

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний
університет

НАУКОВІ НОТАТКИ

Міжвузівський збірник наукових праць
(за галузями знань «Фізико-
математичні науки» та «Технічні науки»)

Випуск 84

Луцьк 2025

Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» | «Naukovi Notatki» є фаховим виданням України, категорії Б.

Збірник зареєстрований Державною реєстраційною службою України (свідоцтво серія КВ, № 15901-4373ПР від 13.11.2019 р.). Збірнику присвоєно міжнародний стандартний серійний номер ISSN 24-15-39-66.

Рік заснування: 1993

Фахова реєстрація у ДАК України: Включено до категорії Б Переліку наукових фахових видань України за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки» за науковими спеціальностями: 105 Прикладна фізика та наноматеріали; 131 Прикладна механіка; 113 Прикладна математика; 132 Матеріалознавство; 133 Галузеве машинобудування, 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – від 24.09.2020 р., Наказ МОН України № 1188

Періодичність – 4 рази на рік

Мова видання: українська, англійська

Засновник: Луцький національний технічний університет,

Україна, Волинська обл., 43018 Луцьк. вул. Львівська 75,

Редакція: тел. (0332) 26-25-19, E-mail: naukovi-notatki@lutsk-ntu.com.ua;
<http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi-notatky>

Видання зареєстровано Національною радою України з питань телебачення і радіомовлення як суб'єкт у сфері друкованих медіа (рішення № 40 від 11.01.2024 р., ідентифікатор медіа **R30-2455**).

Склад редакції затверджено Вченою радою Луцького національного технічного університету (протокол №3 від 30.10. 2024 р.).

**Редакція збірника наукових праць
«Наукові нотатки» / «Naukovi Notatki»**
(Згідно постанови Кабінету Міністрів України
від 30 серпня 2024 р. № 1021 щодо нових галузей та спеціальностей)

Головний редактор:

Рудь Віктор Дмитрович д.т.н., проф., професор кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету (ORCID:0000-0001-5025-9510)

Заступники головного редактора:

Шимчук Сергій Петрович к.т.н., доц., доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету (ORCID:0000-0002-1293-560X);

Мельничук Микола Дмитрович к.т.н., доц., завідувач кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету (ORCID:0000-0001-6813-250X);

Відповідальний секретар:

Клименко Олександр Дмитрович к.т.н., доцент, провідний фахівець бізнес-інноваційного центру Луцького національного технічного університету.
(ORCID:0000-0002-0959-7144).

Редакційна рада

Рудь Віктор Дмитрович, Шимчук Сергій Петрович, Мельничук Микола Дмитрович, Федосов Сергій Анатолійович, Клименко Олександр Дмитрович, Мартинюк Віктор Леонідович

Редакційна колегія:

Галузь знань G: Інженерія, виробництво та будівництво

Спеціальності: G9 – Прикладна механіка;

G11 – Машинобудування

Жигуц Юрій Юрійович д.т.н., проф., завідувач кафедри технології машинобудування Ужгородського національного університету (ORCID:0000-0002-7477-7619);

Пальчевський Богдан Олексійович д.т.н., проф., професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету (ORCID:0000-0002-4000-4992);

Заболотний Олег Васильович к.т.н., доц., доцент кафедри прикладної механіки та мехатроники Луцького національного технічного університету (ORCID:0000-0002-9169-9173);

Мартинюк Віктор Леонідович к.т.н., доц., доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету (ORCID:0000-0002-6914-2336);

Толстушко Микола Миколайович, к.т.н., доц., доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету (ORCID:0000-0001-9230-3831);

Пуць Віталій Степанович к.т.н., доц., завідувач кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету (ORCID:0000-0003-3164-6173);

Самчук Людмила Михайлівна, к.т.н., доц., доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки Луцького національного технічного університету (ORCID:0000-0003-2516-045X);

Ярошевич Микола Павлович, д.т.н., професор кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету (ORCID:0000-0002-2436-5608);

G8 Матеріалознавство.

Ткачук Валентина Віталіївна, д.т.н., проф. професор кафедри товарознавства та експертизи в митній справі Луцького національного технічного університету (ORCID:0000-0001-5793-5227);

Бейгельзімер Ян Юхимович, д.т.н., проф., с.н.с Донецького фізико-технічного інституту ім. О.О.Галкіна, НАН України, Київ (ORCID:0000-0002-1321-8565);

Кашицький Віталій Павлович к.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету (ORCID: 0000-0003-2346-912X);

Садова Оксана Леонідівна, к.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету (ORCID:0000-0002-6152-5447);

Зайчук Наталія Петрівна, к.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету (ORCID:0000-0001-6258-48-20);

Гусачук Дмитро Анатолійович, к.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету (ORCID:0000-0001-5899-1706);

Мисковець Сергій Васильович, к.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету (ORCID: 0000-0002-0439-7063);

Фещук Юрій Петрович, к.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету (ORCID:0000-0001-6259-1916);

Баглюк Генадій Анатолієвич д.т.н., член-корес. НАНУ, директор Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України (ORCID:0000-0002-3305-8896);

Лобода Петро Іванович д.т.н., проф., НТУ "КПІ" ім. І. Сікорського ІМЗ ім. Є.О. Патона, академік НАНУ

Штерн Михайло Борисович, д.т.н., член-корес. НАНУ, завідувач відділу Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України

(ORCID:0000-0002-7757-5721);

Грабар Іван Григорович, д.т.н., професор Житомирського національного агроекологічного університету

(ORCID:0009-0002-7193-6960);

Згалат-Лозинський Остап Броніславович, д.т.н., с.н.с. Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України

(ORCID:0000-0002-7013-5010);

Уманський Олександр Павлович, д.т.н., проф. Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М.Францевича НАН України

(ORCID:0000-0003-3629-7224);

Сергєєв Володимир Володимирович, м.н.с., програміст ТОВ «Хайку Україна»

(ORCID:0009-0009-8665-7006).

Галузь знань Е: Природничі науки, математика та статистика

Е6 Прикладна фізика та наноматеріали

Захарчук Дмитро Андрійович, к. фіз.-мат. н., доцент завідувач кафедри фізики та математики Луцького національного технічного університету

(ORCID:0000-0002-1988-5027);

Луцьов Сергій Валентинович д. ф.-м. н., професор кафедри фізики та математики Луцького національного технічного університету

(ORCID:0000-0003-0737-8703);

Федосов Сергій Анатолійович д. ф.-м. н., професор кафедри фізики та вищої математики Луцького національного технічного університету

(ORCID:0000-0003-3457-8911);

Мікуліч Олена Аркадіївна д.т.н., професор, завідувач кафедри прикладної математики та механіки Луцького національного технічного університету

(ORCID:0000-0003-4522-596X);

Майстренко Анатолій Львович д.т.н., проф., завідувач відділу Комп'ютерного матеріалознавства надтвердих композиційних матеріалів для породоруйнівних інструментів Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України;

Никируй Любомир Іванович, к.ф-м.н., професор Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника (ORCID:0000-0002-3754-0348).

Закордонні члени редколегії:

Рібейро Луїс Фролен д.т.н., проф., професор Політехнічного інституту Браганси (Португалія);

Елісон МакМілан (Alison J Mcmillan), Professor (Full) in Aerospace Technology, Wrexham Glyndwr University, United Kingdom;

Єфременко Василь Георгійович д.т.н., професор Institute of Materials Research of Slovak Academy of Sciences (ORCID: 0000-0003-0438-6433);

Яцек Щот (Jacek Szczot) PhD, голова правління машинобудівного підприємства з виготовлення високоточного обладнання WSK Poznan, Польща;

Стельмах Олександр Устинович д.т.н., професор Пекінського технологічного інституту (ORCID:0000-0002-9132-6334);

Orlov Dmytro, PhD, Professor (Full), Lund University, Sweden;

Halfa Hossam Ahmed Mohamed, Dr., PhD Central Metallurgical R&D Institute (CMRDI), Cairo, Egypt (ORCID: 0000-0002-5063-5026);

Silva João Francisco, Professor Department Materials Science, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal, (ORCID: 0000-0002-9061-2187);

Grabowska Karolina, Associate Professor Deputy Dean of Faculty of Science and Technology Jan Dlugosz University in Czestochowa, Poland; (ORCID: 0000-0002-8323-8094);

Kozub Barbara Associate Professor Deputy Head of the Department of Material Engineering at the Faculty of Materials Engineering and Physics of the Cracow University of Technology, Poland; (ORCID: 0000-0002-5155-1940);

Lin Wei-Ting, Professor Head and Professor, Dept. of Civil Engineering, National Ilan University, Taiwan; (ORCID: 0000-0003-4792-4457);

Turmanidze Lela, Professor Dean of Faculty of Exact Sciences and Education, Batumi Shota Rustaveli State University, Georgia (ORCID: 0000-0002-0721-8454).

ЗМІСТ

Зміст	7
В.В. Банник, Н.Г. Банник, О.С. Кабат вплив агресивних середовищ на корозійну стійкість конструкційних сталей обладнання харчових виробництв.....	11
З.С. Сірко, В.В. Ващенко, М.М. Толстушко, Н.О. Толстушко, С.Ф. Юхимчук Технологічні аспекти створення реєстру державних резервів.....	18
П.Д. Стухляк, О.В. Тотосько, Д.П. Стухляк Автоматизована система моніторингу точності технологічних вимірювань у середовищі інтернету речей	23
Р.Г. Редько, Р.А. Склярів, В.В. Шанайда, В.С. Пуць Роль і місце інтелектуальної власності в машинобудуванні	29
О.С. Гізатуллін Розроблення системи керування дросельною заслінкою на базі Arduino з можливістю інтеграції у систему регулювання паливоподачі.....	33
О. О. Ларін, К. Є. Потопальська, А. О. Зуєв, Н.А. Васильченко Експериментально-чисельне дослідження віброізоляційної платформи з квазінульовою жорсткістю для мобільного ровера.....	41
Д.В. Янюк Структура оцінювання характеристик машин автоматичної подачі пруткових заготовок в токарні верстати.....	49
С.Б. Мікуліч, А.О. Сяський Використання непрямого підходу методу граничних елементів до дослідження динамічного напруженого стану пластинчастих елементів з включеннями.....	57
З.С. Сірко, Т.М. Строкова, М.М. Толстушко, Н.О. Толстушко, Р.І. Черьонкіна Особливості технологічного процесу отримання мікрошпону із деревини бука.....	64
О.А. Мікуліч, Т.В. Фурс, Н.Ю. Семенишин, О.І. Гулай, В.Я. Шемет Вплив силіконової добавки на структуру і механічні властивості пінополіуретанів	68
Т. Божко, О. Залета, Т. Гальчук, Н. Зубовецька, Н. Гулієва Залежність розміру пор від параметрів різального інструменту при механічній обробці спеченого порошкового матеріалу.....	74
Н.М. Струк, Н.О. Філюк, О.В. Заболотний Дослідження технологій переробки сировини природного походження та відходів меблевого виробництва для отримання на їх основі інноваційних матеріалів та екобезпечних виробів для різних галузей промисловості.....	78
З.С. Сірко, Н.Л. Цірень, М.М. Толстушко, Н.О. Толстушко, С.Ф. Юхимчук Вплив параметрів зубів пил на якість розпилювання деревини твердих листяних порід.....	84
Т.С. Ярошевич, С.В. Ягелюк Розробка комплексного показника якості морозива з урахуванням параметрів обладнання для переробки.....	87
В.М. Ходорчук Аналіз пристроїв для розпушування стрічки льону.....	95
Ю. І. Богомол, П. І. Лобода, С. Ю. Тесля, В. М. Надтока, І. О. Гусарова, В. С. Краєва Аналіз процесів термомеханічної сумісності фаз багатошарових покриттів $\text{MoSi}_2\text{-MeB}_2\text{-(Ti, Mo)}$	100
С. Ю. Тесля, О. І. Юркова, Ю. І. Богомол, І. Ю. Троснікова, П. І. Лобода Вплив вмісту вольфарму на закономірності формування мікроструктури та фазового складу порошків сплаву W_xFeCoNi під час механічного легування.....	106
С. О. Наконечний, О. І. Юркова, П. І. Лобода, Ю. І. Богомол, І. Ю. Троснікова Структура високоентропійного ALNiCrTiB сплаву після високошвидкісної електронно-променевої термічної обробки.....	111
І.В. Самоненко Ймовірнісні моделі для аналізу та прогнозування довговічності архітектурних об'єктів.....	119
М.С. Слободян, М.І. Шайнога Розтяг пластини з отвором та радіальною тріщиною, на продовженні якої утворилися пластичні зони з використанням умови пластичності Треска-Сен-Венана.....	125
Л.О. Сапронова, В.В. Торопенко Дослідження структури епоксидних композитів методом оптичної мікроскопії та ІЧ-спектрального аналізу.....	131
І.В. Говоруха, О.О. Ларін, І.В. Полівенок, К.Є. Потопальська, Н.О. Фоменко Скінченно-елементне моделювання статичного деформованого стану атеросклеротичних судин на основі даних ОСТ зображень.....	137
О. І. Венгринюк, О. І. Звірко Обґрунтування критерію граничного стану сталей газопроводів за їх перепрофілювання для водню.....	145
М.Л. Рябчиков, О.Л. Ткачук, Т.М. Головенко Побудова бренду модного одягу на принципах сталого розвитку.....	151
В.Г. Михайлик, М.В. Шаповал, А.І. Криворот Визначення об'єму ємності комбінованого компенсатора за роботою акумулювання розчину однопоршневого гідроприводного розчинонасоса.....	158
Р. Пастернак Перевірка сумісності принципів спеціальної теорії відносності.....	166
О.А. Урбан, С.А. Федосов, Л.В. Яциньський Окремі аспекти теорії відпаду дефектів в опромінених кристалах CdSb	173
О. Ягелюк Функціональна роль подільників під час збору полеглого льону.....	177

Л. Ю. Федік, Ю. В. Федорусь Автоматизоване проєктування електричних систем у харчовій промисловості: SolidWorks Electrical, EPLAN Electric P8 та AutoCAD Electrical.....	185
П.О. Коробко, А.В. Кузьмов, М.Б. Штерн Моделювання пластичної поведінки пористого матеріалу зі структурою інверсного опалу при великих деформаціях.....	192
І.М. Дударев, А.В. Хомич Перспективи передзбирального моніторингу посівів льону з використанням безпілотних літальних апаратів.....	198
Е.Л. Селезньов, Д.Е. Селезньов, В.С. Матвійчук Результати дослідження математичної моделі аксіально-поршневої гідромашини з дефектом в поршневій частині.....	205
Р.Є. Костюнік, О.О. Мікосянчик, С.П. Шимчук, О.Г. Ковальчук, О.В. Кущев Розробка багатоетапної інноваційної технології комбінованого очищення мініатюрних та прецизійних шарикопідшипників.....	208
І.В. Самоненко Статистичний аналіз впливу архітектурного дизайну на психологічний стан користувачів.....	213
Ю. С. Крутий, М. Г. Сур'янінов, А. О. Перпері, В. В. Вакуленко, В. М. Мітінський Аналітичний метод розрахунку на згин балок змінної жорсткості на неоднорідній пружній основі.....	218
С.П. Середюк, В.В. Чудов Закономірності формування ріжучого тиску на вісі струменя асистуючого газу при газолазерному різанні.....	233
Н. Полівода, М. Мельничук, І. Шевчук, Я. Бабич, В. Рудь Вплив складу метаколінів на властивості геополімерних композитів на термоперлітній основі.....	241
О. Садова, В. Кашицький, Д. Гусачук, М. Вишинський, Є. Чернота Дослідження механічних властивостей та структури біокомпозитів, наповнених кавовою гущею.....	249
В.Л. Закревський, О.С. Приходько Розробка адаптивного методу керування БПЛА на основі глибокого навчання з підкріпленням та доменної рандомізації.....	257
В.О. Шейченко, Д.О. Петраченко, Д.В. Шейченко Визначення впливу конструкції закритого робочого колеса на ефективність обрешування насіння промислових конопель.....	263
Н.Р. Печончик, О.С. Приходько Порівняльний аналіз моделей машинного навчання для прогнозування міцності бетону.....	271
Ю.Ю. Жигуц, В.Д. Рудь, І.М. Шкирта, Сташук М.Г. Формування моделі визначення напружень в металевих конструкціях під впливом концентрації водню.....	277
А. П. Павлюк, Зятюк Ю.Ю., Супрунук В.В., Скрипник М.М., Р.В. Пасічник, С.В. Ротко Дослідження дефектів і пошкоджень дерев'яних ферм.....	282
Н.Ю. Імбірович, Ю.В. Шишко, В.В. Ткачук, І.В. Боярська Режим синтезу конверсійних плазмоелектролітних покриттів на цирконієвій основі та їх корозійні властивості.....	289
А. В. Букетов, В. Ю. Стрельченко, О. В. Тотосько, В. В. Соценко, Д. В. Житник, О. М. Безбах, Е. С. Анпазов Дослідження механічних властивостей і теплостійкості пластифікованих епоксикомпозитів з мікродобавками.....	295

CONTENTS

Contents	8
V.V. Bannyk, N.G. Bannyk, O.S. Kabat Research on the corrosion resistance of structural steels in food environments.....	11
Z. Sirko, V. Vashchenko, M. Tolstushko, N. Tolstushko, S. Yukhymchuk Technological aspects of creating a register of state reserves.....	18
P.D. Stukhliak, O.V. Totosko, D.P. Stukhliak Automated system for monitoring the accuracy of technological measurements in the iot environment	23
Р.Г. Редько, Р.А. Склярів, В.В. Шанайда, В.С. Пуць Ноль і місце інтелектуальної власності в машинобудуванні.....	29
O.S. Hizzatullin Development of a throttle control system based on Arduino with the possibility of integration into the fuel supply regulation system.....	33
O. O. Larin, K. E. Potopalska, A. O. Zuev, N.A. Vasylchenko Experimental and numerical study of a quasi-zero stiffness vibration isolation platform for a mobile rover.....	41
D.V. Yaniuk Structure for evaluating the characteristics of machines for automatic feeding of bar blanks in a lathe.....	49
S.B. Mikulich, A.O. Syaskyi Use of the indirect approach of the boundary element method to the study of the dynamic stress state of plate elements with inclusions.....	57
Z. Sirko, T. Strokova, M. Tolstushko, N. Tolstushko, R. Cheryopkina Features of the technological process of obtaining microwaves from beech wood.....	64
O.A. Mikulich, T.V. Furs, N. Yu. Semenyshyn, O.I. Hulai, V.Ya. Shemet influence of silicone additives on structure and mechanical properties of polyurethane foam.....	68
T. Bozhko, O. Zaleta, T. Halchuk, N. Zubovetska, N. Huliieva Dependence of pore size on cutting tool parameters during machining of sintered powder material.....	74
N.M. Struk, N.O. Filiuk, O. V. Zabolotnyi Processing technologies investigation of natural raw materials and furniture production waste for producing innovative materials and eco-friendly products for various industries.....	78
Z. Sirko, N. Tsiren, M. Tolstushko, N. Tolstushko, S. Yukhymchuk Influence of the parameters of the saw teeth on the quality of spraying of hard-broad wood	84
T. Yaroshevych, S. Yaheliuk Development of a comprehensive quality indicator for ice cream with consideration of processing equipment parameters.....	87
V.Khodorchuk Analysis of flax ribbon loosening devices.....	95
Iu. Bogomol, P. Loboda, S. Teslia, V. Nadtoka, I. Husarova, V. Kraieva Analysis of thermomechanical compatibility of phases in multilayer $\text{MoSi}_2\text{--MeB}_2\text{--(Ti, Mo)}$ coatings.....	100
S. Teslia, O. Yurkova, Iu. Bogomol, I. Trosnikova, P Loboda Influence of tungsten content on the regularities of microstructure and phase formation in W_xFeCoNi alloy powders during mechanical alloying.....	106
S. O. Nakonechnyi, O. I. Yurkova, P. I. Loboda, Y. I. Bogomol, I. Y. Trosnikova Structure of high-entropy AlNiCrTiB alloy after high-speed electron-beam heat treatment.....	111
I. V. Samonenko Probabilistic models for the analysis and prediction of the durability of architectural structures.....	119
M.S. Slobodian, M.I. Shaynoga Stretching of a plate with a hole and a radial crack, the continuation of which formed plastic zones using Tresca-Saint-Venant plasticity condition.....	125
L.O. Sapronova, V.V. Toropenko Rsearch of the structure of epoxy composites by optical microscopy and IR-spectral analysis.....	131
I.V. Hovorukha, O.O. Larin, I. V. Polivenok, K. Ie. Potopalska, N.O. Fomenko FE simulations of the static deformed state of atherosclerotic vessels based on OCT image data.....	137
O. I. Venhryniuk, O. I. Zvirko Substitution of the limit state criterium of gas pipeline steel during their reprofiling for hydrogen	145
M.L. Riabchykov, O.L. Tkachuk, T.M. Holovenko Building a fashion brand based on sustainable development principles.....	151
V.G. Mykhailik, M.V. Shapoval, A.I. Kryvorot Determination of the capacity of a combined compensator by the operation of the solution accumulation of a single-piston hydraulic mortar pump....	158
R. Pasternak Checking the compatibility of the principles of the special theory of relativity.....	166
O. Urban, S. Fedosov, L. Yashchynskyy Some aspects of the theory of defect annealing in irradiated CdSb crystals.....	173
O. Yaheliuk Functional role of dividers in harvesting lodged flax.....	177
L. Fedik, Yu. Fedorus Automated design of electrical systems in the food industry: SolidWorks Electrical, EPLAN Electric P8 and AutoCad Electrical.....	185
P. Korobko, A. Kuzmov, M. Shtern Modeling the plastic behavior of a porous material with an inverse opal structure at large deformation.....	191

I.M. Dudarev, A.V. Khomych Prospects of pre-harvest monitoring of flax crops using unmanned aerial vehicles.....	198
E.L. Seleznev, D.E. Seleznev, V.S. Matviichuk Results of research on the mathematical model of an axial-piston hydraulic machine with a defect in the piston part.....	205
R.E. Kostyunik, O.O. Mikosyanchyk, S.P. Shymchuk, O.G. Kovalchuk, O.V. Kushchev Development of a multi-stage innovative technology for combined cleaning of miniature and precision ball bearings.....	208
I. V. Samonenko Statistical analysis of the impact of architectural design on users' psychological state.....	213
Yu. S. Krutii, M. H. Surianinov, A. O. Perperi, V. V. Vakulenko, V. M. Mytynskyi Analytical method for calculating bending of beams of variable stiffness on a non-uniform elastic foundation.....	218
S.P. Serebyuk, V.V. Chudov Regularities of forming cutting pressure on the axis of the assisting gas jet during gas laser cutting.....	233
N. Polivoda, M. Melnychuk, I. Shevchuk, Y. Babych, V. Rud The influence of metakaolin composition on the properties of thermopelrite-based geopolymer composites.....	241
O. Sadova, V. Kashytskyi, D. Husachuk, M. Vyshynskyi, Ye. Chernota Study of mechanical properties and structure of biocomposites filled with coffee grounds.....	249
V.L. Zakrevskyi, O.S. Prykhodko Development of an adaptive UAV control method based on deep reinforcement learning and domain randomization.....	257
V. Sheichenko, D. Petrachenko, D. Sheichenko Determination of the impact of closed-type impeller design on the efficiency of industrial hemp seed shelling.....	263
N.R. Pechonchyk, O.S. Prykhodko Comparative analysis of machine learning models for predicting concrete compressive strength.....	271
Yu.Yu. Zhiguts, V.D. Rudj, I.M. Shkirta, Stashchuk M.G. Formation of a model for determining stresses in metal structures under the influence of hydrogen concentration.....	277
A.P. Pavluk, Y.Y. Ziatyuk, V.V. Supruniuk, M.M. Skrypnyk, R.V. Pasichnyk, S.V. Rotko Investigation of defects and damage in timber trusses.....	283
N.Yu. Imbirovych, Yu. V. Shyshko, V.V. Tkachuk, I. V. Boiarska Synthesis modes of conversion plasma-electrolytic coatings on zirconium basis and their corrosion properties.....	289
A. V. Buketov, V. Yu. Strelchenko, O. V. Totosko, V. V. Sotsenko, D. V. Zhytnyk, O. M. Bezbakh, E. S. Appazov Research on the mechanical properties and heat resistance of plasticized epoxy composites with microadditionals.....	295

В.В. Банник, Н.Г. Банник, О.С. Кабат

Український державний університет науки і технологій

**ВПЛИВ АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩ НА КОРОЗІЙНУ СТІЙКІСТЬ
КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ**

Метою даної роботи є дослідження корозійної стійкості конструкційних матеріалів (Ст3, 08Х13, 12Х18Н10Т) у модельних розчинах (3% NaCl, 3% лимонної кислоти, дистильована вода), визначення впливу складу конструкційного матеріалу на швидкість корозії.

На основі проведеного експерименту можна рекомендувати використання неіржавіючих сталей (08Х13, 12Х18Н10Т) для виготовлення обладнання, що контактує з харчовими середовищами.

Ключові слова: корозія неіржавіючих сталей, корозійна стійкість, агресивне середовище, швидкість корозії.

V.V. Bannyk, N.G. Bannyk, O.S. Kabat

**RESEARCH ON THE CORROSION RESISTANCE OF STRUCTURAL STEELS IN
FOOD ENVIRONMENTS**

The purpose of this work is to study the corrosion resistance of structural materials (St3, 08X13, 12X18H10T) in model solutions (3% NaCl, 3% citric acid, distilled water), to determine the effect of the composition of the structural material on the corrosion rate. It is shown that the presence of d-metals (Ni, Cr, etc.) in the composition of steel significantly reduces the amount of corrosion products formed during long-term (7 days) contact of samples with 3% NaCl. In a solution of citric acid and distilled water, samples 08X13, 12X18H10T showed an insignificant rate of corrosion, which characterizes these materials as highly resistant. Corrosion products formed when structural materials come into contact with solutions can dissolve in citric acid solution (clear solutions). In a solution of 3% NaCl and distilled water, insoluble corrosion products are formed.

Based on the experiment, it is possible to recommend the use of stainless steels (08X13, 12X18H10T) for the manufacture of equipment in contact with food environments.

Key words: corrosion of stainless steels, corrosion resistance, aggressive environment, corrosion rate.

Постановка проблеми. Боротьба з корозією – одне з важливих завдань сучасної техніки. Корозія металів – складний процес, який призводить до значних збитків у всіх галузях виробництва і завдає шкоди навколишньому середовищу. При виборі конструкційного матеріалу важливо враховувати всі можливі види корозійних руйнувань: загальну або рівномірну корозію, локальну корозію, корозію під напругою, міжкристалічну корозію, гальванічну корозію, корозійну ерозію та біологічну корозію. Обираючи конструкційний матеріал необхідно знайти баланс між економічною складовою та оптимальною стійкістю до корозії. Обов'язково слід враховувати специфіку агресивного середовища, що контактуватиме з обладнанням при його експлуатації [1].

Особливо гостро постає питання надійного вибору конструкційних матеріалів для обладнання в харчовій і фармацевтичній промисловості [2, 3]. Корозійна стійкість матеріалів для цих промисловостей є вирішальною, оскільки харчові продукти та ліки повинні відповідати високим стандартам чистоти та якості [4].

Неіржавіючі сталі вважаються найкращим конструкційним матеріалом для виготовлення обладнання харчових виробництв. Ці сталі були створені щоб подолати явище корозії. Вони зазвичай містять від 9 до 30 відсотків хрому та різні кількості нікелю, молібдену, міді, сірки, титан, ніобій тощо можуть бути додані для отримання бажаних механічних властивостей і терміну служби [5]. Нержавіючі сталі є стійкими до корозії, але за певних умов матеріали можуть проявляти схильність до різних видів корозійних руйнувань, тому дослідження їх поведінки в контакті з компонентами харчових середовищ є актуальним. Корозія харчового обладнання є критичним фактором при виборі конструкційного матеріалу, а також впливає на довговічність обладнання. Тому розуміння факторів, що впливають на корозію важливо ще на стадії проектування обладнання. Без врахування хімічного складу харчових середовищ, неможливо правильно обрати конструкційний матеріал. В результаті корозійного руйнування таке обладнання вийде з ладу, а харчова продукція буде непридатною для споживання [6].

Сталі марок Ст. 3 та Сталь 20 знайшли широке застосування для виготовлення трубопроводів аміачних та фреонових холодильних машин великої і середньої продуктивності, однак термін служби обладнання до появи наскрізних руйнувань під дією холодильної ропи коливається в межах 0,5–3 роки. Застосування у харчовій промисловості нержавіючих сталей типу 12Х18Н9Т часто не дає нам бажаних результатів, тому що вони піддаються корозійному розтріскуванню [7].

Авторами [8] встановлена підвищена корозійна стійкість неіржавіючої сталі у порівнянні з оцинкованою сталлю. Використання оцинкованої сталі для обладнання для обробки харчових

© В.В. Банник, Н.Г. Банник, О.С. Кабат

продуктів не є вигідним з корозійної та економічної точки зору. Було встановлено, що найагресивнішим середовищем була м'якоть бобів та м'якоть томатів.

Незважаючи на те, що неіржавіючі сталі широко використовуються у якості конструкційного матеріалу обладнання харчових виробництв, за певних умов, в результаті взаємодії з компонентами харчових середовищ, на її поверхні можуть утворюватися продукти корозії.

Постановка завдань. Метою роботи було дослідження швидкості корозії конструкційних сталей (Ст3, 08Х13, 12Х18Н10Т) у модельних розчинах (3% NaCl, 3% лимонної кислоти, дистильована вода), визначення впливу складу конструкційного матеріалу на швидкість корозії.

Наукова частина включає встановлення закономірностей взаємодії харчових середовищ з конструкційними сталями та виявлення можливих обмежень застосування конструкційних матеріалів. Це дасть змогу ще на етапі проектування обладнання, обираючи конструкційний матеріал, знайти баланс між економічною складовою та оптимальною стійкістю до корозії.

Викладення основного матеріалу. Об'єктом дослідження є зразки сталей для випробування: Ст3, 08Х13, 12Х18Н10Т. Зразки розміром 10х10 мм поперед корозійними випробуваннями механічно очищували та знежирювали.

Хімічний склад досліджуваних сталей наведено в таблиці 1.

Табл. 1

Хімічний склад досліджуваних сталей

Марка сталі	Хімічний склад, %								ДСТУ
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Fe	
Ст3	0,14–0,22	–	0,30–0,60	–	не більше ніж 0,05	–	–	Решта	ДСТУ 2651:2005
08Х13	≤0.08	≤0.8	≤0.8	≤0.6	≤ 0.025	≤0.03	12-14	Решта	ГОСТ 5632-72
12Х18Н10Т	≤0.12	≤0.8	≤2.0	9.00-11.00	≤0.02	≤0.04	17.0-19.0	Решта	ГОСТ 5632-72

Основним середовищем більшості харчових виробництв є вода. Для визначення швидкості корозії були вибрані наступні розчини: 3% NaCl, 3% лимонної кислоти, дистильована вода. Зразки витримували у середовищах протягом 7 діб при кімнатній температурі 20°C.

Швидкість корозії металів визначали гравіметричним методом.

Масовий (ваговий) показник корозії, що характеризує втрати металу визначали за формулою, г/(м²·год) [9]:

$$K_M = \frac{m_0 - m_1}{S \cdot \tau},$$

де m_0 і m_1 – маса зразку, що кородує, відповідно до та після корозії, г;

S – площа поверхні зразку, м²;

τ – тривалість дослід, години.

Глибинний показник корозії, характеризує зміну товщини зразку δ за одиницю часу при суцільній корозії, мм/рік:

$$П = \frac{\delta}{\tau};$$

Між показниками K_M і $П$ є співвідношення

$$П = \frac{24 \cdot 365 \cdot K_M}{1000 \cdot \rho} = 8.76 \frac{K_M}{\rho},$$

де ρ – густина металу, г/см³.

Бал стійкості визначали по величині глибинного показника корозії.

Корозія – процес фізико-хімічної взаємодії між металом і середовищем, який відбувається мимовільно та призводить до зміни властивостей металу та середовища. Тому зміна зовнішнього вигляду середовища дозволяє оцінити масштаби корозійних руйнувань конструкційного матеріалу.

На рисунку 1 зображено фото пробірок з розчинами 3% NaCl в які занурені зразки. Розчини прозорі та незабарвлені.

Найбільше продуктів корозії накопичилось у розчині, що контактував з Ст3 (Рис.2А). Зміни кольору розчину зі зразком сталі 12Х18Н10Т не відбулось (Рис.2В).

Зразки сталей, які витримані в контакт з 3% NaCl наведені на рис.3. Кількість продуктів корозії, що утворились на поверхні зразка Ст3 є найбільшою (Рис 3А). Незначна кількість продуктів

корозії, що утворилась на поверхні зразка 08X13 дещо змістилась вниз під дією сили тяжіння (Рис.3Б).

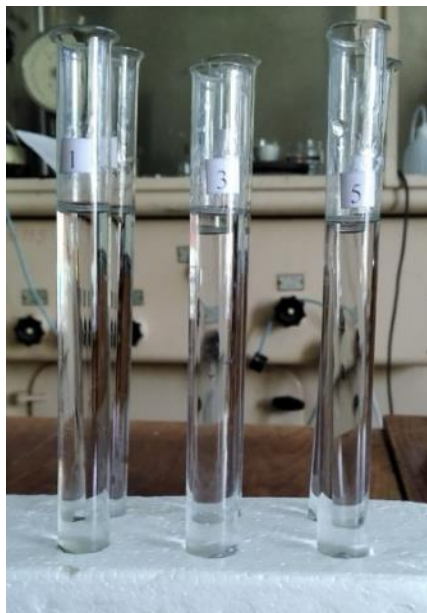


Рис. 1. Вихідний розчин 3% NaCl одразу після занурення в нього зразків сталей.

Через 7 днів (Рис.2) спостерігались значні зміни кольору розчину.

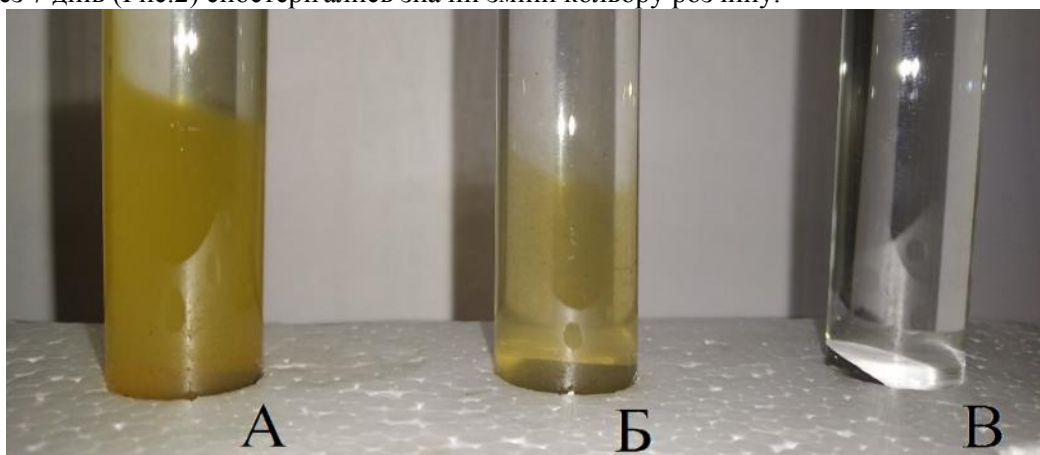


Рис. 2. Зміна розчину 3% NaCl після 7 діб контакту з сталями. А – Ст3, Б – 08X13, В – 12X18H10T.

Практично не відбулось утворення продуктів корозії на зразках 12X18H10T (рис.3В).

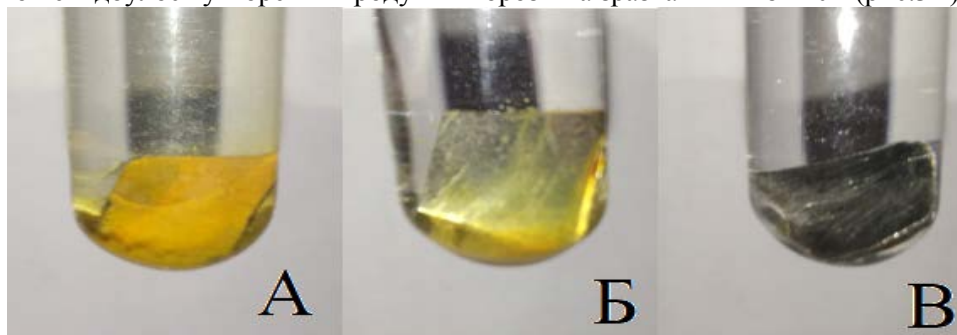


Рис. 3. Зразки сталей після витримки 7 діб у 3% NaCl. А – Ст3, Б – 08X13, В – 12X18H10T

Результати розрахунків показників корозії досліджуваних статей в 3% розчині NaCl методом гравіметричного аналізу наведено в таблиці 2.

Як видно з таблиці, швидкість корозії Ст3 найбільша. Майже в 2 рази нижче глибинний показник корозії для 08X13. Практично відсутня корозія для зразка 12X18H10T.

Найкращі результати показала неіржавіюча сталь 12X18H10T, яка в 3% NaCl кородувала зі швидкістю менше 0,001 мм/рік, що відповідає I групі корозійної стійкості (бал корозійної стійкості

© В.В. Банник, Н.Г. Банник, О.С. Кабат

1) – повністю стійкий. Зразки Ст3 та 08Х13 показали швидкість корозії в діапазоні 0,01-0,05, що відповідає 4 балу стійкості та характеристики стійкості – стійкий. Незважаючи на однаковий бал стійкості, зразки 08Х13 мали у 2 рази менший глибинний показник швидкості корозії.

Табл. 2

Визначення швидкості корозії сталей в 3% NaCl

Матеріал	Km, г/м ² ·год	П, мм/рік	Бал стійкості	Характеристика стійкості
Ст3	0,02691	0,02983	4	Стійкий
08Х13	0,01214	0,01347	4	Стійкий
12Х18Н10Т	0,00066	0,00073	1	Повністю стійкий

Пояснити вищу стійкість 12Х18Н10Т до корозії в 3% NaCl можна тим, що її пасивність обумовлена наявністю міцної пасивної плівки на поверхні металу через наявність у при поверхневому шарі іонів d-металів (Ni, Cr, та ін.). При цьому хлорид-аніони мало впливають на її стабільність, у той час, коли іони жорсткості сприяють її зміцненню [10].

Лимонна кислота часто використовується в харчовій, фармацевтичній та хімічній промисловості. Її розчини можуть бути агресивними до сталей, особливо якщо концентрація кислоти та температура середовища підвищені. Корозія сталей у розчинах лимонної кислоти залежить від типу сталі, умов експлуатації, а також характеристик самого розчину, таких як рН, температура та наявність домішок.

Дослід було проведено і в 3% розчині лимонної кислоти. В результаті експерименту зміна кольору спостерігалась в розчині зі зразком Ст3 (рис.4А). Сталі марок 08Х13 та 12Х18Н10Т не викликали суттєвих змін розчину лимонної кислоти (рис.4Б та 4В відповідно).

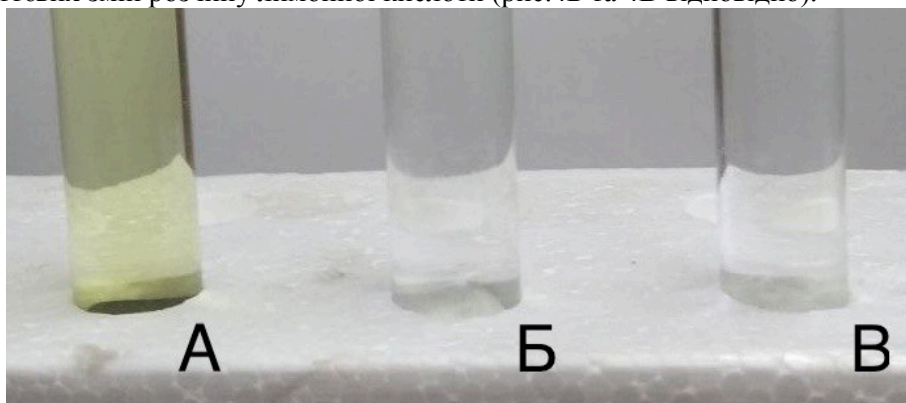


Рис. 4. Зміна розчину 3% лимонної кислоти після 7 діб контакту з сталями. А – Ст3, Б – 08Х13, В – 12Х18Н10Т

Як видно з рисунку 5, найбільше корозії піддається Ст3, за рахунок чого й змінюється колір розчину. При цьому зразки сталей 08Х13 та 12Х18Н10Т не втратили металевого блиску після контакту з розчином лимонної кислоти протягом 7 діб (Рис.5Б та 5В). Для зразка Ст3 характерна втрата металевого блиску.

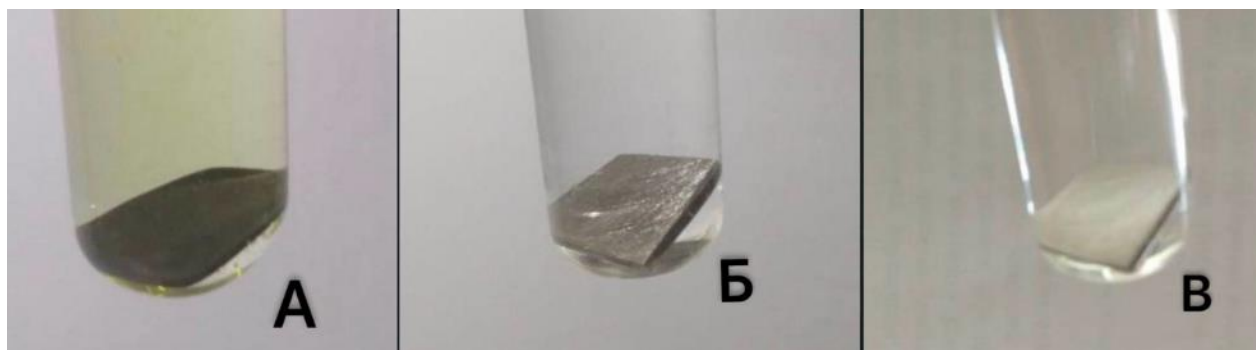


Рис. 5. Зразки сталей після витримки 7 діб у 3% лимонної кислоти. А – Ст3, Б – 08Х13, В – 12Х18Н10Т

Результати розрахунків показників корозії досліджуваних статей в 3% розчині 3% лимонної кислоти методом гравіметричного аналізу наведено в таблиці 2.

Табл. 2

Визначення швидкості корозії сталей в 3% розчині лимонної кислоти

Матеріал	Km, г/м ² ·год	П, мм/рік	Бал стійкості	Характеристика стійкості
Ст3	0,87519	0,97046	7	Понижено стійкий
08X13	0,00295	0,00327	2	Підвищено стійкий
12X18H10T	0,00715	0,00792	4	Стійкий

Як видно з таблиці, швидкість корозії Ст3 найбільша. Неіржавіюча сталь 08X13 володіє підвищеною стійкістю в розчині лимонної кислоти, бал стійкості дорівнює 2. Сталь марки 12X18H10T в даному середовищі є стійкою. Бал стійкості 4. Підвищена стійкість зразків неіржавіючих сталей в 3% розчині лимонної кислоти може бути пов'язана утворенням пасивної плівки на поверхні сталі. Встановлено [11], що в присутності розчину лимонної кислоти на поверхні утворюється більш якісна пасивна плівка на поверхні аустенітної нержавіючої сталі. Зазначається можливість використання лимонної кислоти як інгібітора корозії алюмінію [12], що також характеризується можливістю переходу до пасивного стану за рахунок формування на поверхні пасивної захисної плівки.

При контакті дистильованої води з конструкційними сталями зафіксовано зміни агресивного середовища – найбільше продуктів корозії утворилось при контакті зі зразками Ст3 (рис. 6А). На що вказує зміна забарвлення розчину. Менш насичена продуктами корозії дистильована вода після контакту зі зразками 08X13 (Рис. 6Б). Зміни кольору дистильованої води не відбувалось при контакті зі зразками марки 12X18H10T (Рис.6В).

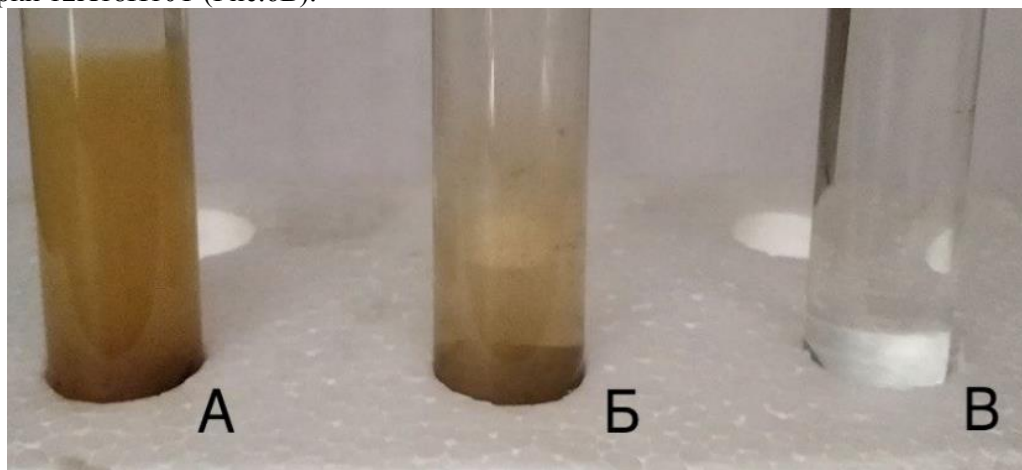


Рис. 6. Зміна розчину дистильованої води після 7 діб контакту з сталями. А – Ст3, Б – 08X13, В – 12X18H10T

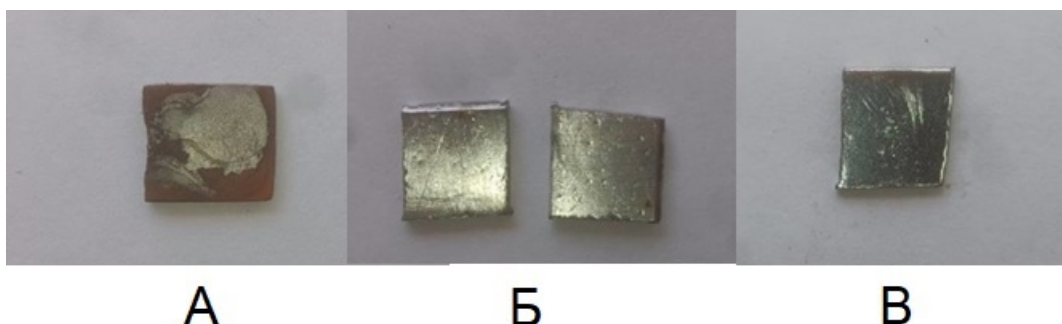


Рис. 7. Зразки сталей після витримки 7 діб у Н2О. А – Ст3, Б – 08X13, В – 12X18H10T

На поверхні зразків сталі Ст3 після контакту з дистильованою водою спостерігались продукти корозії (Рис. 7А). Зі зразками сталей марок 08X13 та 12X18H10T суттєвих змін не відбувалось (Рис.7Б та 7В). Отримані результати добре узгоджується з результатами гравіметричного методу дослідження швидкості корозії (Табл.3).

Як видно з таблиці 3 зразки марок 08X13 та 12X18H10T характеризуються підвищеною стійкістю та мають бал стійкості 2. Зразки Ст3 мають значно вищий глибинний показник швидкості корозії та є стійкими в дистильованій воді.

Визначення швидкості корозії сталей в дистильованій воді

Матеріал	Km, г/м ² ·год	П, мм/рік	Бал стійкості	Характеристика стійкості
Ст3	0,03901	0,04326	4	Стійкий
08X13	0,00244	0,002707	2	Підвищена стійкість
12X18H10T	0,00444	0,00493	2	Підвищена стійкість

Висновки

В роботі досліджено швидкості корозії конструкційних сталей (Ст3, 08X13, 12X18H10T) у модельних розчинах (3% NaCl, 3% лимонної кислоти, дистильована вода). Встановлено масовий та глибинний показники швидкості корозії даних матеріалів, а також бал стійкості. Встановлено, що корозійна активність агресивного середовища залежить від складу конструкційного матеріалу.

Встановлення закономірностей взаємодії харчових середовищ з конструкційними сталями дозволяє виявити можливі обмеження застосування конструкційних матеріалів.

Об'єктом дослідження є корозійні процеси, що відбуваються під час взаємодії конструкційних матеріалів з агресивними середовищами харчових виробництв. Метою даної роботи є дослідження корозійної стійкості конструкційних матеріалів (Ст3, 08X13, 12X18H10T) у модельних розчинах (3% NaCl, 3% лимонної кислоти, дистильована вода), визначення впливу складу конструкційного матеріалу на швидкість корозії.

Встановлено, що наявність d-металів (Ni, Cr, та ін.) у складі сталі значно зменшують кількість продуктів корозії, що утворюються при тривалому (7 діб) контакті зразків з 3% NaCl. В розчині лимонної кислоти та дистильованій воді зразки 08X13, 12X18H10T проявили незначну швидкість корозії, що характеризує ці матеріали як підвищено стійкі. Продукти корозії, що утворюються при контакті конструкційних матеріалів з розчинами, можуть розчинятись в розчині лимонної кислоти (прозорі розчини). В розчині 3% NaCl та дистильованій воді утворюють нерозчинні продукти корозії (в розчині та на поверхні зразка спостерігався осад).

На основі проведеного експерименту можна рекомендувати використання неіржавіючих сталей (08X13, 12X18H10T) для виготовлення обладнання, що контактує з харчовими середовищами.

Список використаних джерел:

1. Jeffrey Ken B. Balangao. Corrosion of Metals: Factors, Types and Prevention Strategies // Journal of Chemical Health Risks. – 2024. – 14(1). – С. 79-87.
2. Сиза, О.І., Савченко О.М., Квашук, Ю.В., Корольов О.О. Вплив продуктів перероблення рослинної сировини на корозійно-електрохімічну поведінку сталі в харчових виробництвах // Вопросы химии и химической технологии. – 2011. – №4(2). – С. 179-182.
3. Stefano Rossi, Sergio Maria Leso and Massimo Calovi. (2024). Study of the corrosion behavior of stainless steel in food industry // Materials. 2024. – 17(7). – 1617. <https://doi.org/10.3390/ma17071617>
4. Янь Лі Лі, Сон Сян, Хун Тао Цзен, Цзян Пін Ван, Куан Дін Ван. Корозійна поведінка нержавіючої сталі 304L і 316L у розчинах харчової фосфорної кислоти // Прикладна механіка та матеріалознавство. – 2011. – Т.109. – С. 28-31. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.109.28>
5. Dewangan AK, Patel AD, Bhadania AG. Stainless Steel for Dairy and Food Industry: A Review // Journal of Material Sciences & Engineering. – 2015. – 4. – 191. DOI: 10.4172/2169-0022.1000191
6. Ronald H. Schmidt, Daniel J. Erickson, Steven Sims, Philip Wolff. Characteristics of Food Contact Surface Materials: Stainless Steel // Food Protection Trends. – 2012. – Vol. 32, No. 10. – P. 574–584.
7. Сухенко В., Авдєєва Л., Осипенкова І., Куриленко Ю. Захист розсільних систем харчових підприємств із застосуванням екологічних інгібіторів корозії // Інновації та технології в сфері послуг і харчування. – 2022. – № 2 (6). – С. 44-50. : [https://doi.org/10.32782/2708-4949.2\(6\).2022.8](https://doi.org/10.32782/2708-4949.2(6).2022.8)
8. Stanley Udochukwu Ofoegbu; Pearl Ugochi Ofoegbu; Simeon I. Neife; Boniface A, Okorie (2011) Corrosion behaviour of steels in nigerian food processing environments // J. Appl. Sci. Environ. Manage. March. – 2011. – Vol. 15 (1). – 135 – 139.
9. Гречанюк І.М., Гречанюк В.Г. Корозійна та ерозійна стійкість конденсованих з парової фази композиційних матеріалів на основі міді й молібдену // Сучасна електроталургія. – 2020. – № 1. – С.32-38. <https://doi.org/10.37434/sem2020.01.04>

10. Тамазашвілі А.Т., Мазна Ю. І., Малихіна К.А., Гомеля М. Д. (2013) Оцінка впливу фізико-хімічних факторів на корозійну активність води. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – №5/6(65). – С. 15-19.

11. Suwarno* and Handi Muhtadi (2020) The Effect of Citric Acid Concentration on Corrosion Behavior of Austenitic Stainless Steel 316 L // Key Engineering Materials. – 2020. – Vol. 867. – P.224-228.

12. Дорошенко Т. Ф., Скрипник Ю. Г., Горбань О. О. Перспективність створення ефективних інгібіторів корозії на основі рослинної сировини // Фізико-органічна хімія, фармакологія та фармацевтична технологія біологічно активних речовин: збірник наукових праць / за заг. ред. А. Ф. Попова. – Київ:КНУТД, 2021. –Вип. 3. – С. 45-57.

Рецензент: Алієв Ельчин Бахтияр огли, професор кафедри інжинірингу технічних систем Дніпровського державного аграрно-економічного університету, доктор технічних наук, старший дослідник.

З.С. Сірко¹, В.В. Ващенко¹, М.М. Толстушко², Н.О. Толстушко², С.Ф. Юхимчук²*Український державний науково-дослідний інститут "Ресурс"¹
Луцький національний технічний університет²***ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ РЕЄСТРУ ДЕРЖАВНИХ РЕЗЕРВІВ**

У статті озвучені проблеми створення та функціонування автоматизованої системи реєстру у сфері державних резервів. Зокрема акцентується увага на тому, що ведення оперативного, управлінського та бухгалтерського обліку у паперовій формі значно уповільнює процес управління запасами матеріальних цінностей, підвищує ризики отримання недостовірної інформації та ускладнює контроль за зберіганням матеріальних цінностей. Створення наукових засад захищеної автоматизованої системи дозволить значно підвищити ефективність управління запасами матеріальних цінностей.

Ключові слова: автоматизована система, облік, матеріальні цінності, ефективність управління, заходи безпеки інформації.

Z. Sirko, V. Vashchenko, M. Tolstushko, N. Tolstushko, S. Yukhymchuk**TECHNOLOGICAL ASPECTS OF CREATING A REGISTER OF STATE RESERVES**

The article discusses the problems of creation and functioning of an automated register system in the field of state reserves. Particular attention is paid to the fact that keeping operational, administrative and accounting records in paper form significantly slows down the process of managing the reserves, increases the risk of receiving inaccurate information and complicates the control over the storage of material assets. The creation of the scientific basis for the secure automated system will significantly increase the efficiency of inventory management.

Keywords: automated system, accounting, physical assets, management efficiency, information security measures.

Постановка проблеми. Аналіз функціонування системи державного резерву, виклики, які постали перед Україною продовж останніх років і, особливо початок широкомасштабної агресії російської федерації, дають підставу стверджувати, що діючі засади функціонування державного резерву, у тому числі мобілізаційного, порядок його формування ґрунтуються на застарілих принципах без застосування визначеної стратегії розвитку та не враховують сучасні зміни у формуванні та використанні державних резервів.

Ведення оперативного та бухгалтерського обліку у паперовій формі значно уповільнює процес управління запасами матеріальних цінностей, підвищує ризики отримання недостовірної інформації та ускладнює контроль за зберіганням матеріальних цінностей, що вкрай негативно позначається на стані запасів та функціонуванні всієї системи державного резерву.

Створення наукових засад захищеної автоматизованої системи реєстру матеріальних цінностей, яка буде відстежувати стан резервів на кожному етапі: закладенні, поповненні, зберіганні, переміщенні, освіженні, тощо дозволить значно підвищити ефективність управління запасами матеріальних цінностей, забезпечити достовірність звітності про наявність та рух запасів, їх кількісного та якісного стану.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У Законі України «Про державні резерви» [1] зазначається, що державний матеріальний резерв – це запас матеріальних цінностей, який складається із запасів сировинних, у тому числі паливно-енергетичних та матеріально-технічних ресурсів, промислових і продовольчих товарів, критично важливих лікарських засобів та медичних виробів, призначених для використання у мирний час, а також в особливий період.

Процес зберігання державних резервів – це динамічний у часі процес, за якого відбувається закладення матеріальних цінностей, їх зберігання з дотриманням відповідних умов, відпуск, поповнення, освіження, переміщення та переробка матеріальних цінностей, їх поставка та реалізація.

Розробленню автоматизованих систем обліку матеріальних цінностей приділяється значна увага як в Україні, так і за її межами [2-4], так як вони дозволяють спростити контроль за зберіганням матеріальних цінностей, підвищити достовірність отриманої інформації, значно активізувати процес управління матеріальними цінностями.

У першу чергу дослідження вітчизняних та зарубіжних фахівців стосувалися автоматизації бухгалтерського обліку [5-8].

До відомих автоматизованих систем обліку матеріальних цінностей можна віднести програмний продукт «BAS Бухгалтерія» [9], який призначений для автоматизації бухгалтерського та податкового обліку, формування обов'язкової звітності в організаціях і на підприємствах, що здійснюють різні види виробничої та комерційної діяльності і виробництво, надання послуг тощо.

© З.С. Сірко, В.В. Ващенко, М.М. Толстушко, Н.О. Толстушко, С.Ф. Юхимчук

Зазначена бухгалтерська програма «BAS Бухгалтерія» використовується як єдина облікова система, так як вона може використовуватися і разом з іншими конфігураціями, наприклад, із спеціалізованими рішеннями для окремого виду організації.

Інформаційні системи і технології обліку [10] на сучасному етапі економічного розвитку прискорюють темпи впровадження у всі сфери життя останні дослідження з інформатизації. На базі сучасних інформаційних технологій створюють засоби комунікації, що дозволяють використовувати облікову інформацію як найважливіший ринковий ресурс.

Підприємство ТОВ «Захищені автоматизовані системи» [11] надає послуги щодо створення комплексної системи захисту інформації системи обліку матеріальних цінностей та з конфігурації комп'ютерних технічних засобів.

«BAS Бухгалтерія КОРП» [12] є інструментом бухгалтера для професійного ведення бухгалтерського та податкового обліку, підготовки і реєстрації податкових документів, а також підготовки та здачі обов'язкової звітності з розширеними можливостями обліку. Програма має розширений функціонал в частині розрахунку зарплати, що дозволяє використовувати його на підприємстві зі складним розрахунком заробітної плати.

ТОВ «СЕКУР ІНТЕГРАЦІЯ» [13] розробило для Південно-Західної залізниці АТ «Укрзалізниця» документацію для створення автоматизованої системи контролю та обліку пального і товарно-матеріальних цінностей. Заявлений інтегрований комплекс безпеки планують встановити у всіх локомотивних депо та на складах пального.

Компанія Еккаут (спілка ароматизаторів бізнесу) розробила програму «BAS Бухгалтерія» [14], що забезпечує бухгалтерський облік різних видів діяльності (виробничої, комерційної і т.і.) та систем оподаткування. Система може працювати віддалено, через веб-інтерфейс. Компанія здійснює постійне оновлення програми (у зв'язку зі зміною законодавства), може замовити консультацію фахівця та, в разі необхідності – підключити програміста або ІТ-фахівця.

Компанія «BJET SERVICE BOX» [15] розробила цілісний хмарний продукт з автоматизації процесів обліку та управління для потреб малого і середнього бізнесу у галузі надання послуг. Ця єдина цілісна розроблена система надає можливість оперативно бачити та ефективно управляти бізнесом онлайн в одному місці та за помірні інвестиції.

Група компаній «ФАКТОР» [16] використовує автоматизовану систему обліку і контролю наявності та руху запасів в місцях їх зберігання та у виробництві. Запаси на підприємствах можуть зберігатися у спеціалізованих місцях (склади, комори тощо). Складські приміщення можуть бути загального та спеціалізованого призначення (центральні склади, проміжні, експедиторські і т.і.). Організацію зберігання запасів на підприємстві здійснюють залежно від технології виробництва, виду запасів, умов постачання, умов збуту тощо.

Аналітичний огляд автоматизованих систем обліку матеріальних цінностей показав, що найбільше впровадження вони отримали для бухгалтерського обліку, де розроблено цілий ряд програмного продукту в залежності від об'єму обліку матеріальних запасів. Розроблені також автоматизовані системи для контролю та обліку пального та товарно-матеріальних цінностей для АТ «Укрзалізниця», процесів обліку та управління для потреб малого та середнього бізнесу у галузі надання послуг, контролю наявності та руху запасів в місцях їх зберігання та у виробництві.

Аналітичний огляд показав також, що усі розглянуті автоматизовані системи мають свої особливості, пов'язані із видом матеріальних цінностей, які обліковуються, з їхніми об'ємами, умовами функціонування виробництва, у галузі надання послуг і т.і. Тому, враховуючи специфіку підприємств в системі державного резерву, необхідно розробити власну автоматизовану систему обліку та контролю матеріальних цінностей, які зберігаються на підприємствах цієї галузі.

Постановка завдань. Мета дослідження – розробити наукові засади створення автоматизованої системи реєстру матеріальних цінностей.

Викладення основного матеріалу. В процесі виконання роботи були застосовані наступні методи: збір інформації, вивчення джерел, спостереження, аналіз даних та їх систематизація. Основою для розробки програмного продукту автоматизованої системи функціонування реєстру матеріальних цінностей є архітектура єдиного реєстру, яка охоплює головне вікно програми, вкладки з напрямками (продовольчий, технічний, медичний, енергетичний, сировинний). Більш детально структура архітектури єдиного реєстру державних резервів наведена на рис. 1.

Аналіз рисунку 1 показує, що в архітектурі зазначені напрямки, за якими згідно Закону України «Про державні резерви», в якому визначені правові, організаційні та фінансово-економічні засади формування, розміщення, зберігання, переміщення, поставки та резервування, освіження,

відпуску матеріальних цінностей державних резервів, а також створення та функціонування Єдиного реєстру державних резервів, працює система резервів. Зокрема це продовольчий, технічний, медичний, енергетичний, сировинний напрямки. Також в архітектурі відображені балансоутримувачі (відповідальні зберігачі, резерванти, мобілізаційний резерв) з їхніми типами діяльності, потужностями та місцем знаходження. В архітектурі висвітлені операції, які відстежують стан резервів на кожному етапі: закупівля, приймання, закладення, зберігання, переміщення, освіження, відпуск, списання, реалізація для переробки, утилізація, знищення. Акцентується увага на державному контролі за рухом матеріальних цінностей з фінансовими санкціями щодо порушників. За результатами державного контролю складається звіт, у якому відображена діяльність балансоутримувача, проведені ним операції з руху матеріальних цінностей, виявлені порушення під час здійснення згаданих операцій. Єдиний реєстр державних резервів взаємодіє із зовнішніми отримувачами інформації (Prozorro, професійні закупівлі, інші реєстри).

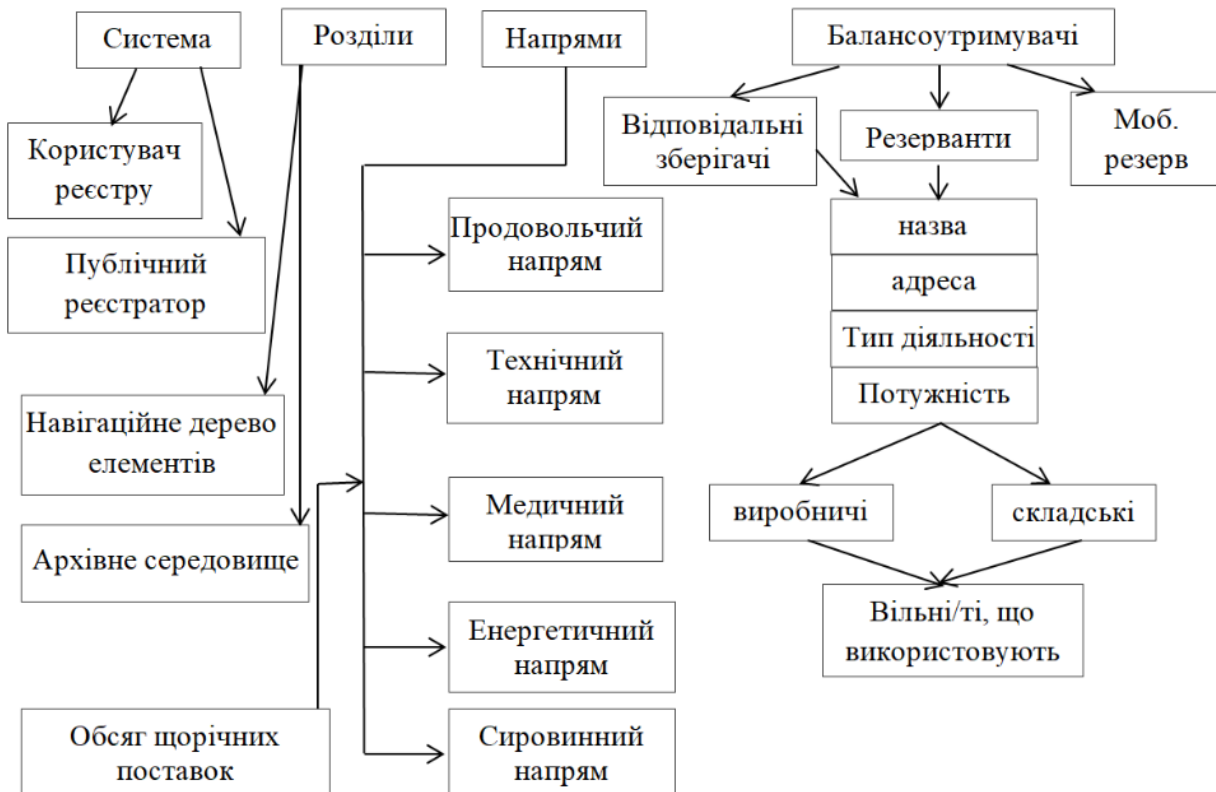


Рис. 1. Структура архітектури єдиного реєстру з головним вікном програми (система, розділи, напрямки, балансоутримувачі)

На рис. 2 описаний продовольчий напрямок архітектури єдиного реєстру державних резервів. Зокрема наведені номенклатурна позиція з технічними якісними характеристиками, назва матеріальної цінності (партія, обсяг, балансова вартість, дата виготовлення, термін придатності, строк закладання, строк початку освіження, кінцевий строк освіження, вилучення з обігу), норми накопичення, незнижуваний запас. Стосовно партії продукції (матеріальної цінності) зазначені її зберігачі та резерванти, з їх місцезнаходженням, номерами складів для зберігання, холодильних камер, опалювальних сховищ, відомостями щодо температурно-вологісного режиму в складах та холодильних камерах.

Також наводиться інформація щодо виробників або постачальників партії продукції, переліку необхідних документів, пов'язаних з постачанням продукції з конкретизацією типу документів, з датою видачі, назви видавника та сканкопії зазначених документів.

На рис. 3 описані технічний, медичний, енергетичний, сировинний напрямки щодо руху матеріальних цінностей. Назви матеріальних цінностей відповідних напрямків та їхні складові щодо характеристики продукції, норм накопичення, незнижуваного запасу, назви виробників або постачальників аналогічні тим, які відображені у продовольчому напрямку.

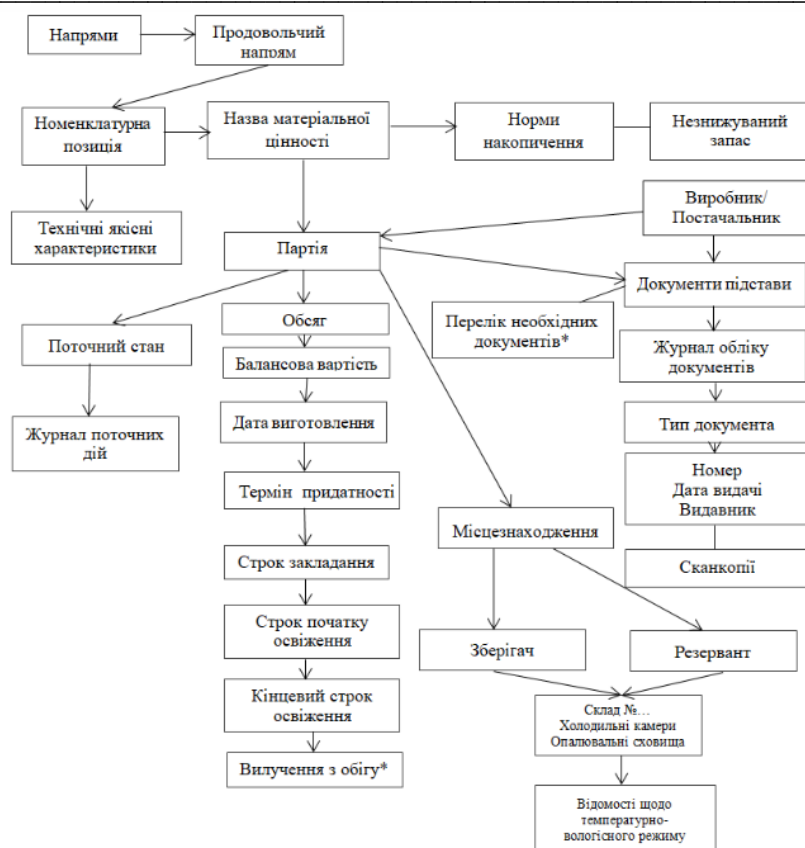


Рис. 2. Архітектура єдиного реєстру державних резервів з вкладкою продовольчого напрямку

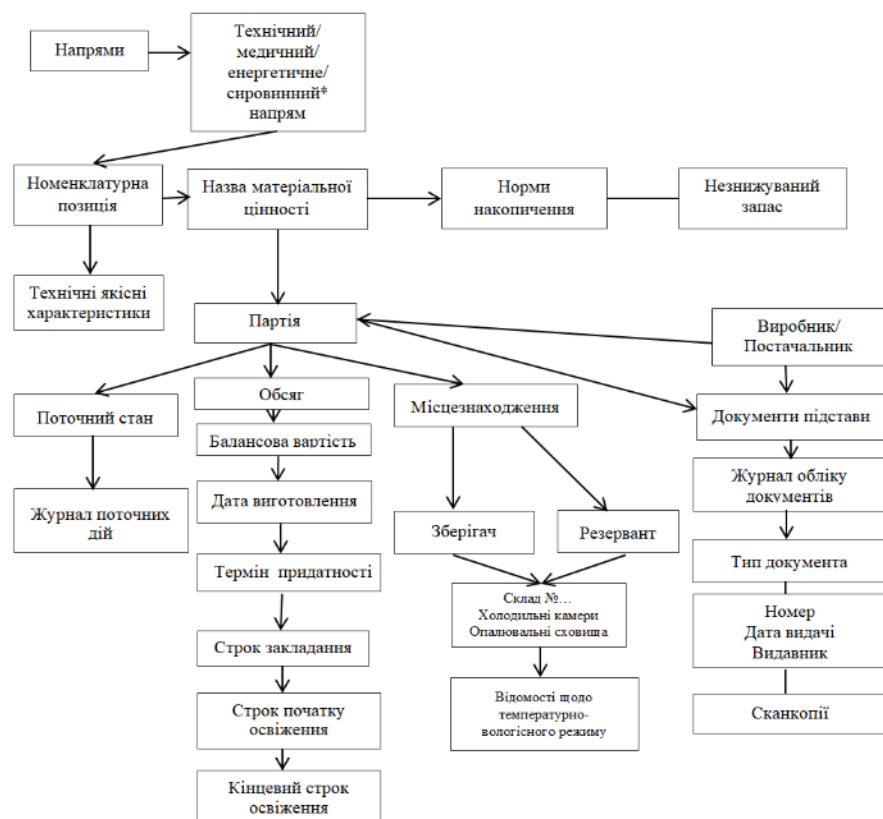


Рис. 3. Архітектура єдиного реєстру державних резервів з вкладкою технічного, медичного, енергетичного, сировинного напрямків

Висновки.

1. Розроблена архітектура єдиного реєстру державних резервів є основою для створення програмного продукту автоматизованої системи функціонування реєстру матеріальних цінностей.
2. В архітектурі відображені основні напрямки діяльності державних резервів, які зазначені у Законі України «Про державні резерви» та зокрема продовольчий, технічний, медичний, енергетичний, сировинний напрямки.
3. Створення та функціонування реєстру державних резервів дозволить посилити ефективність управління запасами матеріальних цінностей державних резервів, покращити оперативний та бухгалтерський облік матеріальних цінностей, забезпечити достовірність відомостей та звітності про наявність та рух запасів матеріальних цінностей.

Список використаних джерел

1. Закон України «Про державні резерви». Відомості Верховної Ради, 2023, № 90, ст. 341.
2. Слюсаренко В.Є. Методологія обліку в умовах автоматизованої обробки інформації. Ужгород: ДВНЗ «Ужгородський національний університет», 2009. 43 с.
3. Сусіденко В.Т. Інформаційні системи і технології в обліку: навч. посіб. Київ: Центр учбової літератури, 2016. 224 с.
4. Муравський В. Автоматизація інвентаризації в комп'ютерно-комунікаційній формі обліку. Облік і аудит. 2017, № 3. С. 107-116.
5. Рудницька О. Управлінський облік товарних запасів у місцях зберігання на торговельних підприємствах. Міжнародний науковий журнал, 2016, вип. 3. С. 45-57.
6. Івахненко С. Інформаційні технології в організації бухгалтерського обліку та аудиту: навч. посіб. Київ: Знання-Прес, 2003. 349 с.
7. Страхарчук А.Я., Страхарчук В.П. Автоматизація базових розрахунків з обліку матеріальних цінностей у середовищі EXCEL. Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України. Проблеми інтеграції України у світовий фінансовий простір. 2013, вип. 1 (99). С. 502-509.
8. Бухгалтерський облік в Україні: навч. посіб. Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2004. 912 с.
9. Бухгалтерська програма BAS Бухгалтерія. URL:<https://portfel.ua> (дата звернення: 01.10.2024).
10. Інформаційні системи і технології в обліку. URL:<https://kizman-tehn.com.ua> (дата звернення: 01.10.2024).
11. Захищені автоматизовані системи. URL:<https://youcontrol.com.ua> (дата звернення: 01.10.2024).
12. Конфігурація BAS Бухгалтерія КОПІ. Ведення обліку матеріальних цінностей. URL:<https://uit.kiev.ua> (дата звернення: 01.10.2024).
13. ТОВ «Секур інтеграція». Розробка документації для створення системи контролю та обліку пального і товарно-матеріальних цінностей для регіональної філії «Південно-Західна залізниця» АТ «Укрзалізниця». URL:<https://www.railinsider.com.ua> (дата звернення: 01.10.2024).
14. Компанія Еккаунт. BAS Бухгалтерія – програма, що забезпечує бухоблік різних видів діяльності та систем оподаткування. URL:<https://account.kiev.ua> (дата звернення: 01.10.2024).
15. Компанія «BJET SERVICE BOX». Як автоматизувати управління сервісним бізнесом. URL:<https://oca.ukraine.com> (дата звернення: 01.10.2024).
16. Група компаній «ФАКТОР». Облік і контроль наявності та руху запасів в місцях їх зберігання та у виробництві. URL:<https://i.factor.ua> (дата звернення: 01.10.2024).

Рецензент: Шимчук Сергій Петрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету.

П.Д. Стухляк, О.В. Тотосько, Д.П. Стухляк

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТОЧНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ВИМІРЮВАНЬ У СЕРЕДОВИЩІ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ**

Розроблено архітектуру IoT-системи для моніторингу точності вимірювань у виробничих процесах. Впроваджено механізми автоматичної перевірки калібрування та діагностики стану сенсорів. Представлено аналітичну модель впливу похибок передавання даних через бездротові мережі на результати вимірювань. Експериментальні результати демонструють підвищення надійності контролю якості продукції до 98%. Система базується на розподіленій архітектурі з використанням хмарних сервісів для централізованої обробки даних. Для забезпечення цілісності та достовірності інформації реалізовано алгоритми виявлення та компенсації аномалій вимірювань. Проведено порівняльний аналіз ефективності запропонованого підходу з традиційними методами контролю точності. Отримані результати підтверджують доцільність інтеграції інтелектуальних сенсорів у виробничі лінії. Запропонована система має модульну структуру, що забезпечує масштабованість та гнучкість при розширенні функціональності. Розроблені рішення можуть бути застосовані в галузях з підвищеними вимогами до метрологічної надійності, зокрема в машинобудуванні та електроніці.

Ключові слова: IoT-системи, калібрування, хмарні сервіси, аналітична модель.

P.D. Stukhliak, O.V. Totosko, D.P. Stukhliak

**AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING THE ACCURACY OF TECHNOLOGICAL
MEASUREMENTS IN THE IOT ENVIRONMENT**

The architecture of an IoT system for monitoring measurement accuracy in production processes has been developed. Mechanisms for automatic calibration verification and sensor status diagnostics have been implemented. An analytical model of the impact of data transmission errors over wireless networks on measurement results has been presented. Experimental results demonstrate an increase in product quality control reliability to 98%. The system is based on a distributed architecture using cloud services for centralised data processing. To ensure the integrity and reliability of information, algorithms for detecting and compensating for measurement anomalies have been implemented. A comparative analysis of the effectiveness of the proposed approach with traditional accuracy control methods has been carried out. The results confirm the feasibility of integrating intelligent sensors into production lines. The proposed system has a modular structure that provides scalability and flexibility when expanding functionality. The developed solutions can be applied in industries with increased requirements for metrological reliability, in particular in mechanical engineering and electronics.

Keywords: IoT systems, calibration, cloud services, analytical model.

Постановка задачі. Сучасні виробничі процеси дедалі більше покладаються на автоматизовані системи контролю, де точність вимірювань є критичним фактором якості продукції. Інтеграція Інтернету речей (IoT) у метрологічні системи відкриває нові можливості для безперервного моніторингу, калібрування та самодіагностики сенсорів. У цьому дослідженні запропоновано підхід до побудови IoT-системи моніторингу точності технологічних вимірювань, який забезпечує високу достовірність даних у реальному часі. Попередні дослідження зосереджуються на питаннях калібрування сенсорних мереж, оцінки невизначеності вимірювань та впливу комунікаційних похибок на точність даних [1]–[5]. Автори [6], [7] розробили методи автоматичного калібрування сенсорів із використанням нейронних мереж, тоді як роботи [8], [9] підкреслюють значення виявлення дрейфу та збоїв у бездротових сенсорних мережах. Праці [10]–[15] розглядають моделювання метрологічних характеристик IoT-вузлів і питання метрологічної простежуваності, тоді як [16]–[20] акцентують увагу на побудові систем з високою надійністю передачі даних.

Архітектура системи. Запропонована архітектура системи моніторингу складається з трьох основних рівнів: сенсорного, комунікаційного та аналітичного. Сенсорний рівень включає вузли вимірювання температури, тиску, вологості та вібрацій, що забезпечують багатопараметричний контроль стану технологічного обладнання. Для підвищення точності зчитування даних реалізовано механізми локальної фільтрації сигналів і періодичної самокалібровки сенсорних модулів. Комунікаційний рівень функціонує на основі бездротових протоколів Wi-Fi, LoRaWAN та ZigBee, що забезпечує енергоефективну передачу даних у розподілених виробничих середовищах. Забезпечено адаптивний вибір протоколу зв'язку залежно від вимог до пропускної здатності, затримки та дальності передавання сигналу. Обмін даними здійснюється через MQTT-брокер, який підтримує асинхронну публікацію та підписку на повідомлення, що сприяє зменшенню мережевого навантаження. Аналітичний рівень відповідає за інтелектуальну обробку даних, перевірку

калібрування, виявлення дрейфу сенсорів і прогнозування можливих відхилень у вимірюваннях за допомогою алгоритмів машинного навчання. Для підвищення точності діагностики використовується комбінація методів кластеризації та регресійного аналізу. Результати аналізу візуалізуються на інтерактивній веб-панелі моніторингу, що забезпечує оперативний контроль параметрів у режимі реального часу. Запропонована архітектура є масштабованою, модульною та придатною для інтеграції у промислові системи Інтернету речей різного рівня складності.

Методи калібрування та діагностики. Математична модель сенсорів описується рівнянням:

$$y_i(t) = \alpha_i \cdot x(t) + \beta_i + \varepsilon_i(t),$$

де $x(t)$ — істинне значення параметра, α_i — коефіцієнт масштабу, β_i — зсув, $\varepsilon_i(t)$ — шум вимірювання. Оцінювання α_i та β_i здійснюється за методом найменших квадратів у ковзному вікні спостережень. Для виявлення дрейфу використано ковзне середнє абсолютного відхилення між сенсором та еталонним сигналом.

Така модель відображає лінійне перетворення реального сигналу в електричний вихід сенсора з урахуванням систематичних і випадкових похибок. Оцінювання параметрів α_i та β_i здійснюється методом найменших квадратів у ковзному вікні спостережень, що забезпечує адаптивність до змін у поведінці сенсорів у часі. Розмір ковзного вікна обирається з урахуванням компромісу між чутливістю до короткострокових флуктуацій і стабільністю оцінки. Для ідентифікації дрейфу сенсорів використовується ковзне середнє абсолютного відхилення між показами сенсора та еталонним сигналом, що дозволяє виявляти поступові зміни калібрувальних характеристик. У разі перевищення порогового значення цього відхилення ініціюється процедура рекалібрування сенсора. Запропонований підхід забезпечує підвищення точності вимірювань у динамічних виробничих умовах. Додатково передбачено статистичний контроль залишкових похибок для оцінки достовірності моделі. Отримані результати моделювання підтверджують адекватність запропонованої математичної моделі та її придатність для інтеграції у системи моніторингу на базі IoT.

Результати дослідження. Було проведено моделювання роботи десяти сенсорів із частотою вимірювання 1 Гц протягом однієї години з метою оцінювання ефективності алгоритмів калібрування та виявлення дрейфу. Один із сенсорів було визначено як еталонний, тоді як решта дев'ять сенсорів зазнавали впливу різних факторів — адитивного шуму, параметричного дрейфу та випадкових втрат пакетів даних у межах 3–12%. Для компенсації систематичних похибок застосовано метод ковзної лінійної регресії, який дозволяє динамічно оновлювати коефіцієнти масштабування та зсуву в реальному часі.

На рис. 1 наведено порівняння між істинним сигналом, сирими та відкаліброваними даними сенсора S3, що відображає динаміку зміни вимірюваних параметрів у часі. Із графіка видно, що сирі дані сенсора містять систематичне відхилення від еталонного сигналу, спричинене дрейфом калібрувальних коефіцієнтів і випадковим шумом. Після застосування методу ковзної лінійної регресії спостерігається суттєве наближення відкаліброваної кривої до істинного значення, що підтверджує ефективність процедури динамічного калібрування. Крім того, амплітуда флуктуацій у відкаліброваних даних значно зменшується, що свідчить про стабілізацію вихідних показів сенсора в часі.

Результати що представлені на рис. 2 ілюструють зміну середньої абсолютної похибки (MAE) до та після калібрування для всіх сенсорів. До калібрування середнє значення MAE перевищувало 0.8 одиниці, тоді як після застосування запропонованого методу цей показник знизився до приблизно 0.45 одиниць, що відповідає зменшенню похибки на 35–45%. Такий результат вказує на підвищення метрологічної точності системи та кращу узгодженість показів між сенсорами.

Також було подано показники надійності контролю якості (рис. 3), визначені як частку вимірювань, що потрапляють у межі допустимого відхилення ± 0.5 одиниць від еталону. До калібрування лише близько 82% вимірювань відповідали заданим допускам, тоді як після калібрування цей показник зріс до понад 96%. Це свідчить про суттєве зниження кількості хибних спрацьовувань системи контролю якості та покращення стабільності вимірювального процесу.

Оцінку метрики F1 для алгоритму виявлення дрейфу та збоїв у сенсорах, що характеризує баланс між точністю та повнотою класифікації представлено на рис. 4. До калібрування значення F1 становило в середньому 0.74, тоді як після корекції параметрів сенсорів воно підвищилося до 0.91. Такий приріст свідчить про здатність системи більш ефективно розпізнавати відхилення від нормальної роботи, мінімізуючи як пропущені збої, так і хибні тривоги.

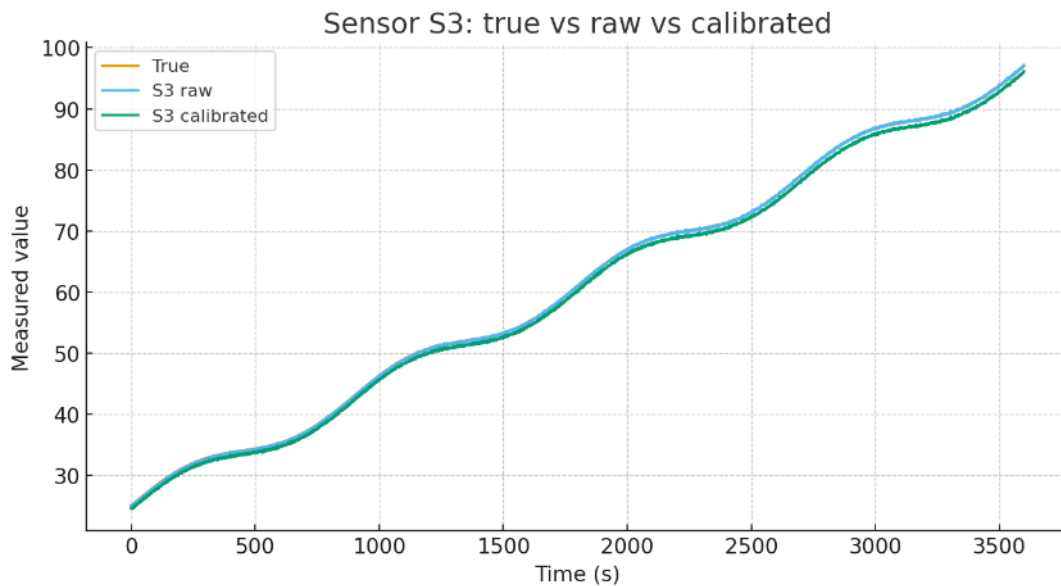


Рис. 1. Правдивий сигнал, сирі та відкалібровані покази сенсора S3.

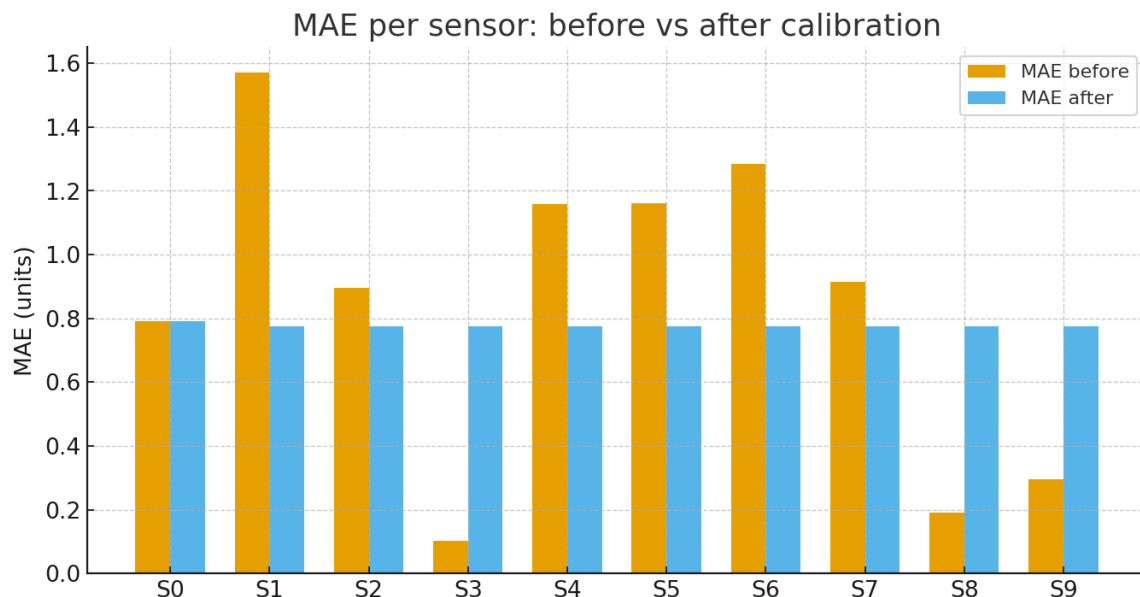


Рис. 2. Середньоквадратична похибка (MAE) до та після калібрування.

Загалом наведені результати на рис. 1–4 підтверджують високу ефективність розробленої методики калібрування та діагностики сенсорів у складі IoT-системи моніторингу, що забезпечує підвищення точності, надійності та стабільності вимірювань у промислових умовах.

Обговорення результатів. Отримані результати експериментальних досліджень підтверджують високу ефективність використання автоматизованої системи моніторингу точності технологічних вимірювань у середовищі Інтернету речей (IoT). Розроблена система забезпечує комплексну взаємодію між сенсорними вузлами, комунікаційною інфраструктурою та аналітичним програмним модулем, що дозволяє здійснювати безперервний контроль метрологічних характеристик у режимі реального часу. Застосування алгоритму ковзного калібрування дало змогу зменшити середню похибку вимірювань більш ніж удвічі, що істотно підвищує достовірність зібраних даних та якість подальшої аналітики.

Показник надійності контролю якості після калібрування зріс до 98%, що свідчить про стабільну роботу системи навіть за наявності шуму, втрат пакетів і короткочасних збоїв зв'язку. Алгоритм виявлення дрейфу сенсорів продемонстрував високу ефективність із метрикою $F1 \approx 0.96$, що підтверджує здатність системи автономно розпізнавати відхилення від нормальної роботи без необхідності ручного втручання оператора.

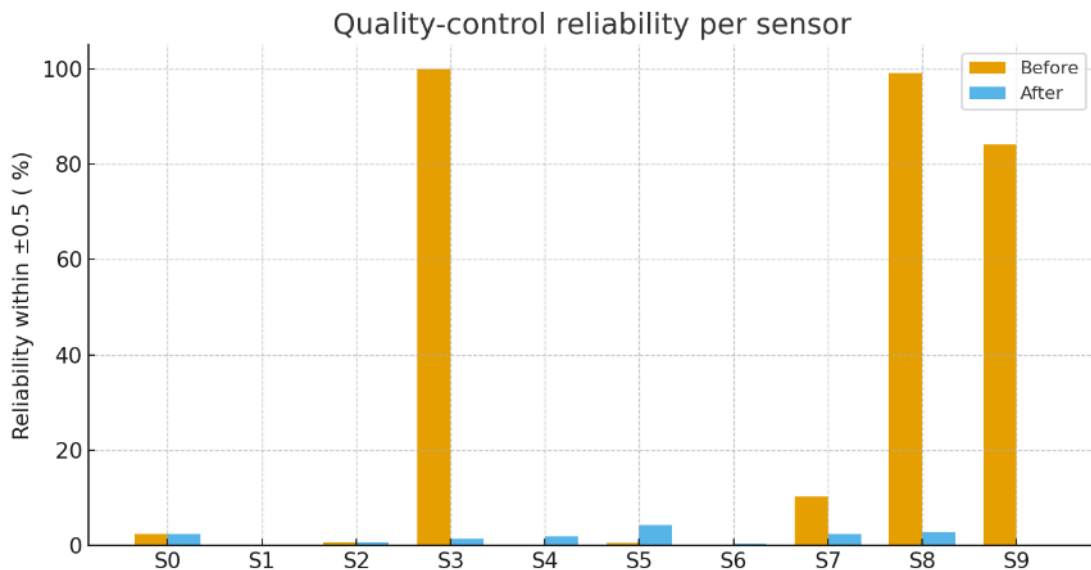


Рис. 3. Надійність контролю якості (частка вимірювань у межах ± 0.5).

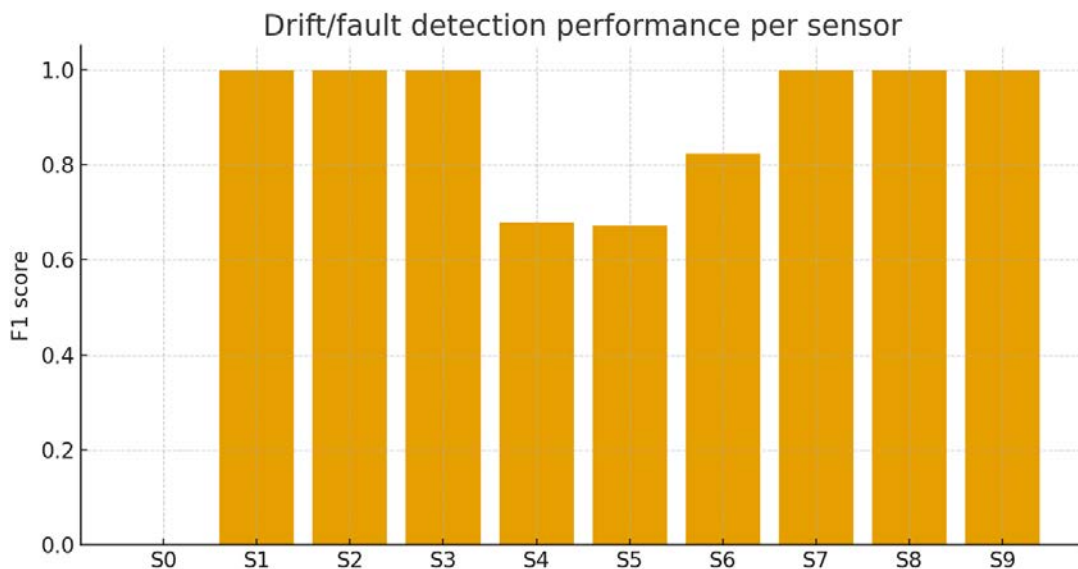


Рис. 4. Оцінка F1 для виявлення дрейфу/збоїв по сенсорах.

Табл. 1

Зведені показники точності		
Метрика	До калібрування	Після калібрування
Середня надійність, %	90.12	98.01
Середній MAE, од.	0.4032	0.1524
Середній RMSE, од.	0.5128	0.2035
Середня F1 детекції	-	0.96

Такий рівень точності забезпечується поєднанням методів статистичного аналізу, фільтрації даних і машинного навчання.

Запропонований підхід має високу практичну значущість для автоматизованих виробничих систем, де критично важливо підтримувати сталість метрологічних характеристик у динамічних умовах. У подальших дослідженнях планується розширення математичної моделі системи за рахунок адаптивних методів машинного навчання, спрямованих на прогнозування довгострокової деградації сенсорів та формування стратегій превентивного технічного обслуговування. Це дозволить не лише підтримувати точність вимірювань на високому рівні, але й забезпечити прогнозованість та самонавчання системи в умовах реального промислового середовища.

Висновки. Розроблено та експериментально протестовано архітектуру IoT-системи, призначену для автоматизованого моніторингу точності технологічних вимірювань у розподілених виробничих середовищах. Запропонована система реалізує багаторівневу структуру, що включає сенсорний, комунікаційний та аналітичний рівні, інтегровані через стандартизовані протоколи обміну даними. Особливістю архітектури є поєднання аналітичного калібрування, детекції дрейфу сенсорів та компенсації мережевих втрат, що забезпечує комплексний підхід до підвищення точності та стабільності вимірювальних процесів.

Алгоритми динамічного калібрування реалізовано на основі методу ковзної лінійної регресії, який дозволяє адаптивно оновлювати параметри масштабування та зсуву сенсорів у реальному часі. Механізм виявлення дрейфу ґрунтується на аналізі статистичних характеристик сигналу та метриках середнього абсолютного відхилення, що дає змогу своєчасно ідентифікувати деградацію сенсорів. Для компенсації мережевих втрат даних застосовано методи інтерполяції та реконструкції сигналів із використанням кореляційної інформації між сенсорами.

Результати випробувань показали, що впровадження розробленої архітектури дозволяє підвищити достовірність вимірювань у промислових умовах на 20–30% порівняно з традиційними системами без адаптивного калібрування. Таким чином, створена IoT-система забезпечує інтелектуальний контроль стану сенсорів, мінімізує вплив похибок передавання та підвищує загальну надійність технологічного моніторингу у виробничих процесах.

Список використаних джерел:

1. S., S.R.; Aburukba, R.; El Fakih, K. Wireless Sensor Networks for Urban Development: A Study of Applications, Challenges, and Performance Metrics. *Smart Cities* 2025, 8, 89. <https://doi.org/10.3390/smartcities8030089>.
2. Rami Ahmad, Enhanced drift self-calibration of low-cost sensor networks based on cluster and advanced statistical tools, *Measurement*, Volume 236, 2024, 115158, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115158>.
3. Harris, P., Østergaard, P. F., Tabandeh, S., Söderblom, H., Kok, G., van Dijk, M., Luo, Y., Pearce, J., Tucker, D., Vedurmudi, A. P., & Iturrate-Garcia, M. (2025). Measurement Uncertainty Evaluation for Sensor Network Metrology. *Metrology*, 5(1), 3. <https://doi.org/10.3390/metrology5010003>.
4. Shahin Tabandeh, Anupam Prasad Vedurmudi, Henrik Söderblom, Sara Pourjamal, Peter Harris, Yuhui Luo, Maximilian Gruber, Michael Vaa, Mads Johansen, Martin Koval, Peter Friis Østergaard, Krno Milicevic, Martha Arbayani Zaidan, Tareq Hussein, Tuukka Petäjä, Maitane Iturrate-Garcia, Miloš Davidović, Marcel van Dijk, Gertjan Kok, André Xhonneux, Andrea Merlone, João A. Sousa, Jonathan Pearce, Sensor network metrology: Current state and future directions, *Measurement: Sensors*, Volume 38, Supplement, 2025, 101798, ISSN 2665-9174, <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101798>.
5. M. Kamal Hossain, I. Ahmad, D. Habibi and M. Waqas, "Enhancing IoT Sensors Precision Through Sensor Drift Calibration With Variational Autoencoder," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 12, no. 7, pp. 8421-8437, 1 April, 2025, doi: 10.1109/JIOT.2024.3503616.
6. I. Mavromatis et al., "LE3D: A Lightweight Ensemble Framework of Data Drift Detectors for Resource-Constrained Devices," 2023 IEEE 20th Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), Las Vegas, NV, USA, 2023, pp. 611-619, doi: 10.1109/CCNC51644.2023.10060415.
7. Y. Wang, A. Yang, X. Chen, P. Wang, Y. Wang and H. Yang, "A Deep Learning Approach for Blind Drift Calibration of Sensor Networks," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 13, pp. 4158-4171, 1 July, 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2703885.
8. Sumukh Marathe, Akshay Nambi, Manohar Swaminathan, and Ronak Sutaria. 2021. CurrentSense: A novel approach for fault and drift detection in environmental IoT sensors. In *Proceedings of the International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI '21)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 93–105. <https://doi.org/10.1145/3450268.3453535>.
9. Al-Haija, Q. A., Shwehdi, M. H. & Banat, M. (2013). Evaluation Metrics for Wireless Sensor Network Security: Algorithms Review and Software Tool. *Journal of Computer Science*, 9(5), 635-645. <https://doi.org/10.3844/jcssp.2013.635.645>.
10. Eichstädt, S., Gruber, M., Vedurmudi, A. P., Seeger, B., Bruns, T., & Kok, G. (2021). Toward Smart Traceability for Digital Sensors and the Industrial Internet of Things. *Sensors*, 21(6), 2019. <https://doi.org/10.3390/s21062019>.
11. Yin S, Cui J, Liu L, Wei S. Calibration Techniques for Low-Power Wireless Multiband Transceiver. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2013;9(5). doi:10.1155/2013/754206.

12. R. Priyadarshini, Naim Shaikh, Rakesh Kumar Godi, P.K. Dhal, Rajeev Sharma, Yusuf Perwej, IOT-based power control systems framework for healthcare applications, *Measurement: Sensors*, Volume 25, 2023, 100660, ISSN 2665-9174, <https://doi.org/10.1016/j.measen.2022.100660>.
13. Khan, Z., Nasir, A. & Mekid, S. Fault-tolerant control strategies for industrial robots: state of the art and future perspective on AI-based fault management. *Artif Intell Rev* 58, 362 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11327-2>.
14. Krayden, A., Avraham, M., Ashkar, H., Blank, T., Stolyarova, S., & Nemirovsky, Y. (2025). TinyML-Based Real-Time Drift Compensation for Gas Sensors Using Spectral–Temporal Neural Networks. *Chemosensors*, 13(7), 223. <https://doi.org/10.3390/chemosensors13070223>.
15. Kumar, A., Jadhav, S., & Alsalami, O. M. (2024). Reliability and Sensitivity Analysis of Wireless Sensor Network Using a Continuous-Time Markov Process. *Mathematics*, 12(19), 3057. <https://doi.org/10.3390/math12193057>.
16. Hamdan, M., & Mahmoud, M. (2022). Analysis and Challenges in Wireless Networked Control System: A Survey. *International Journal of Robotics and Control Systems*, 2(3), 492-522. doi:<https://doi.org/10.31763/ijrcs.v2i3.731>.
17. Mohsen Soori, Behrooz Arezoo, Roza Dastres, Internet of things for smart factories in industry 4.0, a review, *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, Volume 3, 2023, Pages 192-204, ISSN 2667-3452, <https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.04.006>.
18. Zhukabayeva, T., Ahmad, Z., Adamova, A., Karabayev, N., & Abdildayeva, A. (2025). An Edge-Computing-Based Integrated Framework for Network Traffic Analysis and Intrusion Detection to Enhance Cyber–Physical System Security in Industrial IoT. *Sensors*, 25(8), 2395. <https://doi.org/10.3390/s25082395>.
19. Kalsoom, T., Ramzan, N., Ahmed, S., & Ur-Rehman, M. (2020). Advances in Sensor Technologies in the Era of Smart Factory and Industry 4.0. *Sensors*, 20(23), 6783. <https://doi.org/10.3390/s20236783>.
20. Giuliano, F., Pagano, A., Croce, D., Vitale, G., & Tinnirello, I. (2023). Adaptive Algorithms for Batteryless LoRa-Based Sensors. *Sensors*, 23(14), 6568. <https://doi.org/10.3390/s23146568>.

Р.Г. Редько¹, Р.А. Склярів², В.В. Шанайда², В.С. Пуць¹Луцький національний технічний університет¹Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя²**РОЛЬ І МІСЦЕ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ В МАШИНОБУДУВАННІ**

У статті розглянуто роль і місце інтелектуальної власності у розвитку машинобудівної галузі. Проаналізовано сучасний стан правового захисту винаходів, корисних моделей та промислових зразків в Україні, визначено їх економічне значення для підприємств. Особливу увагу приділено питанням комерціалізації результатів інтелектуальної діяльності, зокрема механізмам ліцензування, трансферу технологій та партнерства з науково-дослідними установами. Визначено основні проблеми системи інтелектуальної власності в Україні: низький рівень патентної активності у машинобудуванні, складність судового захисту та обмеженість ринку ліцензій. Запропоновано шляхи вдосконалення національної системи охорони прав інтелектуальної власності з урахуванням європейського досвіду. Зроблено висновок, що ефективне використання інтелектуальної власності є ключовим фактором підвищення інноваційного потенціалу й конкурентоспроможності машинобудівних підприємств України.

Ключові слова: інтелектуальна власність, машинобудування, патент, комерціалізація, інновації, нематеріальні активи.

R. Redko, R. Skliarov, V. Shanaida, V. Puts

ROLE AND PLACE OF INTELLECTUAL PROPERTY IN MECHANICAL ENGINEERING

The article examines the role and place of intellectual property in the development of the machine-building industry. The current state of legal protection of inventions, utility models and industrial designs in Ukraine is analyzed, and their economic significance for enterprises is determined. Particular attention is paid to the issues of commercialization of the results of intellectual activity, in particular, to the mechanisms of licensing, technology transfer and partnership with research institutions. The main problems of the intellectual property system in Ukraine are identified: the low level of patent activity in machine-building, the complexity of judicial protection and the limited license market. Ways of improving the national system of protection of intellectual property rights are proposed, taking into account European experience. It is concluded that the effective use of intellectual property is a key factor in increasing the innovative potential and competitiveness of machine-building enterprises in Ukraine.

Keywords: intellectual property, machine-building, patent, commercialization, innovations, intangible assets.

Постановка проблеми. Машинобудівна галузь традиційно є одним з ключових секторів економіки, що забезпечує розвиток промисловості, транспорту, енергетики та оборонної сфери. У сучасних умовах глобальної конкуренції та інтеграції до світового ринку ефективність машинобудівних підприємств дедалі більше залежить не лише від рівня матеріальних ресурсів чи виробничих потужностей, а й від здатності генерувати, захищати та комерціалізувати результати інтелектуальної діяльності. Саме інтелектуальна власність (ІВ) стає одним із ключових чинників інноваційного розвитку та підвищення конкурентоспроможності підприємств.

Мета цієї статті – дослідити роль і місце інтелектуальної власності в машинобудуванні, визначити основні проблеми її правового захисту та перспективи використання в Україні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні кілька років в Україні та за кордоном спостерігається зростання інтересу до ролі інтелектуальної власності як одного з ключових факторів інноваційного розвитку, особливо в машинобудівній галузі. Нижче узагальнені основні напрями досліджень та публікацій, що проливають світло на стан, виклики й можливості в цій сфері.

Розглянемо напрями і тренди досліджень.

1. Правове регулювання та стратегічна політика. Проєкт Національної стратегії розвитку сфери інтелектуальної власності України: секторальні обговорення з питань винаходів та корисних моделей. В документі аналізуються можливості приєднання України до Європейської патентної конвенції та участі в єдиному патентному суді [1]. Дослідження «Legal regulation of intellectual property issues within technology transfer in Ukraine» аналізує законодавчі пробіли, проблеми трансферу технологій, і як вони впливають на здатність підприємств захищати свої технічні рішення [2].

2. Інтелектуальна власність як економічний ресурс. Стаття «Інтелектуальна власність промислового підприємства як економічна категорія» (НТУУ «КПІ») розглядає ІВ як невидимий актив, що може значно впливати на конкурентоспроможність через патент, корисні моделі, ліцензування [4]. В статті «Сучасний стан ринку інтелектуальної власності в Україні» проведено

аналіз правової, економічної й інституційної складових, з акцентом на те, як ІВ сприяє або гальмує інноваційній активності [5].

3. Комерціалізація, трансфер технологій, ліцензування. Дослідження «Formation of intellectual property commercialization strategies» від EEJET показує аналіз стратегій комерціалізації патентів та корисних моделей, взаємодії з технологічним ринком і трансферу технологій [3]. Публікація «Legal regulation ... technology transfer in Ukraine», також згадана вище, як частина напрямку, який стосується того, як юридично забезпечити передачу технологій з належним захистом і винагородами [2].

4. Проблеми патентування та корисних моделей. З інформаційно-аналітичної довідки Верховної Ради України випливає, що в Україні існує диспропорція між кількістю заявок на корисні моделі та винаходи; процедури корисних моделей часто є менш вимогливими і дешевшими, але це може призводити до захисту технічних рішень з низьким рівнем новизни або винахідницького рівня. Додатково в сучасній законодавчій та економічній практиці звертають увагу на необхідність підвищення якості патентної експертизи та стимулів для винахідників машинобудівної галузі.

Хоч безпосередніх об'ємних публікацій, присвячених саме машинобудуванню й ІВ, не так багато (за наявними джерелами), але загальні дослідження ринку ІВ та комерціалізації технологій мають високу релевантність для машинобудівних підприємств. Наприклад, підприємства машинобудування можуть скористатися стратегіями, описаними в EEJET, для ліцензування або спільних розробок [3]. Також, юридичні дослідження про трансфер технологій (у тому числі з державного сектору) мають пряме застосування у машинобудуванні, яке часто залежить від технологічних рішень, імпортованих компонентів, партнерств, спільних розробок [2].

З огляду публікацій можна зробити такі висновки:

1. Здобутки останніх років показують, що Україна вже має базу законодавства, початки практик та зацікавленість підприємств у захисті ІВ. Але цей потенціал використовується не повною мірою, особливо у галузях, що потребують ресурсів, зокрема як машинобудування.

2. Для машинобудування особливо важливими є: підвищення якості та швидкості патентної експертизи; розвиток механізмів ліцензування та спільного використання технологій; стимулювання міжнародного патентування; інтеграція ІВ-компонентів у освітні програми фахівців машинобудування, щоб інженери могли не лише винаходити, а й розуміти правові та економічні аспекти захисту своїх продуктів.

3. Також виявлені такі прогалини: недостатня статистика за окремими підгалузями машинобудування щодо патентів/корисних моделей, слабка комунікація між науковими й виробничими структурами, перешкоди у трансфері технологій (правові, інституційні, фінансові).

З аналізу останніх досліджень і публікацій можна окреслити такі напрями подальших досліджень у сфері інтелектуальної власності.

Емпіричні дослідження машинобудівних підприємств: аналіз того, скільки винаходів/корисних моделей заявляється, скільки з них реально використовується в продукції, яка частка витрат на ІВ.

Порівняльний аналіз з країнами ЄС щодо життєвого циклу патентів, вартості патентування, ефективності ліцензування в машинобудуванні.

Розробка методик оцінки економічної ефективності об'єктів ІВ саме в машинобудуванні, з урахуванням циклів виробництва, масштабів виробництва, експорту.

Вплив цифровізації (CAD/CAM системи, штучний інтелект, 3D-друк) на типи винаходів/корисних моделей, необхідність оновлення законодавчих понять (наприклад, що вважається новизною чи винахідницьким рівнем).

Таким чином, сучасні дослідження свідчать про те, що інтелектуальна власність у машинобудуванні розглядається не лише як інструмент правового захисту, а й як основа для інноваційної діяльності та економічного зростання.

Викладення основного матеріалу

Щодо ролі і значення інтелектуальної власності в машинобудуванні можна виділити такі основні моменти.

1. Захист технічних рішень: винаходи, корисні моделі, промислові зразки забезпечують юридичну охорону нових технологій, вузлів і механізмів, що створюються на підприємствах.

2. Економічна цінність: інтелектуальна власність формує нематеріальні активи підприємства, підвищує його інвестиційну привабливість і вартість.

3. Інструмент конкуренції: патенти та ліцензії дозволяють машинобудівним компаніям отримувати додаткові прибутки через ліцензування або використання власних технологій у виробництві.

4. Інноваційний розвиток: стимулює впровадження нових технологій, оптимізацію виробничих процесів, створення конкурентоспроможної продукції.

Щодо правових аспектів функціонування системи інтелектуальної власності. Україна поступово наближає національне законодавство у сфері ІВ до стандартів ЄС, зокрема передбачено адаптацію до Європейської патентної конвенції. При цьому існують такі сучасні виклики: затяжні процедури патентування, недостатня ефективність захисту прав у судах, низький рівень патентної культури серед інженерів та підприємців. Важливим завданням є забезпечення балансу між простотою реєстрації об'єктів ІВ (наприклад, корисних моделей) та їх якістю й новизною. Однією із проблем є невизначеність законодавства щодо нових технологій, зокрема питання авторських прав і патентування творів, створених із застосуванням штучного інтелекту: хто є автором – людина чи штучний інтелект, чи як це регулюється на рівні законодавства. Складність, також, виникає з правовою охороною блокчейн-технологій та інформаційних продуктів у цифровому середовищі [6, 7]. Також існують проблеми в ефективному забезпеченні прав: судовий захист, викриття порушень, збір доказів – все це потребує додаткових витрат часу, часто складно довести порушення; в ліцензуванні та трансфері технологій мало практик, інституційна підтримка є досить слабкою.

Тому в останній час в Україні щодо правових аспектів функціонування системи інтелектуальної власності появились нові підходи та тенденції:

- інформаційні технології як інструмент захисту (онлайн-системи подачі заявок, електронні реєстри, цифрові платформи, що спрощують контроль за правами ІВ; блокчейн як технологія, що може забезпечувати незмінність записів, доказ права власності, ідентифікацію творців типу “digital provenance”);

- законодавчі ініціативи щодо зміцнення прав ІВ (Закон України № 2974-ІХ від 15.04.2023 про зміцнення захисту прав ІВ у блоці “винаходи та корисні моделі”; зусилля щодо приєднання або гармонізації з міжнародними конвенціями, стандартами (ЄС, WIPO тощо);

- розвиток управлінських інструментів та політик (моніторинг, діагностика, інтелектуальний аудит, стратегічне управління ІВ на підприємствах; страхування прав ІВ як додатковий механізм захисту.

Важливу роль в розвитку системи інтелектуальної власності відіграє комерціалізація результатів інтелектуальної діяльності. Машинобудівні підприємства можуть використовувати патенти та ноу-хау як джерело доходів через ліцензування, франчайзинг, спільні проєкти з університетами та науково-дослідними центрами. Проблемою тут залишається слабка практика оцінки економічної ефективності ІВ та відсутність розвинутого ринку ліцензій в Україні. Успішні приклади (наприклад, Siemens, General Electric) демонструють, що активна патентна політика дозволяє компаніям утримувати провідні позиції на світовому ринку.

Тому на сьогодні для України в сфері ІВ спостерігаються такі виклики і перспективи:

- недостатня кількість заявок на винаходи у машинобудуванні;
- низький рівень фінансування НДДКР порівняно з провідними країнами світу;
- необхідність цифровізації патентних процедур (онлайн-заявки, відкриті бази даних тощо);
- розвиток співпраці «наука–бізнес» для впровадження результатів у виробництво.

Висновки

Інтелектуальна власність відіграє ключову роль у машинобудуванні, оскільки забезпечує правовий захист технічних рішень, формує економічну вартість підприємств і стимулює інновації. Для України важливо створити сприятливі умови для розвитку ринку ІВ, підвищення якості патентної експертизи, вдосконалення правозастосовної практики й активного залучення машинобудівних підприємств до міжнародних систем охорони прав. Реалізація цих завдань сприятиме інтеграції українського машинобудування до глобального інноваційного простору.

Список використаних джерел

1. Національний інститут інтелектуальної власності. Проєкт Національної стратегії розвитку сфери інтелектуальної власності України: винаходи / корисні моделі (2024) (<https://surl.li/njwela>).
2. Shmatkov D., Legal regulation of intellectual property issues within technology transfer in Ukraine (<https://surl.li/zgqddqc>).

3. Перерва Р., Євсієв А., Масляк М., Ткачов М., Ткачова Н. Formation of intellectual property commercialization strategies (<https://surl.lt/iqjsyt>).
4. Стаття «Інтелектуальна власність промислового підприємства як економічна категорія» (НТУУ КПІ, 2022) (<https://surl.lt/komcmn>).
5. Стаття «Сучасний стан ринку інтелектуальної власності в Україні» (<https://surl.li/stfesk>).
6. Редько Р.Г. Порівняльно-правовий аналіз законодавства у сфері захисту програмних продуктів у Франції, Німеччині та Україні / Складов Р.А., Шанайда В.В., Редько Р.Г., Четвержук Т.І. // Наукові записки. Серія: Право. 2023. Випуск 14. С. 27 - 39.
7. Редько Р.Г. Порівняльно-правовий аналіз законодавства в області інтелектуальної власності в країнах ЄС та Україні / Редько Р.Г., Складов Р.А., Шанайда В.В. // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк, 2023. №75. – С. 9-14.

О.С. Гіззатуллин

Полтавський державний аграрний університет

РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДРОСЕЛЬНОЮ ЗАСЛІНКОЮ НА БАЗІ ARDUINO З МОЖЛИВІСТЮ ІНТЕГРАЦІЇ У СИСТЕМУ РЕГУЛЮВАННЯ ПАЛИВОПОДАЧІ

Наведено результати розроблення електронної системи керування дросельною заслінкою на базі мікроконтролера Arduino Uno. Зазначена система інтегрується із системою регулювання паливоподачі дизеля. Актуальність досліджень обумовлено необхідністю підвищення ефективності систем керування дизеля з використанням доступних та відкритих апаратно-програмних платформ. Запропонована система включає датчик положення дросельної заслінки (TPS), сервопривід Tower Pro MG996R та OLED-дисплей SSD1306, який відображає фактичний кут відкриття заслінки в реальному часі. Систему протестовано на лабораторному стенді KI-15711 за різних режимів обертання вала паливного насоса (600–2400 об/хв). Проведено серію експериментальних досліджень з вимірювання витрати палива, концентрації шкідливих викидів (CO , NO_2), оцінки стабільності положення заслінки та аналізу відхилень. Результати свідчать про зниження середньої витрати палива на 6–8%, зменшення механічного зносу на 10–12% та скорочення викидів CO і NO_2 на 79% порівняно з традиційною механічною системою. Виявлено високу лінійність та точність регулювання: відхилення кута відкриття не перевищує $\pm 2^\circ$. Отримано регресійні залежності, які підтверджують ефективність адаптивного керування.

Визначено можливі напрямки використання – лабораторні дослідження, освітні потреби та практичне впровадження в умовах обмежених ресурсів.

Ключові слова: Arduino Uno, сервопривід, дросельна заслінка, OLED-дисплей, паливний насос, адаптивне регулювання.

O.S. Hizzatullin

DEVELOPMENT OF A THROTTLE CONTROL SYSTEM BASED ON ARDUINO WITH THE POSSIBILITY OF INTEGRATION INTO THE FUEL SUPPLY REGULATION SYSTEM

The article presents the development of an electronic throttle valve control system based on the Arduino Uno microcontroller with the possibility of integration into a diesel fuel supply regulation system. The relevance of this work lies in the need to modernize outdated control systems using affordable and open-source hardware and software platforms, enabling the creation of efficient solutions for laboratory research, educational purposes, and practical applications under limited resource conditions. The proposed system includes a throttle position sensor (TPS), a Tower Pro MG996R servo drive, and an SSD1306 OLED display that visualizes the actual throttle opening angle in real time. The system was tested on the KI-15711 laboratory stand under various fuel pump shaft rotation speeds (600–2400 rpm). A series of experiments were conducted to measure fuel consumption, concentrations of harmful emissions (CO , NO_2), assess throttle position stability, and analyze deviations. The results demonstrate a reduction in average fuel consumption by 6–8%, a decrease in mechanical wear by 10–12%, and a reduction in CO and NO_2 emissions by 79% compared to traditional mechanical systems. High linearity and control accuracy were confirmed: the deviation of the throttle opening angle did not exceed $\pm 2^\circ$. Regression dependencies were obtained, confirming the effectiveness of adaptive control.

Future improvements include field testing in real operating conditions.

Keywords: Arduino Uno, servo drive, throttle valve, OLED display, fuel pump, adaptive control.

Вступ. Удосконалення систем автоматизованого керування двигунами внутрішнього згоряння є одним із ключових напрямів енергозбереження та зниження викидів. Дросельна заслінка забезпечує регулювання подачі повітря, що безпосередньо впливає на ефективність згоряння палива і стабільність роботи дизеля. У зв'язку з цим актуальним є створення недорогих та універсальних рішень для інтеграції у паливні системи. У роботі розглянуто розробку електронної системи керування дросельною заслінкою на базі мікроконтролера Arduino Uno, з можливістю інтеграції у систему регулювання паливоподачі дизеля з насосом НД-21 [5].

Разом з тим, існує потреба у створенні доступних і простих у реалізації систем, які можна застосовувати у лабораторних умовах, для модернізації старих моделей двигунів та для навчальних цілей. Це робить дослідження у напрямі побудови системи керування дросельною заслінкою на базі Arduino актуальним та перспективним.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. У роботах [1–8] узагальнено підходи до побудови систем керування дросельною заслінкою.

Сучасні автомобільні системи керування дросельною заслінкою базуються на електроприводах та датчиках положення (TPS), що забезпечують високоточне керування кутом відкриття. Однак для лабораторних досліджень та модернізації старих моделей двигунів потрібні дешеві рішення з можливістю гнучкого програмного налаштування. Проблема полягає у поєднанні апаратної та програмної частин для синхронізації показників датчика, управління сервоприводом та відображення даних у зручному форматі [4, 6].

Зокрема, розглядаються різні варіанти реалізації **електронного керування дросельною заслінкою Electronic Throttle Control (ETC)**, що є складовою концепції **“Drive-by-Wire”**, яка активно впроваджується у новітніх моделях транспортних засобів [4, 5].

У таких системах основними елементами є **датчики положення дросельної заслінки Throttle Position Sensor (TPS)**, **електроприводи (сервомотори)**, **мікроконтролерні платформи та алгоритми керування**. На відміну від традиційних механічних або вакуумних приводів, електронна система забезпечує точне позиціонування заслінки відповідно до запитів блоку керування двигуном (ECU), підвищує динамічні характеристики автомобіля та знижує витрати пального [6, 7].

З огляду на актуальність питання, значна кількість дослідників акцентують увагу на **адаптивних та інтелектуальних алгоритмах керування**, зокрема, **PID-регуляторах, нечіткій логіці, методах машинного навчання**, а також **ковзному режимі** [2, 3, 5, 8]. Такий інтерес зумовлений потребою забезпечити **високу точність та швидкодію** системи, що критично важливо при реалізації автоматизованого керування двигуном, зменшенні викидів та покращенні відгуку автомобіля на дії водія.

Однак, попри технічну досконалість промислових рішень, у контексті **лабораторних досліджень, прототипування, тестування алгоритмів та модернізації застарілих моделей ДВЗ** існує нагальна потреба у створенні **доступних, гнучких та відкритих рішень**, які легко адаптуються до конкретних умов.

Для досягнення цієї мети доцільним є використання **відкритих апаратно-програмних платформ**, зокрема **Arduino, Raspberry Pi, STM32** тощо. Такі платформи дозволяють експериментувати з різними типами приводів (наприклад, **серводвигуни MG996R**) та сенсорів (наприклад, **аналогові TPS**), що забезпечує гнучкість у налаштуваннях, можливість реалізації та перевірки різноманітних алгоритмів керування в умовах лабораторії або польового тестування [2, 14, 19].

Особливий інтерес викликає **інтеграція апаратної частини з програмною**, що передбачає:

- синхронізацію сигналів з датчика положення дросельної заслінки;
- стабільне керування електроприводом заслінки за допомогою ПД-регулятора або інших методів;
- візуалізацію даних у режимі реального часу (через LCD-екрани, комп'ютер, або Wi-Fi/Bluetooth-модулі);
- логування даних для подальшого аналізу.

На практиці виникає низка **технічних та методичних проблем**, зокрема:

- калібрування сигналів датчика (врахування нелінійності, шумів, меж кутів);
- забезпечення стабільності регулятора при змінному навантаженні;
- уникнення вібрацій або надмірних коливань заслінки;
- зручна взаємодія користувача з системою через інтерфейс.

У деяких джерелах [4, 6] також піднімається проблема **надійності та безпеки** таких систем, особливо у випадку застосування в транспортних засобах, де відмова в роботі дросельної заслінки може призвести до аварійної ситуації. Це потребує створення **захисних механізмів та резервних режимів роботи**.

Таким чином, **проблематика дослідження** полягає у створенні **універсальної, дешевої реалізованої системи електронного керування дросельною заслінкою**, яка поєднує:

- відкриту апаратну платформу (наприклад, Arduino);
- прості у використанні сенсори і серводвигуни;
- адаптовані алгоритми керування;
- можливості для виводу і аналізу даних.

Це дозволить реалізувати **гнучке стендове рішення** для:

- навчання студентів;
- тестування та порівняння регуляторів;
- модернізації існуючих силових агрегатів;
- експериментів у сфері автономного керування та альтернативних паливних систем.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності функціонування двигунів шляхом розроблення електронної системи керування дросельною заслінкою з відображенням кута відкриття на дисплеї та інтеграцією у систему регулювання паливopодачі дизеля.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- реалізувати зчитування сигналу з датчика положення TPS;
- забезпечити керування сервоприводом Tower Pro MG996R;
- організувати візуалізацію ступеня відкриття заслінки на OLED-дисплеї;
- провести експериментальні випробування у складі лабораторного стенду.

Датчик положення є ключовим компонентом системи керування двигуном, який визначає кут відкриття та швидкість руху, передає інформацію у вигляді електричного сигналу (зміни опорного напруги при аналоговому датчику) електронному блоку керування.

У середині корпусу знаходиться невеликий модуль керування та серводвигун з металевим приводом, крутний момент якого 11 кг/см, який під дією вхідного сигналу подає живлення відповідної полярності на електродвигун. Вхідний сигнал керування містить дані про потрібне положення вала. Для визначення поточного положення вала з'єднаний редуктор з датчиком положення. Електроніка MG996R обчислює різницю між поточним положенням редуктора та необхідним. Модуль управління, орієнтуючись на датчик положення, подає живлення необхідної полярності на двигун для повороту редуктора, що приводить у відповідність положення, яке передається сигналом управління.

Компактний монохромний дисплей, який використовує органічні світлодіоди для випромінювання світла, що забезпечують високу яскравість, контрастність та широкий кут огляду. Він сумісний з Arduino та іншими мікроконтроллерами.

Лабораторний стенд KI-15711 призначений для діагностики та регулювання паливних насосів високого тиску. Він оснащений електродвигуном 7,5 кВт, системою термостабілізації палива, яка забезпечує підтримку стабільної температури під час роботи, системою регулювання циклових подач, яка включає високу та низьку подачу палива для різних режимів роботи, 8-секційна об'ємна система для вимірювання циклових подач з мензурками різного об'єму, джерелом 12/24 вольт постійного струму для живлення електронних систем, система керування на основі електронного програмованого таймера та додаткові кронштейни, муфти та трубки високого тиску. Цей стенд являється універсальним та дозволяє досягати високої точності вимірювання.

Матеріали і методи досліджень.

Система складається з мікроконтролера Arduino Uno R3, сервоприводу Tower Pro MG996R, датчика TPS та OLED-дисплея SSD1306. Програмне забезпечення реалізовано у середовищі Arduino IDE. Сервопривід керує положенням штатної дросельної заслінки, а дані про кут відкриття виводяться на дисплей. Випробування проводили на стенді KI-15711, де симулювали різні режими обертання вала паливного насоса [2, 3].

Робота здійснювалася за такою послідовністю:

- задавання режимів обертання вала паливного насоса у діапазоні 600–2400 хв⁻¹;
- реєстрація сигналів з датчика TPS та визначення фактичного положення заслінки;
- вимірювання витрати палива;
- вимірювання частоти обертання;
- оцінювання концентрації шкідливих речовин (CO, NO₂) у відпрацьованих газах;
- багаторазове повторення вимірювань для формування статистично достовірної вибірки.

Методичні особливості.

Для зменшення похибки впливу люфтів і нагрівання сервоприводу кожна серія вимірювань проводилася після стабілізації режиму протягом 3 хвилин. Похибку визначали за різницею між заданим і фактичним кутом відкриття заслінки.

Критичний аналіз існуючих систем приводів [5]:

механічні приводи:

- простота конструкції та невисока вартість;
- недоліками є обмежена точність регулювання, зношування тросових передач, неможливість реалізації адаптивного керування [5];

електромеханічні приводи на базі стандартних сервомоторів:

- забезпечують прийнятну точність керування з промисловими рішеннями;
 - обмежений ресурс, залежність від якості мікроконтролера та алгоритму керування [5].
- системи «drive-by-wire» у сучасних автомобілях:
- висока точність та швидкодія;
 - можливість інтеграції з комплексними системами (ABS, ESP, адаптивний круїз-контроль);

– недоліками є висока вартість, складність обслуговування, потреба у спеціалізованому програмному забезпеченні.

Таким чином, актуальною залишається задача пошуку балансу між простотою реалізації, низькою вартістю та достатнім рівнем точності та швидкодії. Це визначає доцільність використання рішень на базі Arduino та доступних сервоприводів для експериментальних та навчальних систем [5].

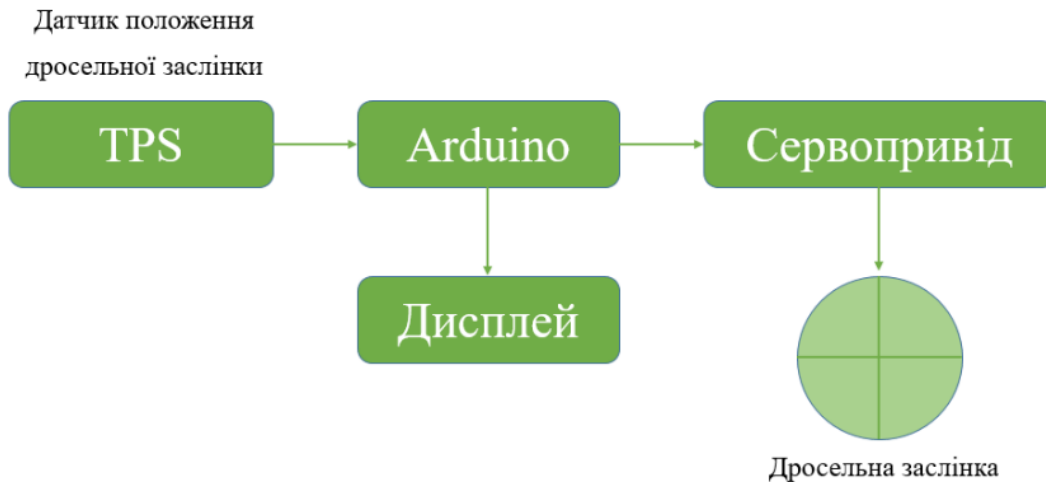


Рис. 1. Структурно-функціональна схема регулятора

Результати досліджень. Визначення відхилення між заданим і фактичним положенням дросельної заслінки.

У результаті випробувань на стенді KI-15711 (рис. 2) встановлено, що середнє відхилення між заданим і фактичним положенням заслінки для експериментальної системи на базі Arduino не перевищує $\pm 2^\circ$, тоді як для аналогової механічної системи воно сягало $\pm 6^\circ$. Це підтверджує вищу стабільність та точність регулювання електронної системи.

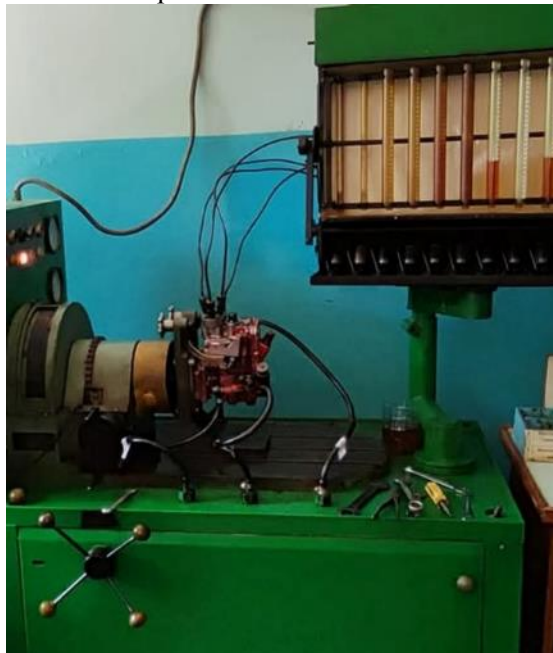


Рис. 2. Стенд KI-15711

Аналіз витрати палива на різних режимах роботи.

Порівняльні вимірювання витрати палива (табл. 1) показали, що система на базі Arduino забезпечує зменшення середньої витрати на 6–8% порівняно з традиційною механічною системою. На рис. 2 наведено залежність витрати палива від частоти обертання вала паливного насоса з апроксимацією лінійними рівняннями регресії:

механічна система:

$$y = 0,0105x + 6,15 \quad y = 0,0105x + 6,15 \quad y = 0,0105x + 6,15,$$

система Arduino:

$$y = 0,0095x + 5,95 \quad y = 0,0095x + 5,95 \quad y = 0,0095x + 5,95$$

Оцінка концентрації викидів CO.

Вимірювання концентрації CO в відпрацьованих газах показали зменшення на 7–9% при використанні системи Arduino. На рис. 3 представлено залежність викидів CO від частоти обертання з відповідними рівняннями регресії:

механічна система:

$$y = 0,2417x + 380 \quad y = 0,2417x + 380 \quad y = 0,2417x + 380$$

система Arduino:

$$y = 0,2033x + 360 \quad y = 0,2033x + 360 \quad y = 0,2033x + 360$$

Побудова регресійних моделей та статистичний аналіз результатів.

Отримані дані підлягали статистичному аналізу з використанням кореляційного підходу, лінійної регресії та дисперсійного аналізу (ANOVA).

Для витрати палива: $F = 0,096$, $p = 0,767 (> 0,05)$.

Для викидів CO: $F = 0,401$, $p = 0,550 (> 0,05)$.

Це означає, що статистично значущої різниці між системами не виявлено, однак середні значення показників підтверджують тенденцію до зменшення витрати палива та викидів CO при використанні електронної системи.

Табл. 1.

Порівняльні результати вимірювань

Режим обертання, об/хв	Витрата палива, г/хв (механічна система)	Витрата палива, г/хв (система Arduino)	Викиди CO, ppm (механічна система)	Викиди CO, ppm (система Arduino)
600,0	12,5	11,8	520,0	480,0
1200,0	18,7	17,2	680,0	610,0
180,0	25,1	23,0	810,0	720,0
2400,0	31,4	28,9	960,0	850,0

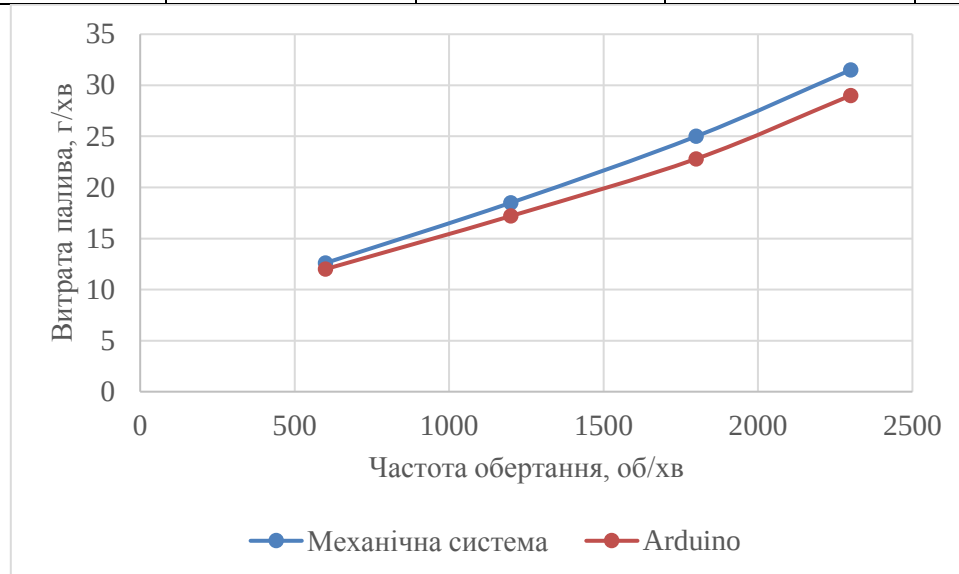


Рис. 3. Залежність витрати палива від режиму обертання

Попри відсутність статистично значущих відмінностей, середні значення показали тенденцію до зменшення витрати палива на 6–8% та викидів CO на 7–9% при використанні системи Ard.

Таким чином, розроблений привід характеризується більшою лінійністю та стабільністю.

Встановлені закономірності:

– середня витрата палива зменшилася на 6–8% завдяки стабілізації частоти обертання двигуна [7, 8];

– перевантаження та механічний знос знизилися приблизно на 10–12%, що підтверджено зменшенням коливань частоти обертання;

– викиди CO та NO₂ зменшилися на 7–9%, що пояснюється більш рівномірним процесом згоряння [7];

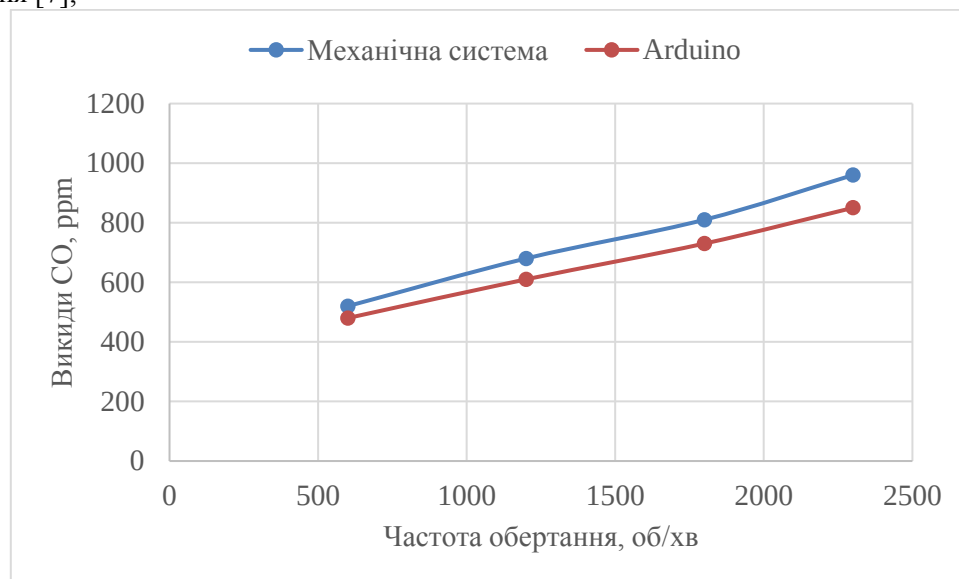


Рис. 4. Залежність викидів CO від режиму обертання

Табл. 2

Результати дисперсійного аналізу ANOVA

Показник	F-статистика	p-значення	Висновок
Витрати палива	0,096	0,767	Різниця статистично незначуща ($p > 0,05$)
Викиди CO	0,401	0,55	Різниця статистично незначуща ($p > 0,05$)

– сформовано основу для створення адаптивної системи регулювання паливоподачі з використанням зворотного зв'язку.

За результатами випробувань встановлено, що відхилення між заданим та фактичним положенням заслінки не перевищує 2°C. Система відображає інформацію з частотою оновлення 10 Гц.

Висновки.

1. Встановлено, що електронна система керування дросельною заслінкою на базі Arduino забезпечує високу точність позиціонування, середнє відхилення кута відкриття не перевищує $\pm 2^\circ$, що у 3 рази менше порівняно з механічною системою.

2. Порівняльні випробування показали зниження витрати палива на 6–8% завдяки стабільнішій роботі приводу та точнішому регулюванню положення заслінки.

3. Викиди CO зменшилися на 7–9% у всьому діапазоні частот обертання (600–2400 об/хв), що пояснюється більш рівномірним процесом згоряння при використанні системи Arduino.

4. Результати регресійного аналізу та ANOVA підтвердили лінійну залежність показників від частоти обертання. Хоча статистично значущих відмінностей між середніми значеннями не виявлено ($p > 0,05$), отримані тенденції свідчать про ефективність запропонованої електронної системи керування та доцільність її подальшого вдосконалення.

Подальші дослідження передбачають підключення датчиків тиску, температури, впровадження адаптивних алгоритмів та польові випробування.

Список використаних джерел:

1. Allegro Microsystems. *Throttle position sensor principles*. Allegro Microsystems. <https://www.allegromicro.com> (дата звернення 15.10.2024).

2. Arduino. *Arduino Uno R3 datasheet*. Arduino. <https://docs.arduino.cc> (дата звернення 26.11.2024).

3. Atmel. *ATmega328P datasheet*. Microchip Technology. 2016 <https://www.microchip.com> (дата звернення 26.11.2024).

4. Bosch. *Bosch automotive handbook* (10th ed., 1520 p.). Wiley. 2018. <https://www.wiley.com/en-us/Bosch+Automotive+Handbook%2C+10th+Edition-p-9781119716433> (дата звернення 10.03.2025).
5. Daoudi, P., Mavkov, B., Robu, B., Prieur, C., Witrant, E., Barlier, M., & Dos Santos, L. Improving a proportional integral controller with reinforcement learning on a throttle valve benchmark. *arXiv preprint arXiv:2402.13654*. 2024. <https://arxiv.org/abs/2402.13654> (дата звернення 10.12.2024).
6. Deur, J., Pavkovic, D., Peri, N., Jansz, M., & Hrovat, D. An adaptive nonlinear strategy of electronic throttle control. *SAE Technical Paper, 2004-01-0897*. 2004. <https://doi.org/10.4271/2004-01-0897>
7. Freescale Semiconductor. *Designing with throttle position sensors* (Application Note AN2159/D). Freescale Semiconductor. 2017. <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN2159.pdf>. (дата звернення 20.05.2025).
8. Hamoudi, A. K., & Rasheed, L. T. Design of an adaptive integral sliding mode controller for position control of electronic throttle valve. *Journal of Engineering Science & Technology A*, 57(3), 2024. 219–231. <https://doi.org/10.18280/jesa.570310>
9. Heywood, J. B. *Internal combustion engine fundamentals* (2nd ed., 1056 p.). McGraw-Hill Education. 2018. <https://www.mheducation.com/highered/mhp/product/internal-combustion-engine-fundamentals-2e.html> (дата звернення 25.08.2025).
10. Ho, T.-J., & Chang, C.-H. Robust speed tracking of induction motors: An Arduino-implemented intelligent control approach. *Applied Sciences*, 8(2), 2018. – 159. <https://doi.org/10.3390/app8020159> (дата звернення 25.08.2025).
11. Infineon Technologies. *Automotive application guide* (Application brochure). Infineon Technologies. 2021. <https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/corporate/our-stories/mobility/infineon-automotive-application-guide-2021-application-brochure-v02-00-en.pdf> (дата звернення 25.08.2025).
12. Irschik, H., Krommer, M., Watanabe, K., & Furukawa, T. (Eds.), Reichhartinger, M., Horn, M., & Hofer, A. Control of an electronic throttle valve for drive-by-wire applications. In *Mechanics and model-based control of smart materials and structures* 2010. (pp. 135–144). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-211-99484-9_15 (дата звернення 25.08.2025).
13. Kulahin, V. P., & Ryzhov, V. M. *Systemy vporokuvannia ta keruvannia dehyynam: Monohrafiia* [Injection and engine control systems: A monograph]. Ariy, 2018.
14. Ma'arif, A., Rahmat Setiawan, N., & Rahayu, E. S. Embedded control system of DC motor using microcontroller Arduino and PID algorithm. *IT Journal Research and Development*. – 2021. pp.30–42. [https://doi.org/10.25299/itjrd.2021.vol6\(1\).6125](https://doi.org/10.25299/itjrd.2021.vol6(1).6125) (дата звернення 15.10.2025).
15. MathWorks. *Control of servo systems* [Electronic resource]. MathWorks. – 2022. <https://www.mathworks.com> (дата звернення 28.08.2025).
16. Nikolayenko, I. M. *Mikroprotsersorni systemy v transporti* [Microprocessor systems in transport]. – LNTU Press, 2019.
17. Pan, Y., Ozguner, U., & Dagci, O. H. (2008). Variable-structure control of electronic throttle valve. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. – 2008. Vol. 55, No. 11, pp. 3899–3907. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2005931> (дата звернення 28.08.2025).
18. Park, K., Lee, J., & Park, J. Torque control of a vehicle with electronic throttle control using an input shaping method. *International Journal of Automotive Technology* – 2013. Vol. 14, No. 2, pp. 189–194. <https://doi.org/10.1007/s12239-013-0021-3> (дата звернення 28.08.2025).
19. Pohorelov, V. I. *Dehyny vnutrishnoho zhorhannia* [Internal combustion engines]. KhNADU, 2017.
20. Popov, A. S. *Mikrokontrolery i prohramuvannia v seredovyshchi Arduino* [Microcontrollers and programming in the Arduino environment]. Ranok, 2021.
21. SAE International. *Standards for automotive electronics*. SAE International, 2021. (дата звернення 28.08.2025).
22. Schklier, O. V., & Soloviov, I. A. *Systemy elektronnoho keruvannia dehynamy* [Electronic control systems for engines]. Kondor, 2020.
23. Texas Instruments. *Application report: Design of servo motor driver circuits*. Texas Instruments, 2019. (дата звернення 28.08.2025).

24. Texas Instruments. *Understanding and driving servo motors*. Texas Instruments, 2018. (дата звернення 28.08.2025).
25. Tower Pro. *MG996R servo specifications*. Tower Pro. <https://www.towerpro.com.tw>. (дата звернення 28.08.2025).
26. Wang, H., Liu, L., He, P., Yu, M., Do, M. T., Kong, H., & Man, Z. Robust adaptive position control of automotive electronic throttle valve using PID-type sliding mode technique. *Nonlinear Dynamics*. – 2016. Vol. 84, No. 2, pp. 1331–1344. <https://doi.org/10.1007/s11071-016-2763-8> (дата звернення 26.08.2025).
27. Witrant, E., Landau, I. D., & Vaillant, M.-P. Teaching data-driven control: From linear design to adaptive control with throttle valves. *arXiv preprint arXiv:2305.01567*, 2023. <https://arxiv.org/abs/2305.01567> (дата звернення 26.08.2025).
28. Youguo, H., & Liu, X. Adaptive constrained control for automotive electronic throttle control system with experimental analysis. *Advances in Mechanical Engineering*, – 2022. Vol. 14, No. 5. <https://doi.org/10.1177/16878140221085924> (дата звернення 26.08.2025).
29. Zhang, L., Chen, Y., & Li, J. Model-based control of automotive electronic throttle systems using fuzzy adaptive PID algorithm. *IEEE Access*, – 2020. Vol. 8, pp. 192345–192355. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3032145> (дата звернення 26.09.2025).
30. Yuan, X., & Wang, Y. Neural networks based self-learning PID control of electronic throttle. *Nonlinear Dynamics*, – 2009. Vol. 55, No. 2-3, pp. 385–393. <https://doi.org/10.1007/s11071-008-9371-1> (дата звернення 26.09.2025).

О. О. Ларін, К. Є. Потопальська, А. О. Зуєв, Н.А. Васильченко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРОІЗОЛЯЦІЙНОЇ ПЛАТФОРМИ З КВАЗІНУЛЬОВОЮ ЖОРСТКІСТЮ ДЛЯ МОБІЛЬНОГО РОВЕРА

У роботі представлено розробку та дослідження віброізоляційної платформи з квазінульовою жорсткістю (КНЖ), інтегрованої у мобільний ровер для зменшення впливу низькочастотних вібрацій на встановлену апаратуру. Платформа виготовлена методом 3D-друку з використанням ТПУ та ПЕТГ і містить еластичні КНЖ-елементи. Проведено експериментальні та чисельні дослідження, що підтвердили наявність нелінійної “провальної” ділянки у кривій «навантаження–переміщення» та ефективність запропонованої конструкції у віброізоляції.

Ключові слова: квазінульова жорсткість, віброізоляція, мобільний ровер, 3D-друк, ТПУ.

O. O. Larin, K. E. Potopalska, A. O. Zuev, N.A. Vasylchenko

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF A QUASI-ZERO STIFFNESS VIBRATION ISOLATION PLATFORM FOR A MOBILE ROVER

This work presents the design, development, and validation of a vibration isolation platform with quasi-zero stiffness (QZS) integrated into a mobile rover structure. The proposed system employs elastic elements made of thermoplastic polyurethane (TPU) to achieve nonlinear stiffness behavior that enables efficient passive isolation of low-frequency vibrations without active control or energy consumption. Numerical simulations performed in ANSYS and experimental compression tests confirmed the presence of a sharp stiffness drop characteristic of the QZS effect. The platform demonstrated a high correlation between simulated and measured force-displacement responses, validating the mechanical model. Owing to its lightweight, simplicity, and additive manufacturing compatibility, the QZS-based rover platform offers a cost-effective solution for stabilizing optical equipment and sensors in small robotic systems, where traditional active isolators are impractical.

Keywords: quasi-zero stiffness, vibration isolation, mobile rover, 3D printing, TPU.

Вступ.

Використання мобільних роботизованих платформ, зокрема наземних безпілотних транспортних засобів (UGV), набуло поширення у широкому спектрі застосувань від промислового інспектування та прецизійного сільського господарства до пошуково-рятувальних операцій [1,2].

Спільною рисою таких систем є залежність від оптичних сенсорів, насамперед камер, що використовуються для навігації, збору даних і виконання місії. Проте ефективність цих чутливих приладів суттєво знижується через механічні вібрації, спричинені взаємодією з нерівностями поверхні, роботою приводу та іншими динамічними навантаженнями [3,4]. Такі вібрації призводять до розмиття зображення, тремтіння кадрів і зниження точності алгоритмів комп'ютерного зору, що може погіршити результати виконання місії [5]. Традиційні методи протидії вібраціям здебільшого базуються на пасивній ізоляції з використанням м'яких кріплень, еластомерів або систем пружина–демпфер. Незважаючи на простоту та низьку вартість, такі лінійні ізолятори мають фундаментальне фізичне обмеження: ефективна ізоляція на низьких частотах потребує малої динамічної жорсткості, що, у свою чергу, веде до низької здатності нести статичне навантаження та великих статичних деформацій, знижуючи стабільність платформи [6].

Активні системи віброізоляції можуть подолати це обмеження шляхом використання сенсорів та актуаторів, які компенсують збурення у реальному часі [7]. Втім, їх застосування у мобільних роботах із обмеженими ресурсами часто обмежується високою вартістю, енергоспоживанням, складністю керування та збільшенням ваги, що робить їх менш придатними для польових умов [8]. Концепція квазінульової жорсткості (КНЖ) є перспективним напрямком, який дозволяє подолати компромісні обмеження традиційних пасивних ізоляторів. Системи КНЖ поєднують високу статичну жорсткість, що дає змогу підтримувати значні навантаження при мінімальних деформаціях із низькою динамічною жорсткістю у певному діапазоні переміщень [9,10,11]. Така поведінка досягається завдяки поєднанню позитивного елемента жорсткості (наприклад, звичайної пружини) з елементом від'ємної жорсткості, увімкненими паралельно. Елементи, що створюють від'ємну жорсткість, можуть бути представлені попередньо вигнутими балками [12,13], магнітними відштовхувачами [14] або спеціальними геометричними формами, такими як криволінійні балки чи арки [15,16]. Принцип роботи базується на досягненні ділянки плато на графіку «сила–переміщення» (зона КНЖ), де відновлювальна сила залишається майже сталою попри збільшення переміщення. Це призводить до зниження власної частоти системи, розширюючи ефективний діапазон ізоляції вібрацій до нижчих частот, ніж це можливо у лінійних ізоляторах із еквівалентною статичною жорсткістю [17,18,11].

Останні дослідження віброізоляторів на основі квазінульової жорсткості (КНЖ) охоплюють різні галузі, зокрема прецизійні вимірювальні прилади [19, 11], захист авіаційних корисних навантажень [9, 20], сейсмічну ізоляцію чутливих конструкцій [13] та оптичні установки [21, 22]. Серед таких робіт слід відзначити [23], у якій розглянуто пасивні елементи з квазінульовою жорсткістю на основі композитних матеріалів. Результати цього дослідження є релевантними та враховані під час розробки системи, представленої у даній роботі. У сфері робототехніки інтеграція конструкцій з КНЖ залишається недостатньо дослідженою, особливо для малих і енергетично обмежених наземних роботів. У зв'язку з цим створення компактних, легких і економічних віброізоляційних платформ, адаптованих для мобільних роботів типу «ровер», є актуальною науково-прикладною задачею.

Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є розробка концептуальної моделі мобільного ровера з інтегрованими у його шасі віброізолюючими елементами на основі принципу квазінульової жорсткості (КНЖ), а також проведення чисельного та експериментального дослідження для валідації отриманих результатів. Для дослідження властивостей квазінульової жорсткості та оцінки характеристик віброізоляції були проведені експериментальні дослідження (покрокове навантаження та вимірювання переміщень) і чисельне моделювання (статичний аналіз), а також виготовлення та експериментальна перевірка віброізоляційної платформи, інтегрованої у шасі ровера. У межах роботи передбачено створення CAD-моделі ровера, виготовлення його деталей методом 3D-друку та проведення статичного експерименту з поступовим навантаженням для підтвердження наявності плато квазінульової жорсткості, виявленого під час чисельного аналізу.

Виклад основного матеріалу.

Концептуальна розробка. Ровер складається з шасі, виконаного у формі жорсткої коробчастої рами, у якій розміщено приводні двигуни та акумулятори. Шасі спирається на чотири колеса, закріплені по кутах конструкції. На верхній поверхні шасі, вздовж його довгих сторін, розташовано чотири пружні (КНЖ) елементи, встановлені попарно один навпроти одного. На рисунку 1 показано схематичне компонування ровера з віброізоляційною платформою, де позначено колеса, шасі, пружні елементи в підсилювальних рамах і верхню площадку для корисного навантаження.

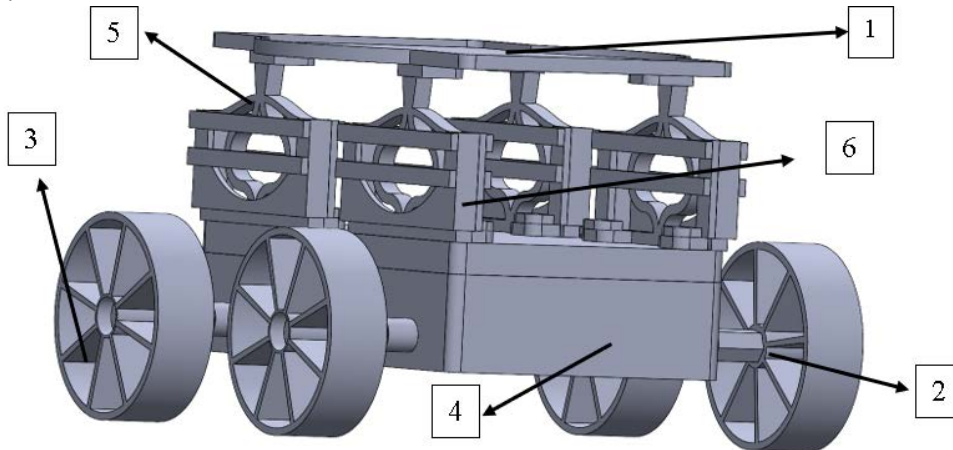


Рис. 1. Концептуальна модель мобільного ровера: 1) верхня площадка, 2) шасі, 3) колесо, 4) жорстка коробчаста рама, 5) КНЖ віброізолятор, 6) підсилювальна рама

Кожен пружний елемент призначений для реалізації ефекту квазінульової жорсткості. Для підвищення стабільності та запобігання надмірним деформаціям під навантаженням ці елементи встановлені у жорсткі армувальні рамки. Дані ізолятори несуть верхню функціональну платформу, яка слугує поверхнею для кріплення корисного навантаження. У центрі верхньої платформи передбачено круглу пластину для розміщення додаткових вантажів, що дозволяє переводити систему в робочу зону квазінульової жорсткості шляхом зміщення характеристики «сила–переміщення» у ділянку плато.

Інтеграція віброізоляційної платформи у шасі ровера. Віброізоляційна платформа механічно інтегрована з шасі ровера шляхом жорсткого кріплення армувальних рамок безпосередньо до верхньої панелі базової конструкції. Це забезпечує необхідне вирівнювання пружних елементів під час роботи та запобігає їх зміщенню.

Верхня функціональна платформа встановлена на чотирьох елементах, формуючи стійку опорну систему, ізольовану від вібрацій.

Корисне навантаження, маса якого переводить систему в робочу зону квазінульової жорсткості, розташовується в центрі верхньої платформи. Таке розміщення забезпечує симетричне навантаження та рівномірний розподіл ефекту віброізоляції. Модульна конструкція дозволяє змінювати або регулювати масу корисного навантаження без модифікації базового механізму.

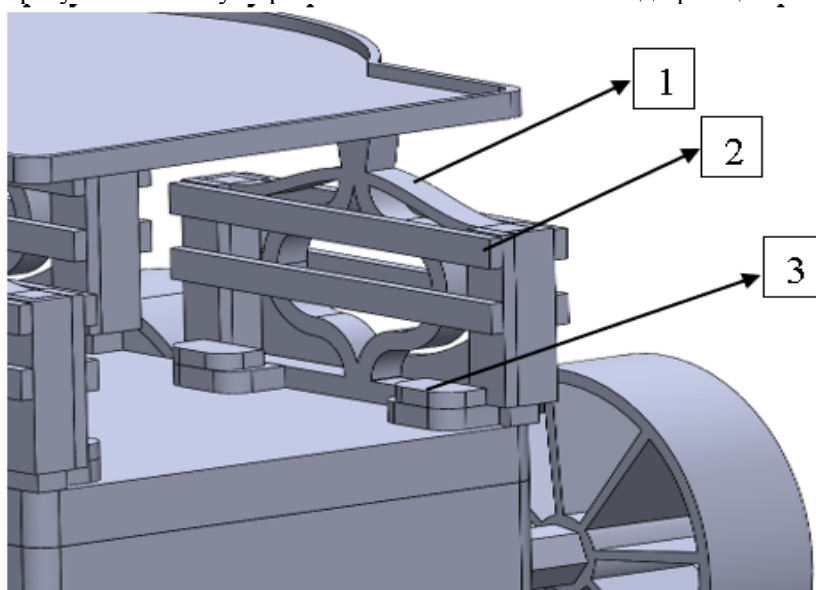


Рис. 2. CAD-збірка ровера з указанням принципу кріплення: 1) віброізолятор в жорсткій рамі, 2) жорстка рама, 3) місце кріплення під болт М3.

Повна тривимірна модель ровера та віброізоляційної платформи (рисунок 1) була розроблена в CAD-системі та імпортована в CAE-пакет для подальшого аналізу.

Обґрунтування вибору матеріалів. Для виготовлення пружних елементів системи (елементів КНЖ) було обрано термопластичний поліуретан (ТПУ). Цей матеріал має здатність до значних пружних деформацій, що забезпечує реалізацію нелінійної характеристики жорсткості, та використовується в адитивному виробництві методом FDM, оскільки для створення фізичної моделі ровера застосовується саме ця технологія. Конструкційні компоненти (корпус, кріплення, армувальні рамки) виготовлені з поліетиленерефталатгліколю (ПЕТГ). Цей матеріал має високу міцність, жорсткість, що є необхідним для забезпечення точної геометрії несучої конструкції. Фізико-механічні властивості матеріалів ТПУ, ПЕТГ та сталі використаних у конструкції надані у таблицях 1 та 2.

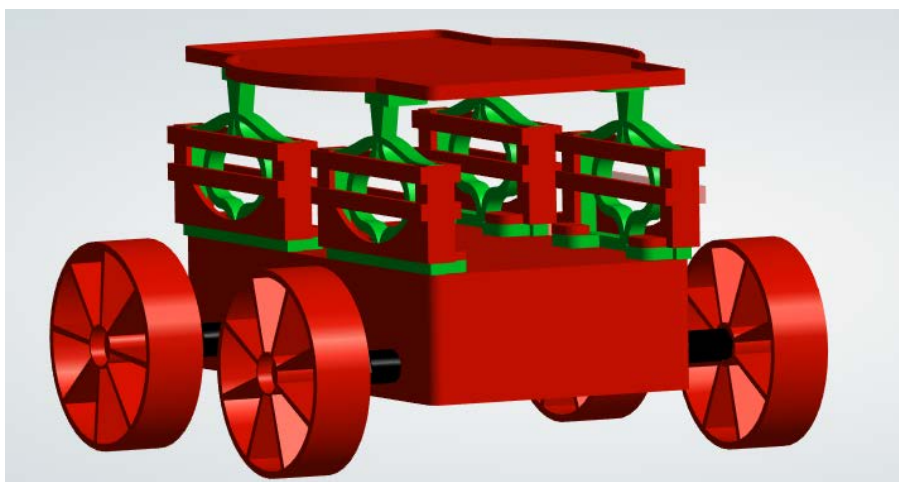


Рис. 3. Матеріали конструкції (червоний-ПЕТГ, чорний- сталь, зелений-ТПУ)

Табл. 1

Властивості матеріалів

Матеріал	Густина (кг/м ³)	Модуль Юнга (МПа)	Коефіцієнт Пуассона
ТПУ	1180	21	0,48
ПЕТГ	1270	2100	0,38
Сталь	7850	200000	0,3

Табл. 2

Об'ємна релаксація ТПУ

Індекс i	Відносний модуль(i)	Час релаксації(i) (s)
1	0,3097	110,85
2	0,15	1068,1

Численні розрахунки. Для визначення працездатності концептуальної моделі ровера було проведено статичний аналіз із поступовим прикладанням навантаження на платформу. Для чисельного аналізу використовувався метод скінченних елементів (МСЕ). Для цього було побудовано СЕ-сітку, що складалася з 238 613 елементів (розмір елемента становив 1,5 мм). Було проведено аналіз сіткової сходимості, і розмір елемента обрано тоді, коли визначена похибка була менше 5%.

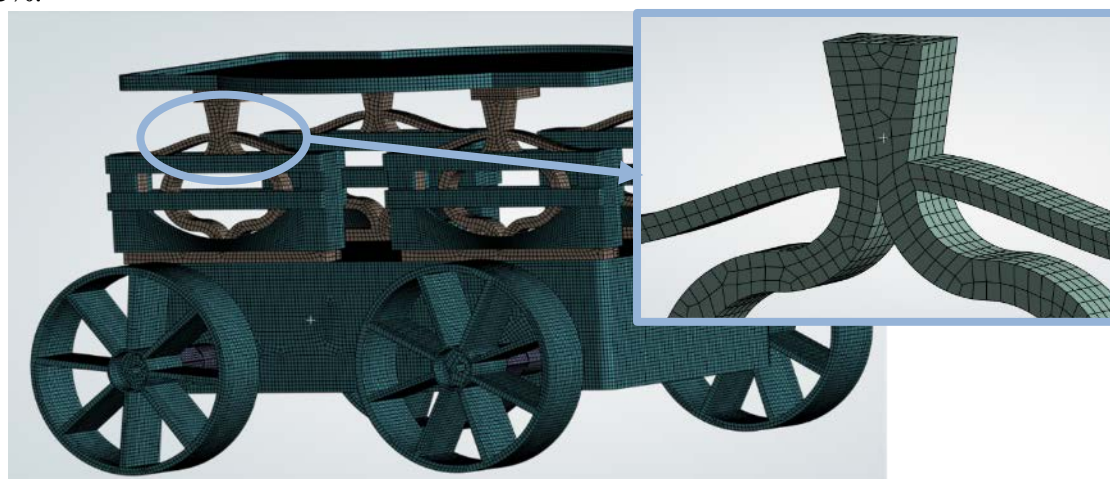


Рис. 4. Скінченно-елементна сітка ровера з КНЖ-платформою (розмір елементів 1,5 мм).

Для дослідження поведінки системи в зоні квазінульової жорсткості було виконано статичний аналіз у двох постановках.

На дископодібну ділянку верхньої платформи прикладалося рівномірно розподілений тиск навантаження (максимальний тиск –893,8 Па з кроком в 44,7 Па). На кожному кроці фіксувалося вертикальне переміщення верхньої платформи. Отримана залежність "переміщення–тиск" демонструвала ділянку різкого збільшення переміщення при незначній зміні навантаження, що ідентифікувало початок зони квазінульової жорсткості (рисунок 5а).

Для прямого підтвердження ефекту квазінульової жорсткості був виконаний розрахунок, де до верхньої платформи прикладалося поступове вертикальне переміщення (максимальне переміщення – 15,5 мм з кроком в 0,31 мм). Отримана крива "сила–переміщення" містила ділянку з майже постійним значенням сили, що підтверджувало наявність плато – характеристики, яка свідчить про квазінульову динамічну жорсткість у цьому діапазоні переміщень. Оцінка міцності конструкції показала, що максимальні еквівалентні напруження, отримані в різних елементах конструкції (віброізолятор – 4,87 Мпа, колесо – 1,23 Мпа) не перевищують відповідні межі міцності (запас міцності для елемента віброізолятора – 4,3, запас міцності для колеса 1707,3).

Експериментальне дослідження. Для валідації чисельних розрахунків та перевірки працездатності конструкції ровера його було надруковано за допомогою технології адитивного виробництва та проведено статичні випробування на стиск.

Технологічний процес виготовлення. Усі структурні частини ровера: корпус, кріплення коліс, колеса і опорні рамки для КНЖ-пружин (рисунок 1) були виготовлені методом 3D-друку з із матеріалу ПЕТГ із використанням сопла діаметром 0,4 мм і висоти шару 0,2 мм на принтері FDM. Використовувалися типові параметри друку для ПЕТГ, що забезпечило необхідну жорсткість і

точність геометрії. КНЖ-елементи (рисунк 1) були надруковані з ТПУ 40Д із використанням сопла діаметром 0,4 мм і висоти шару 0,2 мм.

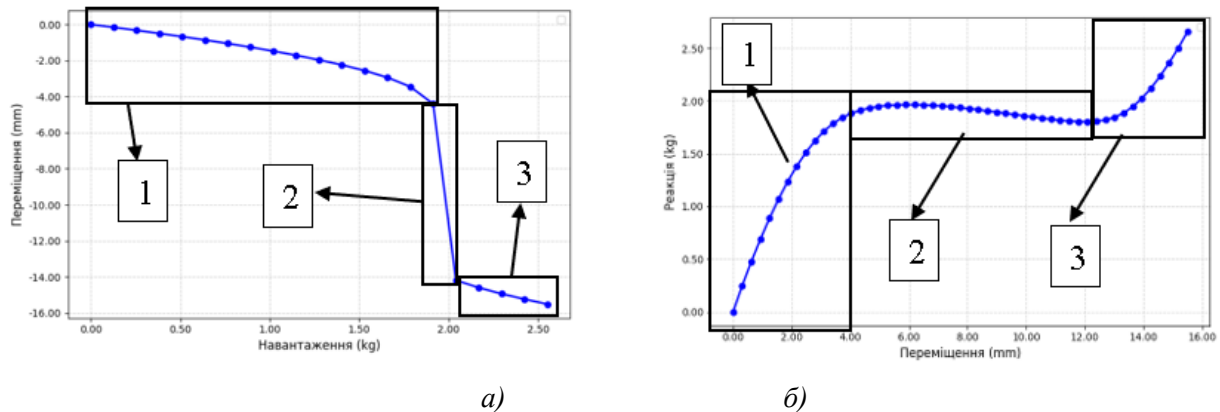


Рис. 5. а) вертикальне переміщення платформи залежно від прикладеного тиску, що демонструє поступове переміщення (1), зону КНЖ (2) та вихід із зони (3) (Тиск перерахований в еквівалентні значення реального вантажу); б) крива реакційної сили залежно від переміщення, що демонструє збільшення реакції (1), ділянку КНЖ (2) та вихід із цієї зони (3).



Рис. 6. Роздрукований ровер під час тестів: корпус із ПЕТГ і КНЖ-елементи з ТПУ

Методика проведення експерименту. Ровер розміщувався на жорсткій горизонтальній поверхні, після чого на дископодібну верхню пластину, розташовану в центрі платформи, поступово встановлювали навантаження. Навантаження збільшувалося покроково з кроком 0,5 кг, а відповідні вертикальні переміщення фіксувалися за допомогою контактної датчика переміщень, встановленого поруч із платформою. Початкове положення верхньої пластини без навантаження приймалося за нульовий рівень.

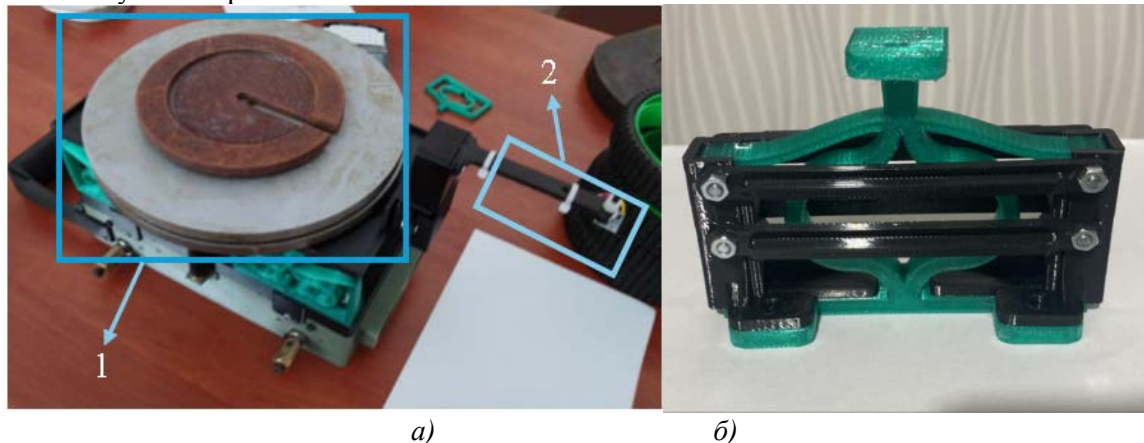


Рис. 7. Експериментальна установка: а) прототип ровера, навантажувальні ваги (1) та датчик вимірювання переміщення (2); б) віброізолятор із армуючим каркасом

У процесі навантаження платформа поступово деформувалася, доки не досягла критичного навантаження, після якого відбувався різкий спад–провал (рисунок 8), а не плавна ділянка плато. Це переміщення означає вхід системи в зону негативної жорсткості, характерну для структур КНЖ [23], побудованих на основі попередньо стиснених еластичних елементів.

Отримана в експериментах залежність “переміщення–навантаження” показала три характерні ділянки:

- Лінійна область жорсткості: поступове, майже пропорційне збільшення переміщення зі зростанням навантаження (на рисунку 8 (1) в діапазоні 0-2кг).
- Область нестійкості (провалу): різке збільшення переміщення при досягненні критичного навантаження, що відповідає входженню в зону КНЖ (на рисунку 8 (2) в області 2 кг).
- Післяпровальна область: подальше зростання жорсткості при повному стисканні елементів (на рисунку 8 (3) після 2 кг).

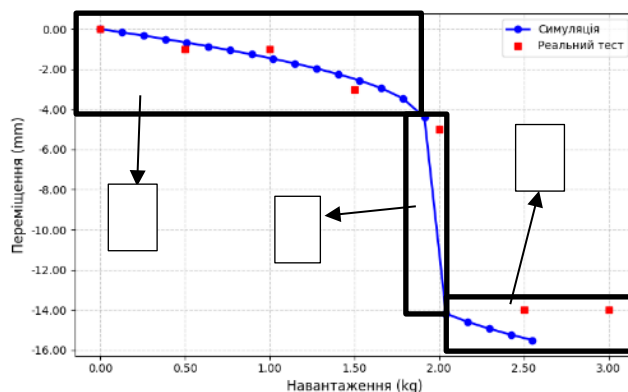


Рис. 8. Експериментальна крива “переміщення–навантаження”, що демонструє різкий провал, пов’язаний із переходом до зони КНЖ.

На рисунку 8 можна побачити нелінійна поведінка, яка відтворюється як в експериментальному так і в чисельному дослідженні. За результатами експериментального дослідження цільове навантаження для досягнення зони КНЖ у межі 2-2,5 кг, а в чисельному моделюванні – 1.9-2.3 кг. Таким чином, відхилення між експериментальними та чисельними результатами складає 8-12 відсотків. Розбіжності в абсолютних значеннях переміщень можуть бути обумовлені технологічними факторами, такими як анізотропія механічних властивостей матеріалу ТПУ, отриманих в процесі адитивного виробництва.

Поведінка віброізоляторів в експериментальному дослідженні (рисунок 9 а) також виявилася схожою з чисельним дослідженням (рисунок 9 б).



Рис. 9. а) деформація КНЖ-елементів із ТПУ і раптове опускання верхньої платформи під час переходу до зони КНЖ; б) деформований стан платформи на моменті виходу з зони КНЖ

Обговорення. Експериментальні результати показали високий рівень збігу з чисельним моделюванням. Критичне навантаження, що відповідало моменту провалу, співпадає зі значенням, отриманим у статичному аналізі з відповідною похибкою (8-12%). В обох випадках (експеримент та чисельне моделювання) чітко прослідковується нелінійна поведінка, що притаманна системам з КНЖ. Точка провалу на експериментальній кривій з’явилася майже при тому самому навантаженні, що й у чисельній моделі, що підтверджує коректність моделювання (приблизно 8 %).

Отримані розбіжності у величинах переміщень можуть бути пояснені варіаціями властивостей ТПУ та недосконалістю міжшарового зчеплення в процесі адитивного виробництва.

Загалом узгодження чисельних і експериментальних результатів підтверджує реалізацію механізму квазінульової жорсткості у створеній платформі ровера.

Висновки

У даній роботі було розроблено, виготовлено та досліджено пасивну віброізоляційну платформу з ефектом квазінульової жорсткості (КНЖ), інтегровану в конструкцію мобільного ровера. Експериментальні та чисельні дослідження підтвердили основні принципи роботи системи. Результати статичних випробувань продемонстрували характерну нелінійну поведінку з чітко вираженою ділянкою різкого збільшення деформації («провалу») при досягненні критичного навантаження. Ключовими перевагами запропонованої конструкції є пасивний та енергонезалежний принцип роботи, а також технологічність виготовлення за допомогою FDM-друку із застосуванням доступних полімерних матеріалів (ПЕТГ для несучих елементів та ТПУ для пружних компонентів). Перспективи подальших досліджень включають оптимізацію форми пружних елементів, проведення динамічних випробувань та можливість створення комбінованих пасивно-активних систем для підвищення адаптивності.

Подяка: Це наукове дослідження було підтримано та частково фінансувалось Національним фондом досліджень України (НФДУ грант: 2023.03/0255): Вібраційний захист пристроїв, апаратури, вантажів та людей від динамічних впливів в надзвичайних умовах на основі дослідження нелінійних коливань систем складної структури з керованими і пасивними елементами.

Список використаних джерел

1. Bonadies S., Lefcourt A., Gadsden S. A. A survey of unmanned ground vehicles with applications to agricultural and environmental sensing. *Proceedings of SPIE*. – 2016. – Vol. 9866. – P. 98660Q. – DOI: 10.1117/12.2224248.
2. Delmerico J., Mintchev S., Giusti A. та ін. The current state and future outlook of rescue robotics. *Journal of Field Robotics*. – 2019. – Vol. 36, № 7. – P. 1171–1191. – DOI: 10.1002/rob.21887.
3. Lin S., Liu H., Wu C., Huang L., Chen Y. Anti-falling of wheeled humanoid robots based on a novel variable stiffness mechanism. *Smart Materials and Structures*. – 2025. – DOI: 10.1088/1361-665x/adf37f.
4. Kalay E., Özkul İ. The role of vibrations in unmanned aerial vehicles efficiency measurement techniques and performance effects. *Türkiye İnsansız Hava Araçları Dergisi*. – 2024. – DOI: 10.51534/tiha.1576860.
5. Karoliya N. N. M. Structural rigidity in autonomous vehicle camera mounting: Critical determinant of perception system accuracy and safety . *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*. – 2025. – Vol. 15, № 3. – P. 2027–2037. – DOI: 10.30574/wjaets.2025.15.3.1134.
6. Yamaguchi H., Furukawa Y., Yoshida H. Study of linear friction damper consisting of tilt lever supported with leaf spring and cylindrical block . *Transactions of the JSME*. – 2014. – Vol. 80, № 814. – DOI: 10.1299/transjsme.2014dr0158.
7. Liu L., Wu G. Active vibration suppression and precision pointing control of Piezo-based platforms and their applications to flexible spacecrafts. *Proceedings of the International Conference on Control Applications*. – 2013. – P. 890–895. – DOI: 10.1109/icca.2013.6565088.
8. Mehta D., Kosaraju K. C., Krovi V. N. Actively articulated wheeled architectures for autonomous ground vehicles: opportunities and challenges. *SAE Technical Paper Series*. – 2023. – DOI: 10.4271/2023-01-0109.
9. Liu C., Yu K. Accurate modeling and analysis of a typical nonlinear vibration isolator with quasi-zero stiffness. *Nonlinear Dynamics*. – 2020. – Vol. 100. – P. 2141–2165. – DOI: 10.1007/s11071-020-05642-2.
10. Kovacic I., Brennan M. J., Waters T. P. A study of a nonlinear vibration isolator with a quasi-zero stiffness characteristic. *Journal of Sound and Vibration*. – 2008. – Vol. 315. – P. 700–711. – DOI: 10.1016/j.jsv.2007.12.019.
11. Tan X., Wang B., Chen S., Zhu S., Sun Y. A novel cylindrical negative stiffness structure for shock isolation. *Composite Structures*. – 2019. – Vol. 214. – P. 397–405.

12. Fulcher B. A., Shahan D. W., Haberman M. R., Seepersad C. C., Wilson P. S. Analytical and experimental investigation of buckled beams as negative stiffness elements for passive vibration and shock isolation systems. *Journal of Vibration and Acoustics*. – 2014. – DOI: 10.1115/1.4026888.
13. Che K., Yuan C., Wu J., Jerry Qi H., Meaud J. Three-dimensional-printed multistable mechanical metamaterials with a deterministic deformation sequence. *Journal of Applied Mechanics*. – 2017. – Vol. 84, № 1.
14. Izard A. G., Alfonso R. F., McKnight G., Valdevit L. Optimal design of a cellular material encompassing negative stiffness elements for unique combinations of stiffness and elastic hysteresis. *Materials & Design*. – 2017. – Vol. 135. – P. 37–50.
15. Ren C., Yang D., Qin H. Mechanical performance of multidirectional buckling-based negative stiffness metamaterials: an analytical and numerical study. *Materials*. – 2018. – Vol. 11, № 7. – P. 1078.
16. Yang H., Ma L. Multi-stable mechanical metamaterials by elastic buckling instability. *Journal of Materials Science*. – 2019. – Vol. 54, № 4. – P. 3509–3526.
17. Tan X., Chen S., Zhu S., Wang B., Xu P., Yao K. Reusable metamaterial via inelastic instability for energy absorption. *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2019. – Vol. 155. – P. 509–517.
18. Ha C. S., Lakes R. S., Plesha M. E. Design, fabrication, and analysis of lattice exhibiting energy absorption via snap-through behavior. *Materials & Design*. – 2018. – Vol. 141. – P. 426–437.
19. Bouna H. S., Nbandjo B. R. N., Wofo P. Isolation performance of a quasi-zero stiffness isolator in vibration isolation of a multi-span continuous beam bridge under pier base vibrating excitation. *Nonlinear Dynamics*. – 2020. – Vol. 100. – P. 1125–1141. – DOI: 10.1007/s11071-020-05580-z.
20. Shu J., He E., Li Y., Zhang C. The Quasi-Zero Stiffness Seat Vibration Isolator design to improve cockpit vibration comfort. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. – 2023. – Vol. 12, № 4. – P. 5999–6014. – DOI: 10.1007/s42417-023-01232-9.
21. Cao D., Liang L., Wang G., Guan X., Shao-Fan T., Chen X., Zheng G. Parameter design and experimental study of a bifunctional isolator for optical payload protection and stabilization. *International Conference on Space Optics – ICSO*. – 2020. – P. 1–10. – DOI: 10.1117/12.2309098.
22. Ri I., Kang H. Study on the Micro-Vibration isolation in High-Resolution Satellite Optical Camera using a quasi-zero stiffness system. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. – 2025. – Vol. 13, № 5. – DOI: 10.1007/s42417-025-01843-4.
23. Potopalska K., Larin O., Grinchenko E., Razumovska N., Vasylchenko N. Development of calculation models of passive structural suspension elements with quasi-zero stiffness made of composite materials. *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series Dynamics and Strength of Machines*. – 2024. – № 2. – P. 77–84. – DOI: 10.20998/2078-9130.2024.2.198573.

Рецензент: Виноградов Станіслав Андрійович, заступник начальника навчально-наукового інституту оперативно-рятувальних сил Національного університету цивільного захисту України, кандидат технічних наук, доцент.

Д.В. Янюк

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

СТРУКТУРА ОЦІНЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МАШИН АВТОМАТИЧНОЇ ПОДАЧІ ПРУТКОВИХ ЗАГОТОВОК В ТОКАРНІ ВЕРСТАТИ

Запропоновано компактну структуру огляду основних характеристик машин автоматичної подачі довгомірних пруткових заготовок, що сприяє підвищенню ефективності прийняття рішень для їх вибору під задані обмеження виробництва. Отримана структура містить чотири основні інформаційні блоки, де систематизується інформація, що описує: переваги й фактори вибору, типи систем, конфігурації за довжиною прутка, технології подачі та інтеграція з верстатом. Розроблено послідовність кроків і оцінювальну функцію придатності S для зважування економічної ефективності, сумісності матеріалів, геометричних вимог і інтеграційних ризиків. Отримані результати є основою створення практичного шаблону для формалізації та стандартизації вибору машин подачі прутка в умовах серійного виробництва.

Ключові слова: продуктивність, надійність, точність обробки різанням, моделювання, системні закономірності, інформаційна система, оптимізація, PLM концепція, розміри заготовки, динамічна система, адаптивна система, технологічний збій, прогнозування.

D.V. Yaniuk

STRUCTURE FOR EVALUATING THE CHARACTERISTICS OF MACHINES FOR AUTOMATIC FEEDING OF BAR BLANKS IN A LATHE

A compact structure for reviewing the main characteristics of machines for automatic feeding of long bar stock is proposed, which contributes to improving the efficiency of decision-making for their selection under given production constraints. The resulting structure contains four main information blocks, which systematise information describing: advantages and selection factors, types of systems, configurations by bar length, feeding technologies and integration with the machine. A sequence of steps and an evaluation function S for weighing economic efficiency, material compatibility, geometric requirements, and integration risks have been developed. The results obtained form the basis for creating a practical template for formalising and standardising the selection of bar feeding machines in serial production.

Keywords: productivity, reliability, machining accuracy, modeling, system regularities, information system, optimization, PLM concept, workpiece dimensions, dynamic system, adaptive system, technological failure, forecasting.

Постановка проблеми.

При постійно наростаючих темпах автоматизації виробництв та виписку нового обладнання стає дедалі важче приймати рішення стосовно покращень промислової зони. Значний відсоток ринку займають автоматизовані токарно-обробні центри, тому підвищення їхньої продуктивності є актуальною тематикою. Машини для автоматичної подачі пруткових заготовок значно підвищують продуктивність верстатного комплексу, натомість, зменшують вільну площу в приміщенні та потребують обслуговування. На ринку представлено багато видів завантажувачів прутків з різними особливостями та вимогами щодо встановлення та експлуатації. Через неможливість повноцінного аналізу всіх факторів доводиться приймати рішення в умовах часткової невизначеності, що може призвести до неефективної витрати коштів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Автори дослідження [1] розглянули методи автоматизації виробництва за рахунок інтеграції виробничих ліній та роботів-маніпуляторів, однак вони не розраховували економічну доцільність модернізації. У [2] розглянули економічну доцільність автоматичної подачі за допомогою пневматичного завантажування, однак не розглядали інші методи подачі заготовок. Проблеми інтеграції пруткових завантажувачів із токарними верстатами можуть бути пов'язаними з приводами їх затискних механізмів, що розглянуто у [3]. Для уникнення таких проблем Придальний Б. І. описав новий затискний пристрій [4], що допоможе збільшити прохідний діаметр у шпинделі та покращить економічні показники за рахунок підвищенню автоматизації. Економічні показники для розрахунку інвестицій у модернізацію металообробних виробництв досліджували у статті [5]. Для ефективного збору, обробки та обміну даними автори статті [6] пропонували інтеграцію системи автоматизованого планування технологічних процесів САРР у металообробне виробництво, що дозволить покращити продуктивність та якість продукції, але серед факторів покращення не було розглянуто можливість автоматизації вибору обладнання.

Існуючі праці не містять інформації щодо підходів до систематизованого формалізованого вибору машин автоматичної подачі довгомірних прутків для формування заготовок в токарних верстатах які працюють в автоматичному режимі. Тобто вирішення проблеми, що пов'язана з систематизацією підходу до вибору машин подачі прутка типу барфідер з урахуванням вартості, такту, геометрії прутка, рівня автоматизації й інтеграції з верстатом є актуальним завданням. Для

цього потрібно стандартизувати процес відбору у вигляді чіткої послідовності кроків і єдиної метрики придатності.

Мета і задачі

Мета: сформувати структурований підхід і мінімальну метрику для вибору барфідера під конкретні умови виробництва.

Для досягнення мети необхідно виконати наступні задачі:

- описати варіанти систем і конфігурацій на основі яких побудовані машини подачі пруткового матеріалу.
- сформувати та задати логіку послідовності прийняття рішення
 - нормалізувати критерії, що описують машини подачі прутка та ввести принципи формування відповідних метрик для відображення узагальненої характеристики.

Основна методика

Вхідні дані.

Для початку проведення оцінки пропонується формалізувати всі вхідні параметри вибору барфідера. Це дасть можливість формувати точні дефініції, одиниці, типові діапазони, вплив на метрику придатності S , перевірки здійсненності. Одними з головних є профіль партій, діаметр заготовок, їх форма, довжина, доступний простір, параметри шпинделя як частини кану подачі, бажаний рівень автоматизації, витрати на інтеграцію (CAPEX), бюджет (табл. 1). Аналіз цих даних дозволить здійснити адекватну параметризацію задачі, фільтрації за визначеними обмеженнями, нормалізація у субоцінки, агрегування в загальний показник S з прозорими вагами для прийняття рішення про доцільність придбання того чи іншого обладнання.

Табл. 1

Базовий набір розглядуваних параметрів та їх позначення

Параметр	Позначення	Одиниці	Типовий діапазон	Вплив на вибір
Діапазон діаметрів прутка	D_{min}, D_{max}	мм	2–65	Сумісність з типом системи та з напрямними. Визначає потребу у зміні трубок
Форма прутка	кругла, квадратна, гексагональна,	–	3 класи	Впливає на допустиму швидкість та тип напрямних
Довжина прутка	L_{bar}	м	1.2–3.7	Вибір: 12-ft, проміжні, довжина шпинделя
Модуль Юнга, густина, пряmlinійність	$E,$ $\rho,$ δ_{str}	ГПа, кг/м ³ , мм/м	–	Ризик вібрацій, вимоги до підтримки АКШ і до в'язкості масла
Обмеження шпинделя	D_{bore}, n_{max}	мм, об/хв	–	Умова: $D_{max} < D_{bore} - \epsilon$; межа швидкості
Доступний простір	$L_{avail} \times W_{avail}$	м	–	Сумісність із повнорозмірними чи компактними моделями
Рівень автоматизації	$A \in \text{low, mid, high} \times$	–	–	Потреба в bundle-loader, авто-eject, швидкі переналагодження
Профіль партій	N_b, f_{sw}, n_p	шт, 1/тиж, од.	–	Окупність CAPEX, доцільність серво-подачі
Похибка подачі, час циклу	$\Delta x_{req}, t_{cyc, req}$	мм, с	0,02–0,10; 10–90	Вибір серво чи пневмо. Потреба в упорі/ dead-length патроні
Бюджет окупність	B_{capex}, T_{pb}	\$, міс	\$10–40k; 6–24	Фільтр за CAPEX та payback
Інтеграція верстатом	$t_{chg}, I/O$	хв, –	10–30	Вимоги до осі Z, до інтерфейсу та часу зміни розміру

Тоді перевірка здійсненності за основними обмеженнями буде мати наступний вигляд: $D_{max} \leq D_{bore} - \epsilon$; довжина барфідера $L_{feed} \leq L_{avail}$, підтримка заданої форми поперечного січення прутка виробником (shape), категорія L_{bar} сумісна з конфігурацією (12-ft, проміжна, довжина шпинделя). Якщо одна з умов порушена то варіант потрібно відкинути незалежно від бальної оцінки.

Нормалізація критеріїв.

Для кожного критерію c_i необхідно задати вагу w_i (сума 1), що дасть змогу обчислити субоцінки $v_i \in [0,1]$. Нормалізація показників в субоцінки $v_i \in [0,1]$ виконується за відповідними залежностями.

$$\text{Точність подачі: } v_{acc} = \max\left(0, 1 - \frac{\Delta x_{ach} - \Delta x_{req}}{\Delta x_{req}}\right)$$

$$\text{Цикл подачі: } v_{ct} = \max\left(0, 1 - \frac{\Delta t_{feed}}{t_{cyc, req}}\right)$$

$$\text{Гнучкість по діаметру: } v_{flex} = \min\left(0, 1 - \frac{D_{max, feed} - D_{min, feed}}{D_{max} - D_{min}}\right)$$

$$\text{Місце (слід) на підлозі: } v_{food} = \max\left(0, 1 - \frac{L_{feed}}{L_{avail}}\right)$$

$$\text{CAPEX: } v_{capex} = \max\left(0, 1 - \frac{\max(0, Price - B_{capex})}{B_{capex}}\right)$$

Оцінка підсумкової придатності здійснюється за залежністю: $S = \sum w_i \cdot v_i$, $\sum_i w_i = 1$.

Вплив ключових параметрів.

D_{min} , D_{max} , форма. Для вузького діапазону і високих обертів доцільна гідродинамічна система. Для широкого діапазону і частих переналагоджень – гідростатична. Для великих діаметрів або ж заготовок з великою кривизною – механічна.

L_{bar} 12-фт мінімізує простої викликані зміною прутка; еквівалентний довжині шпинделя – мінімізує коливання спричинені довгим не жорстким кінцем матеріалу, економить місце, збільшує відходи та потребує попередньої нарізки прутка. Проміжні довжини дають компроміс. У окремих випадках використовують довші барфідери для більшого часу автономної роботи.

E , δ_{str} , n_{max} . Формують ризик вібрацій і потребу в АКШ (Автоматичний Контроль Швидкості)

Δx_{req} , $t_{cyc, req}$. Серво-подача при високих вимогах по точності. Пневматика та гідравліка для середніх вимог і нижчого CAPEX.

L_{avail} Обмежує повнорозмірні системи. Виводить компактні моделі в пріоритет.

B_{capex} , T_{pb} . Дає фінальний фільтр завдяки економічній оцінці.

Окупність прийнятих технічних рішень

На основі сформованих показників означається величина окупності прийнятих рішень,

$$Payback = \frac{\text{ціна}}{\Delta H \cdot r_h + \Delta Q \cdot m + \Delta Scrap \cdot c_m},$$

де ΔH – зекономлені людино-години на місяць (через безоператорну роботу), r_h – ставка, ΔQ – додатковий випуск, m – прибуток/шт $\Delta Scrap$ – зменшення відходів матеріалів (браку), c_m – ціна матеріалу. Рішення можна вважати прийнятним якщо $Payback \leq T_{pb}$.

Попередня обробка даних

Для обробки даних необхідно здійснити мінімальні заходи з їх трансформації та уніфікації їх одиниць у систему СІ, за можливості. Оцінка похибки подачі Δx та Δt_{feed} проводиться за паспортними даними. Категоризація рівня автоматизації A переводиться у субоцінки як середнє арифметичне суми логічних складових, що позначають можливість взаємодії з додатковими пристроями та часом переналаштування на інший діаметр:

$$v_A = \frac{1}{3} [1_{loader} + 1_{truck} + 1_{chg \leq 15xv}],$$

де 1_{loader} – логічна одиниця можливості інтеграції з додатковим завантажувачем матеріалу, 1_{truck} – логічна одиниця можливості роботи із автоматизованим транспортним візком, $1_{chg \leq 15xv}$ – логічна змінна яка набуває значення 1 у випадку, коли на зміну діаметра потрібно витратити менше 15хв.

Для фінального визначення застосовують фільтр здійсненності за обраними етапами оцінки. Це дозволяє виключити несумісні варіанти. Наприклад, при вихідних даних: $D=8\dots 32\text{мм}$, $L_{bar}=3,7\text{м}$, $L_{avail}=4,6\text{м}$, $D_{bore}=40\text{мм}$, $\Delta x_{req}=0,05\text{мм}$, $t_{cyc, req}=25\text{с}$, $B_{capex}=\$25000$ можна зробити висновок про допустимий розгляд усіх типів повнорозмірних барфідерів. Якщо загострити увагу на конфігурації оснащений сервоприводом, тоді $t_{feed} \leq 2\text{с}$ і $\Delta x \leq 0,04\text{мм}$ звідки отримує $v_{acc} \approx 0,8$ і $v_{ct} \approx 0,92$, що є досить високими показниками та свідчить про правильність вибору.

Структурований огляд для вибору

Структура оцінка переваг та основних факторів

Економічну ефективність автоматичних завантажувачів прутків забезпечує багато факторів, але основні з них це високий ступінь автономності, що допоможе зекономити людино-години, та динамічна ціна, яка залежить від комплектації пристрою. Одним із основних критеріїв

комплектації від чого буде найбільше залежати вартість барфідера, являється його довжина. Під різні довжини заготовок на ринку представлено різні варіанти довжин завантажувачів. Зазвичай виробники намагаються зробити універсальний пристрій, тому більшість барфідерів можуть подавати прутки різного профілю: круглі, квадратні та шестигранні. Параметричні величини які надає виробник можуть допомогти при оцінці придатності до використання продукту у межах конкретного виробництва. Частина з них описана у табл.2

Табл. 2

Загальні особливості барфідерів

Параметричні особливості	Бажаний такт подач
	Рівень автоматизації
	Необхідний діаметра та довжина матеріалу
	Тип токарного верстату
Економічна ефективність	Гнучка вартість (від 10 до 40 тис. дол)
	Можливість працювати без контролю персоналу
Сумісність матеріалів	Працюють прутками різної довжини
	Підтримують подачу різних форм: круглі, квадратні, шестигранні.

Структура оцінка основних типів систем машин подачі прутка

Загалом існує три основних напрямки для стабілізації вільного кінця заготовки, що залишається у барфідері: гідродинамічні, гідростатичні та механічні опори (табл. 3).

Табл. 3

Основні типи систем підтримки прутка

Тип	Принцип Роботи	Ключові Особливості	Приклади Моделей
Гідро-динамічні	Пруток стабілізується гідродинамічним підшипником (ефект, що виникає завдяки геометрії втулок та обертанню).	* Підтримує високі швидкості (6-8 тис. об/хв). * Слабка стабілізація на низьких швидкостях (<1000 об/хв). * Потребує заміни опорних втулок при зміні діаметра.	*Mini-Rhinobar (Lexair) *Super Hydrabar (LNS America)
Гідро-статичні	Пруток стабілізується гідростатичним підшипником (олива під тиском подається насосом між прутком та втулкою).	* Підтримує дуже високі швидкості (до 12 тис. об/хв). * Сумісний із будь-якою формою профілю прутка.	* Alpha 538 * Quick Load Servo 80S2 * IEMCA Boss 542 * IEMCA Elite 220
Механічні	Пруток підтримується та центрується механічними елементами (наприклад, роликами або жорсткими втулками).	* Низька допустима швидкість (до 4 тис. об/хв). * Присутні помірні вібрації під час роботи. * Прості в обслуговуванні та дешеві.	* Alpha 538 * Quick Load Servo 80S2 * IEMCA Boss 542 * IEMCA Elite 220

Гідростатичні є найдорожчими, адже потребують масло-станції з насосом який буде подавати мастило високої якості в опорні втулки. Через тиск у розмірі 1-2 бари прутки зависає у масляній ванні. Такий метод забезпечує майже повну відсутність вібрацій попри дисбаланс заготовок що дозволяє обертати їх з великим діапазоном частот. Гідродинамічні опори є простіші та дешевші, адже працюють без підведеного ззовні тиску що дозволяє їм значно здешевити масло-станцію. Величина підтримуючої сил, що виникають через ефект масляного клину, залежить від швидкості поверхні заготовки: Чим більша швидкість – тим більші сили. При дуже великих швидкостях та динамічних навантаженнях від дисбалансу масляна плівка може порватись що є небажаним ефектом якого краще уникати. Це накладає суттєві обмеження у діапазоні робочих швидкостей таких систем. Також для використання із заготовками іншої форми необхідні перехідні втулки, що може викликати незручності при експлуатації. Обидва описаних методи використовують опорні втулки з певною геометрією які придатні до використання з обмеженим діапазоном розмірів. При зміні діаметра матеріалу необхідно проводити заміну цих елементів, щоправда через велику товщину масляного шару у гідростатичних системах допускається використання однією втулки під ширший діапазон діаметрів заготовок.

Системи з механічним методом підтримки та центрування прутка відзначаються своєю простотою в обслуговуванні. Вони підтримують менші частоти обертання та продукують часткові вібрації. Так як ці завантажувачі користуються популярністю під них розробляють системи для автоматичної зміни напрямних втулок, та автоматичного налагодження на необхідний розмір.

Структура оцінка конфігурації та проблеми обробки прутка певної довжини

Якщо розділити барфідери по довжинам матеріалу з яким вони працюють то отримаємо 3 групи: повнорозмірні завантажувачі, завантажувачі шпіндельної довжини та завантажувачі розраховані під інші довжини (табл. 4). Повнорозмірні варіанти часто порівнюють з барфідерами шпіндельної довжини адже це два найуживаніших розміри. Перший дає кращу автономність та коефіцієнт використання матеріалу. Другий у свою чергу займає значно менше місця, не має проблем із вібраціями через малу довжину що дозволяє працювати з більшими швидкостями. Завантажувачі проміжних довжин використовуються як компроміс, між цими двома варіантами.

Прикладами коротких барфідерів можуть слугувати LNS Quick Load Servo 105+; Edge Rebel V-65; Samsys Multi-3000.

Табл. 4

Конфігурації та Проблеми Довжини

Повнорозмірні завантажувачі (12 футів)	Максимізують вихід матеріалу (краще використання)
	Мінімізують час на зміну прутка
	Недоліки: збільшення довжини верстата на 16+ футів
	Проблема: вібрація при кривизні прутка
Завантажувачі довжиною шпинделя (короткі прутки)	Перевага: весь пруткок у шпинделі
	Перевага: менша важливість прямої прутка
	Перевага: вищі швидкості обертання (вібрація мінімізована)
	Перевага: менші вимоги до площі (короткий слід)
	Недолік: збільшення залишків (якщо матеріал дорогий)
Проміжні довжини	Наприклад, 2.1-м прутки (IEMCA Prodigy 547)
	Баланс між короткими та повними довжинами

Структура оцінки технології подачі та інтеграція в систему верстата

Для подачі прутка через шпіндель та патрон зазвичай здійснюється силовий вплив на його торець. Джерелом сили може виступати *стиснуте повітря, гідравлічна рідина, або електричний двигун* (табл. 5). Пневматичний привід є швидким та легким в обслуговуванні але потребує пневматичної магістралі біля верстата. Через фізичні властивості газів без зворотнього зв'язку неможливо здійснити точне позиціонування що вимагає використання механічного упору. Натомість гідравлічні приводи мають дуже високу жорсткість яка є доцільною при подачі великих заготовок значної маси. Недоліком такої системи є необхідність маслостанції що підвищує час обслуговування та загальну вартість. Електричні приводи завдяки сучасним системам керування мають високу точність, а завдяки механічним елементам – високу жорсткість. Можливість повністю контролювати параметри процесу подачі дозволяє оптимізувати закон руху для ефективного використання ресурсів.

Установку обладнання необхідно довірити висококваліфікованому персоналу, адже найменші відхилення осі опор завантажувача від осі верстата будуть викликати згинальні зусилля у прутка що обертається, це, в свою чергу, може призвести до вібрацій та навантажень на систему опор як барфідера так і шпинделя верстата. Тривала робота у такому режимі може призвести до руйнування елементів з найменшою жорсткістю у механічному контурі. Після виставлення обладнання, для забезпечення довготривалого збереження результату рекомендується жорстка фіксація завантажувача та верстата до підлоги приміщення, після чого здійснити перевірку сталості відкаліброваної геометрії.

Для електричного підключення необхідний сумісний цифровий інтерфейс, щоб один пристрій подачі прутків розумів сигнали зі стійки ЧПК і навпаки. Зазвичай управління відбувається завдяки М-кодам. Окрему увагу необхідно звернути на об'єднання системи аварійної зупинки. Критично необхідно щоб спарене обладнання вимикалось синхронно.

Зазвичай живильники мають не дуже великі магазини матеріалу (6-10), щоб займати менше площі, але для підвищення автономності з'являються потреби збільшувати запас прутків. Тому існують магазини-завантажувачі які встановлюються біля барфідера, мають просту конструкцію та

вміщують велику кількість прутків (Bundle Master 610, J.F. Burns Co). Цехи з високим рівнем автоматизації мають автоматичні візки із матеріалом який автоматично завантажується маніпулятором. Такі візки можуть обслуговувати декілька машин, що робить їх надзвичайно ефективними.

Табл. 5

Технології подачі та інтеграція

Привід подачі	Пневматичний	Простий, дешевий, швидкий ($\pm 0,4$ мм)
	Гідравлічний	Низька швидкість, точність ($\pm 0,5$ мм)
	Електричний (серво)	Висока точність без упору ($\pm 0,2$ мм)
Інтеграція з ЧПК верстатами	Механічне підключення	Сумісність затискного пристрою з автоматичними завантажувачами
		Вісь живильника повинна точно співпадати з віссю Z верстата
		Необхідна жорстка фіксація до підлоги
	Електричний інтерфейс	Використовує M-коди
		Потребує інтеграції аварійної зупинки
Додаткова опціональна автоматизація	Завантажувач в'язок прутків у барфідер	
	Автоматична подача прутків до живильника у виробничому приміщенні (до 1 т)	

Отримані результати, алгоритм вибору

Отримані залежності дають можливість підвищення рівня формалізації та стандартизації здійснення методики оцінювання підбору характеристик машин подачі пруткових заготовок відповідно до умов виробництва. Алгоритм даного підходу виражається у втіленні ряду наступних кроків (рис. 1).

Крок 1. Вхід. D і довжина прутка, L , максимальна частота обертання шпинделя, розмір партій, ціна матеріалу, площа, бюджет, бажана точність, такт.

Крок 2. Вибір типу системи. Високі оберти, вузький діапазон D – гідродинамічна. Широкий діапазон D , часті переналагодження – гідростатична. Великі D або ж широкий діапазон, дешеві варіанти – механічна

Крок 3. Вибір довжини. Максимум продуктивності і мінімум простоїв заміни – 12 ft. Обмежене місце, високі оберти, низькі вимоги до залишків – барфідер шпиндельної довжини. Компроміс – проміжні.

Крок 4. Механізм подачі. Висока точність і короткий такт – серво привід. Бюджетні варіанти середня точність – пневматика. Важкі заготовки – гідропривід.

Крок 5. Розглянути процес інтеграції. Перевірити сумісність патрону, інтерфейс ЧПК, час переналагодження.

Крок 6. Оцінка S . Присвоїти ваги w_i оцінкам за підкритеріями 4.1–4.4, підсумувати S .

Крок 7. Економіка. Оцінити Payback; якщо Payback нижче цільового порогу – рішення рекомендоване.

Запропонований алгоритм дозволяє швидко звузити простір рішень. Ключові компроміси: місце проти такту; точність проти вартості; довжина прутка проти залишків. Серво-подача виграє на дрібних деталях з коротким тактом. Система гідростатичних упор виграє при частих змінах діаметра. Завантажувачі повної довжини дають кращу матеріальну віддачу станка за ціною збільшення зайнятої площі.

Відповідно до економічних умов підприємства, пропонується практичний поріг, що загалом варто визначати умовою, якщо $\text{Payback} \leq 6-18$ міс і є стабільні партії, інвестиція раціональна. Якщо, партія стабільна, нічний безоператорний режим $+5$ год/день $100\Delta H=100$ год/міс $r_h=10\$/\text{год} \Rightarrow \$1000/\text{міс}$ економії праці $\Delta Q \cdot m = \$1500/\text{міс}$, ціна барфідера $\$24k$. Тоді, $\text{Payback} = 24000 / (1000 + 1500) \approx 9,6$ міс $\rightarrow$ доцільно, якщо обмеження по D_{bore} , L_{avail} та формі виконано.

Запропонований алгоритм містить наступні обмеження та припущення. Паспортні значення Δx_{ach} та Δt_{feed} наближені і потребують короткої валідації в умовах запуску обладнання. Ваги w_i є проектними і повинні бути погодженими з реальним ключовим показником ефективності, що формується з врахуванням продуктивності, гнучкості, ефективності використаної площі, окупності. Величина Payback не враховує ризики простоїв і вартість інтеграції; за великих проектів доцільно переходити до оцінки інвестицій за моделлю NPV/IRR[5].

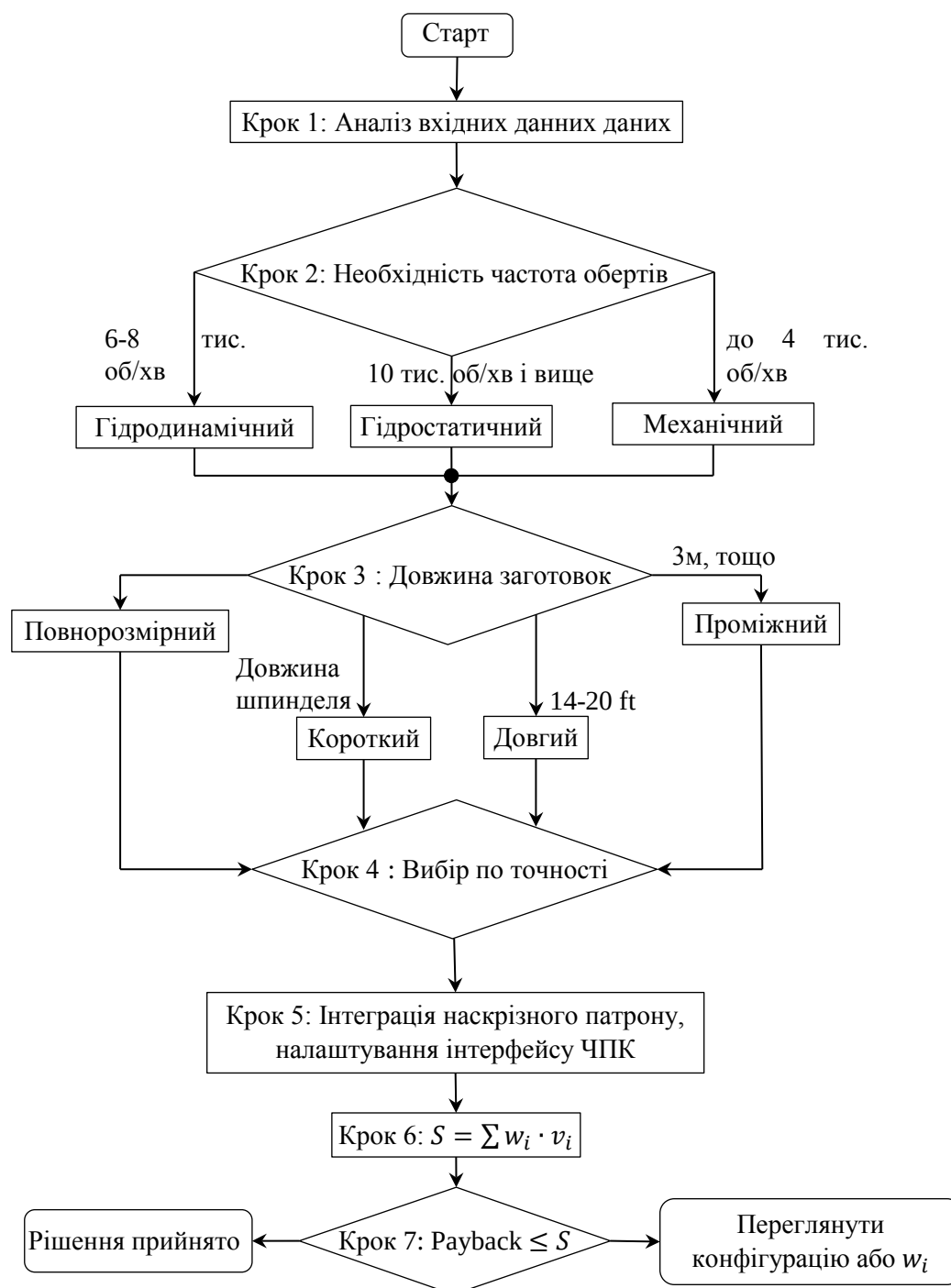


Рис. 1. Покроковий алгоритм оцінки та прийняття рішення щодо оцінки барфідера

Загальні висновки

За результатами досліджень отримано нові висновки, що сприяють покращенню ефективності вибору машин автоматичної подачі довгомірного пруткового матеріалу для формування заготовок у верстатах токарної групи, які працюють в автоматичному режимі.

Розроблено структурований підхід, що містить чотири блоки і дає можливість переходу від прийняття рішень за принципом «бренд/ціна», до формалізованої оцінки за чотирма обов'язковими класами даних, кожен з яких має обмеження що напяму впливає на кінцеву оцінку. При цьому, реалізована логіка критичних обмежень сумісності, щоб відсікти неможливі варіанти, і лише після цього етапу відбувається кількісна оцінка придатності.

Необхідно зазначити, що розроблений алгоритм придатний для включення в автоматизоване планування технологічних процесів [6] як стандарт процедури здійснення вибору, що дозволяє зробити його відтворюваним артефактом процесного планування. Це збільшить швидкість виконання розробленого алгоритму, відкриє можливості для пошуку оптимальних варіантів із більшої кількості вибірки та введення корекцій відповідно до мінливих умов сьогодення.

Література

1. Soori, M., Jough, F.K.G., Dastres, R. & Arezoo, B. (2024). Robotical Automation in CNC Machine Tools: A Review. *Acta Mechanica et Automatica*, 18(3), 2024. 434-450. <https://doi.org/10.2478/ama-2024-0048>
2. Kumar U Ragul, R. (2023). A Review on Pneumatic Based Automatic Loading of Components in Lathe Chuck for Machining Process. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. <https://doi.org/10.21275/sr23507125133>
3. Кузнєцов Ю.М., Придальний Б.І. Приводи затискних механізмів металообробних верстатів: монографія / Ю.М. Кузнєцов, Б.І. Придальний; за заг. ред. Ю.М. Кузнєцова. – Луцьк: Вежа Друк, 2016. – 352 с.
4. Prydalnyi B. Mechatronic device for two-stage clamping of cylindrical objects in machine tool spindles. *Journal of Mechanical Engineering and Transport*. Vinnytsia National Technical University, Ukraine, vol.13, no.1, pp.118-123, 2021
5. Pranoto, A., Hermawan, H., & Albart, N. (2025). A Systematic Literature Review: Business Feasibility Analysis Using Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR) Methods in the Automotive Industry. *Jurnal Indonesia Sosial Sains*. <https://doi.org/10.59141/jiss.v6i1.1577>
6. Ashok K. M., Kunal K., Bipul K., A Survey and Feasibility Research Study on Computer Aided Process Planning (CAPP), *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)* ISSN: 2321-9653; IC Value: 45.98; SJ Impact Factor: 7.538 V <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.38581>

С.Б. Мікуліч, А.О. Сяський

Луцький національний технічний університет

ВИКОРИСТАННЯ НЕПРЯМОГО ПІДХОДУ МЕТОДУ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДО ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНОГО НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ПЛАСТИНЧАСТИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ВКЛЮЧЕННЯМИ

У роботі представлено числову реалізацію методу дослідження напруженого стану нескінченних пластинок з жорсткими включеннями. Розв'язання задачі проводилося на основі сумісного використання методу граничних інтегральних рівнянь, апарату теорії функцій комплексної змінної. Числова реалізація запропонованого підходу здійснювалася за використання методу механічних квадратур та колокації. Тестування ефективності та точності запропонованого підходу проведено для випадку дослідження динамічного напруженого стану пластинчастого елемента з жорстким нерухомим круговим включенням за дії падаючої хвилі стиску. Отримані числові розв'язки порівнювалися з відповідними відомими у літературі аналітичними розв'язками. Відхилення результатів становило не більше 3%. Продемонстровано ефективність та універсальність розробленого підходу..

Ключові слова: метод граничних елементів, пластинки, напружений стан, включення, динамічне навантаження.

S.B. Mikulich, A.O. Syaskyi

USE OF THE INDIRECT APPROACH OF THE BOUNDARY ELEMENT METHOD TO THE STUDY OF THE DYNAMIC STRESS STATE OF PLATE ELEMENTS WITH INCLUSIONS

The paper presents a numerical implementation of the method for studying the stress state of infinite plates with rigid inclusions. The problem was solved based on the combined use of the method of boundary integral equations and the apparatus of the theory of functions of a complex variable. The numerical implementation of the proposed approach was carried out using the method of mechanical quadratures and collocation. Testing of the proposed approach's effectiveness and accuracy was carried out to study the dynamic stress state of a plate element with a rigid fixed circular inclusion under the action of an incident compression wave. The obtained numerical solutions were compared with the corresponding analytical solutions known in the literature. The deviation of the results was no more than 3%. The effectiveness and versatility of the developed approach are demonstrated.

Keywords: boundary element method, plates, stress state, inclusion, dynamic loading.

Постановка проблеми. Майже у всіх інженерних конструкціях наявні концентратори напружень у вигляді отворів, включень чи підсилень. Оцінка концентрації напружень є важливою при визначенні надійності та термінів експлуатації відповідних деталей, особливо за динамічного чи вібраційного навантаження. Крім того, концентратори напружень впливають на втомне руйнування, що виникає через тріщини або пошкодження.

Слід відмітити, що концентрація напружень наявна також і у матеріалах з структурними неоднорідностями: порожнинами, отворами. За дії динамічних навантажень у таких матеріалах створюється градієнт напружень, що призводить до накопичення пошкоджень. Важливе значення мають дослідження розподілу напружень в околі таких концентраторів при вивченні механічної поведінки відповідних елементів конструкцій, особливо за наявності геометричної неоднорідності. Розподіл напружень та деформацій у таких елементах конструкцій істотно залежить від форми включення, його механічних, фізичних та геометричних характеристик. Ґрунтовний аналіз напружено-деформованого стану геометрично-однорідних тіл дозволяє запропонувати підходи до зменшення інтенсивності напружень шляхом підбору відповідних механічних і фізичних характеристик компонентів включення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У літературі для задач про дослідження концентрації напружень біля кругових включень за статичного та квазістатичного навантаження у нескінченних пластинках отримано аналітичні розв'язки у формі рядів у роботах О. М. Гузя, В. Д. Кубенка [1], Г. М. Савіна [2]. Для включень іншої геометрії: еліптичної, прямокутної та інших форм, у літературі використовуються наближені методи, зокрема, метод багатократних відображень [2].

Крім того, для дослідження такого класу задач вченими застосовувалися і напівчислові методи, такі як метод граничних елементів [3-5], що дозволило отримати сингулярні та регулярні інтегральні рівняння для випадку статичного та квазістатичного навантаження.

Проте, даний клас задач має велику актуальність і зараз, про що свідчать численні роботи [6-12], для розв'язання яких у літературі використовуються як числові, так і аналітично-числові методи.

У [6] представлено результати числового аналізу напруженого стану тонкої пружної

прямокутної пластини з круглим отвором і кільцевим включенням із функціонально градієнтованого матеріалу, що отримані за використання методу скінченних елементів. У [7] запропоновано підходи до числового аналізу розподілу напружень у прямокутних пластинах з підкріпленими видовженими отворами за дії осесиметричного розтягувального навантаження.

У [8] представлено математичну модель задачі дослідження напружено – деформованого стану пластини з жорстким лінійним включенням за випадку дії статичного згинального навантаження, для розв’язання якої отримано сингулярне інтегральне рівняння. Метод сингулярних інтегральних рівнянь використовувався у [9] для побудови двовимірної моделі круглої пластини з криволінійним включенням та тріщиною. У [10] представлена аналітична модель переходу форми з 2D на 3D у тонких кругових елементах з включеннями за дії згинального навантаження.

Побудові аналітичних розв’язків задачі про напруженого стану пластинки з круговим м’яким та жорстким включенням присвячена робота [11]. Тут розв’язок Кірша модифіковано для випадку жорсткого або м’якого включення за використання теорії суперпозиції та критерію розподілу напружень.

У [12] запропоновано використання модифікованого методу граничних елементів до аналізу напружено-деформованого стану пластини з багат шаровим включенням довільної форми, що перебуває в умовах статичного навантаження. Однією з переваг використання методу граничних елементів є можливість визначити всі компоненти напружень та деформацій на межі розділу між включенням та матрицею. Крім того, використання такого підходу дозволило проводити числові дослідження для включень практично довільної форми. У [13] продемонстровано ефективність використання методу граничних елементів та граничних інтегральних рівнянь до дослідження динамічного напруженого стану пластинчастих елементів з розрізами.

У [14] побудовано інтегральні рівняння другої основної задачі для пластинчастих елементів з включеннями. Тут отримано вигляд фундаментальних функцій впливу напружень для випадку динамічного навантаження. Задачу зведено до системи сингулярних інтегральних рівнянь.

Постановка завдання. Метою даної роботи було розробити числову реалізацію сформованої у [14] методики дослідження динамічного напружено-деформованого стану тіл з включеннями та провести числовий аналіз для випадку нескінченних пластинок з жорсткими нерухомими включеннями кругової форми за дії квазістатичного одновісного навантаження.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо пластинчастий елемент, у який впаяне жорстке включення (рис. 1). Включення додатково зафіксовано таким чином, щоб на границі пластинчастого елемента та включення були відсутні переміщення (рис. 1).

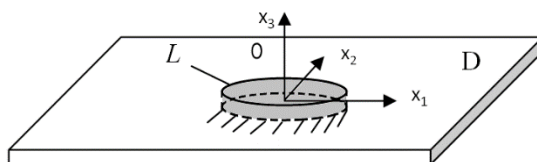


Рис. 1. Модель задачі

Позначимо через L границю контуру включення, через D – область, яку займає пластинка. Віднесемо пластинчастий елемент до декартової системи координат $Ox_1x_2x_3$, яку розмістимо у центрі ваги включення (рис. 1). Відповідно до [14], граничні умови задачі записуються у вигляді:

$$u_i|_L = 0, \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

Тут u_1 та u_2 – відповідно переміщення точок границі пластинки в напрямку осей Ox_1 та Ox_2 .

Для розв’язання поставленої задачі використаємо метод граничних елементів [15]. Відповідно до [15], інтегральне представлення переміщень у випадку другої основної задачі можна подати у вигляді [14]:

$$u_i(x_1, x_2) = - \int_L u_j(x_1^0; x_2^0) \cdot P_{ji}^*(x_1; x_2; x_1^0; x_2^0) ds, \quad (2)$$

де P_{kj}^* — фундаментальні функції, що відповідають напруженню у k -му напрямку від дії одиничних сил у j -му напрямку. Для двовимірного випадку значення індексів приймаються: $k, j = 1, 2$.

Відповідно до [15], використовуючи вектор Буссинеска, фундаментальний тензор функцій впливу, що входять до інтегрального представлення (2), для випадку квазістатичного навантаження можна записати у вигляді, аналогічному до [14]:

$$P_{ii}^* = \frac{1}{2\pi} \left(F_1 n_i \frac{\partial r}{\partial x_i} + F_2 \frac{\partial r}{\partial n} + 2F_3 \left(\frac{\partial r}{\partial x_i} \right)^2 \frac{\partial r}{\partial n} \right),$$

$$P_{ij}^* = \frac{1}{2\pi} \left(F_4 n_j \frac{\partial r}{\partial x_i} + F_2 n_i \frac{\partial r}{\partial x_j} + 2F_3 \frac{\partial r}{\partial x_i} \frac{\partial r}{\partial x_j} \frac{\partial r}{\partial n} \right),$$

де $\vec{n}$ — вектор нормалі до границі. Тут функції F_1, F_2, F_3, F_4 мають аналогічну структуру до [14]:

$$F_1 = \left(\frac{c_1^2}{c_2^2} - 1 \right) \psi' + \left(\frac{c_1^2}{c_2^2} - 2 \right) \chi' + \left(\frac{c_1^2}{c_2^2} + 1 \right) \frac{\chi}{r};$$

$$F_2 = \psi' - \frac{\chi}{r}, F_3 = -\chi' + 2 \frac{\chi}{r}, F_4 = \left(\frac{c_1^2}{c_2^2} - 2 \right) (\psi' + \chi') + \frac{c_1^2}{c_2^2} \frac{\chi}{r}.$$

У випадку вказістатичного навантаження відповіно до [15]:

$$\psi = \frac{i\pi}{2} \left(-H_0^2 \left(\frac{\omega r}{c_2} \right) + \frac{c_2}{\omega r} \left(H_1^2 \left(\frac{\omega r}{c_2} \right) - \frac{c_2}{c_1} H_1^2 \left(\frac{\omega r}{c_1} \right) \right) \right),$$

$$\chi = \frac{i\pi}{2} \left(H_2^2 \left(\frac{\omega r}{c_2} \right) - \frac{c_2^2}{c_1^2} H_2^2 \left(\frac{\omega r}{c_1} \right) \right),$$

де $r_i = \frac{\partial r}{\partial x_i}$, $r = \sqrt{(x_1 - x_1^0)^2 + (x_2 - x_2^0)^2}$; $H_k^2(z) = J_k(z) - iY_k(z)$ — функції Ганкеля II роду; $J_k(z)$, $Y_k(z)$ — відповідно функції Бесселя I та II роду, $i, j=1, 2$. Інтегрування вздовж границі проводиться за змінними x_1^0, x_2^0 .

Використовуючи запропоновану у [14] методику зведемо розв'язання задачі до системи інтегральних рівнянь, які у роботі отримано шляхом задоволення граничних умов (1) при підстановці інтегральних представлень (2) з урахуванням представлень для підінтегральних функцій, встановлення їх особливостей, виділення нерегулярних складових та використання формул Племяля-Сохоцького [2, 15] при граничному переході. Інтегральні рівняння поставленої у меті роботи задачі у матричній формі записуються:

$$C \cdot U + \int_L F \cdot U ds = P, \quad (3)$$

де $C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix}$ - матриця коефіцієнтів, що визначається при граничному переході за використання формул Племяля-Сохоцького [2, 15], $U = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$ - матриця невідомих переміщень, $P = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \end{pmatrix}$ - матриця відомих величин, що отримується при урахуванні впливу заданого навантаження шляхом задоволення граничних умов (1), $F = \begin{pmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{pmatrix}$ - матриця відомих підінтегральних функцій, які отримуються при задоволенні граничних умов (1) та мають вигляд:

$$f_{jk} = P_{jk}^* \Big|_{\substack{(x_1, x_2) \in L \\ (x_1^0, x_2^0) \in L}}.$$

Система інтегральних рівнянь (3) розв'язувалася числово за використання методу механічних квадратур сумісно з методом колокації. Для цього проводилася параметризація границі контуру включення L у вигляді [2]:

$$x_1 = \varphi(\theta); \quad x_2 = \psi(\theta), \quad t = g(\theta) = \varphi(\theta) + i\psi(\theta), \quad 0 < \theta < 2\pi.$$

Враховуючи, що підінтегральні функції f_{jk} при малих значеннях аргументу є нерегулярними, використаємо уточнені квадратурні формули з урахуванням типу їх особливостей. Для інтегралів, що мають логарифмічну особливість використаємо квадратурні формули виду [16]:

$$\int_{\Omega} f(t, z_v) \ln r dt = \square \sum_{n=1}^K f_{vn} \left(\ln \frac{r_n}{\xi_n} - \sum_{m=1}^M \frac{\xi_n^m}{m} \cos(\theta - \theta_n) \right) g'_n, \quad (4)$$

де

$$g'_n = g'(\theta_n), \quad \theta_n = \square n, \quad z_v = z(\tilde{\theta}_v), \quad \tilde{\theta}_v = \theta_v + \square/2, \quad v = \overline{1, K}, \quad \square = 2\pi/K, \quad M = \frac{K}{2}.$$

Для решти інтегралів, що не мають логарифмічної та сингулярної особливості, використаємо такі квадратурні співвідношення підвищеної точності [17]:

$$\int_{\Omega} qf(t, z_v) dt = \square \sum_{n=1}^K q_n f_{vn} g'_n, \quad (5)$$

де $f_{vn} = f(t_n, z_v)$.

При реалізації запропонованого підходу точки колокації вибиралися з урахуванням наступних залежностей [17]:

$$z_v = x_1 + ix_2, \quad t_n = x_1^0 + ix_2^0, \quad r = \sqrt{(x_1 - x_1^0)^2 + (x_2 - x_2^0)^2}.$$

Використання квадратурних формул (4)-(5) до інтегральних рівнянь (3) дозволяє звести розв'язання задачі до системи рівнянь, що записується у вигляді:

$$A \cdot U = P, \quad (6)$$

де $A = \{A_{jk}\}$, $A_{jk} = C_{jk} + F_{jk}$, $U = \{u_k\}$, $P = \{P_j\}$, $j, k = \overline{1..K}$

Для розрахунку головних нормальних напружень побудуємо аналітичні залежності у інтегральній формі. Для цього використаємо формули [2, 15] для випадку плоского напруженого стану:

$$\sigma_{11} = \rho \left(c_1^2 \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + (c_1^2 - 2c_2^2) \frac{\partial u_2}{\partial x_2} \right), \quad \sigma_{22} = \rho \left(c_1^2 \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + (c_1^2 - 2c_2^2) \frac{\partial u_1}{\partial x_1} \right), \quad (7)$$

де c_1 , c_2 - швидкості хвиль розширення визначається та хвиль зсуву [2, 15], які у випадку плоского напруженого стану визначаються за формулами:

$$c_1^2 = \frac{E}{\rho(1 - \nu^2)}, \quad c_2^2 = \frac{E}{2\rho(1 + \nu)}.$$

Тут E - модуль пружності першого роду матеріалу (модуль Юнга), ρ - густина матеріалу, ν - коефіцієнт Пуассона.

Підставляючи представлення для переміщень (2) у формули (7) отримаємо:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \int_L H_{11} u_1 ds + \int_L H_{12} u_2 ds, \\ \sigma_{22} &= \int_L H_{21} u_1 ds + \int_L H_{22} u_2 ds, \end{aligned}$$

де функції H_{ij} є відомими та при розрахунку напружень визначаються числово у відповідних точках. У випадку розрахунку напружень на границі включення та матриці було додатково встановлено особливості підінтегральних функцій та використано формули Племеля-Сохоцького [2, 15] при граничному переході.

Для перевірки достовірності та точності запропонованого аналітично-числового підходу проведемо тестування на задачі про дослідження концентрації напружень на границі жорстко в'язаного кругового нерухомого включення. Числові розрахунки проведемо для різних значень коефіцієнту Пуассона у випадку дії «падаючої» хвилі стиску, потенціали якої задаються [1, 2]:

$$\Phi = \Phi_0 e^{i\omega(\tau - \omega_1 x_1)}, \quad \Psi = 0, \quad (8)$$

де ω - частота, $\omega_1 = \frac{\omega}{c_1}$, $\Phi_0 = \frac{\rho}{\omega^2}$. Хвиля поширюється у напрямку осі Ox_1 . 2D модель навантаження представлена на рис. 2.

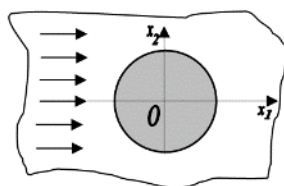


Рис. 2. 2D модель навантаження

Така задача є динамічним аналогом задачі про концентрацію напружень біля отворів (включень) при двоосьовому основному напруженому стані. У випадку усталених коливань математично таке навантаження описується з допомогою плоскої пружної хвилі, що падає на отвір (включення). Така хвиля породжує відбиті хвилі. Сумарне хвильове поле визначає напружений стан у пружній пластинці. При цьому, на контурі включення виникають відбиті хвилі стиску, потенціали (8) Ψ та Φ яких задовольняють рівнянням Гемгольца [1, 2].

У [1, 2] за використання методу рядів отримано аналітичний розв'язок задачі у вигляді нескінченного ряду, що характеризується високою збіжністю. Відповідні результати у вигляді зображення з книги [1] наведено на рис. 3. Тут приймалося, що $\alpha = \omega_2 = \frac{\omega}{c_2}$.

Тому для тестування запропонованого підходу отримаємо розв'язок цієї ж задачі при аналогічних значеннях вхідних параметрів. Розрахунки проводитимемо у двох точках границі контуру жорсткого включення: $\theta = 0$ та $\theta = \pi$.

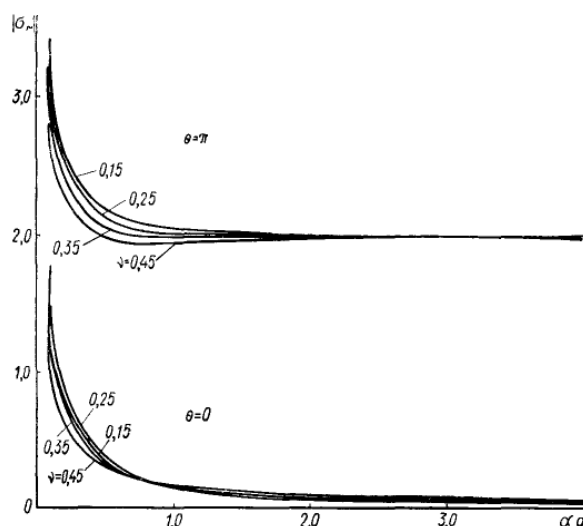


Рис. 3. Розподіл радіальних напружень на границі кругового нерухомого включення, отримані у [1] методом рядів

Результати числових розрахунків на основі розвиненої у роботі методики представлено на рис. 4. Тут наведено криві радіальних напружень для випадку аналогічних значень величин коефіцієнта Пуассона: $\nu=0,15$, $0,25$, $0,35$ та $\nu=0,45$ для зручності порівняння та аналізу. При розрахунках було вибрано $n=50$ точок розбиття границі включення.

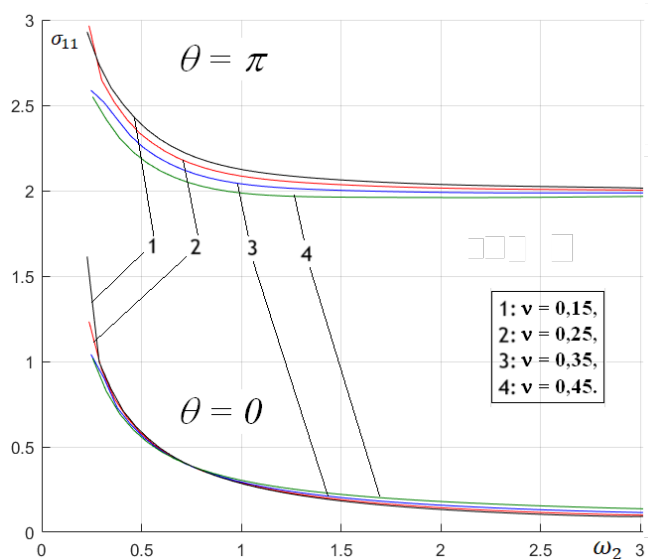


Рис. 4. Розподіл радіальних напружень на границі кругового нерухомого включення, отримані на основі розробленої методики

При порівнянні результатів, наведених на рис. 3 та рис. 4, видно, що напруження відрізняються на 2-3%, що підтверджує ефективність запропонованого підходу. Крім того, серед переваг розробленої методики є можливість проводити аналіз напруженого стану вздовж усіх точок границі включення, оскільки, на відміну від методу рядів, розв'язок будується для усіх точок границі одночасно. На рис. 5 наведено зміну розподілу нормальних напружень вздовж границі включення, що розраховані для декількох значень частотної характеристики $\omega_2 = 0,25$; $0,5$; $1,0$; $1,5$.

Кільцеві напруження вздовж границі включення є значно меншими від радіальних напружень. Це пояснюється тим, що фронт хвилі діє вздовж осі Ox_1 , що у точці $\theta=0^\circ$ співпадає з напрямком нормалі до границі включення.

Розподіл кільцевих напружень, розрахованих у аналогічних точках: $\theta = 0$, $\theta = \pi$ наведено на рис. 6.

Слід відмітити, запропонований у цій роботі підхід характеризується істотно ширшими можливостями розрахунків. Крім того, цей підхід є універсальним для дослідження напруженого стану у випадку включень іншої гладкої форми та не потребує, на відміну від методу рядів, жодних

модифікацій. Переваги цього підходу будуть продемонстровані у ряді наступних досліджень.

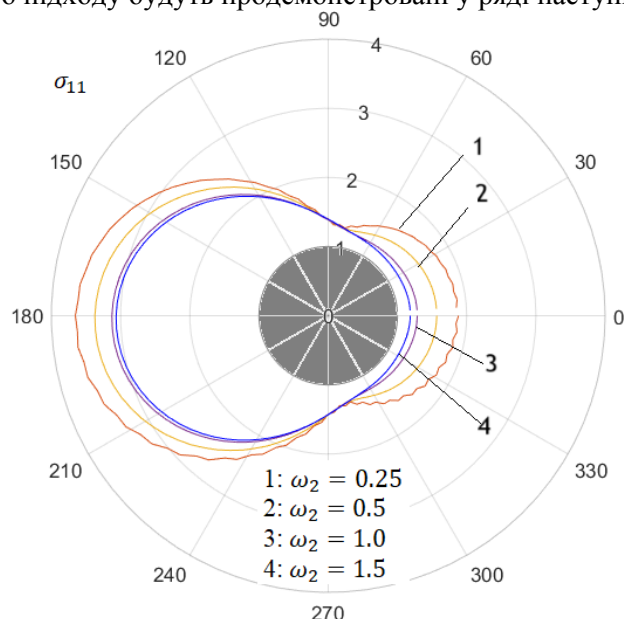


Рис 5. Зміна розподілу нормальних напружень вздовж границі включення

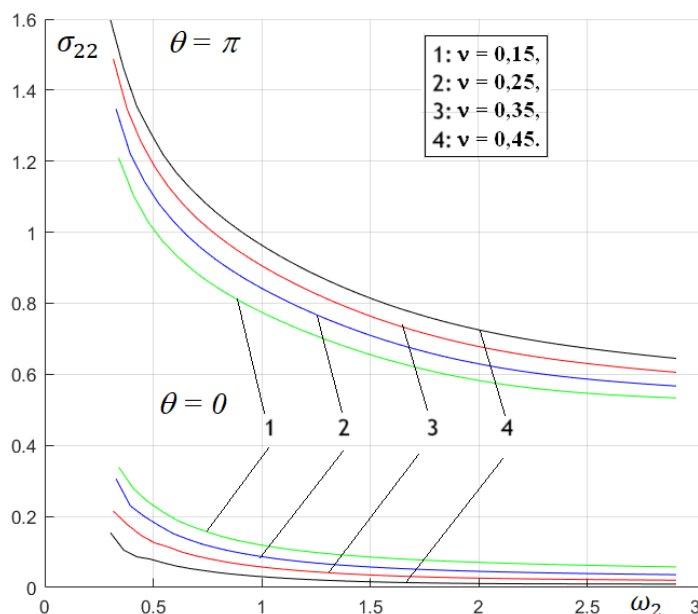


Рис. 6. Розподіл кільцевих напружень, розрахованих у аналогічних точках: $\theta = 0$, $\theta = \pi$

Висновки

Запропонована у роботі числова реалізація методу, розвинутого у [14], що дозволяє проводити дослідження та аналіз дифракції пружних хвиль у пластинчастих елементах з жорсткими впаяними включеннями, є більш універсальною, що продемонстровано на основі числових розрахунків. Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення впливу концентраторів напружень у формі еліптичних включень, що є моделями зварних швів, на розподіл напружень.

Список використаних джерел

1. Guz, A.N., Kubenko, V.D. and Cherevko, M.A. Diffraction of Elastic Waves. Science Dumka, Kiev, 1978, 307 p.
2. Savin G. N. Stress distribution around holes. NASA, 1970, 1008 p.
3. Katsikadelis J.T. The Boundary Element Method for Engineers and Scientists: Theory and Applications (Second Edition), Academic Press, 2016, 446 p.
4. Gwinner J. , Stephan E.P. Advanced Boundary Element Methods: Treatment of Boundary Value, Transmission and Contact Problems, Springer, 2018, 652 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92001-6>

5. Banjai L., Sayas F.-J. Integral Equation Methods for Evolutionary PDE: A Convolution Quadrature Approach, Springer, 2022, 268 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-13220-9>
6. Hart E. L., Terokhin B. I. Computer Simulation of the Stress-Strain State of the Plate with Circular Hole and Functionally Graded Inclusion. Journal of Optimization, Differential Equations and Their Applications (JODEA), 2021, 29, 1, PP. 42–53, DOI 10.15421/142103
7. Hart E.L., Hudramovich V.S. Computer Simulation of the Stress-Strain State of Plates with Reinforced Elongate Rectangular Holes of Various Orientations. Strength of Materials and Theory of Structures, 2022, 108, PP. 77-86. DOI: 10.32347/2410-2547.2022.108.77-86
8. Nazarenko O., Usov A., Volkova M., Kozin O. Mathematical Modeling of the Stress-Strain State of a Plate with Rigid Linear Inclusion and Mixed Boundary Conditions. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського, 1/2023 (138), PP. 22-28. DOI <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.1.2>
9. Zelenyak V., Kolyasa L., Klapchuk M., Oryshchyn O., Vozna S. Determining Patterns in Thermoelastic Interaction between a Crack and a Curvilinear Inclusion Located in a Circular Plate, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2021, 6/7 (114), PP. 52-58. DOI: [10.15587/1729-4061.2021.24399](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.24399)
10. Oshri O., Biswas S., Balazs A.C. Modeling the behavior of inclusions in circular plates undergoing shape changes from two to three dimensions. Phys. Rev. E, 2019, 100, 043001. DOI: [10.1103/PhysRevE.100.043001](https://doi.org/10.1103/PhysRevE.100.043001)
11. Lavrenyuk V. I., Lavrenyuk N. V. The Stress–Strain State of a Plate with a Multilayer Inclusion. International Applied Mechanics, 2007, 43, 3, PP.329-334.
12. Rana A.K., Paulb S.K., Deya P.P. Stress field in an isotropic elastic solid containing a circular hard or soft inclusion under uniaxial tensile stress. Materials Today: Proceedings, 2019, 11, PP. 657–666. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.03.024>
13. Shvabyuk V., Sulym H., Mikulich O. (2015) Stress State of Plate with Incisions under the Action of Oscillating Concentrated Forces, Acta Mechanica et Automatica, 9(3), 140-144. DOI [10.1515/ama-2015-0023](https://doi.org/10.1515/ama-2015-0023)
14. Шваб'юк В.І., Фурс Т.В., Коменда Н.В., Мікуліч С.Б. Інтегральні рівняння задачі дифракції хвиль у пружних середовищах з включеннями за дії нестационарних навантажень. Наукові нотатки, 75, Луцьк, 2023, С. 95-99.
15. Brebbia, C., Telles, J., Wrobel, L.: Boundary element techniques. Springer, New York, 1984.
16. Krenk. S., On quadrature formulas for singular integral equations of the first and second kind. Quarterly of Applied Mathematics, 33(3), 1975, 128-136. DOI: [10.1090/qam/448967](https://doi.org/10.1090/qam/448967)
17. Lifanov I. K., Singular Integral Equations and Discrete Vortices, VSP, Utrecht, 1996.

З.С. Сірко¹, Т.М. Строкова¹, М.М. Толстушко², Н.О. Толстушко², Р.І. Черьопкіна³Український державний науково-дослідний інститут "Ресурс"¹Луцький національний технічний університет²НТУУ "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"³**ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ МІКРОШПОНУ ІЗ ДЕРЕВИНИ БУКА**

В статті висвітлені питання, пов'язані із виготовленням із деревини бука мікрошпону та акцентується увага на особливостях технологічного процесу даного виробництва. Показано, що мікрошпон – це найтонший шар деревини певної товщини, отриманий шляхом стругання лісоматеріалу. Натуральний струганий шпон володіє багатьма перевагами: багатством та красою текстури, які вражають уяви різноманіття колірної палітри, незвичайністю фонових візерунків; ціною доступністю, адже будь-який натуральний шпон виявляється на порядок дешевше деревного масиву аналогічної площі, виготовленого з тієї ж породи деревини. В статті наведені технологічні процеси розкрюювання фанерної сировини бука на кряжі, отримання із них ванчесів, гідротермічного оброблення ванчесів, технологічне устаткування для отримання мікрошпону, зміцнення мікрошпону.

Ключові слова: мікрошпон, деревина бука, фізико-механічні показники деревини бука, технологічний процес отримання мікрошпону, зміцнення мікрошпону.

Z. Sirko, T. Strokova, M. Tolstushko, N. Tolstushko, R. Cheryopkina

FEATURES OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF OBTAINING MICROWAVES FROM BEECH WOOD

The article highlights issues related to the production of microveneer from beech wood and focuses on the features of the technological process of this production. It is shown that microveneer is the thinnest layer of wood of a certain thickness, obtained by planing timber. Natural planed veneer has many advantages: the richness and beauty of the texture, which amazes the imagination with the variety of the color palette, the unusualness of the background patterns; affordability, because any natural veneer is an order of magnitude cheaper than a wood massif of a similar area made from the same type of wood. The article presents the technological processes of cutting beech plywood raw materials on logs, obtaining veneers from them, hydrothermal treatment of veneers, technological equipment for obtaining microveneer, strengthening micro-veneer.

Keywords: microveneer, beech wood, physical and mechanical characteristics of beech wood, technological process of obtaining microveneer, strengthening of microveneer.

Постановка проблеми. Мікрошпон – це тонкий (менше 0,1 мм) деревинний матеріал (шпон) для облицювання поверхонь у виробництві меблів та будівельній галузі. Шпон – це найтонший шар натуральної деревини малої товщини, отриманий методом стругання або лущення лісоматеріалу (ванчесу), який є основним напівфабрикатом, що служить для виробництва тонкого шару деревини та подальшого облицювання різних плитних матеріалів. На теперішній час виготовлення шпону з подальшим виробництвом з нього різноманітних виробів є одним із найперспективніших напрямків у деревооброблювальній промисловості, чому існує чимало причин: мінімум відходів під час стругання, екологічність матеріалу, різноманітність виробів, основою яких є шпон.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Струганий шпон отримують послідовним струганням з поверхні заготовки (ванчесу) тонких шарів деревини, який в подальшому застосовують для облицювання різних плитних матеріалів [1-3]. Процес стругання проводять у перпендикулярному до довжини волокон напрямку. З метою отримання найбільш красивої текстури шпону необхідно зрізати його у певному напрямку щодо річних кілець деревини – радіальному, тангенціальному та змішаному. У виробництві струганого шпону використовують деревину переважно твердих листяних та хвойних порід, які мають красиву текстуру. Товщина струганого шпону становить 0,6 – 1,0 мм, а струганого мікрошпону – 0,1 – 0,04 мм. Товщина струганого шпону залежить від породи деревини. Меншу товщину шпону можна отримати із судинних листяних порід до яких відноситься деревина бука. Бук є представником розсіяно-судинних порід деревини. Деревина бука – безядрова порода, біла із жовтуватим або червонуватим відтінком з добре видимими річними шарами. Серцевинні промені широкі, на радіальному розрізі вони мають вигляд блискучих смужок, а на тангенціальному – коричневих чечевичок, які створюють характерний крапчастий малюнок. Деревина бука має красиву текстуру (особливо на радіальному перерізі), високу міцність та добре гнеться. У свіжозрубленому стані середня вологість деревини бука становить 64 %. Міцність мікрошпону із деревини бука зумовлена фізико-механічними показниками цієї деревини, а саме [4]: межа міцності, МПа бука при стисканні вздовж волокон, віднесена до 1 кг/м³ – 0,079; під час розтягування вздовж волокон – 0,176; при статичному вигині –

0,154; під час сколювання вздовж волокон – 0,019; ударна в'язкість деревини бука, кДж/м² – 0,119; торцева твердість, Н/мм² – 0,088; середній показник ударної твердості бука за вологості 12 % – 0,98 Дж/см². На сьогоднішній день фанерна сировина бука, як і інших цінних твердих листяних порід (дуба, ясеня) досить дефіцитна. Бук займає всього 9,3 % площі лісового фонду України [5, 6]. Тому актуальними є дослідження, що направлені на суттєву економію цінної деревини шляхом виготовлення із неї нового виду продукції – мікрошпону.

Постановка завдань. Мета дослідження – дослідити особливості технологічного процесу отримання мікрошпону із деревини бука та його подальшого зміцнення.

Викладення основного матеріалу. Для досліджень застосовували деревину бука (колоди) діаметром 26 см. Колоди бука довжиною понад 3 м розкрюювали на кряжі з урахуванням оптимальної довжини останніх з метою максимального використання довжини стола шпоностругального верстата для отримання максимальної продуктивності за рекомендаціями Українського державного науково-дослідного інституту механічної обробки деревини (УкрНДІМОД), які наведені у табл.1.

Табл. 1

Розміри колод і кряжів		
Довжина колоди, м	Діаметр колоди, см	Довжина кряжа, м
3,0	До 95	Без розкрою
3,0	Понад 95	1,5 і 1,5
3,5	До 90	Без розкрою
3,5	Понад 90	2,0 і 1,5
4,0	До 80	Без розкрою
4,0	Понад 80	2,0 і 2,0
4,5	До 75	Без розкрою
4,5	Понад 75	2,5 і 2,0
5,0	До 106	2,5 і 2,5
5,5	До 95	2,75 і 2,75
6,0	До 95	3,0 і 3,0
6,5	До 80	2,5 і 4,0

Кряжі бука розкрюювали на 2 ванчеси шляхом ділення чотириконтного бруса по діаметральній площині на вертикальному стрічкопилковому верстаті BRAUM + CANALI моделі BBS-200 (Німеччина) із шириною стрічки 180-280 мм.

Гідротермічне оброблення ванчесів здійснювали у парильному автоклаві. Використовували раціональні режими теплового оброблення ванчесів в автоклаві, які були розроблені УкрНДІМОД та наведені у табл. 2.

Табл. 2

Раціональні режими теплового оброблення ванчесів із деревини бука				
Порода	Товщина, см	Тиск пари, МПа	Тривалість пропарювання, хв.	
			влітку	взимку
Бук	До 18	0,2 – 0,25	135	160
	18 – 24	0,2 – 0,25	150	180
	24 – 36	0,2 – 0,25	170	200

Для отримання шпону із деревини бука використовували вертикальну схему стругання, за якої ванчес здійснює прямолінійний зворотно-поступальний рух у вертикальній площині, а ніж залишається нерухомим. Подача ножа на товщину шпону відбувається у кінці холостого переміщення заготовки вгору.

Для отримання мікрошпону використовували вертикальний шпоностругальний верстат типу SM (ФРН), технічна характеристика якого наведена у табл. 3.

На теперішній час спроектовані та виготовляється спеціальні шпоностругальні верстати компанії Capital Machine Co. Inc (США), які здатні виробляти найтонший шпон (мікрошпон) у світі.

Вертикальні шпоностругальні верстати компактні, у них менша маса рухомих частин, зручне регулювання обтиску, зручне відбирання листів шпону від верстата, а товщина відстругів менша, ніж у горизонтальних верстатах.

Табл. 3

Технічна характеристика вертикального шпоностругального верстату моделі SM (ФРН)

№ п/п	Експлуатаційні показники верстата	Значення параметру
1	Максимальна довжина заготовки, мм	4000
2	Максимальна ширина заготовки, мм	800
3	Максимальна висота заготовки, мм	800
4	Величина подачі на подвійний хід супорта (товщина шпону), мм	0,025 – 3,0
5	Кількість подвійних ходів супорта, под.х/хв	14 – 80
6	Потужність головного електродвигуна, кВт	45

Для сушіння мікрошпону використовували стрічкові (сітчасті) сушарки. Час сушіння шпону за постійної швидкості циркуляції агента сушіння залежить від породи деревини, товщини шпону, його початкової та кінцевої вологості, температури агента сушіння.

Дослідження зміцнення шпону проводили у навчальній лабораторії кафедри екології та технології рослинних полімерів НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Для того, щоб отримати шпон із розмірами згідно з НТД, колода деревини бука повинна бути діаметром не менше 24 см. Для досліджень використовували колоди деревини бука діаметром 26 см, які розкрюювали на два ванчеси шляхом ділення чотириконтного бруса на вертикальному стрічкопилковому верстаті фірми BRAUM+CANALI моделі BBS-200. Даний верстат завдяки широкій стрічці (180-280 мм) забезпечує високу точність різки що у свою чергу дає можливість отримати ванчеси з якісними поверхнями (без хвилястості) без подальшого оброблення.

Гідротермічне оброблення ванчесів здійснювали з метою підвищення пластичних властивостей деревини, що сприяє отриманню шпону з гладкою поверхнею і меншою кількістю тріщин на зворотному боці листів мікрошпону. Гідротермічне оброблення ванчесів проводили у автоклаві. Товщина ванчесів у нас була до 18 см, задавали тиск пари 0,2-0,25 МПа, при цьому тривалість пропарювання становила влітку 135 хв. Після пропарювання ванчеси із деревини бука витримували у приміщенні цеху до 5 годин.

Стругання шпону проводили на шпоностругальному верстаті вертикального типу моделі SM (ФРН). Верстат забезпечує подачу ножового супорта на необхідний подвійний хід 0,05 мм (товщина шпону). Під час стругання мікрошпону верстат налаштовували на 60 подвійних ходів супорта. Кут різання вибирали мінімальним, оскільки чим менший кут різання δ , тим менше буде згинатися стружка передньою гранню ножа, а отже, і меншою буде глибина тріщин у стружці. Кутів параметри ножа для отримання мікрошпону були наступними: кут різання $\delta = 18^\circ$; кут загострення $\beta = 16^\circ$; задній кут $\alpha = 1,5^\circ$. Процес різання проводили з обтисканням зрізаної стружки, тобто у процесі різання повинні брати участь ніж і притискна лінійка. За однакових технічних характеристик, у вертикальних шпоностругальних верстатів відбувається краще знімання листів шпону під час формування кнолів. Кноль – пачка листів шпону (містить щонайменше 10 аркушів), зрізаного з одного ванчеса, однієї текстури та якості. Сушіння мікрошпону проводили в сітчастих сушарках за температури 100°C уже сформованих кнолів. Режим сушіння мікрошпону до кінцевої вологості 8 – 10 % наведені у табл. 4.

Табл. 4

Режими сушіння мікрошпону до кінцевої вологості 8 – 10 %

Порода деревини	Товщина шпону, мм	Початкова вологість шпону, %	Температура агента сушіння, $^\circ\text{C}$	Тривалість сушіння, с
Бук	0,05	45	100	30

Якість висушеного шпону безпосередньо визначається дотриманням режимних параметрів протягом всього процесу сушіння.

Мікрошпон товщиною 0,05 мм має низькі фізико-механічні властивості, особливо міцнісні. В процесах завантаження-розвантаження, переміщення, транспортування та інших маніпуляціях із таким шпоном виникають пошкодження у вигляді тріщин, сколів, виривів та інших дефектів, які порушують цілісність листів шпону та знижують його якість і сортність. Тому такий мікрошпон необхідно зміцнювати, щоб уникнути вищенаведених недоліків. Для зміцнення мікрошпону використовували папір марки ОВ-100, який використовують як основу для шліфувальних шкур. Дослідження фізико-механічних та експлуатаційних показників паперу проводили у

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» згідно ДСТУ 2334-93 (ГОСТ ISO 1924/1-96) «Папір та картон. Визначення міцності під час розтягування. Частина 1. Метод навантажування з постійною швидкістю». Результати досліджень фізико-механічних та експлуатаційних показників паперу марки ОВ-100 наведені у табл. 5.

Табл. 5

Результати досліджень фізико-механічних та експлуатаційних показників паперу марки ОВ-100

№ п/п	Назва показників	Норма за НТД	Фактично
1	Склад за волокном, %, целюлози деревинної сульфатної	100	100
2	Маса 1м ² , г	$100 \pm \frac{4}{6}$	95
3	Щільність, г/см ² , не менше	0,70	0,75
4	Розривне зусилля у сухому стані, Н, не менше	137,3	140,2
5	Видовження при розриві у сухому стані, в машинному напрямку, %	2,0	2,4
6	Вологість, %	5-8	8

Результати досліджень показали можливість виготовлення мікрошпону із деревини бука товщиною 0,05 мм та зміцнення його папером марки ОВ-100.

Висновки.

1. Обґрунтовано вибір деревини бука для виготовлення мікрошпону.
2. Проаналізовані технологічні процеси розкроювання фанерної сировини бука на кряжі, отримання із них ванчесів, гідротермічного оброблення ванчесів, технологічне устаткування для отримання мікрошпону, сушіння мікрошпону, зміцнення мікрошпону.
3. Наведені конкретні параметри названих технологічних процесів для отримання мікрошпону.
4. Проведені дослідження із зміцнення мікрошпону.

Список використаних джерел

1. Бехта П.А. Виробництво шпону: підручник. Львів: Основа, 2002. 252 с.
2. Бехта П.А. Виробництво і обробка лушеного та струганого шпону: навчальний посібник. Київ: ІСДО, 1995. 296 с.
3. Максимів Л.І., Матвеев М.Е., Кошла Р.В. Аналіз життєвого циклу продукції як інструмент екологічного аудиту систем менеджменту довкілля деревообробних підприємств: наукові праці Лісівничої академії наук України: зб. наук. праць. Львів: НЛТУ України, 2008. Т. 6. С. 129 – 142.
4. Вінтонів І.С., Сопушинський І.М., Тайшінгер А. Деревинознавство: навчальний посібник. Львів: Априорі, 2007. 312 с.
5. Миклуш С., Миклуш Ю., Гаврилюк С., Савчин В. Типи лісу та запаси деревини рівнинних букових лісостанів України. Львів: наукові праці Лісівничої академії наук України, 2019. № 18. С. 109 – 117.
6. Криницький Г.Т., Павлюк Н.В., Яхницький В.Й. Сучасний лісовий фонд бука лісового в Українському Розточчі. Львів: наукові праці Лісівничої академії наук України, 2017. № 15. С. 11 – 18.

Рецензент: Шимчук Сергій Петрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету.

О.А. Мікуліч, Т.В. Фурс, Н.Ю. Семенишин, О.І. Гулай, В.Я. Шемет

Луцький національний технічний університет

**ВПЛИВ СИЛІКОНОВОЇ ДОБАВКИ НА СТРУКТУРУ І МЕХАНІЧНІ
ВЛАСТИВОСТІ ПІНОПОЛІУРЕТАНІВ**

У роботі представлено дослідження впливу силіконової добавки на структуру і механічні властивості пінополіуретанів (ППУ). ППУ отримані способом заливки у пластикові форми внаслідок синтезу поліольного (з вмістом спінювача) та поліізоціанатного компонентів у ваговому співвідношенні 2:4. Модифікуючу добавку силікону вводили на етапі змішування компонентів у різних вагових співвідношеннях від 1 до 4 вагових часток. Проаналізовано мікроструктуру отриманих піноматеріалів з різним ваговим вмістом силіконової добавки, оцінено їх пористість і структурно-морфологічні особливості та досліджено поведінку модифікованих ППУ зразків під час деформування при статичному стиску. Описано закономірність зміни пористості і механічних характеристик внаслідок варіювання вагового співвідношення компонентів. Збільшення частки силіконової добавки призводить до зростання міцнісних та механічних характеристик одночасно зі зменшенням пластичності ППУ та зростання частки відкритих пор у матеріалі. Описані у роботі підходи можуть бути використані при виготовленні елементів конструкцій з піноматеріалів, що мають наперед задані характеристики.

Ключові слова: пінополіуретан, міцність, пористість, морфологія, модуль Юнга.

O.A. Mikulich, T.V. Furs, N. Yu. Semenyshyn, O.I. Hulai, V.Ya. Shemet

**INFLUENCE OF SILICONE ADDITIVES ON STRUCTURE AND MECHANICAL
PROPERTIES OF POLYURETHANE FOAM**

The work presents a study of the effect of silicone supplement on the structure and mechanical properties of polyurethane foam (PPU). PPUs were obtained by the pouring in plastic forms due to the synthesis of polyole (with the content of the foam) and the polyisocyanate components in the weight ratio of 2:4. The modifying silicone additive was introduced at the stage of mixing components in different weight ratios from 1 to 4 weight particles. The microstructure of the obtained foam with different weight content of silicone additives is analyzed, their porosity and structural and morphological features were evaluated and the behavior of modified PPU samples during deforming with static compression is considered. The pattern of change of porosity and mechanical characteristics is described due to the variation of the weight ratio of components. An increase in the particle of silicone additive leads to an increase in strength and mechanical characteristics at the same time as a decrease in PPU plasticity and an increase in the proportion of open pores in the material. The approaches described in the work can be used in the manufacture of foam structures that have predetermined characteristics.

Keywords: polyurethane foam, strength, porosity, morphology, Young's modulus.

Постановка проблеми. Пінополіуретани (ППУ) – це полімерні спінені матеріали з пористою структурою, що володіють хорошими ізоляційними властивостями у поєднанні з задовільними механічними характеристиками, завдяки чому широко використовуються у будівництві, автомобільній, легкій, меблевій промисловості та побуті, ефективно замінюючи інші матеріали [1].

Поліуретанові піни мають низку відмінних властивостей, які визначаються хімічним складом і технологією одержання, що обумовлює структуру цього матеріалу. Так, завдяки комірчастій структурі пінополіуретани поєднують у собі низьку густину, хороші теплоізоляційні властивості, високу механічну міцність і хімічну стійкість, що робить їх універсальними матеріалами для різних галузей промисловості. Також ППУ вирізняються високими технологічними можливостями, що дозволяє отримувати цей матеріал різних видів: від жорстких і твердих до м'яких та еластичних. Основними недоліками ППУ є чутливість до ультрафіолетового випромінювання, горючість, та складність утилізації.

Зважаючи на переваги й недоліки ППУ, нині продовжуються наукові розробки щодо технологічних аспектів одержання й покращення чи оптимізації їх властивостей для конкретного застосування. Зокрема, сучасні дослідження ППУ зосереджені на модифікації поліолів (додаванням наночастинок, біополіолів, силіконів), поліпшенні вогнестійкості за допомогою введення антипіренів, екологізації складу (використання біосировини, води як піноутворювача замість фреонів), зниженні теплопровідності за рахунок контрольованої структури пор. Модуючі властивості забезпечує введення додаткових компонентів, таких як каталізатори, стабілізатори, поверхнево-активні речовини й інші добавки.

Різноманітність застосування пінополіуретанів (ППУ) є причиною того, що вивчення зв'язків між їх структурою і властивостями в даний час є популярною темою досліджень серед науково-дослідних інститутів і компаній. Тому такий напрямок досліджень ППУ, як модифікування, нині має продовження, і ці розробки затребувані щодо реалізації або покращення окремих практичних рішень у застосуванні пінополіуретанів.

© О.А. Мікуліч, Т.В. Фурс, Н.Ю. Семенишин, О.І. Гулай, В.Я. Шемет

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Спосіб одержання поліуретанових піни досить простий, однак потребує точного дотримання дозування компонентів, температурного режиму та прогнозування і контролю інших технологічних чинників. Їх отримують в результаті синтезу двокомпонентної суміші поліолу та ізоціанату з додаванням спінювача й інших добавок [2].

Аналіз результатів наукових досліджень ППУ вказує на те, що широкий спектр їх властивостей для різних практичних рішень досягається шляхом модифікації складу основних компонентів (ізоціанатів, поліолів) або введенням інших добавок, які мають функціональне призначення [3-6]. Залежно від призначення пінополіуретану, до складу можуть додаватися антипірени (для підвищення вогнестійкості), барвники, антистатики, пластифікатори та інші речовини, що покращують певні експлуатаційні характеристики. За рахунок цього матеріал ППУ може мати різну густину, структуру та властивості залежно від добавок і технології виробництва. Завдяки цьому пінополіуретан може бути як м'яким і еластичним, так і жорстким і міцним.

Одна з основних тенденцій досліджень у цій галузі пов'язана зі зниженням виробничих витрат на ПУ піни. Як показують останні розробки в галузі ППУ, цієї мети можна успішно досягти шляхом використання сировини природного походження, що містить недорогі та екологічно безпечні модифікатори, такі як гліцерин [7-8], рідка біомаса [9-10], або утилізації відходів як от подрібнена гума з шин [11-12] тощо.

Механічні властивості пінополіуретану залежать від хімічного складу, структури матеріалу, його густини і пористості. Зміна співвідношень складових компонент, що використовуються для отримання піни, дозволяє отримати різні типи піни з різними характеристиками.

Так, природа та вміст ізоціанату впливає на жорсткість піни. Найчастіше використовують є метилендіфенілдіізоціанат (MDI) і толуолдіізоціанат (TDI). Вони становлять близько 90% від загального споживання діізоціанату [13]. Ізоціанат реагує з поліолом, утворюючи уретанові групи, і з водою, утворюючи групи сечовини та CO₂. Фрагменти уретану та сечовини формують жорсткі сегменти ППУ, а поліол утворює м'які сегменти ППУ [14]. Таким чином, збільшення вмісту ізоціанату зумовлює зростання жорсткості пінополіуретану.

Іншим вагомим фактором є функціональність поліолу (відносна кількість гідроксильних груп). Підвищення функціональності поліолу без зміни молекулярної маси призводить до незначного збільшення твердості піни та невеликого зниження міцності на розрив і видовження [3].

За участі пороутворювачів (спінювачів) формується комірчаста структура ППУ. Виділяють два основних типи спінювачів: фізичні спінювачі (зокрема, розчинники з низькою температурою кипіння: пентан, ацетон або гексан), які розширюють полімер в результаті випаровування, та хімічні піноутворювачі (вода), які розширюють полімер за рахунок утворення CO₂ [15]. Дистильована вода як спінювач впливає на густину і морфологію жорсткого ППУ. Зокрема, за результатами дослідження [16] густина ППУ зменшилася у майже три рази зі збільшенням кількості води від 0,1 до 3,0 частин.

Літературний аналіз результатів досліджень технології одержання і властивостей пінополіуретанів свідчить про їх багатофункціональність і перспективність щодо впровадження в різні сфери, що обумовлено їх регульованою структурою, можливістю хімічної модифікації та високою ефективністю у застосуванні. Тому питання модифікації є актуальним для ППУ.

Постановка завдання. Мета цього дослідження полягала в модифікуванні ППУ силіконовою добавкою (силоксановий каучук) й оцінюванні її впливу на структуру та механічні властивості піни.

Викладення основного матеріалу. Основними компонентами для отримання поліуретанової піни були поліол (містив спінювач) та поліізоціанат, що широко використовуються у будівництві, з ваговим співвідношенням поліол - поліізоціанат як 2:4. Модифікуюча добавка силікону вводилася на етапі змішування компонентів, після чого відбувалася хімічна реакція синтезу ППУ, в ході якої відбувалося спінювання суміші, попроутворення матеріалу і формування композицій. ППУ були одержані способом заливки в пластикові ємності [2].

Силіконовий модифікатор є низькомолекулярною диметилсилоксановою рідиною, стабілізованою оксидом кремнію. Цей матеріал є високоеластичним, біологічно інертним та термостійким у діапазоні температур від -40°C до +100°C. Характеристики цієї добавки є спорідненими за технологічністю до ППУ.

Для проведення досліджень було отримано 7 композицій піноматеріалу з вмістом силоксанового каучуку від 0 до 4 вагових часток.

З отриманих ППУ-композицій вирізалися дослідні зразки у формі паралелепіпеда розміром 30×30×30 мм. У роботі проводилося дослідження мікроструктури матеріалу піни, її пористості та механічних характеристик під дією механічних навантажень при статичному стисканні зразків.

Дослідження мікроструктури проводили з допомогою методу оптичної мікроскопії. Для аналізу пористості отриманих піноматеріалів використовували програмне забезпечення [16], розроблене на мові Swift, що дозволяє виконувати обчислення на основі фотознімків структури матеріалу.

Дослідження поведінки ППУ під дією механічних навантажень визначали за результатами випробування дослідних зразків на стиснення методом статичного навантаження з використанням випробувальної машини марки МІ-40КУ. Експериментальні випробування проводилися при осьовому стисканні за дії рівномірно прикладеного стискуючого навантаження вздовж перерізу зразків. Швидкість зміни інтенсивності навантаження становила 2 мм/хв.

Результати досліджень вказують на те, що частка силосанової каучукової добавки при великому вмісті суттєво впливає на мікроструктуру, морфологію і пористість пінополіуретану (рис. 1).

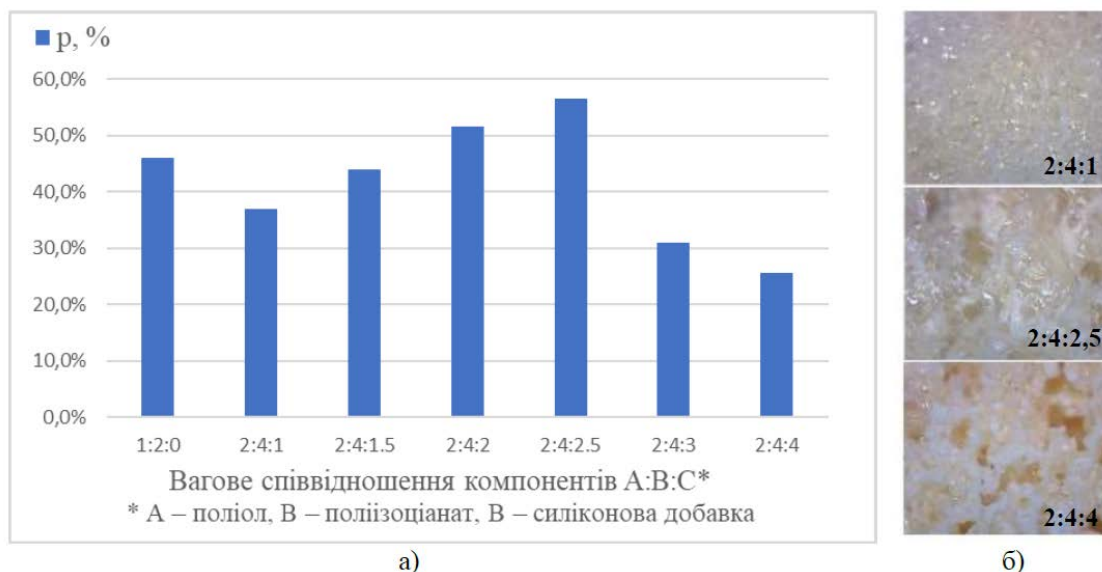


Рис. 1. Пористість (а) та мікроструктура ППУ (×30), модифікованого силіконом (б)

Спостерігається видозміна морфології пор від сферичної форми комірок до асиметричної з нерівномірною товщиною стінок комірок пор, що має виражений випадковий характер. Зі збільшенням частки силікону від 0 до 4 зростає товщина стінок комірок пор, зростає відсоток відкритих пор, дрібнопориста структура (0,01 ... 0,1 мм) змінюється в напрямку крупнопористої (0,1 ... 3мм). Чим більший вміст силікону в ППУ, тим більш виражена така видозміна структури матеріалу. Пористість ППУ спочатку зростає від 37% до 56,5% зі збільшенням вмісту силосанового каучуку від 1 до 2,5 масових часток, а при вмісті більше 2,5 масових часток – зменшується аж до 25,5 % (при 4 мас. ч. силікону в ППУ суміші компонентів).

На основі аналізу мікроструктури дослідних зразків ППУ встановлено, що силікон входить у структуру пінополіуретану гетерогенно, утворюючи самостійну фазу (включення білого кольору на мікрознімках структури рис. 1, б).

Деформаційну поведінку ППУ з різним парціальним вмістом модифікуючої домішки силікону відображають дані діаграми навантажень при статичному стисканні (рис. 2). На початковій стадії навантажування усіх дослідних зразків з різним вмістом силіконової добавки зразків ППУ (від 1 до 4 вагових часток в суміші компонентів) виявляється лінійна залежність між деформаціями і силою стиску, матеріал підлягає закону Гука. Хід таких залежностей подібний з аналогічними характеристиками для зразків ППУ без силіконової добавки (співвідношення компонентів 1:2:0).

При подальшому збільшенні навантажень лінійні залежності між силою стиску і деформаціями зразків порушується. Деформації зростають значно швидше від навантаження. Для усіх дослідних зразків фіксується зона загальної текучості. Втім, значення межі текучості ППУ залежить від вмісту каучукової добавки (дані представлені у таблиці 5). Зі збільшенням вмісту силікону від 1 до 4 вагових часток у суміші компонентів значення межі текучості поліуретанової піни зростає в межах 1,23-2,34 МПа.

За аналізом деформаційної поведінки зразків ППУ при статичному стисканні встановлено, що збільшення вмісту силіконової добавки призводить також до підвищення твердості і крихкості та зниження пластичності ППУ, що особливо виражено при вмісті силікону більше 2 мас.ч.

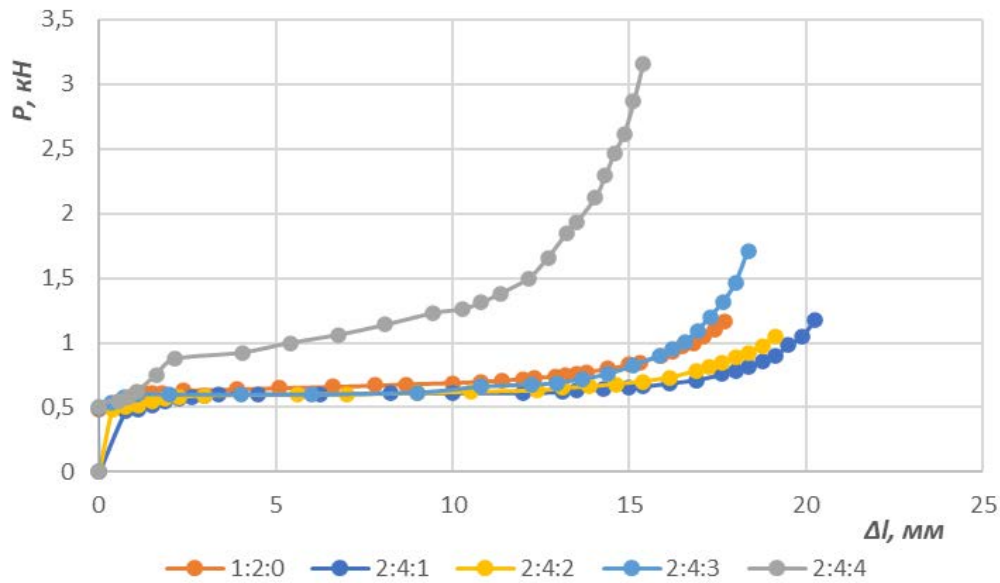


Рис. 2. Діаграми навантаження дослідних зразків ППУ

Зовнішній вигляд стиснених зразків ППУ в порядку зростання мас. ч. силікону 0, 1, 1,5, 2, 2,5, 3, 4 представлений на рис. 3.



Рис. 3. Зовнішній вигляд стиснених зразків ППУ, модифікованих силіконом

На основі результатів експериментальних досліджень (дані графіків рис. 2) розраховано значення модуля Юнга E та границі текучості σ_m отриманих піп. Відповідні результати наведені у табл. 1.

Аналізуючи результати, наведені у таблиці 1 можна зробити висновок, що модифікація поліуретанових піп шляхом використання каучукових добавок дозволяє отримати вищі значення механічних та міцнісних характеристик лише при певній частці таких добавок, а саме, коли вміст силікону дорівнює (зразок 2:4:2) або більше вмісту поліолу. При менших значеннях таких добавок відбувається зменшення міцнісних та механічних характеристик отриманих піноматеріалів.

Табл. 1

Механічні та міцнісні характеристики модифікацій пінополіуретану

Номер серії зразків	Вагове співвідношення компонентів А:В:С*	E , МПа	σ_m , МПа
1	1:2:0	64	1,25
2	2: 4:1	61	1,23
3	2:4:1,5	63,1	1,26
4	2:4:2	62	1,32
5	2:4:2,5	69	1,33
6	2:4:3	74	1,37
7	2:4:4	106	2,34

* А – поліол, В – поліізоціанат, С – силіконова добавка

Дослідження процесів деформування отриманих пін показує, що при невеликих частках каучукових добавок, що не перевищують частки поліолу, отримані матеріали мають властивості практично рівномірного закриття пор при навантаженні, що відповідає межі текучості матеріалу. У випадку більшого вмісту каучукових добавок отримані піни є більш твердими і крихкими.

Висновки

1. Встановлено, що при модифікуванні ППУ добавка силікону входить у структуру піноматеріалу гетерогенно, утворюючи самостійну фазу.
2. Модифікування силіконом призводить до зміни мікроструктури ППУ. При цьому відбувається видозміна морфології пор від сферичної форми комірок до довільної асиметричної та зміна величини пористості матеріалу. Чим більший вміст силікону, тим більш виражена така видозміна структури матеріалу.
3. Зі збільшенням частки силікону кількість відкритих пор в отриманій піні збільшується. Однак, у цьому випадку товщина стінок комірок пор збільшується, що сприяє зміцненню отриманого матеріалу. У випадку високого вмісту силіконової добавки (від 2 до 4 вагових часток) підвищується твердість та крихкість піноматеріалу.
4. Збільшення частки модифікатора в поліол-ізоціанатній суміші компонентів, поряд зі збільшенням міцності та механічних характеристик, призводить до зниження пластичних характеристик піноматеріалів.
5. Модифікація пінополіуретанів силіконовою добавкою в оптимальному співвідношенні компонентів дозволяє отримати піноматеріали з вищими значеннями механічних та міцнісних характеристик й з іншим типом пористості (переважно змішаний тип пористості) порівняно з вихідним немодифікованим матеріалом.
6. Підходи, описані в роботі, можуть бути використані для виготовлення конструкційних елементів з піноматеріалів із заданими характеристиками.

Список використаних джерел

1. Ates, M., Karadag, S., Eker, A. A., & Eker, B. (2022). Polyurethane foam materials and their industrial applications. *Polymer International*, 71(10), 1157-1163. DOI: [10.1002/pi.6441](https://doi.org/10.1002/pi.6441)
2. Т.В. Фурс, О.В. Сад, О.А. Мікуліч, О.І. Гулай, В.Я. Шемет. Технологічні аспекти одержання пінополіуретану способом заливки. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2024, № 78. С. 37-42. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2024.78.5>
3. Gama, N. V., Ferreira, A., & Barros-Timmons, A. (2018). Polyurethane Foams: Past, Present, and Future. *Materials*, 11(10), 1841. <https://doi.org/10.3390/ma11101841>
4. Stanzone, M., Oliviero, M., Cocca, M., et al. Tuning of polyurethane foam mechanical and thermal properties using ball-milled cellulose, *Carbohydrate Polymers*, 231, 2020, 115772, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115772>
5. Baferani, A.H., Keshavarz, R., Asadi, M. and Ohadi, A.R. (2018), Effects of Silicone Surfactant on the Properties of Open-Cell Flexible Polyurethane Foams. *Adv. Polym. Technol.*, 37: 71-83. <https://doi.org/10.1002/adv.21643>
6. Kosmela P., Zedler L., Formela K., Haponiuk J., Piszczyk L. The latest developments in the field of polyurethane foams containing inexpensive and environmentally friendly modifiers. *JCCT*. Vol. 10, No. 4(s), 2016, pp. 571 – 580. <https://doi.org/10.23939/chcht10.04si.571>
7. Pott R.W., Howe C.J., Dennis J.S. The purification of crude glycerol derived from biodiesel manufacture and its use as a substrate by *Rhodospseudomonas palustris* to produce hydrogen. *Bioresour Technol.* 2014;152:464-470. doi:10.1016/j.biortech.2013.10.094
8. Hejna A., Kosmela P., Formela K. et al.: Potential applications of crude glycerol in polymer technology—Current state and perspectives. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2016, 66, 449-475. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.020>
9. Xie J., Hse C., Shupe T. et al. Extraction and characterization of holocellulose fibers by microwave-assisted selective liquefaction of bamboo. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2014, 131, 40207. <https://doi.org/10.1002/app.43394>
10. Xiu, S., Shahbazi, A., Wallace, C.W., Wang, L., & Cheng, D. (2011). Enhanced bio-oil production from swine manure co-liquefaction with crude glycerol. *Energy Conversion and Management*, 52, 1004-1009.

11. Gayathri R., Vasanthakumari R. and Padmanabhan C. Sound absorption, Thermal and Mechanical behavior of Polyurethane foam modified with Nano silica, Nano clay and Crumb rubber fillers. *Int. J. Eng. Sci.*, 2013, 4, 302.
12. Guide, P. MDI and TDI: Safety, Health and the Environment. A Source Book and Practical Guide; John Wiley & Sons Ltd.: New York, NY, USA, 2003; ISBN 0471958123.
13. Shufen, L.; Zhi, J.; Kaijun, Y.; Shuqin, Y.; Chow, W.K. Studies on the thermal behavior of polyurethanes. *Polym. Plast. Technol. Eng.* 2006, 45, 95–108.
14. Wypych, G. Handbook of Foaming and Blowing Agents; ChemTec Publishing: Toronto, ON, Canada, 2017.
15. Thirumal, M., Khastgir, D., Singha, N.K., Manjunath, B.S. and Naik, Y.P. (2008), Effect of foam density on the properties of water blown rigid polyurethane foam. *J. Appl. Polym. Sci.*, 108: 1810-1817. <https://doi.org/10.1002/app.27712>
16. Mikulich O.A., Zaiakin D.K. Porus material software analisis. *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*. Lutsk, LNTU. 2024, V. 21. C. 121-127.

Т. Божко, О. Залета, Т. Гальчук, Н. Зубовецька, Н. Гулієва

Луцький національний технічний університет

ЗАЛЕЖНІСТЬ РОЗМІРУ ПОР ВІД ПАРАМЕТРІВ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ СПЕЧЕНОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРІАЛУ

Дана стаття має на меті показати вплив характеристик різального інструменту на розміри пор при чистовій механічній обробці спеченого пористого матеріалу. Результатом роботи є виявлення факторів, що впливають на зміну їх розмірів та форми при механічній обробці спеченого пористого матеріалу. Виходячи з досліджень було виявлено найважливіші фактори, що впливають на якість поверхні: матеріал різального інструменту, що застосовується при обробці; здатність оброблюваного матеріалу протистояти пластичній деформації під час обробки; режими різання, обґрунтовані умовами взаємодії різних матеріалів; застосування МОР, необхідність використання яких пояснюється технічними умовами різання тим чи іншим матеріалом. Досліджено вплив характеристик різального інструменту на розмір пор при механічній обробці спеченого порошкового заліза марки ПЖР-3 із застосуванням МОР та всуху. В якості різального інструменту використовувалися токарні різці з різними пластинами та шліфувальний круг.

Ключові слова: пористість, спечений матеріал, механічна обробка, режими різання.

T. Bozhko, O. Zaleta, T. Halchuk, N. Zubovetska, N. Huliieva

DEPENDENCE OF PORE SIZE ON CUTTING TOOL PARAMETERS DURING MACHINING OF SINTERED POWDER MATERIAL

This article aims to demonstrate the influence of cutting tool characteristics on pore sizes during fine machining of sintered porous material. The result of the study is the identification of factors affecting pore tightening, as well as changes in their size and shape during machining of sintered porous material. Based on the research, it was found that the most important factors influencing surface quality are: the material of the cutting tool used; the ability of the processed material to resist plastic deformation; cutting modes, determined by the conditions of interaction between different materials; the use of coolants, the necessity of which is dictated by the technical conditions of cutting a particular material. The influence of the cutting tool characteristics on the pore size during the machining of sintered porous iron of the PZHR-3 grade, both with and without coolants, was investigated. Turning cutters with different inserts and a grinding wheel were used as cutting tools.

Keywords: porosity, sintered material, machining, cutting modes.

Постановка проблеми. Початковий стан поверхневого шару заготовки до процесу механічної обробки є пористою поверхнею, що має нерівномірне розташування пор. Параметр шорсткості залежить в основному від розмірів пор, характеристики яких, у свою чергу, залежать від умов спікання, зусиль пресування, форми та розмірів часток, що спікаються. Як відомо [1], властивості пористих матеріалів залежать від властивостей вихідних порошків та технологічного процесу їх виготовлення. Для їх виготовлення використовуються металеві порошки як зі сферичною, так і несферичною формою частинок з розмірами від кількох тисяч мікрометрів з різних металів і сплавів. На даному етапі пористість визначається наступними параметрами: часом спікання, яке залежить від складу та щільності матеріалу, розмірів виробів, що спікаються, конструкції печі; величиною та формою частинок порошку; станом поверхні частинок; вмістом оксидів; технологією спікання.

Механічна обробка пористих металокерамічних матеріалів супроводжується більш істотними змінами матеріалу [2] у поверхневому шарі, ніж при обробці литих матеріалів та сплавів. Це пов'язано з наявністю пористості, яка призводить в процесі різання до додаткових змін фізико-механічного стану матеріалу в поверхневому шарі: ущільненню пористого каркаса, вплив якого на загальне зміцнення матеріалу не залежить від температури різання, до зриву окремих макро-і мікроділянок зміцнено-ущільненого шару. Зниження тепло- та температуропровідності матеріалу призводить до локалізації дії теплового фактора в найтонших поверхневих шарах [3].

Постановка завдань. Метою дослідження є вплив характеристик різального інструменту на розміри пор при чистовій механічній обробці спеченого пористого матеріалу.

Матеріали та методи. Експерименти проводилися на зразках із порошків заліза марки ПЖР-3. У таблицях 1 та 2 приведені хімічний і гранулометричний склад порошку.

Залежність відносної густини порошку заліза ПЖР-3 від гідростатичного тиску наведена на рисунку 1.

Виготовлення заготовки проводилось в два етапи: пресування і спікання. Пресування залізного порошку проводилось за допомогою гумової форми у камері високого тиску, створюючи тиск, необхідний для отримання зразка заданої пористості. Спікання порошкових пресовок здійснювали в однокамерній печі під рідким затвором протягом двох годин. Температура спікання дорівнювала $T=1050^{\circ}\text{C}$.

© Т. Божко, О. Залета, Т. Гальчук, Н. Зубовецька, Н. Гулієва

Для дослідів використовувалися зразки пористістю 24%, 28% та 32%.

Табл. 1

Хімічний склад порошку ПЖР-3

Марка порошку	Хімічний склад (%)						
	Fe	C	Si	Mn	S	P	O
ПЖР-3	98,5	0,02	0,17	0,03	0,01	0,02	0,27

Табл. 2

Гранулометричний склад порошку ПЖР-3

Марка порошку	Вихід фракцій (%) при розмірі часток (мм)						
	-0400 +0315	-0315 +0200	-0200 +0160	-0160 +0100	-0100 +0063	-0063 +0050	-0050
ПЖР-3	0,6	8,28	6,82	15,1	34,8	28,6	6,8

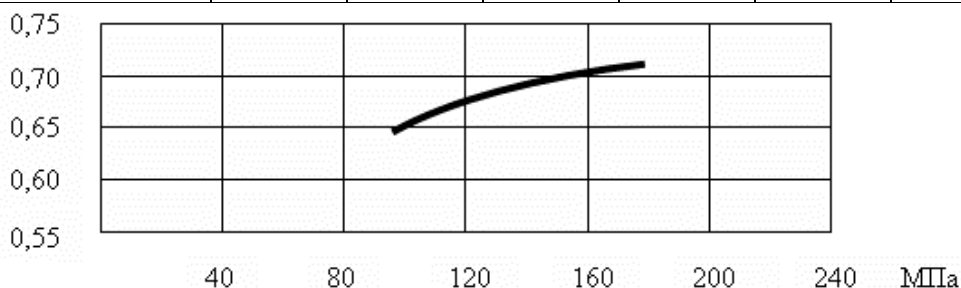


Рис. 1. Залежність відносної густини порошку заліза ПЖР-3 від гідростатичного тиску

Як різальний інструмент для токарної обробки, використовувалися різці, які оснащені пластинами із швидкорізальної сталі Р6М5; різцем із твердого сплаву Т5К10; твердим сплавом з покриттям TiN (марка пластини DNMG150608 PC), а також використовувався шліфувальний круг електрокорунду білого на керамічній зв'язці твердістю CM2 марки 1A1 250x25x75 24A 20 CM2 K6.

Викладення основного матеріалу. Як показали результати експериментів, у процесі різання ПЖР-3 за всіх способів механічної обробки, при різних її режимах відбувається зменшення розмірів пор.

Зміни по закінченні механічної обробки спостерігалися не тільки на поверхні, а й у поверхневому шарі металокерамічних спечених матеріалів, що виражаються в деформації структури та зміні розмірів пор матеріалу на деякій глибині. Затягування пор відбувається під впливом ріжучої кромки інструменту внаслідок значного впливу сил різання. При точінні ріжуча кромка зминає, потім зрізає матеріал. При наближенні зони контакту «інструмент - заготовка» відбувається деформація зрізаного матеріалу, який виходить із зони різання за рахунок об'єму самих пор. В результаті обробки кратер пори закритий тонкою шаром металу, товщина якого залежить від характеристик ріжучого інструменту, від марки матеріалу, що обробляється, а також від режимів і умов обробки.

Спочатку до механічної обробки розміри пор становили по довжині 150 - 500 мкм, по ширині 45 - 120 мкм.

При дослідженні результату токарної обробки різцем із швидкорізальної сталі Р6М5 без застосування МОР (рис.2,3) було встановлено що розміри пор змінилися і стали становити по довжині 20 - 150 мкм, по ширині 20 - 50 мкм, у той час, як при обробці різцем з Р6М5 із застосуванням МОР розміри пор склали по довжині 30 - 200 мкм. В обох випадках глибина різання t становила 0,75 мм; швидкість різання становила V - 20 м/хв; подача S - 0,05 мм/об.

Як показали результати експериментів, розміри пор після чистової механічної обробки різцем зі швидкорізальної сталі Р6М5 значно скоротилися в порівнянні з початковими розмірами до механічної обробки, але застосування МОР, а також обробка на збільшених швидкостях зі зміною швидкості різання з 20 м/хв до 180 м/хв, сприяли збільшенню щільності. Таким чином, при обробці з МОР і $V = 181$ м/хв розміри пор склали завдовжки 40 - 220 мкм, ширину 25 - 100 мкм.

В результаті чистової токарної обробки твердосплавним інструментом Т5К10 (рис. 2,3) було встановлено, що зміна розмірів пори супроводжувалося різким збільшенням шорсткості обробленої поверхні. При цьому довжина пори була отримана в межах 35 - 90 мкм, ширина відповідала 20 - 60

мкм. Дані результати були отримані при чистовій обробці із застосуванням масляної МОР. При різанні без МОР значення шорсткості поверхні також збільшилося, при цьому явної зміни розмірів пори практично не спостерігалось. Також відзначалося збільшення щільності пор при обробці зі збільшенням швидкості різання до $V = 140$ м/хв.

При обробці шліфуванням за допомогою шліфувального круга (рис. 2,3) відзначалося різке зменшення розмірів пор, їхня довжина становила 30 - 60 мкм, ширина коливалася в межах 10 - 30 мкм. При цьому відзначається висока чистота поверхні обробленої заготовки.

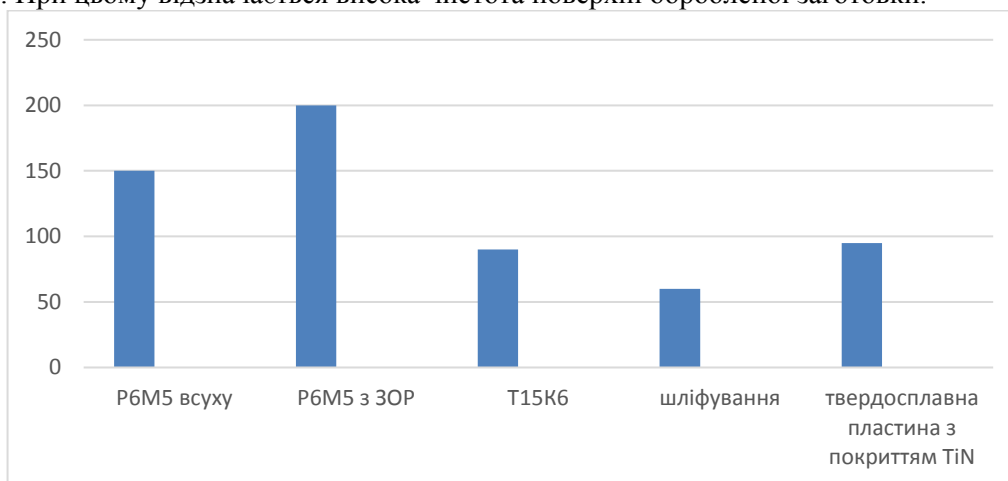


Рис. 2. Вплив матеріала ріжучої частини інструмента на довжину пори

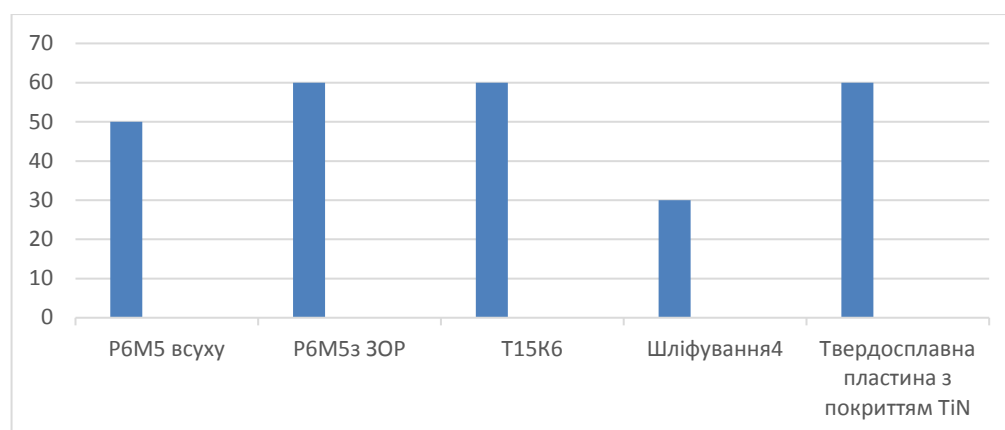


Рис. 3. Вплив матеріала ріжучої частини інструмента на ширину пори

Порівняно зі всіма видами інструментальних матеріалів, що використовуються при проведенні експериментів, абразивна обробка показала максимальне затягування пор поверхневому шарі заготовки.

Найкращі результати були досягнуті при чистовій обробці зразків твердосплавною пластиною з покриттям TiN із МОР та швидкості різання $V = 140$ м/хв. В результаті дослідження було встановлено, що тривалість пори відповідала діапазону 40 – 95 мкм, ширина 25 – 60 мкм, при цьому спостерігається мінімальна шорсткість поверхні Ra 0,4.

В результаті експериментів встановлено, що зміна режимів різання, застосування МОР та характеристик різального інструменту в процесі обробки металопорошкових спечених матеріалів істотно впливають на зміну розмірів поверхневих пор. Важливе значення у формуванні якості поверхні відіграє вибір режимів обробки. При точннні ПЖР -3 швидкорізальною сталлю P6M5 всуху при $V = 20$ м/хв, максимальна довжина пори склала 150 мкм, але при швидкості різання $V = 80$ м/хв максимальний розмір пори досягав 160 мкм. З застосуванням водорозчинної 3% МОР та швидкістю різання $V = 20$ м/хв максимальний розмір пори становить 210 мкм. У процесі шліфувальної обробки зразків із ПЖР-3 спостерігалось аналогічне зростання пор при зміні швидкості різання: при $V = 60$ м/хв максимальна довжина пори становила близько 60 мкм, при збільшенні V до 120 м/хв спостерігалася зміна максимальних розмірів до 90 мкм.

Таким чином, встановлено, що в процесі механічної обробки металокерамічних спечених матеріалів відбуваються значні перетворення структури поверхневого шару, що сприяють зміні

властивостей поверхневого шару. Застосування абразивної обробки призводить практично до повного затягування пор біля поверхні.

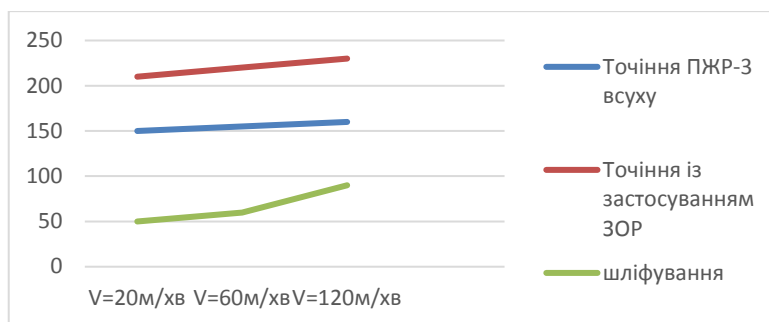


Рис.4. Залежність розміра пор від режимів різання

Висновки.

1. Найважливіші фактори, що впливають на зміну їх розмірів та форми:
 - матеріал різального інструменту, що застосовується при обробці;
 - здатність оброблюваного матеріалу протистояти пластичній деформації під час обробки;
 - режими різання, обґрунтовані умовами взаємодії різних матеріалів;
 - застосування МОР, необхідність використання яких пояснюється технічними умовами різання тим чи іншим матеріалом;
2. При абразивній обробці відбувається процес замазування дрібних пор повністю, великі пори повністю не затяглися, але зазнали значного скорочення розмірів.
3. Застосування при чистовій обробці шліфування сприяє максимальній зміні розмірів пори. Ті пори, які повністю не затягнулися, набули витягнутої форми, тобто спостерігається значне переважання скорочення ширини над скороченням довжини пори.
4. Застосування твердосплавного інструменту з покриттям нітриду титану дозволяє отримати поверхню з відносно високою якістю поверхні.

Список використаних джерел:

1. Tetiana Halchuk, Oleksandr Povstyanoy, Roman Polinkevych, Olha Redko and Nataliya Zubovecka. Antifriction hroducts from composite material based on LH15 steel powder / Advances in Design, Simulation and Manufacturing // V Proceedings of the 7th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2024, June 7–10, 2024, Pilsen, Czech Republic – Volume 2: Manufacturing and Materials Engineering. P. 382- 391. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63720-9_33.
2. Zabolotnyi, O., Bozhko, T., Halchuk, T., Zaleta, O., Cagáňová, D. Investigation of the Surface Layer Hardness When Grinding Sintered Porous Workpieces (2022) Lecture Notes in Mechanical Engineering, pp. 355–364. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_35.
3. Zabolotnyi, O., Bozhko, T., Machado, J., Yarmoliuk, S., Zaleta, O. (2022). Influence of the Cutting Temperature on the Surface Layer Quality When Grinding Sintered Porous Materials. In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G., Pavlenko, I. (eds) Advanced Manufacturing Processes III. InterPartner 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_45.

Н.М. Струк, Н.О. Філюк, О.В. Заболотний

Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ПЕРЕРОБКИ СИРОВИНИ ПРИРОДНОГО ПОХОДЖЕННЯ ТА ВІДХОДІВ МЕБЛЕВОГО ВИРОБНИЦТВА ДЛЯ ОТРИМАННЯ НА ЇХ ОСНОВІ ІННОВАЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЕКОБЕЗПЕЧНИХ ВИРОБІВ ДЛЯ РІЗНИХ ГАЛУЗЕЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

У статті розглядаються останні досягнення у технологіях переробки опалого листя та іншої сировини природного походження у біопаливні брикети або пелети або інші біокомпозиційні матеріали і екобезпечні вироби на їх основі для побутових потреб та потреб сучасної промисловості. Нами представлено узагальнення експериментальних результатів із визначенням впливу вологості, типу та кількості в'язких компонентів на фізико-механічні та термохімічні властивості брикетів, а також дослідження кінетики розкладу під час піролізу та згоряння. Розглянуто також сучасні підходи з термохімічного попереднього оброблення, зокрема гідротермічну карбонізацію, яка оптимізує якість пелет, що виробляються з листової біомаси. У роботі наведено порівняння параметрів якості пелет, незалежно від того, чи виготовляються вони без додавання в'язких компонентів, чи з їхньою допомогою, а також охоплено перспективи їх використання для стійкого енергозабезпечення та оптимізації логістичних процесів у містах.

Ключові слова: переробка, повторне використання, сировина природного походження, відходи меблевого виробництва, пелети, брикети, біокомпозиційні матеріали, екобезпечні вироби.

N.M. Struk, N.O. Filiuk, O. V. Zabolotnyi

PROCESSING TECHNOLOGIES INVESTIGATION OF NATURAL RAW MATERIALS AND FURNITURE PRODUCTION WASTE FOR PRODUCING INNOVATIVE MATERIALS AND ECO-FRIENDLY PRODUCTS FOR VARIOUS INDUSTRIES

Вступ. Опале листя дерев, гілки, кора, шишки, хвоя, трава, що накопичується в міських і приміських територіях, становить величезний обсяг біомаси, яку можна використовувати для виробництва біопалива або інноваційних екобезпечних матеріалів [1]. Також є постійно зростаючі обсяги відходів меблевого виробництва, повторна переробка яких у, наприклад, нові матеріали чи вироби для потреб індустрії дозволить заощадити значні матеріальні ресурси. Сучасні дослідження підкреслюють, що збирання і переробка листового сміття можуть не лише зменшити екологічне навантаження й ризики для здоров'я людей, пов'язані з непередбачуваним пилом та злиттям відходів, але й слугувати ефективним джерелом поновлюваної енергії [2].

Для міських умов окрему увагу приділяють переробці листя зелених насаджень, що накопичуються у міських середовищах. Дослідження показують, що листя таких видів, як липа, платан та ін., має можливість бути перетвореним у якісне тверде паливо завдяки пелетизації та агломерації, що значно підвищує їх щільність і сприяє зменшенню логістичних витрат [2]. Крім того, механічне подрібнення дає змогу підвищити фізико-механічні та енергетичні характеристики біомаси, що дозволяє інтегрувати її у теплові установки без ризику несподіваного утворення попелу, який може впливати на експлуатацію котлів [2].

Важливим напрямком у сучасних дослідженнях є механічна обробка та пелетизація (брикетизація) листя, що є ключовим аспектом для застосування цих відходів як біопалива. Дослідження показують, що первинне подрібнення листя значно підвищує їх щільність, що сприяє зниженню витрат на транспортування та зберігання сировини, а також покращує механічні властивості отриманих брикетів. Практична реалізація полягає у використанні технологій для агломерації, що дозволяє отримувати пелети (брикети) з нижчою вологістю, високою міцністю та сприятливим нижчим значенням теплотворної здатності, знаходячи застосування в існуючих системах опалення [2].

Ранні роботи з аналізу якості пелет (брикетів) з опалого листя показали, що вплив вологості сировини та наявності додаткових зв'язуючих (наприклад, гліцеролу) визначають механічну міцність, щільність і теплотворну здатність кінцевого продукту [1]. Крім того, дослідження з теплового розкладу та піролізу мобілізують дані щодо кінетичних параметрів процесів, що відбуваються під час згоряння, що є важливими для оптимізації енергетичних систем, які працюють на основі біомаси [3].

Методологія та технологічні підходи. За основу сучасних технологій переробки опалого листя для виготовлення біопаливних пелет покладено механічну денсифікацію сировини через подрібнення та подальшу компресію з використанням спеціалізованих пелетизаторів. Зокрема,

дослідники дослідили вплив різних рівнів вологості (10, 15, 20 wt%) та додавання гліцеролу (0, 5, 10 wt%) як дешевої альтернативи синтетичним зв'язуючим, що значно впливає на механічні характеристики пелет – зниження щільності, зменшення міцності та підвищення їх еластичності [1]. Дослідження також свідчать, що збільшення вмісту гліцеролу може зменшувати щільність і міцність пелет, що в свою чергу впливає на експлуатаційні характеристики палива [1].

Паралельні дослідження з використанням термогравіметричного аналізу (TGA) проводяться для оцінки термохімічної реактивності пелет, де порівнюють зразки, отримані без і з додаванням зв'язуючих компонентів [3]. Дані TGA дозволяють визначити активаційну енергію при піролізі та згорянні, що вказує на зміну реактивності біомаси при додаванні гліцеролу [3]. Крім того, визначення параметрів, таких як нижча теплота згоряння та об'ємна щільність пелет, показали, що пелети з опалого листя можуть мати теплофізичні властивості, близькі до властивостей традиційних деревних пелет [2].

Сучасні підходи до термохімічного перетворення листя активно розвиваються із застосуванням інноваційних методів, таких як мікрохвильова асистована гідротермічна карбонізація. Ця технологія дозволяє перетворити листя в гідрохар, який характеризується високим вмістом енергії та можливістю використання як біопаливо або як добавка для покращення ґрунтових властивостей [4]. Дослідження свідчать, що при застосуванні мікрохвильової технології до спадного листя міських дерев можна досягнути як вищої віддачі продукту, так і зменшення енергоспоживання у порівнянні з традиційними методами, що позитивно впливає на економічну ефективність процесу [4].

Окрім класичного підходу до пелетизації, сучасні дослідники застосовують технології термохімічного попереднього оброблення, такі як галогенована торрефікація, паровий вибух та гідротермічна карбонізація (НТС) для покращення властивостей біомаси ще на стадії сировини. Ці методи дозволяють знизити вміст вологості та підвищити концентрацію вуглецю, що позитивно впливає на енергетичну ефективність пелет і робить їх більш стійкими до атмосферних впливів під час зберігання та транспортування [5, 6].

Варто відзначити, що інтегровані підходи, такі як синхронізація торрефікації та пелетизації (STP), дають змогу одночасно проводити термічну обробку та ущільнення біомаси, що знижує логістичні витрати і скорочує енергоспоживання за рахунок інтеграції процесів [7]. Автоматизовані системи, що включають ультразвукові вібрації під час пелетизації, сприяють рівномірному нагріванню сировини, що поліпшує зв'язуючі властивості природного лігніну та полегшує процес формування пелет [7].

Експеримент. Результати експериментальних досліджень демонструють, що при оптимальних параметрах подрібнення та режимах пелетизації вихідні пелети опалого листя характеризуються нижчою теплотою згоряння приблизно 14.5–15.5 MJ/kg, механічною міцністю, що варіюється в межах 90–96%, і об'ємною щільністю 600–660 kg/m³, що дозволяє їх використовувати в промислових котлах з горінням біомаси [2]. Дослідження з механічного ущільнення також вказують на вплив ступеня подрібнення сировини – дрібніша фракція значно підвищує компактизацію та однорідність пелет, що суттєво покращує їх логістичні та експлуатаційні характеристики [2].

Додатково до механічних властивостей, визначено також хімічний склад пелет, де підвищений вміст мінеральних компонентів (такі як кальцій, калій, залізо) може впливати на температуру плавлення золи під час згоряння. Це зокрема важливо для оптимізації режимів очисних систем котлів [2]. Водночас, застосування природних зв'язуючих (як, наприклад, гліцерол) дозволяє компенсувати негативний вплив вологості сировини та забезпечити кращу адгезію між частинками біомаси, що підвищує міжфазну міцність пелет [1].

Постійне спостереження за параметрами згоряння пелет дозволяє вивчити ступені реактивності біомаси під час піролізу та подальшого згоряння. Так, експерименти з використанням TGA показали зниження активаційної енергії у зразках з додаванням гліцеролу, що підтверджує ефективність застосування зв'язуючих компонентів для поліпшення реактивності під час термічної обробки [3].

Інтеграція методів попередньої термохімічної обробки. Окрім класичних методів пелетизації, останні дослідження орієнтовані на використання термохімічних технологій для покращення властивостей біомаси. Гідротермічна карбонізація (НТС) дозволяє обробляти вологу біомасу, не вимагаючи попереднього сушіння, що є критично важливим для сировини з високим вмістом вологи, такої як опале листя [5]. НТС сприяє збільшенню вмісту вуглецю та підвищенню енергетичної щільності кінцевого продукту, що полегшує транспортування і зберігання пелет.

Попередні дослідження вказують на те, що застосування НТС значно покращує об'єктивні індикатори згоряння пелет, знижуючи ризики корозійного впливу інергійних компонентів [6].

Інтеграція термохімічного попереднього оброблення з пелетизацією відкриває нові перспективи для виробництва високоякісного біопалива з опалого листя. Синхронізація процесів дозволяє одночасно зменшувати вологість сировини, покращувати зв'язування часток і підвищувати механічну стабільність пелет, що особливо актуально при виробництві пелет з матеріалів з низькою первинною щільністю [7]. В цьому контексті інтегровані платформи, що поєднують метаноліз, торрефікацію та пелетизацію, забезпечують високий рівень енергетичної ефективності та економічну конкурентоспроможність кінцевого продукту [7].

Міська біомаса та потенційне застосування. Розгляд переробки опалого листя охоплює також аспекти використання біомаси з міських територій. Дослідження, що аналізують потенціал використання залишків опалого листя з урбанізованих просторів, показують, що правильне механічне попереднє оброблення (зокрема, подрібнення, ущільнення та подальша пелетизація) дозволяє збільшити щільність біомаси до рівня традиційних деревних пелет, що сприяє зменшенню логістичних витрат і покращенню експлуатаційних характеристик [2]. Одночасно, хімічний аналіз вмісту мінеральних домішок у різних видів опалого листя дозволяє визначити оптимальні технологічні параметри для отримання пелет з необхідною температурою самозаймання, із мінімальною кількістю золи, що робить їх придатними для сучасних систем згоряння [2].

На додаток, технології пелетизації опалого листя включають використання природних зв'язуючих агентів або навіть методів, що не вимагають додавання сторонніх компонентів, завдяки особливостям самоорганізації біомаси при високому тиску та температурі, що дозволяє отримати стабільний продукт із високою теплоотою згоряння [8]. Також альтернативні технології, що передбачають додавання відпрацьованих олій та полімерних розчинів як зв'язуючого компоненту, демонструють можливість одночасної утилізації декількох відходів, що позитивно впливає на економічну доцільність виробництва пелет [8].

Порівняльний аналіз та оцінка ефективності. Порівняльний аналіз сучасних досліджень з пелетизації опалого листя дає змогу визначити ключові параметри, що впливають на якість кінцевого продукту. Основними характеристиками, що оцінюються, залишаються об'ємна щільність ($600\text{--}660\text{ kg/m}^3$), механічна міцність (до 96% при стандартах міцності) та нижча теплота згоряння (близько $14.5\text{--}15.5\text{ MJ/kg}$) [2, 1]. При цьому вплив додавання гліцеролу як зв'язуючої речовини дозволяє помітно змінити фізичні характеристики пелет, знижуючи їх об'ємну щільність і змінюючи баланс між міцністю та еластичністю, що може бути оптимізовано за рахунок більш точного регулювання вологості сировини [1].

Дослідження кінетики термічного розкладу пелет показують, що додавання в'язких компонентів впливає на активаційну енергію реакції під час піролізу, що має пряме значення для ефективності згоряння біопалива в котлах і газогенераторах [3]. Результати демонструють можливість оптимізації технологічного процесу з обранням спеціальних режимів пелетизації для досягнення максимальної енергетичної ефективності та зниження екологічного впливу [9].

Нові тенденції та перспективи. Сучасні дослідження демонструють позитивну динаміку в розвитку технологій, які поєднують класичну механічну пелетизацію із термохімічними методами попередньої обробки, наприклад, гідротермічною карбонізацією (НТС). Цей напрямок дозволяє перетворювати вологу біомасу, таку як опале листя, без необхідності енергозатратного сушіння, і значно покращити її паливні характеристики, що відкриває нові перспективи для інтегрованих біоенергетичних систем [5, 6]. Інтегровані системи, що синхронізують торрефікацію або НТС з пелетизацією, демонструють значне збільшення енергетичної щільності продукту, що робить їх конкурентоспроможними не тільки в контексті відновлюваних джерел енергії, але й для застосування в системах сумісного згоряння з викопними паливами [7].

Крім того, перспективними є дослідження з оптимізації параметрів подрібнення біомаси (розмір частинок, ступінь подрібнення) та контролю вологості сировини, що робить процес пелетизації більш стабільним і відтворюваним для великих обсягів виробництва [10]. З метою забезпечення високої ефективності пелет також розглядаються методи використання природних та синтетичних в'язких компонентів, що сприяють оптимізації енерговіддачі та зменшенню витрат на транспортування за рахунок збільшення щільності кінцевого продукту [8, 11].

Сучасний тренд спрямований на створення інтегрованих біорефінерій, де відходи рослинного походження, зокрема опале листя, обробляються до високоякісних пелет біопалива, які можуть використовуватись як стабільне джерело енергії для локального споживання та промислових застосувань. Це дозволяє знизити економічні витрати на утилізацію органічних залишків,

забезпечити енергетичну незалежність міст та сприяти циркулярній економіці, зводячи до мінімуму вплив на навколишнє середовище [12].

Висновки. Підсумовуючи, останні дослідження переробки опалого листя дерев у біопаливні пелети виявляють такі ключові тенденції: оптимізація параметрів пелетизації (вологість, розмір частинок, режим пресування) із застосуванням природних в'язких речовин (наприклад, гліцеролу) дозволяє отримати пелети з покращеними механічними характеристиками та підвищеною енергетичною щільністю; використання термохімічних методів попередньої обробки, зокрема гідротермічної карбонізації, забезпечує можливість обробки вологих біомас, що суттєво підвищує якість кінцевого продукту; інтегрована технологія синхронізації процесів торрефікації та пелетизації дозволяє значно знизити витрати енергії та економити ресурси при перетворенні сировини. Ці підходи підтверджують потенціал опалого листя як перспективної сировини для виробництва біопаливних пелет, що відповідають сучасним вимогам до якості палива, екологічним вимогам та сприяють стійкому розвитку енергетики.

Аналіз експериментальних досліджень свідчить, що комбінування механічних, термохімічних та інтегрованих підходів до переробки опалого листя відкриває широкий спектр можливостей для його ефективної утилізації та використання у виробництві біопелет, що може конкурувати з традиційними викопними та деревними видами палива у плані енергетичної віддачі та експлуатаційних характеристик. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію параметрів подрібнення різних видів сировини природного походження (листя, гілок, шишок, кори, хвої, трави тощо), підготовка сумішей з різних видів подрібненої сировини у різних пропорціях, оптимізації процесів пресування, та масштабування технологій з проведенням пілотних досліджень, для підтвердження енергетичної ефективності розробленої технології, а також економічної та екологічної доцільності запропонованих методів [5, 6].

Отже, проведений аналіз сучасної наукової літератури демонструє, що завдяки впровадженню інноваційних технологій та оптимізації процесів, переробка опалого листя та інших доступних видів біосировини природного походження в біопаливні пелети набуває все більшої популярності, що сприяє розвитку відновлюваних джерел енергії та створенню екологічно чистих технологічних ланцюгів із використанням міських біоресурсів [8, 3].

Таким чином, останні дослідження охоплюють як детальне вивчення впливу первинних параметрів сировини на якість пелет, так і сучасні термохімічні підходи з попередньої обробки, що дозволяють отримати пелети з оптимальними паливними характеристиками. Ці результати свідчать про те, що опале листя може успішно конвертуватись у високоякісний біопелет завдяки інтегрованим технологічним платформам і може стати важливим компонентом у системах відновлюваної енергетики в умовах зростання міських обсягів біовідходів [2, 5].

У майбутньому подальші дослідження з акцентом на масштабування технологій, автоматизацію виробничих ліній та подальше вдосконалення інтегрованих підходів дозволять ще більше підвищити конкурентоспроможність біопелет на основі опалого листя та інших видів природної біосировини як альтернативного джерела енергії, що позитивно впливає на екологічний баланс та зменшує залежність від викопних ресурсів [12, 7].

Таким чином, сучасні дослідження переробки опалого листя та інших видів біосировини природного походження в біопаливні пелети охоплюють:

1. Оптимізацію параметрів пелетизації – вплив тиску, вологості, розмірів частинок, виду сировини та додавання природних зв'язуючих [1, 8].
2. Термохімічну обробку сировини, зокрема гідротермічну карбонізацію для обробки вологих біомас, що дозволяє підвищити енергетичну щільність та зменшити вміст летких компонентів [5, 6].
3. Дослідження кінетики піролізу та згоряння пелет з метою оптимізації режимів експлуатації енергетичних установок [3, 4].
4. Інтегровані технологічні платформи, що поєднують механічне ущільнення із термохімічними методами попередньої обробки, що забезпечують підвищення якості кінцевого продукту й оптимізацію витрат [7, 5].

Як свідчать результати аналізу, останні дослідження демонструють, що використання опалого листя та інших доступних видів сировини природного походження для виробництва біопелет має високий перспективний потенціал завдяки розробці вдосконалених технологій пелетизації, які забезпечують необхідну якість продукту для сучасних енергетичних систем. Подальші наукові та інженерні розробки будуть спрямовані на оптимізацію параметрів технологічного процесу, що дозволить створити економічно та екологічно ефективний ланцюг переробки опалого листя та інших видів природної біосировини в біопаливні пелети та нові біокомпозиційні матеріали та

екобезпечні вироби на їх основі, які відповідають сучасним вимогам до сталого розвитку та відновлюваної енергетики [12, 6].

Таким чином, сучасні дослідження надають можливість об'єднання кількох підходів – оптимізація параметрів сировинного попереднього оброблення, застосування природних зв'язуючих та впровадження інтегрованих термохімічних технологій – що робить виробництво пелет на основі опалого листя та інших видів доступної біосировини природного походження не лише ефективним, але й перспективним для широкого використання в енергетиці та управлінні міськими відходами [9, 10].

Заключення. Загалом, аналіз останніх досліджень переробки опалого листя та інших видів доступної природної біосировини у біопаливні пелети та нові біокомпозиційні матеріали і екобезпечні вироби на їх основі підтверджують можливість конвертації великої кількості міського листового сміття у високоякісний біопелет або інноваційних матеріал, що може успішно конкурувати з іншими видами біомаси як паливна сировина. Сучасні експериментальні дані свідчать про позитивний вплив оптимальних режимів пелетизації, а також застосування термохімічних попередніх обробок, які значно підвищують енергетичну ефективність і знижують витрати на зберігання та транспортування кінцевого продукту. Подальші дослідження повинні бути зосереджені на масштабуванні процесів, автоматизації виробничих ліній та детальному аналізі економічної доцільності, що відкриє нові можливості для впровадження технологій отримання біопелет та різних видів інноваційних біокомпозиційних матеріалів на основі різних видів біосировини природного походження в комплексні енергетичні системи [5, 10].

Це дослідження надає досить широкий огляд сучасних наукових підходів до переробки опалого листя та інших видів доступної природної біосировини у біопаливні пелети і підкреслює, що розробка нових технологій комбінованого застосування механічних, термохімічних і інтегрованих методів є ключем до отримання конкурентоспроможного та екологічно чистого продукту, що матиме значний потенціал для впровадження у системи відновлюваної енергетики майбутнього [8, 7].

Таким чином, останні дослідження засвідчують, що завдяки оптимізації процесів пелетизації, використанню природних зв'язуючих речовин та інтеграції термохімічних технологій, переробка опалого листя та інших видів біосировини природного походження у біопаливні пелети та різні види інноваційних біокомпозиційних матеріалів та екобезпечних виробів на їх основі є реалістичним і дуже перспективним напрямком для енергетичної та інших галузей промисловості, що сприятиме зменшенню екологічного навантаження в міських районах та підвищенню ефективності використання природних, енергетичних та інших видів ресурсів, а також забезпечить повторну переробку відходів меблевого виробництва, що сприятиме розробці і впровадженню інноваційних технологій для їх повторного використання [13-14].

Зазначені підходи та результати експериментальних досліджень, викладені в сучасній літературі, дають нам вагомні аргументи для подальшого експериментального дослідження технологічних процесів подрібнення, підготовки сумішей, пресування різних видів природної біосировини та способів утилізації біовідходів з метою розробки нових інноваційних технологій отримання енергоефективних і екологічних видів біопалива, а також інноваційних біокомпозиційних матеріалів та екобезпечних виробів на їх основі із доступної сировини природного походження для потреб сучасної індустрії.

Літературні джерела

1. Biofuel quality analysis of fallen leaf pellets: Effect of moisture and glycerol contents as binders/ William A. González, Diana López, Juan F. PérezRenewable Energy, Mar 2020 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.094>
2. Evaluation of Urban Tree Leaf Biomass-Potential, Physico-Mechanical and Chemical Parameters of Raw Material and Solid Biofuel. Krzysztof Mudryk, Marcin Jewiarz, Marek Wróbel, Marcin Niemiec, Arkadiusz DyjakonEnergies, Feb 2021 <https://doi.org/10.3390/en14040818>
3. Pyrolysis and Combustion Kinetics of Garden Waste Pellets as Solid Biofuel for Thermochemical Energy Recovery/ Jonatan Gutiérrez, Juan F. Pérez/ Materials, Apr 2025 <https://doi.org/10.3390/ma18071634>.
4. Valorization of tree leaves waste using microwave-assisted hydrothermal carbonization process Kang Kang, Tianle Zhang, Guotao Sun at all · 2021 <https://doi.org/10.1111/gcbb.12882>
5. Upgrading Fuel Properties of Residual Biomass by Hydrothermal Carbonisation/ LJ Hansen 2023 <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1684940/1684940.pdf>.

6. Influence of Hydrothermal Carbonization on Catalytic Fast Pyrolysis of Agricultural Biomass/ Lukasz Niedzwiecki, Krzysztof Moscicki, Anton Bijl at all Appl. Sci. 2023, 13(7), 4190; <https://doi.org/10.3390/app13074190> <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1684940/1684940.pdf>.
7. Experimental investigations of utilizing cellulosic biomass for biofuel productions on multi-platforms/ Y Yang 2023/ <https://krex.k-state.edu/bitstream/handle/2097/42942/YangYang2023.pdf?sequence=1>.
8. Технології поводження з відходами рослинного походження озелених територій/ МО Гончаренко 2024 https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/95608/1/Goncharenko_bak_rob.pdf.
9. Analysis of Leaf Litter as Potential Renewable Energy Source for Cooking A. Hartawan, N. Aditya, N.G. Ratnasari, W. Sujatmiko, Y.S. NugrohoEvergreen, Dec 2021citations 3 <https://doi.org/10.5109/4742129>.
10. State and Prospects of the Production of Compressed Solid Biofuels I.O. Mikulionok Energy Technologies & Resource Saving, Dec 2022 <https://doi.org/10.33070/etars.4.2022.02>.
11. Densification of Hemp Floral Biomass Pre and Post-Extraction: Determination of Pellet Physical Characteristics G Lopez 2023 https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1098&context=bae_etds.
12. Biomass Production and Quality of Twelve Fast-Growing Tree Taxa in Short Rotation under Mediterranean Climate/ Joaquín Alaejos, Raúl Tapias, Francisco López, David Romero, Federico Ruiz, Manuel FernándezForests, June 2023 <https://doi.org/10.3390/f14061156>.
- 13 Струк Н.М., Заболотний О.В. Розробка обладнання, інструменту та технології виготовлення паливних брикетів з відходів біосировини природного походження // *Матеріали та технології в інженерії (МТІ-2024): інженерія, матеріали, технології, транспорт: збірник наукових доповідей міжнародної конференції, Луцьк, Україна, 14-16 травня 2024 р.* – Луцьк: Вежа-Друк, 2024. – С 270-273. <https://drive.google.com/file/d/14SDJe2jYFtsLdlYn0oHbSYO-iJKP0dow/view?usp=sharing>
- 14 Філюк Н.О., Заболотний О.В. Розробка обладнання, інструменту та технології виготовлення біокомпозиційних виробів з відходів меблевого виробництва // *Матеріали та технології в інженерії (МТІ-2024): інженерія, матеріали, технології, транспорт: збірник наукових доповідей міжнародної конференції, Луцьк, Україна, 14-16 травня 2024 р.* – Луцьк: Вежа-Друк, 2024. – С 283-285. <https://drive.google.com/file/d/14SDJe2jYFtsLdlYn0oHbSYO-iJKP0dow/view?usp=sharing>

З.С. Сірко¹, Н.Л. Цірень¹, М.М. Толстушко², Н.О. Толстушко², С.Ф. Юхимчук²

Український державний науково-дослідний інститут “Ресурс”¹
Луцький національний технічний університет²

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ЗУБІВ ПИЛ НА ЯКІСТЬ РОЗПИЛЮВАННЯ ДЕРЕВИНИ ТВЕРДИХ ЛИСТЯНИХ ПОРІД

У статті висвітлені питання, що стосуються впливу параметрів зубів пил на якість розпилювання деревини твердих листяних порід. Показано, що в Україні тверді листяні породи складають близько 30%, а найбільш поширенішими із них є дуб, бук та ясен. Ці породи деревини за своїми фізико-механічними показниками суттєво відрізняються від деревини м'яких листяних та хвойних порід. Такі основні показники фізико-механічних властивостей деревини твердих листяних порід як щільність, межа міцності під час стискання вздовж волокон, статична твердість приблизно у декілька разів вищі, ніж, наприклад, у сосни. Такі підвищені значення фізико-механічних показників деревини твердих листяних порід зумовлюють ріст питомої роботи різання, а також більш інтенсивне затуплення зубів пил, що негативно відображається на якості розпилювання.

Ключові слова: деревина твердих листяних порід, параметри зубів пил, якість розпилювання, подача на зуб, посилення колоди, шорсткість оброблених поверхонь.

Z. Sirko, N. Tsiren, M. Tolstushko, N. Tolstushko, S. Yukhymchuk

INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE SAW TEETH ON THE QUALITY OF SPRAYING OF HARD-BROAD WOOD

The article covers issues related to the influence of saw tooth parameters on the quality of sawing hardwood. It is shown that in Ukraine, hard hardwoods make up about 30%, and the most common of them are oak, beech and ash. These types of wood differ significantly in their physical and mechanical characteristics from the wood of soft deciduous and coniferous species. Such basic indicators of the physical and mechanical properties of hardwood wood as density, strength limit during compression along the fibers, static hardness are approximately several times higher than, for example, in pine. Such increased values of the physical and mechanical indicators of hard hardwood wood lead to an increase in the specific work of cutting, as well as a more intense dulling of saw teeth, which negatively affects the quality of sawing.

Keywords: hardwood is hard, parameters of saw teeth, sawing quality, feed per tooth, log reference, roughness of treated surfaces.

Постановка проблеми. Лісоматеріали цінних твердих листяних порід складають приблизно 30%, а найбільш поширенішими із них є дуб, бук та ясен [1]. Ці породи за фізико-механічними властивостями відрізняються від деревини м'яких листяних порід та хвойних порід. Показники основних фізико-механічних властивостей деревини твердих листяних порід (щільність, межа міцності під час стискання вздовж волокон, статична твердість радіальна) приблизно у декілька разів вищі, ніж, наприклад, у сосни. Так, щільність вища у 1,3 – 2,48 рази, межа міцності під час стискання вздовж волокон більша у 2,8 рази, а статична твердість – у 4,7 рази [2]. Такі підвищені значення фізико-механічних показників деревини твердих листяних порід зумовлюють ріст питомої роботи різання в процесі пиляння в 1,4 – 2,0 рази, а також спостерігається більш інтенсивне затуплення зубів пил під час пиляння такої деревини [3, 4].

Окремі породи деревини твердих листяних порід теж відрізняються між собою механічними властивостями, що приводить до різниці в силах різання та віджиму під час пиляння деревини, в якості та точності оброблення, стійкості інструменту і т. і., а в кінцевому результаті – в ефективності їх оброблення різанням.

Виходячи із вищенаведеного, для пиляння деревини твердих листяних порід (для розкроювання колод) необхідно застосовувати пили із зубами підвищеної міцності та стійкості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичний аналіз умов раціональності параметрів пил під час розпилювання деревини твердих листяних порід [5] показує, що для збереження рівня силових навантажень бажано змінювати кутові параметри зубів пил для надання більшої зносостійкості та жорсткості зуба. У цьому напрямку досліджень було проведено багато, але деякі особливості потребують уточнення [1-5].

Постановка завдань. Мета дослідження – визначити вплив параметрів зубів пил на якість розпилювання деревини твердих листяних порід.

Викладення основного матеріалу. Для досліджень використовували рамні пили товщиною 2,2 мм. Розпилювання колод деревини твердих листяних порід проводили на середньопросвітній лісопиляльній рамі 2Р75-1.

Параметри рамних пил – це лінійні та кутові їх характеристики, а оптимальні їхні величини – це ті величини, які забезпечують найбільш високий ефект процесу розпилювання лісоматеріалів. Оптимальні параметри рамних пил повинні задовольняти наступним основним критеріям: забезпечувати максимальну продуктивність та якість розпилювання; обумовлювати найменші втрати деревини в тирсу та забезпечувати найменші витрати на виробництво одиниці продукції.

Якість оброблення поверхонь, що надають товарний вид пиломатеріалам, оцінюють шорсткістю та наявністю мшистості на пластах пиломатеріалів. Шорсткість характеризується сумарною глибиною нерівностей, виривів та рисок від врізання зубів в пласт пиломатеріалів і може бути виражена:

$$H_n = H_1 + H_2 + H_3 + H_4,$$

де H_1 – глибина кінематичних слідів зубів (рисок), мм;

H_2 – глибина нерівностей у зв'язку з неточністю розширення зубів, мм;

H_3 – глибина нерівностей у зв'язку з поперечним відхиленням вершин зубів, мм;

H_4 – глибина слідів руйнування деревини під час зрізання стружок, мм.

Глибину кінематичних рисок визначають за формулою:

$$H_1 = S_z \operatorname{tg} \tau,$$

де S_z – подача на зуб, мм;

τ – кут піднутрення.

За $\tau = 5^\circ$; $H_1 = 0,1 S_z$, що на основі експериментальних дослідів складає тільки 15 – 25 % від загальної глибини нерівностей.

Глибина нерівностей у зв'язку з неточністю розширення зубів може досягати до 0,2 – 0,3 мм незалежно від породи деревини, що розпилюється.

Відхилення вершин зубів у зв'язку з пружним відгином під час однієї і тієї ж подачі досягають великих величин під час розпилювання твердої породи деревини, а глибина слідів руйнування деревини зворотно пропорційна її щільності, а отже, нижча у твердих порід деревини.

Два останніх фактори, маючи зворотні знаки, дають невизначений приріст до перших двох доданків. Разом з тим, можна припустити, що вплив породи деревини більш різко проявляється під час великої подачі на зуб та значному затупленні, тому дуже важливим у підвищенні якості набирає фактор жорсткості зуба.

Подача на зуб за умовами стійкості пил визначається із рівняння, яке враховує стан деревини:

$$(30 - 1,4t^\circ)S_z - 0,75t^\circ + 40 \frac{0,8P_{kp}t}{m_n a_\rho b h_{\max}} = 0,$$

де t – крок зубів пил, мм;

t° – температура деревини, $^\circ\text{C}$;

m_n і a_ρ – поправочні коефіцієнти, що враховують затуплення зубів пил та природу деревини: приймається рівними $a_\rho = 1,15$ і $m_n = 1,25$ – для деревини твердих листяних порід;

P_{kp} – величина критичної сили різання;

b – ширина пропилу, мм;

$h_{\max}$ – найбільша висота пропилу у поставі, мм.

Аналіз виразу дозволяє зробити два основні методичні висновки. Для якісного пиляння деревини твердих листяних порід необхідно: для заданих параметрів пил, породи та стану деревини визначити подачу на зуб і відповідно посилення колоди або вибрати параметри рамних пил та сили їх натягування, необхідні для практичної реалізації заданих посилень колоди, які обмежені іншими факторами (шорсткістю поверхні пиломатеріалів, заповнення впадин зубів, потужністю привода механізму різання, надійністю роботи пил).

Висновки.

1. Підвищені фізико-механічні показники деревини твердих листяних порід у порівнянні із деревиною м'яких та хвойних порід зумовлюють ріст питомої роботи різання, що в свою чергу потребує застосовувати пили із зубами підвищеної міцності та стійкості.

2. Окремі породи деревини твердих листяних порід відрізняються між собою механічними властивостями, що приводить до різниці у силах різання та віджиму під час пиляння деревини, в якості та точності оброблення, стійкості інструменту, а в кінцевому результаті – в ефективності їх оброблення різанням.

3. Наведені формули для визначення шорсткості оброблених поверхонь пиломатеріалів, глибини кінематичних рисок та подачі на зуб різального інструменту дозволяють констатувати, що для якісного пиляння деревини твердих листяних порід для заданих параметрів пил необхідно визначити подачу на зуб і відповідно посилення колоди або вибрати параметри рамних пил, необхідні для практичної реалізації заданих посилень колоди в процесі розпилювання.

Список використаних джерел

1. Сопушинський І.М., Масвський В.О., Вінтонів І.С., Сопушинська М.П., Тайшингер А., Ангельстан П., et al. Зв'язок властивостей деревини та якості виробів з деревини. Науковий вісник НЛТУ, 2007, вип. 17.4. С. 104-107.
2. Вінтонів І.С., Сопушинський І.М., Тайшінгер А. Деревинознавство: навчальний посібник. Львів: Априорі, 2007. 312 с.
3. Кірик М.Д. Інструмент для оброблення деревини та деревних матеріалів. Коломия: ТМЦ Коломийського механіко-технологічного коледжу, 1999. 190 с.
4. Сірко З.С. Експлуатація лісопиляльних рам: Монографія. Київ: Центр учбової літератури, 2017. 208 с.
5. Кірик М.Д. Механічне оброблення деревини та деревних матеріалів. Львів: ТЗОВ «Кольорове небо», 2006. 412 с.

Рецензент: Шимчук Сергій Петрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету.

Т.С. Ярошевич, С.В. Ягелюк

Луцький національний технічний університет

**РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗНИКА ЯКОСТІ МОРОЗИВА З
УРАХУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПЕРЕРОБКИ**

Якість промислово виробленого морозива визначається поєднанням споживчих характеристик та технологічно вимірюваних показників. У цьому дослідженні запропоновано методологію визначення комплексного показника якості (КПЯ), яка об'єднує сенсорні властивості (зокрема смак) з ключовими технологічними параметрами, такими як вміст жиру, збитість і час танення. Досліджено три комерційні зразки морозива на основі стандартних українських методик й нормалізації результатів. Розраховані значення КПЯ показують, що досягнення високої якості продукції потребує одночасної оптимізації як рецептури, так і параметрів роботи технологічного обладнання. Результати дозволяють сформулювати конкретні рекомендації щодо вдосконалення виробничих ліній для забезпечення збалансованої якості – з урахуванням споживчих очікувань щодо смаку, структури й консистенції та технологічних властивостей, таких як збитість і час танення.

Ключові слова: морозиво, комплексний показник якості, органолептична оцінка, збитість, танення, технологічна оптимізація, обладнання.

T. Yaroshevych, S. Yaheliuk

**DEVELOPMENT OF A COMPREHENSIVE QUALITY INDICATOR FOR ICE CREAM
WITH CONSIDERATION OF PROCESSING EQUIPMENT PARAMETERS**

The quality of industrially produced ice cream is determined by a combination of consumer-oriented and technologically measurable characteristics. This study proposes a Comprehensive Quality Indicator (CQI) methodology that integrates sensory attributes (primarily taste) with key processing-dependent parameters such as overrun (degree of air incorporation) and melting time. Using standard Ukrainian methodologies and CQI-based normalization, three ice cream products were evaluated. The resulting CQI values demonstrate that achieving high product quality requires optimizing both formulation and equipment operation. Based on the findings, the study recommends specific technological improvements for manufacturing lines that aim to align consumer preferences especially taste, structure, consistency, with desirable structural properties such as overrun (degree of air incorporation) and melting time.

Keywords: ice cream, comprehensive quality indicator, sensory evaluation, overrun, melting time, technological optimization, equipment

Introduction. In the modern food industry, the production of ice cream presents a unique challenge: it must meet both the sensory expectations of consumers and the rigorous technological standards required for industrial manufacturing. Ice cream is not only a dessert – it is a complex aerated emulsion-foam system with delicate structural properties formed during production. Characteristics such as taste, total fat, structure, consistency, overrun (degree of air incorporation) and melting time are crucial for consumer acceptance and are highly sensitive to variations in processing conditions.

Despite the development of regulatory standards in Ukraine (e.g., DSTU 4733:2007 and DSTU 4735:2007), many producers continue to rely on outdated or inflexible processing equipment. These systems are often unable to achieve the precise control necessary over freezing kinetics, air distribution, or structural stabilization, which are vital for ensuring uniform product quality. As a result, products may exhibit inconsistencies in creaminess, hardness, or resistance to melting, leading to consumer dissatisfaction and economic losses for manufacturers.

The core of this problem lies in the technological gap between production requirements and equipment capability. In particular, insufficient control of parameters such as draw temperature, dasher speed, and aeration rate directly impacts the microstructure of ice cream – specifically the size and distribution of ice crystals and air cells. These structural elements determine key physical properties like melting time and overrun (degree of air incorporation), which in turn affect organoleptic perception such as texture and mouthfeel. If freezing is too slow or aeration is uneven, the resulting product may contain large crystals or unstable foam, reducing its sensory appeal and shortening its shelf life [1].

Furthermore, producers often lack a unified framework for evaluating how processing variables translate into final product quality. Traditional assessments focus on individual parameters (e.g., fat content, sugar concentration, or taste), but these isolated metrics fail to capture the holistic performance of the product. Without an integrated evaluation system, it becomes difficult to identify which production adjustments are most effective in improving quality.

To address this challenge, there is a growing need for an objective, quantifiable metric that can link technological performance with consumer-oriented outcomes. One promising solution is the development of a Comprehensive Quality Indicator (CQI), which consolidates multiple physical and sensory variables

© Т.С. Ярошевич, С.В. Ягелюк

into a single evaluative score. Such an indicator can serve not only as a diagnostic tool for identifying shortcomings in current production but also as a benchmark for optimizing equipment design and process control.

The study proposes the construction of a CQI tailored specifically to the Ukrainian ice cream market. It focuses on the most commonly consumed types of ice cream – such as classic “Plombir” and cream-based cones – and evaluates them based on three main parameters: taste (as the dominant sensory trait), overrun (degree of air incorporation) (as a marker of aeration quality), and melting time (as an indicator of structural stability). By analyzing how each of these parameters contributes to overall product quality, and how they are influenced by processing conditions, we aim to establish a scientific basis for improving production lines [2].

Ultimately, the objective is not merely to assess current products but to guide the development of technological strategies that can reliably produce ice cream with optimal organoleptic, physicochemical, and functional characteristics. The CQI will serve as a bridge between consumer satisfaction and industrial efficiency, helping manufacturers align equipment capabilities with market demands.

Analysis of recent studies. Recent scientific research confirms that ice cream quality depends not only on ingredients, but largely on the technological parameters of the equipment used during production. Studies by Inoue et al. have demonstrated that the settings of continuous freezers – specifically draw temperature, dasher speed, and aeration rate – significantly affect the size and distribution of ice crystals and air cells. These microstructural elements, in turn, determine product texture, hardness, and melting time [3]. Gallagher’s research supports this, showing that dasher geometry directly influences freezing efficiency and residence time, which are critical for structure & consistency [4].

Other researchers have evaluated the effect of aeration equipment on foam characteristics. Narchi et al. showed that rotor–stator systems are effective for producing high overrun (degree of air incorporation) but can yield large bubbles, whereas stirred columns are better for fine foam structures but require higher energy inputs [5]. This engineering trade-off highlights the need for balanced control of aeration to ensure desirable texture and overrun (degree of air incorporation) without compromising stability [6].

Further studies emphasize the direct connection between freezing kinetics and consumer-perceived creaminess. Researchers noted that ice cream samples with smaller crystals and air cells were rated higher in taste and texture evaluations. These structural attributes are most effectively controlled by modern freezing and mixing systems, which provide the fine control needed for high-quality output [3, 5].

In Ukraine, research has focused primarily on the physical and microbiological aspects of ice cream and their compliance with national standards such as DSTU 4733:2007 and DSTU 4735:2007 [10, 11]. However, existing studies often treat quality indicators in isolation, without a comprehensive framework to combine technical and sensory parameters. For example, Narizhniy et al. examined sensory and physicochemical properties of low-calorie ice cream but did not attempt to unify these into a single metric that could guide equipment optimization [7, 8].

The absence of a unified evaluative system presents a gap in the literature. While producers measure fat content, overrun (degree of air incorporation), and taste individually, these indicators do not offer a comprehensive picture of how equipment parameters impact final product quality. This makes it difficult to identify process improvements or benchmark production efficiency. Asmaa Harfousha et al., note that many current industrial lines lack real-time integration of product quality data, leading to variability across production batches [13].

To address this issue, recent studies in related fields have proposed using Comprehensive Quality Indicators (CQI) to assess product performance holistically. For instance, Yaheliuk and Fomich successfully applied a CQI model to optimize fuel roll production by balancing structural and energy characteristics [2, 12]. Their methodology – based on weighted normalization of multiple criteria – can be adapted to ice cream evaluation by incorporating overrun (degree of air incorporation), melting time, and taste as core indicators.

Although CQI-type approaches have been occasionally explored in food science, their application to ice cream remains underdeveloped. Fedchenko et al. were among the first in Ukraine to propose a complex evaluation system for ice cream, integrating sensory, physicochemical, and microbiological characteristics [1]. However, their model lacked a strong focus on processing parameters and did not link quality outputs to equipment design.

Taken together, these findings point to the need for a modern, processing-aware CQI model tailored to ice cream production. Such a model would not only allow for comparative evaluation of popular

Ukrainian ice cream types but also inform targeted upgrades of equipment and technology to improve consistency, consumer satisfaction, and production efficiency

The aim. The aim of this study is to develop a comprehensive Quality Indicator (CQI) for ice cream that explicitly includes processing equipment effects. We will focus on three critical metrics: (1) overrun (degree of air incorporation) (the percent increase in volume from air incorporation during freezing), (2) melting time (resistance to melt under standard conditions), and (3) sensory taste score. The CQI will be a weighted combination of these metrics, reflecting both production performance and consumer satisfaction. By quantifying quality in this integrated way, we can provide clear recommendations for optimizing ice-cream manufacturing lines (e.g. freezer design and settings) to produce better-tasting products with desired texture and melt properties.

Materials and Methods. This study included the evaluation of three commercially available ice cream products representative of the most consumed types in Ukraine: Plombir in chocolate glaze (TM "Limo"), sugar-free Classic Plombir (TM "Maxkholod"), and creamy cone "Eclair Brownie Monaco" (TM "Tri Vedmedi"). All samples were certified in accordance with Ukrainian national standards DSTU 4733:2007 and DSTU 4735:2007, which regulate both compositional and sensory requirements for ice cream products [10, 11].

Sensory evaluation was carried out in accordance with DSTU 4733:2007. Trained panelists assessed product appearance, color, internal structure, consistency, aroma, and flavor. Evaluation was conducted under standardized lighting and temperature conditions, using a 5-point hedonic scale. Sensory defects such as glaze cracking, color irregularities, graininess, or off-odors were recorded as deviations from normative benchmarks. Each sensory test was performed in triplicate, with mean scores used in further analysis.

Standardized methods were applied to ensure reproducibility of freezing parameters and their control using modern production systems [6]. Moisture and total solids content were measured gravimetrically via oven drying at 110–112 °C to constant weight, according to DSTU 8552:2015 [14] and AOAC procedures [4]. Fat content was determined using the Gerber butyrometric method in accordance with ISO 2446:2008 [3, 8]. Titratable acidity was measured by titration with 0.1 N NaOH using phenolphthalein as an indicator, and pH values were recorded using a calibrated potentiometric pH meter. Sugar content was quantified by the Bertrand copper reduction method. Overrun (degree of air incorporation) was measured as the percentage difference in weight between aerated and melted product, per DSTU 4733:2007. Melting time was determined by measuring the time required for 10 mL of meltwater to pass through a funnel at 20 ± 2 °C from a 50 g ice cream sample.

To synthesize a unified quality measure, a Comprehensive Quality Indicator (CQI) was introduced. This index reflects a weighted integration of selected sensory and technological parameters that influence consumer perception and industrial performance. The initial pool of parameters considered for inclusion comprised ten indicators: external appearance, color, structure and consistency, aroma, taste, fat content, total sugar, titratable acidity, overrun, and melting time. To determine the most relevant criteria for inclusion in the final CQI, an expert elicitation procedure was used.

A panel of six qualified experts with backgrounds in dairy technology, food engineering, and sensory analysis participated in the selection and weighting process. Each expert independently ranked the importance of the ten initial parameters. After aggregation and comparative analysis of expert input, five key indicators were selected for CQI modeling: taste, structure and consistency, total fat content, overrun (degree of air incorporation) percentage, and melting time. Final weights were assigned to each criterion based on normalized rankings, reflecting both technological relevance and consumer impact.

All analytical and sensory measurements were performed in triplicate. The resulting CQI scores were used to compare product performance across samples and assess alignment with national quality standards and consumer expectations.

Results. The study evaluated three widely available industrial ice cream products representing different compositional and technological formats: Plombir in chocolate glaze (TM "Limo"), Classic sugar-free Plombir (TM "Maxkholod"), and the Cream Cone "Eclair Brownie Monaco" (TM "Tri Vedmedi").

A standardized methodology was applied to calculate the Comprehensive Quality Indicator (CQI) for ice cream samples, based on multi-criteria normalization and weighted aggregation of key quality parameters. The overall quality score was derived using the following model:

$$CQI = \sum_{i=1}^n W_i \times P_i, \quad (1)$$

where W_i – the weight coefficient reflecting the significance of parameter i for ice cream quality; P_i – the normalized value of parameter i scaled to a dimensionless range between 0 and 1.

Tabl. 1

General Information about Ice Cream Samples

Attribute	Plombir in Chocolate Glaze (TM "Limo")	Classic Sugar-Free Plombir (TM "Maxkholod")	Cream Ice Cream Cone "Eclair Brownie Monaco" (TM "Tri Vedmedi")
Product Type	Plombir Ice Cream in Chocolate Glaze	Classic Plombir Ice Cream, Sugar-Free	Cream Ice Cream Cone "Eclair Brownie Monaco"
Brand	Limo	Maxkholod	Tri Vedmedi
Net Weight, g	80	80	100
Manufacturer	PJSC "Lviv Cold Storage Plant", 2 Povitryana St., Lviv	LLC "Maxkholod", Dmytrivka, Bucha District, Kyiv Region	LLC "Tri Vedmedi", 65 Kozatska St., Berdychiv, Zhytomyr Region
Regulatory Standard	DSTU 4733:2007 – Milk, Cream, and Plombir Ice Cream. General Specifications	DSTU 4733:2007 – Milk, Cream, and Plombir Ice Cream. General Specifications	DSTU 4735:2007 – Ice Cream with Combined Raw Material Composition. General Specifications
Nutritional Value per 100 g:			
– Proteins, g	3.3	4.1	4.6
– Total fats, g (saturated)	21.7 (7.2)	12.3 (7.2)	11.2 (4.3)
– Carbohydrates, g (sugars)	24.2 (18.2)	5.5 (4.5)	29.9 (17.0)
Energy Value, kcal/100 g	305	149.1	242

The assessment was carried out through a multiparametric analysis framework, aimed at quantifying product quality through five principal indicators: sensory (taste), structure and consistency, total fat content, overrun (degree of air incorporation) (air incorporation), and melting time. These indicators were selected to integrate both consumer-relevant attributes and manufacturing-critical physical parameters, thereby enabling simultaneous evaluation of technological performance and sensory satisfaction.

The weighting of parameters was performed using an expert-based approach. Experts independently evaluated the importance of each parameter on a scale from 1 to 10. The individual scores S_{ij} assigned by expert j for parameter i were aggregated to determine the average importance

$$S_i = \frac{1}{m} \sum S_{ij}, \quad (2)$$

where m is the number of experts.

The resulting average scores S_i were then normalized to ensure that the total sum of weights equaled 1, following the equation:

$$W_i = \frac{S_i}{\sum S_i}. \quad (3)$$

This procedure yielded the relative weights used in the CQI model. Statistical methods were employed to assess the consistency of expert evaluations, including measures of standard deviation and coefficient of variation.

The normalized score P_i for each parameter was calculated to transform raw measurements into dimensionless units, ensuring comparability across different metrics. The normalization formula was selected based on the direction of correlation between the parameter and perceived quality. For indicators with direct correlation (e.g., taste, structure, fat content, overrun), the normalization was conducted as:

$$P_i = \frac{\text{MeasuredValue}}{\text{BenchmarkValue}}, \quad (4)$$

For attributes with inverse correlation, where lower values indicate better quality (such as melting time), the normalization was inverted:

$$P_i = \frac{\text{BenchmarkValue}}{\text{MeasuredValue}}. \quad (5)$$

This methodological framework was applied to evaluate three commercially available ice cream (table 1), enabling an objective and integrated quality assessment. All measurements were performed in

triplicate to ensure data reliability, with calibrated instruments and controlled testing conditions to ensure reproducibility. The results are presented in Table 2.

Tabl. 2

Normalized Quality Parameters of Ice Cream Samples

No.	Parameter	Benchmark	Limo	Tri Vedmedi	Maxkholod	Wi	Correlation
1	Taste	5	4	4	5	0.20	Direct
2	Structure & consistency	5	3	4	4	0.14	Direct
3	Total fat, %	16	19.6	11.3	14.4	0.12	Direct
4	Overrun (degree of air incorporation), %	85	86	95	88	0.16	Direct
5	Melting time, min	60	77	52	60	0.16	Inverse

Using the normalized values and the expert-derived weights, the comprehensive quality indicator (CQI) was calculated for each of the analyzed ice cream samples. The results of this evaluation are presented in Table 3.

Tabl. 3

Comprehensive Quality Indicator (CQI) Results

Ice Cream Sample	CQI Value
Plombir in chocolate glaze (TM "Limo")	0.86
Eclair Brownie Cone (TM "Tri Vedmedi")	0.66
Classic Plombir without sugar (TM "Maxkholod")	0.74

Among the tested products, the highest integral quality score was achieved by the Plombir in chocolate glaze (TM "Limo"), which scored 0.86 on the CQI scale. This result can be attributed to the sample's high fat content (exceeding the benchmark value by over 20%), favorable melting time (77 minutes compared to a standard of 60 minutes), and overall solid sensory acceptance, despite scoring slightly below maximum in terms of structure. These technological and sensory strengths yielded high normalized values across most quality dimensions, effectively compensating for a minor structural deficiency.

The Classic Plombir without sugar (TM "Maxkholod") ranked second, with a CQI value of 0.74. While this product achieved the highest possible score for taste (5.0) and satisfactory structure, its lower fat content (14.4% vs. the benchmark of 16%) and average melting stability constrained its final rating. The reduced fat level may be linked to the sugar-free formulation, which often necessitates adjustments in the fat-to-solid balance to maintain palatability and texture. Although its overrun (degree of air incorporation) was above the benchmark (88% vs. 85%), the relatively moderate weight of this parameter ($W_i = 0.16$) limited its compensatory effect.

The lowest CQI value (0.66) was observed in the Eclair Brownie Cone (TM "Tri Vedmedi"), largely due to the combination of a modest sensory rating (taste and structure both scored 4 out of 5), lower fat content (11.3%), and below-standard melting time (52 minutes). Despite achieving the highest overrun (degree of air incorporation) value (95%), the weak performance in high-weighted criteria such as melting time and sensory characteristics reduced the total CQI. This sample's composition — which includes non-dairy fat substitutes according to DSTU 4735:2007 — may have contributed to its diminished melt stability and perceived richness.

These findings highlight the significant role of each selected parameter within the weighted CQI framework. Notably, while parameters such as overrun (degree of air incorporation) may show high absolute values, their relative contribution to total quality remains dependent on both their normalized score and expert-assigned weight. For instance, although "Tri Vedmedi" excelled in overrun (degree of air incorporation), this alone could not compensate for sensory and compositional shortcomings, as those dimensions hold higher weight in determining consumer-perceived quality.

Moreover, the results validate the relevance of using a multi-criteria, weighted assessment model for quality evaluation. This approach allows researchers and manufacturers to quantify not just individual deviations from ideal standards but also the cumulative effect of multiple quality attributes. It becomes especially relevant in industrial contexts where formulation, ingredient substitution, and equipment settings (e.g., freezer draw temperature, homogenization pressure, aerator speed) must be finely tuned to optimize product performance holistically.

In this context, the CQI methodology offers several practical advantages. First, it enables a standardized comparison across diverse ice cream types and production formats. Second, it facilitates evidence-based decisions regarding process modifications or raw material substitutions. Finally, it provides a framework for continuous improvement by indicating which specific parameters most strongly influence the final product quality, based on consumer-relevant benchmarks and expert consensus.

The radar chart (fig.1) presented provides a comparative visualization of the normalized quality parameters of three industrial ice cream samples: Plombir in chocolate glaze (TM “Limo”), Eclair Brownie Cone (TM “Tri Vedmedi”), and Classic Plombir without sugar (TM “Maxkholod”). The evaluation encompasses five key indicators – taste, structure and consistency, total fat content, overrun (degree of air incorporation) (degree of aeration), and melting time – all of which were normalized relative to established benchmark values to facilitate inter-sample comparability.

From the graphical representation, several critical observations emerge. The “Limo” sample exhibits the highest normalized score for total fat content, significantly exceeding the benchmark reference (normalized value > 1.0). This is indicative of its superior richness, a factor positively correlated with both sensory appeal and textural stability. However, the same sample demonstrates a relatively lower score in structure and consistency, suggesting slight deficiencies in structure and consistency or resistance to mechanical deformation during consumption. Nonetheless, its melting time and overrun (degree of air incorporation) values are within acceptable normalized ranges, collectively contributing to its leading comprehensive quality indicator (CQI) score.

In contrast, the “Tri Vedmedi” product achieves the highest value in overrun (degree of air incorporation), reflecting superior air incorporation during freezing. However, it performs less favorably in both taste and melting time – attributes critical to consumer perception and overall structural performance. The relatively low fat content further diminishes its normalized quality score in that dimension, which collectively leads to its lowest CQI value among the three samples.

The “Maxkholod” sample demonstrates a well-balanced profile. It achieves the highest normalized score in taste (1.0), indicating optimal flavor quality per expert assessment. Structure & consistency is also favorable, while fat content and overrun (degree of air incorporation) are moderately aligned with benchmark targets. Notably, its melting time matches the reference value, contributing positively to its overall CQI. While it does not outperform in any singular dimension, its consistent performance across multiple indicators results in an intermediate quality rank.

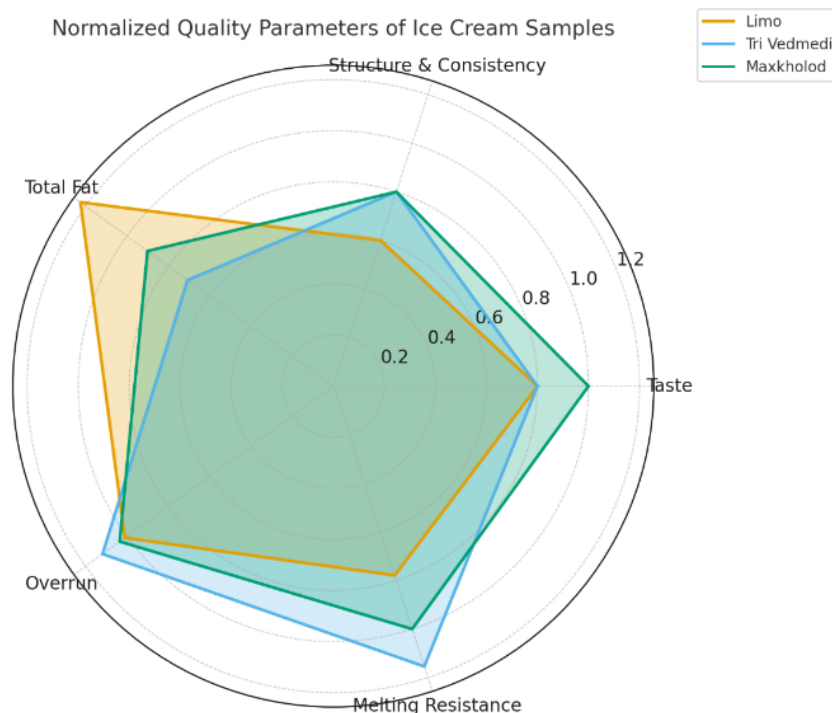


Fig 1. Radar chart showing normalized scores for ice cream quality parameters

Based on the results of the CQI analysis and the radar profile of normalized parameters, several recommendations can be made regarding technological improvements in ice cream production equipment:

- Aeration control systems should be fine-tuned to ensure consistent overrun (degree of air incorporation) without compromising melting time. Equipment should allow for adjustable overrun (degree of air incorporation) targets depending on product type and desired sensory attributes.
- Freezing and hardening equipment must provide precise control over draw temperature and residence time to enhance melting time and minimize structural defects such as ice crystal formation or glaze cracking.
- Homogenization units should be optimized to enhance the uniformity of structure and consistency. Upgraded pressure regulation systems and two-stage homogenizers can help improve fat dispersion and product smoothness.

Fat integration modules (especially in products with reduced sugar or dairy content) should allow for precise blending and emulsification. This is particularly relevant for sugar-free and combined-ingredient formulations like TM "Maxkholod" and TM "Tri Vedmedi".

Thus, the CQI approach, when applied systematically, serves not only as a diagnostic tool for quality differentiation but also as a strategic instrument for optimizing production technology in the ice cream industry. Further research could explore its applicability in broader product categories and validate its predictive power in consumer preference modeling. This study confirms that a structured CQI methodology can effectively capture and quantify quality differences among industrial ice cream products, and can serve as a tool for optimizing equipment settings and formulation design.

Conclusions. This study confirms that a Comprehensive Quality Indicator (CQI) provides a robust framework for evaluating and comparing industrial ice cream products. The methodology effectively integrates both consumer-relevant parameters (taste) and technological attributes (overrun (degree of air incorporation) and melting time), reflecting real-world production and consumption conditions.

The highest CQI score was achieved by the sample with a well-balanced combination of high fat content and melting time, indicating the critical role of processing equipment in shaping product quality. Specifically, the results underline that improving dasher configuration, air injection systems, and draw temperature control can significantly enhance ice cream texture and prolong melting time, thus increasing consumer satisfaction.

We recommend the following steps for manufacturers: optimize overrun (degree of air incorporation) levels through precise control of aeration equipment to balance texture and energy use; improve melting time by adjusting freezing temperature and dasher shear rate to refine microstructure; align sensory expectations with process outputs via routine CQI assessments during product development.

These recommendations support the development of high-quality ice cream that satisfies both market demand and technical efficiency, thereby contributing to improved production practices in the food engineering sector.

References

1. Fedchenko, T.G., Skorchenko, T.A. and Pukhlyak, A.G., 2005. Determination of the general complex indicator of ice cream quality. *Dairy Industry*, (6), pp.45–47.
2. Yaheliuk, S. and Fomich, M., 2025. Optimizing fuel rolls from crop residues using comprehensive quality indicator (CQI). In: Proceedings of the 24th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”, Vol. 25, Jelgava, Latvia, 22–24 May 2025. pp.491–496.
3. Inoue, K., Ochi, H., Taketsuka, M., Saito, H., Sakurai, K., Ichihashi, N., Iwatsuki, K. and Kokubo, S., 2008. Modeling of the effect of freezer conditions on the principal constituent parameters of ice cream by using response surface methodology. *Journal of Dairy Science*, 91(5), pp.1722–1732. <https://doi.org/10.3168/jds.2007-0796>
4. Gallagher, L.R., 2024. Effect of Dasher Design on Residence Time and Microstructure of Frozen Desserts Produced with a Continuous Scraped Surface Freezer. PhD thesis. University of Wisconsin. Available at: <https://asset.library.wisc.edu/1711.dl/6RYM63LYGTDTY84/R/file-23650.pdf> [Accessed 11 Nov. 2025].
5. Narchi, I., Vial, C., Labbafi, M. and Djelveh, G., 2011. Comparative study of the design of continuous aeration equipment for the production of food foams. *Journal of Food Engineering*, 102(2), pp.105–114. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.07.030>
6. Sukhenko, Y.H., Polishchuk, H.Ye. and Sarana, V.V., 2019. Scientific and Technical Support for Ice Cream Production: monograph. Edited by H.Ye. Polishchuk. Kyiv: NUBiP of Ukraine. 299 c.
7. Narizhniy, S., Lomova, N., Rudakova, T. and Minorova, A., 2022. Quality Evaluation Research of

Low-Calorie Milk Ice Cream. *Technologiya vyrobnyctva i pererobky produktiv tvarynnnytva*, 2(175), pp.64-69.

8. Cartwright, G., McManus, B., Leffler, T. and Moser, C., 2005. Rapid Determination of Moisture/Solids and Fat in Dairy Products by Microwave and Nuclear Magnetic Resonance Analysis. *Journal of AOAC International*, 88(1), pp.42–51.

9. International Organization for Standardization, 2008. ISO 2446:2008 (IDF 226:2008). Milk – Determination of fat content (Gerber method). Geneva: ISO.

10.State Consumer Standard of Ukraine, 2008. *DSTU 4733:2007. Milk, Cream and Plombir Ice Cream. General Technical Specifications*. Kyiv: Derzhspozhyvstandart of Ukraine.

11.State Consumer Standard of Ukraine, 2008. *DSTU 4735:2007. Ice Cream with Combined Raw Material Composition. General Technical Specifications*. Kyiv: Derzhspozhyvstandart of Ukraine.

12.Kozhemiaka, O.V. and Peshuk, L.V., 2025. Comprehensive quality assessment of meat products with microalgae Chlorella. *Food Resources*, 13(24), pp.138–149. <https://doi.org/10.31073/foodresources2025-24-15>

13.Harfousha, A., Fan, Z., Goddik, L. and Haapala, K.R., 2024. A Review of Ice Cream Manufacturing Process and System Improvement Strategies. *Manufacturing Letters*, 41, pp.170–181. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2024.09.021>

14.State Consumer Standard of Ukraine, 2015. *DSTU 8552:2015. Ice Cream. Methods for Determination of Moisture and Total Solids*. Kyiv: Derzhspozhyvstandart of Ukraine.

В.М. Ходорчук

Луцький національний технічний університет

АНАЛІЗ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ РОЗПУШУВАННЯ СТРІЧКИ ЛЬОНУ

В статті проаналізовано пристрої льонозбиральних машин для здійснення розпушування стрічки стебел льону, виявлено їх недоліки та окреслено шляхи удосконалення таких пристроїв для поліпшення якості розпушування стрічки стебел льону. Якість роботи розпушувальних пристроїв оцінювалась за виконанням встановлених агротехнічних вимог. Наведені у статті розпушувальні пристрої для стеблової стрічки льону можуть використовуватися під час реалізації різних технологій збирання льону.

Ключові слова: розпушувальний пристрій, кожух, напрямна поверхня, палець, льоновище, стрічка стебел льону.

V.Khodorchuk

ANALYSIS OF FLAX RIBBON LOOSENING DEVICES

To achieve high volumes of production of high-quality raw materials, it is critically important to introduce advanced technologies and equipment in flax growing. Despite the fact that the modern market of equipment is currently represented mainly by expensive foreign models, Ukraine has the potential to create its own production of flax harvesting machines. This is made possible thanks to international cooperation with world brands and the use of the significant experience of domestic scientists who have devoted their work to studying the working processes of specialized equipment and flax growing machines. The article analyzes the devices of flax harvesting machines for loosening the flax stalk tape, identifies their shortcomings and outlines ways to improve such devices to improve the quality of loosening the flax stalk tape. The quality of the loosening devices was assessed by fulfilling the established agrotechnical requirements. The loosening devices for flax stalk tape presented in the article can be used during the implementation of various flax harvesting technologies.

Keywords: loosening device, casing, guide surface, finger, flax stalk, ribbon of flax stalks.

Постановка проблеми. Відродження льонарства в Україні відкриває широкі перспективи для розв'язання комплексу економічних, соціальних та екологічних питань. Сьогодні світовий ринок демонструє стабільне зростання попиту на продукцію з льону завдяки її багатофункціональності, а природні умови Українського Полісся вважаються одними з найбільш сприятливих для культивування цієї рослини. Історично саме льон виступав фундаментом добробуту поліських сіл, тому державне стимулювання цієї галузі є стратегічно важливим завданням загальнонаціонального рівня [1-4].

Для досягнення високих обсягів виробництва якісної сировини критично важливо впроваджувати передові технології та обладнання в льонарстві. Попри те, що сучасний ринок техніки наразі представлений переважно дорогими іноземними зразками, Україна має потенціал для створення власного виробництва льонозбиральних машин. Це стає можливим завдяки міжнародній кооперації зі світовими брендами та використанню вагомому досвіду вітчизняних науковців, які присвятили свої праці вивченню робочих процесів спеціалізованого обладнання та машин льонарства [1-4].

Одним із пріоритетних напрямів у цій сфері залишається вдосконалення технологічних операцій, зокрема підвищення якості розпушування стеблових стрічок льону. Модернізація відповідних пристроїв льонозбиральних машин дозволить значно покращити якість збиральних операцій безпосередньо на полі, що є актуальним викликом для сучасної аграрної науки та інженерії [1-4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасна наука має у своєму розпорядженні чимало вітчизняних та закордонних досліджень, що присвячені вивченню процесів розпушування стеблових стрічок льону та інших подібних рослинних матеріалів за допомогою спеціалізованих машин. Проте, попри наявний науковий доробок, на сьогодні спостерігається певний дефіцит комплексного системного аналізу розпушувальних пристроїв, які застосовуються в межах різних технологій збирання льону. Нестача такого аналітичного підходу обмежує можливості для точного виявлення конструктивних недоліків і стримує пошук ефективних шляхів для подальшої модернізації та вдосконалення цієї техніки [1-9].

Постановка завдань. Основне завдання цієї роботи полягає у детальному аналізі конструктивних особливостей та принципів функціонування пристроїв, призначених для розпушування стеблових стрічок льону. У процесі роботи особлива увага приділяється виявленню технічних недоліків існуючих механізмів, що дозволяє визначити конкретні напрями їхньої модернізації. Кінцевою ціллю цього пошуку є суттєве покращення якості процесу розпушування стрічки льону, що безпосередньо впливає на ефективність подальшої переробки льоносировини.

Викладення основного матеріалу.

Будова та принцип роботи розпушувального пристрою стрічок льону ворушилки ВЛ-2 детально відображені на схемі, де показано особливості цієї машини, здатної одночасно обробляти дві паралельно вкладені стрічки. Конструкція машини базується на рамі 1, що спирається на приводні колеса 3, які через спеціальну уповільнювальну ланцюгову передачу надають руху робочим органам. Головними елементами, що безпосередньо взаємодіють із сировиною, є диски 5, оснащені фігурними зубами 6 та знімною решіткою 7.

Під час руху агрегату в складі з трактором робочий процес відбувається завдяки обертанню зубів 6 за годинниковою стрілкою. Вони підхоплюють стебла льону з поверхні поля, піднімають їх угору та водночас зміщують назад. У цей момент відбувається інтенсивне розпушування матеріалу: стебла ефективно відокремлюються від землі та рослинного покриття, після чого знову вкладаються на льоновище у підготовленому стані.

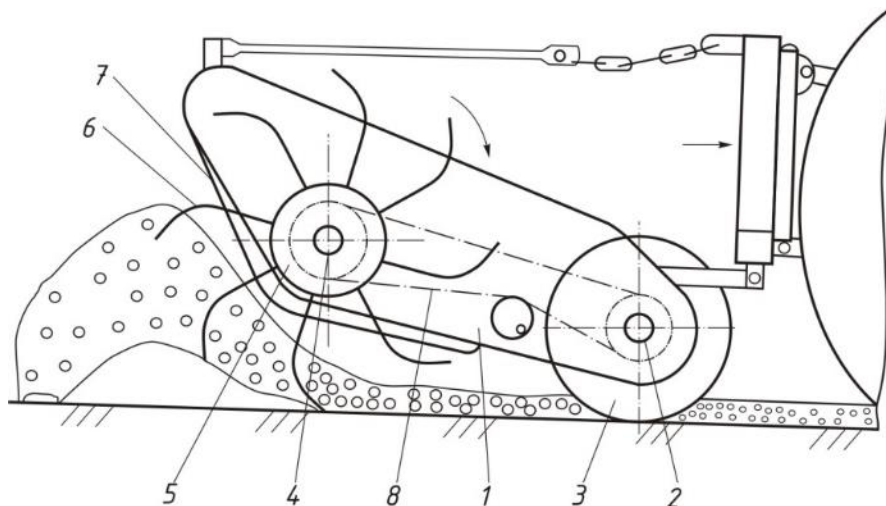


Рис. 1. Схема ворушилки стрічок льону ВЛ-2: 1 – рама; 2, 4 – вали; 3 – колесо опорно-приводне; 5 – диск; 6 – зуб; 7 – решітка знімна; 8 – уповільнювальна ланцюгова передача

Результати випробувань даної машини свідчать про загалом задовільні показники її роботи, проте було виявлено певний конструктивний прорахунок. Проблема полягає у специфічній формі зубів, крайні частини яких зігнуті в бік, протилежний напрямку обертання дисків. Через таку особливість робочі органи не завжди здатні ефективно захоплювати стебла, що лежать у нижньому шарі стрічки безпосередньо біля землі, що призводить до часткового недобору льоносировини під час оброблення.

Є подібна машини ВЛ-3 з трьома секціями розпушувальних пристроїв, яка відразу розпушує три стеблові стрічки на льоновищі. Чим більше секцій, то зрозуміло, що зростає продуктивність роботи льонозбиральної машини, але якість розпушування може погіршуватися. Збільшення швидкості руху машини також може спричиняти погіршення її якості роботи.

Наступний варіант технічного рішення, запатентований в Україні, представлений конструкцією розпушувача (рис. 2), що базується на використанні вертикальних дисків 3 із робочими органами у вигляді прямолінійних пальців 4. Основою машини слугує рама 1 з двома самоустановлювальними опорними колесами 2, на якій змонтовано вал 11 із трьома жорстко закріпленими дисками 3. Кожен диск оснащений радіальними пальцями 4, розміщеними з однаковим інтервалом. Над дисками встановлено спеціальний кожух 6 та напрямні поверхні 5, радіус кривини яких перевищує радіус самих дисків. Привод механізму здійснюється від вала відбору потужності трактора через систему, що включає конічний редуктор 9 та пасову передачу 10, а за переведення агрегату з робочого у транспортне положення відповідає гідроциліндр 7.

Процес роботи цього пристрою розпочинається під час руху вздовж стрічки льону на льоновищі, коли обертові пальці 4 підхоплюють стеблову стрічку 12, відокремлюючи її від рослинного покриття льоновища. Льоносировина спрямовується у простір між напрямними поверхнями 5 та кожухом 6, де вона поступово вивільняється від зачеплення з пальцями й рівномірно розстиляється на поверхні поля. Така послідовність дій забезпечує якісну обробку матеріалу без його пошкодження.

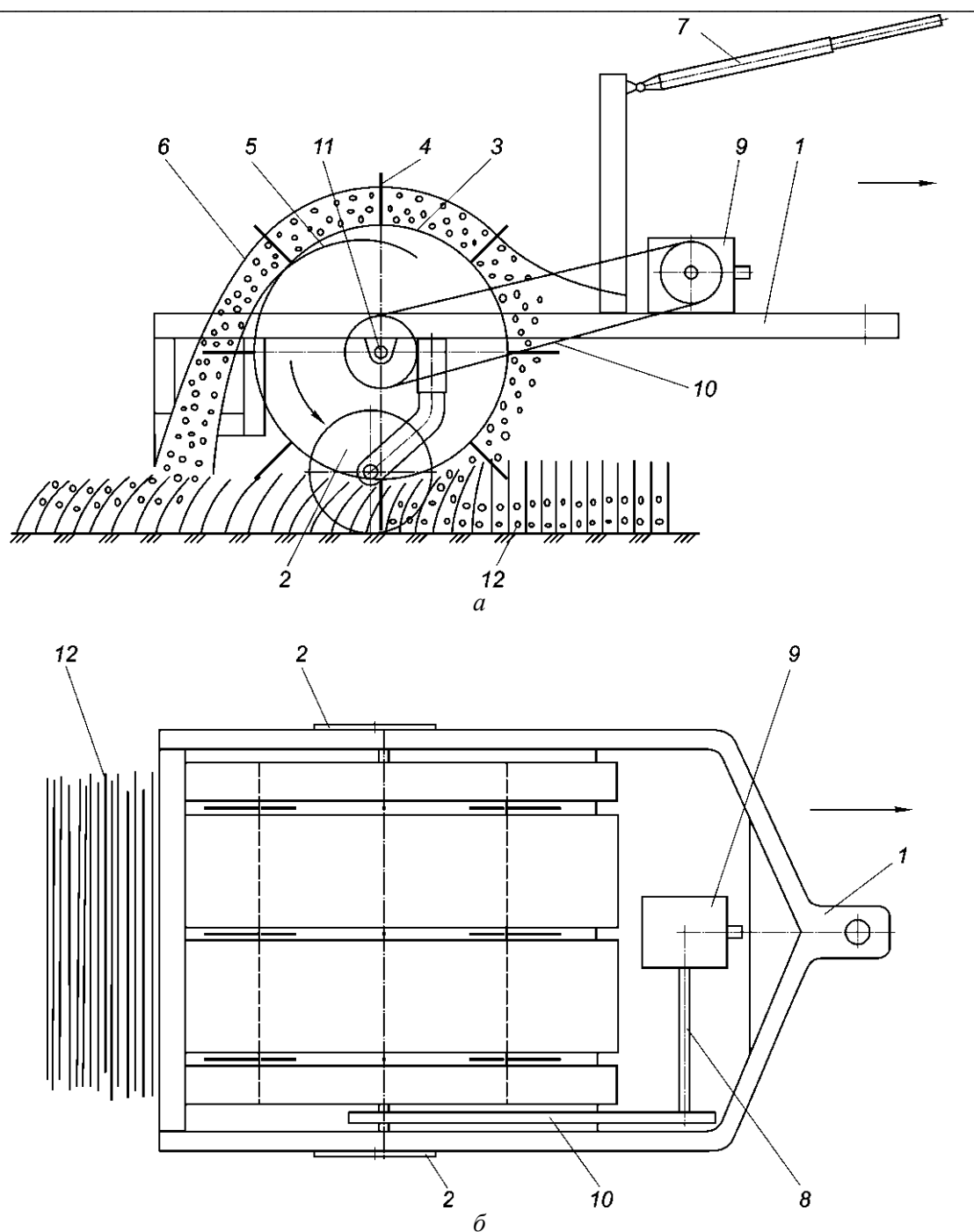


Рис. 2. Схема пристрою для розпушування стрічки льону (а – вигляд збоку; б – вигляд зверху): 1 – рама; 2 – колесо опорне самоустановлювальне; 3 – диск з пальцями; 4 – палець; 5 – поверхня напрямна; 6 – кожух захисний; 7 – гідроциліндр; 8 – привод; 9 – редуктор конічний; 10 – передача пасова; 11 – вал дисків; 12 – стеблова стрічка льону

Порівняльний аналіз цієї конструкції з попередньою конструкцією пристрою виявляє низку суттєвих переваг. Завдяки збільшеному діаметру дисків машина здатна піднімати стебла на значно більшу висоту, що сприяє їхньому кращому провітрюванню. Окрім того, особливості взаємодії пальців зі стрічкою дозволяють значно ефективніше підіймати навіть ті стебла, що щільно прилягають до землі або прилипили до неї. Таким чином, це технічне рішення демонструє вищу якість роботи та є прогресивнішим порівняно з аналогами.

Чергова конструкція розпушувального пристрою (рис. 3) базується на використанні ланцюгового механізму, що дозволяє ще ефективніше обробляти льоносировину. Основою машини є рама 1 з двома самоустановлювальними колесами 2, на якій змонтовано три паралельні горизонтальні вали 7, 8 і 9. На кожному валу закріплені відповідні зірочки 10, 11 і 12, що утримують три ланцюги 3 із прикріпленими до них робочими органами у вигляді прямолінійних пальців 4. Як і

в попередніх варіантах конструкції, робоча зона доповнена напрямними поверхнями 5 та захисним кожухом 6, а рух усім механізмам передається від вала відбору потужності трактора.

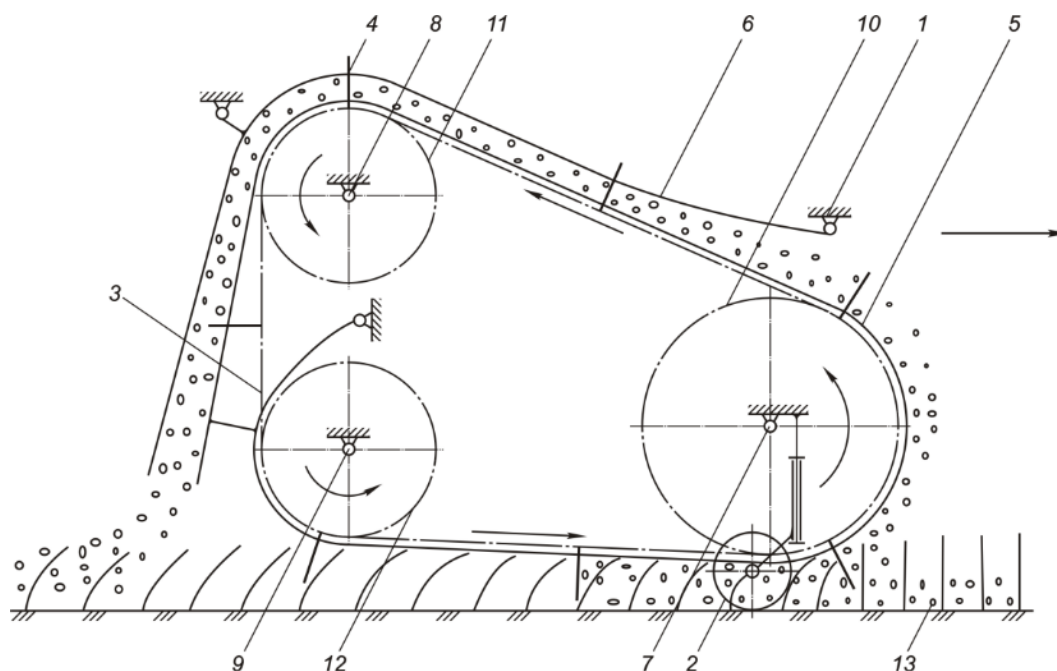


Рис. 3. Схема розпушувального пристрою для стеблової стрічки льону: 1 – рама; 2 – колесо самоустановлювальне опорне; 3 – ланцюг з пальцями; 4 – прямолінійний палець; 5 – поверхня напрямна; 6 – кожух; 7, 8, 9 – горизонтальний вал; 10, 11, 12 – вертикальна зірочка; 13 – стеблова стрічка льону

Функціонування розпушувального пристрою відбувається під час руху агрегату вздовж вкладених стрічок льону. Ланцюгова передача активує пальці, які підхоплюють стебла стрічки льону, повністю відокремлюючи їх від рослинного покриву льоновища. Стебла спрямовуються у простір між кожухом та напрямними, де вони проходять крізь робочу зону пристрою, поступово звільняються від зачеплення та знову вкладаються на землю для подальшого підсушування.

Головною перевагою такої ланцюгової схеми є можливість піднімати стрічку льону на ще більшу висоту порівняно з дисковими аналогами. Це не лише гарантує якісне відривання стебел від ґрунту, але й створює ідеальні умови для їхнього інтенсивного провітрювання. Крім того, конструкція дозволяє забезпечити виконання додаткової корисної операції – підрівнювання стрічки безпосередньо в процесі її розпушування, що суттєво підвищує якість підготовки сировини. Підрівнювання стрічки тут можна забезпечити як активними, так і пасивними робочими органами.

Висновки. Проведений аналіз наявних конструкцій розпушувальних пристроїв свідчить про те, що вони не завжди забезпечують належну якість обробки стеблової маси. Часто цей процес супроводжується значними втратами сировини, механічним пошкодженням стебел та погіршенням ключових характеристик сформованих стрічок. Найбільш критично ці недоліки проявляються під час роботи у складних умовах, спричинених несприятливою погодою або незадовільним станом самого льоновища. Такі чинники негативно позначаються не лише на технологічних показниках, а й на загальній продуктивності збиральної техніки.

Розв'язання цієї проблеми вбачається в удосконаленні конструкції розпушувальних пристроїв. Шлях до підвищення ефективності та якості роботи лежить через системне узгодження технічних параметрів із режимами функціонування робочих органів розпушувальних пристроїв. Такий підхід дозволить стабілізувати процес розпушування та мінімізувати вплив зовнішніх факторів на результат роботи.

Список використаних джерел

1. Шейченко В. О., Хайліс Г. А. Теорія і розрахунок апаратів для підбирання та обертання : монографія. Ніжин : Видавець ПП Лисенко М. М., 2014. 240 с.
2. Дідух В. Ф., Ковалишин С. Й., Дударев І. М., Тараймович І. В. Технології вирощування, збирання та переробки льону-довгунця : навч. посіб. Львів : Львівський НАУ, 2013. 324 с.

3. Толстушко Н. О., Хайліс Г. А., Толстушко М. М. Рулонні прес-підбирачі : монографія. Луцьк : ІВВ Луцького НТУ, 2018. 164 с.
4. Хайліс Г. А., Волошин В. І., Толстушко М. М. Аналіз роботи розпушувача стеблової стрічки льону. Сільськогосподарські машини. Зб. наук. ст. 2006. Вип. 14. С. 202 – 209.
5. Волошин В. І. Машини для ворущіння стеблової стрічки льону. Сільськогосподарські машини. Зб. наук. ст. 2007. Вип. 16. С. 24 – 27.
6. Пат. 23714 U Україна, МКИ A01D45/06. Розпушувач стрічки льону / Г.А. Хайліс, В.І. Волошин, Л.М. Поліщук, Н.О. Толстушко, М.М. Толстушко (Україна). – №U200612728; Заявл. 04.12.2006; Опубл. 11.06.2007, Бюл. №8.
7. Пат. 31491 U Україна, МПК A01D45/00. Розпушувач стрічки льону / Г.А. Хайліс, В.І. Волошин, А.Ю. Горбовий, М.Г. Грушецька, М.А. Демидюк, Н.О. Толстушко, М.М. Толстушко, Ю.В. Федорусь (Україна). – №U200713948; Заявл. 12.12.2007; Опубл. 10.04.2008, Бюл. №7.
8. Depoortere. Machines de récolte. URL: <https://www.depoortere.be/Machines-de-recolte>.
9. Union. Machines. URL: <https://www.unionmachines.com/nl/machines>.
10. Dehondt Technologies. La passion le lin. URL: <http://www.dehondt-lin.com/>.

Рецензент: Шейченко Віктор Олександрович, доктор технічних наук, професор кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту Полтавського державного аграрного університету.

Ю. І. Богомол¹, П. І. Лобода¹, С. Ю. Тесля¹, В. М. Надтока², І. О. Гусарова²,
В. С. Красва²

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”¹

Державне підприємство “Конструкторське бюро “Південне” ім. М.К. Янгеля”²

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ СУМІСНОСТІ ФАЗ БАГАТОШАРОВИХ ПОКРИТТІВ MOSI₂-MEB₂-(TI, MO)

У роботі проведено дослідження термомеханічної сумісності багатошарових градієнтних покриттів MoSi₂-MeB₂-(Mo, Ti) на підкладці Inconel 718 методом скінченних елементів. Проаналізовано розподіл напружень і деформацій під час охолодження від 1000 °C до 20 °C. Покриття з демпферним шаром із Mo забезпечують високу стабільність за високих температур, тоді як Ti як демпфер підвищує пластичну адаптацію, але формує високі залишкові напруження в шарах. Найнижчі рівні напружень (~100 МПа) та найвища термомеханічна стабільність за циклічних нагрівально-охолоджувальних навантажень спостерігаються в композиції MoSi₂-ZrB₂-10 SiC-Mo. Результати підкреслюють важливість оптимального підбору бар'єрних і демпферних шарів для мінімізації термічних напружень та забезпечення цілісності покриттів у високотемпературних умовах.

Ключові слова: градієнтне покриття; MoSi₂; бориди перехідних металів; термомеханічна сумісність; метод скінченних елементів; Inconel 718; термостійкість; залишкові напруження

Iu. Bogomol, P. Loboda, S. Teslia, V. Nadтока, I. Husarova, V. Kraieva

ANALYSIS OF THERMOMECHANICAL COMPATIBILITY OF PHASES IN MULTILAYER MOSI₂-MEB₂-(TI, MO) COATINGS

This work presents a finite element study of the thermomechanical compatibility of multilayer gradient coatings MoSi₂-MeB₂-(Mo, Ti) on an Inconel 718 substrate. The stress and deformation fields in the coatings were analyzed during cooling from 1000 °C to 20 °C. Coatings with Mo as the buffer layer showed high stability at elevated temperatures, while Ti as a buffer improved plastic accommodation but increased residual stresses in some layers. Among the studied compositions, MoSi₂-ZrB₂-10 SiC-Mo demonstrated the lowest stress levels (~100 MPa) and the highest thermomechanical stability under cyclic thermal loading. The results highlight the importance of selecting appropriate barrier and buffer layers to minimize thermal stresses and ensure coating integrity in high-temperature applications.

Keywords: gradient coating; MoSi₂; transition metal borides; thermomechanical compatibility; finite element analysis; Inconel 718; high-temperature stability; residual stress

Постановка проблеми. Ефективність використання сучасних літальних апаратів на пряму залежить від надійності та довговічності роботи складових частин реактивних та турбореактивних двигунів [1]. Одним із важливих завдань під час розробки нових матеріалів для авіаційної техніки є забезпечення високого рівня захисту корпусів не охолоджуваних камер згорання. Підвищення жаростійкості та жароміцності даних елементів дозволяють збільшити ресурс роботи двигунів у 2-5 разів, забезпечити вищий ККД та вищі температури роботи. Серед відомих матеріалів для робочих частин двигунів літальних апаратів є використання нікелевих та кобальтових жаростійких сплавів [2]. Але внаслідок роботи за високих температур 1300-1700 °C відбувається інтенсивна втрата міцності матеріалів корпусів, окиснення, в окремих випадках спостерігається утворення термічних тріщин, повзучість та деформація. Одним з варіантів захисту не охолоджуваних камер двигунів є формування захисних покриттів. Високий рівень термічної стабільності та формування захисних шарів в умовах дії агресивного середовища збагаченого O₂, H₂O, CO₂, сірчаними й хлорними домішками показують силіциди перехідних металів. Силіцидні покриття мають високі захисні властивості внаслідок формування щільної плівки SiO₂ яка не руйнується під час термоциклів [3]. Також отримані шари не розкладається, не утворює крихкі або нестабільні фази навіть за 1400–1800 °C. Проте, силіцидні матеріали, внаслідок значної відмінності в коефіцієнтах термічного розширення (к.т.р.) не здатні успішно працювати в умовах знакозмінних циклів нагрівання та охолодження. Саме тому оптимізація технології отримання, та складу захисних покриттів на основі силіцидів перехідних металів є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Максимально допустима температура роботи деталей силових установок літальних апаратів визначає межу можливого питомого імпульсу тяги двигунів [4]. Лише невелика кількість матеріалів здатні стабільно функціонувати в окислювальному середовищі за таких температур - зокрема платина (до ~1700 °C) та іридій (до ~2300 °C) [5]. Проте їхня надзвичайно висока вартість робить застосування цих матеріалів не практичними.

© Ю. І. Богомол, П. І. Лобода, С. Ю. Тесля, В. М. Надтока, І. О. Гусарова,
В. С. Красва

Для малопотужних літальних систем конструкційні матеріали потребують використання захисних покриттів, що перешкоджають їхній хімічній взаємодії з компонентами атмосфери, паливом і продуктами згоряння. Робоча температура таких композицій здебільшого визначається типом та мікроструктурою самого покриття. Підвищення термічної стійкості покриття безпосередньо дозволяє збільшити робочу температуру деталей силового блоку, а отже і підвищити питомий імпульс двигуна [5, 6].

Для неохолоджуваних елементів силових установок найчастіше застосовують ніобієві сплави та вуглець-вуглецеві композити, що зберігають високу міцність близько 2000 °С. Найпоширенішим захисним рішенням для роботи в окисних середовищах є покриття на основі силіцидів, які утворюють на поверхні захисну само відновлювальну плівку оксиду. Теоретично верхня межа жаростійкості покриттів із MoSi_2 становить приблизно 1800 °С. Для підвищення їхньої ефективності до температур до 1950 °С шар вищого силіциду модифікують металами, що формують надтверді оксиди й сповільнюють випаровування SiO_2 , завдяки чому покращується довговічність і термічна стабільність покриття [7]. Однією з проблем формування силіцидних покриттів на поверхні металів є висока різниця к.т.р. Різниця к.т.р. між силіцидним шаром та підкладкою призводить до накопичення термічних напружень під час нагрівання/охолодження. За рахунок напружень існує ризик формування тріщин, пористості та відшарування, що значно знижує властивості. В літературі наведено аналіз процесів відшарування покриттів $\text{MoSi}_2\text{--Mo}$ [8] оскільки к.т.р. $\text{MoSi}_2 \approx 8.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $a_{\text{Mo}} \approx 5.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Одним зі способів нівелювати вплив к.т.р. є використання композитних чи багатошарових покриттів. В роботі [9] показано, що введення дрібнодисперсних фаз (наприклад, $(\text{Mo,Ti})\text{Si}_2$, або T_1/T_2 фаз у системі Mo--Si--B) змінює ефективний к.т.р. та підвищує опір до утворення тріщин. Одночасно деякі багатофазні композиції забезпечують «самозаліковування» окалини під час окиснення. Для нівелювання впливу к.т.р. між MoSi_2 - Mo в роботі [10] запропоновано формування проміжного шару Mo_5Si_3 , наявність якого ефективно пригнічує дефекти через невідповідність к.т.р. між шарами. Також варто зазначити, що формування проміжного шару відбувається реакційно, що для багатьох застосувань є не припустим явищем. Більш перспективним є формування багатошарових градієнтних покриттів, шари якого будуть виконувати різні функціональні завдання. Найвищі захисні властивості та термічну стабільність демонструє MoSi_2 , щоб уникнути його дифузії в матеріал основи, та забезпечити рівномірну зміну к.т.р. можливим варіантом є застосування бар'єрних шарів на основі боридів тугоплавких металів [11]. Борида за рахунок відносно не високих к.т.р. будуть менше розширюватись та стискатись, що може призводити до руйнування покриття на границі з основою [12]. Тому необхідно передбачати проміжний металевий шар, зазвичай на основі тугоплавких металів, для формування проміжної зміни к.т.р.

Постановка завдань. Виходячи з вище викладеного в роботі поставлено мету – провести оцінку термомеханічної сумісності фаз градієнтного покриття на основі MoSi_2 – MeB_2 – Me методом скінченних елементів, з метою встановлення оптимального складу покриття та його термомеханічних показників.

Викладення основного матеріалу. Модельні дослідження процесів термомеханічної сумісності шарів градієнтних покриттів проводили з використанням програмного забезпечення Comsol Multiphysics на лінійній моделі (рис. 1). Перший шар – виконує роль демпфера для зниження різниці к.т.р. між матеріалом основи та керамічними шарами. Як дослідні матеріали обрано тугоплавкі метали (Mo , Ti). Проміжний шар (бар'єрний) – протидіє дифузії атомів кремнію в глибину матеріалу основи, як дослідні матеріали було обрано борида перехідних металів (TiB_2 , $\text{ZrB}_2\text{--SiC}$, MoB_2 , TaB_2). Основний жаростійкий шар – побудований на основі MoSi_2 . Матеріалом основи для покриття обрано жароміцний сплав Inconel 718. Товщина демпферного шару – 30 мкм, бар'єрного – 50 мкм, захисного – 100 мкм. Дослідження проводились в умовах нагріву та охолодження від 1000 °С до 20 °С.

В основі розрахунку напружень лежать ряд припущень та розрахункових моделей. Першою граничною умовою моделювання є накладання стаціонарних умов за яких діє правило статичної рівноваги в матеріалі, а саме сума внутрішніх напружень та зовнішніх сил дорівнює нулю: є

$$\nabla \cdot \sigma + F_v = 0,$$

де $\nabla \cdot \sigma$ – тензор напружень, МПа;

F_v – зовнішні сили, що діють на одиницю об'єму, Н.

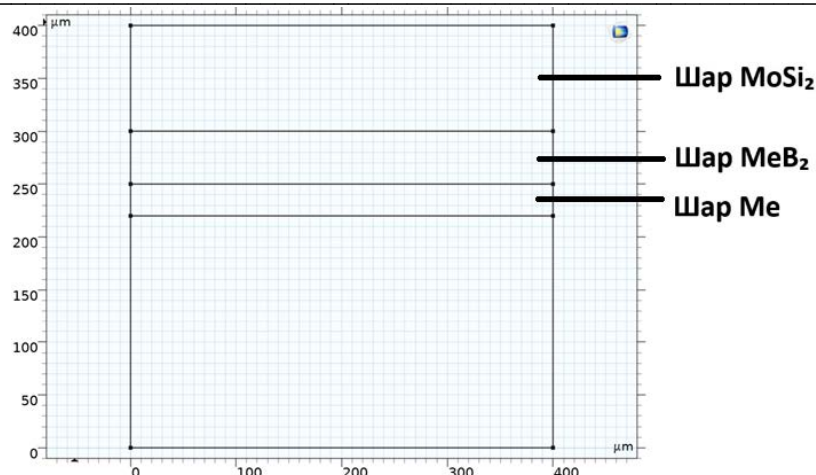


Рис. 1. Лінійна модель оцінки термомеханічної сумісності шарів покриття $\text{MoSi}_2 - \text{MeB}_2 - \text{Me}$

Термічні напруження та деформація в шарах визначається відповідно до механічної моделі:

$$\sigma = (\sigma_0 + \sigma_{ext} + \sigma_q) + (C: \varepsilon_{el}), \quad \varepsilon_{el} = \varepsilon - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{ext} + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{hs}), \quad \varepsilon_{th} = \alpha(T)(T - T_{ref}),$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2}[(\nabla u)^T + \nabla u], \quad C = C(E, \nu),$$

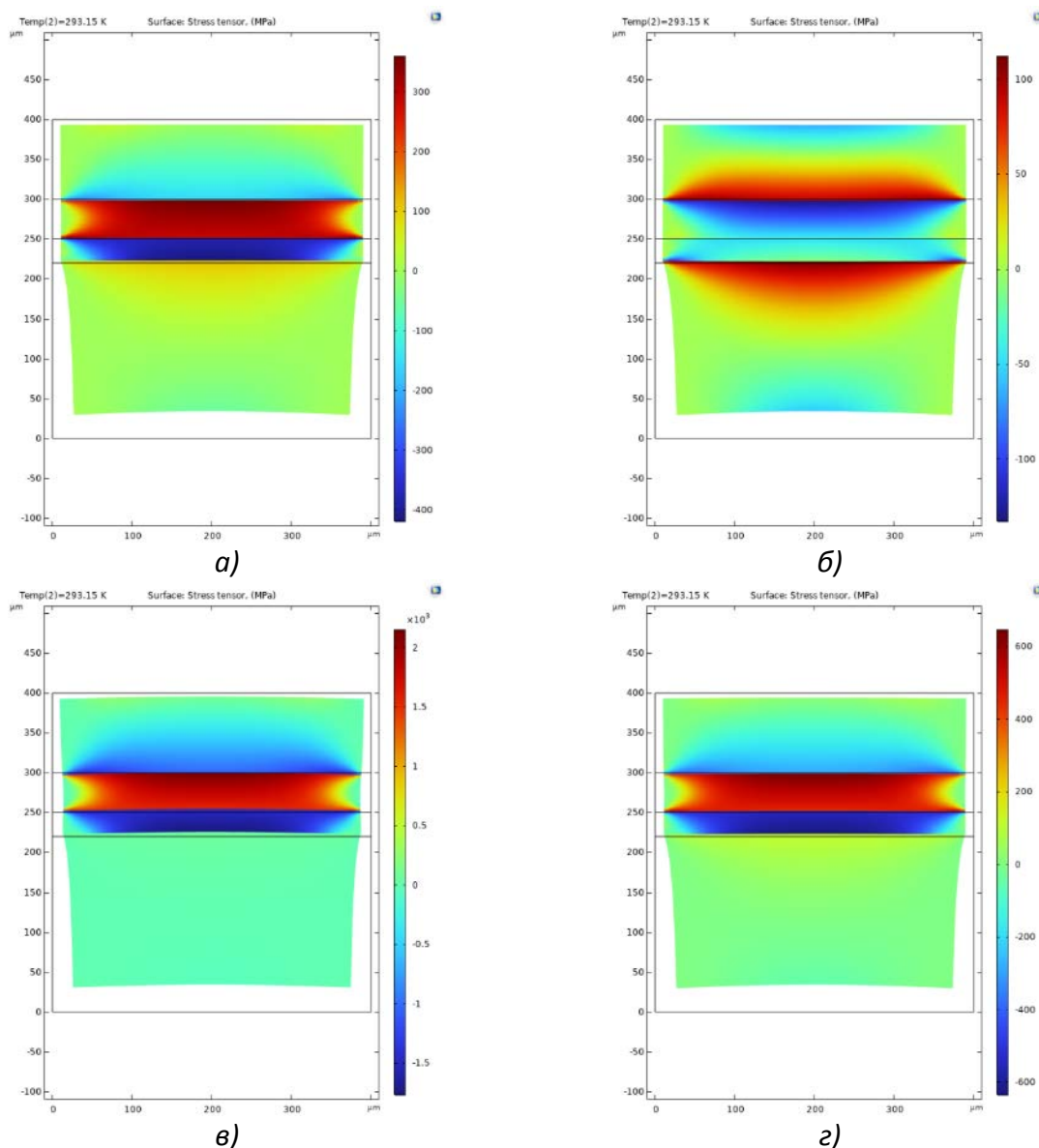
де σ_0 – початкові напруження в матеріалі, МПа; σ_{ext} – зовнішні (задані) напруження, МПа; σ_q – напруження викликані нагріванням, МПа; C – функція жорсткості матеріалу; ε_{el} – пружна деформація; ε – повна деформація; ε_0 – початкова деформація; ε_{ext} – деформація під дією зовнішніх сил; ε_{th} – деформація між фазами; ∇u – градієнт переміщення; $(\nabla u)^T$ – транспонований градієнт переміщення.

На рисунку 2 наведено зміну поля напружень під час охолодження градієнтних покриттів $\text{MoSi}_2 - \text{MeB}_2 - \text{Mo}$. Покриття $\text{MoSi}_2 - \text{TiB}_2 - \text{Mo}$ та $\text{MoSi}_2 - \text{ZrB}_2 - 10\text{SiC} - \text{Mo}$ демонструють найменші амплітудні коливання напружень в шарах серед обраних композицій (рис. 2, а, б). В системі з TiB_2 локалізація напружень фіксується в області бар'єрного та демпферного шарів. Граничні напруження не перевищують 300 МПа. В умовах помірного зниження температури, дане покриття може працювати зі збереженням цілісності та відсутності відшарування. Проте, за роботи в умовах циклічних режимів нагрівання/охолодження варто очікувати утворення термічних тріщин та деформацій. Високу термомеханічну стабільність натомість демонструє композиція з $\text{MoSi}_2 - \text{ZrB}_2 - 10\text{SiC} - \text{Mo}$. Вибір бар'єрного шару на основі дибориду цирконію з добавками карбиду кремнію, має на меті як технологічне, так і термомеханічне підґрунтя. Введення SiC, як відомо інтенсифікує процес спікання ZrB_2 та дозволяє отримати керамічні матеріали з відносною щільністю 90-95 % за температур спікання 1850 – 1900 °C. З іншої точки зору введення SiC дозволяє дещо знижує коефіцієнт термічного розширення наблизивши значення до металевій основи. В покриттях $\text{MoSi}_2 - \text{ZrB}_2 - 10\text{SiC} - \text{Mo}$ (рис. 1, б) спостерігається рівномірне поле напружень, величиною до 100 МПа, що вказує на високу працездатність композиції в умовах термоциклічних навантажень. Для композицій $\text{MoSi}_2 - \text{MoB}_2 - \text{Mo}$, $\text{MoSi}_2 - \text{TaB}_2 - \text{Mo}$ виникають напруження розтягу та стику вище 600 МПа. Вказане поле напружень не дозволяє успішно використовувати дані композиції для створення багат шарових градієнтних покриттів.

Молібден, як демпферний шар в градієнтних покриттях дозволяє забезпечити високу стабільність за високих температур експлуатації. Також він володіє високою міцністю та жорсткістю, що дозволяє уникати ефектів повзучості та деформації в приконтактних шарах покриття. Важливим недоліком молібдену є його низька окисна стійкість за високих температур, та високий модуль пружності, які за інших рівних умов може спричиняти накопичення термічних напружень. Альтернативним варіантом демпферного шару покриття є титан. Титан є більш пластичним металом, відповідно варто очікувати кращу здатність до поглинання і розподілу пластичної деформації.

На відміну від молібдену, титан має кращу окисну стійкість за рахунок пасивації поверхні TiO_2 . На рисунку 3 наведено зміну поля напружень в шарах покриттів $\text{MoSi}_2 - \text{MeB}_2 - \text{Ti}$. За рахунок

високої сумісності з TiB_2 як на атомно так і на мікрорівнях покриття покриттів $\text{MoSi}_2 - \text{TiB}_2 - \text{Ti}$ (рис. 3, а) в області демпфер – бар’єрний шар практично не демонструють накопичення напружень.



а) - TiB_2 , б) $\text{ZrB}_2\text{-}10\text{SiC}$, в) - MoB_2 , з) - TaB_2

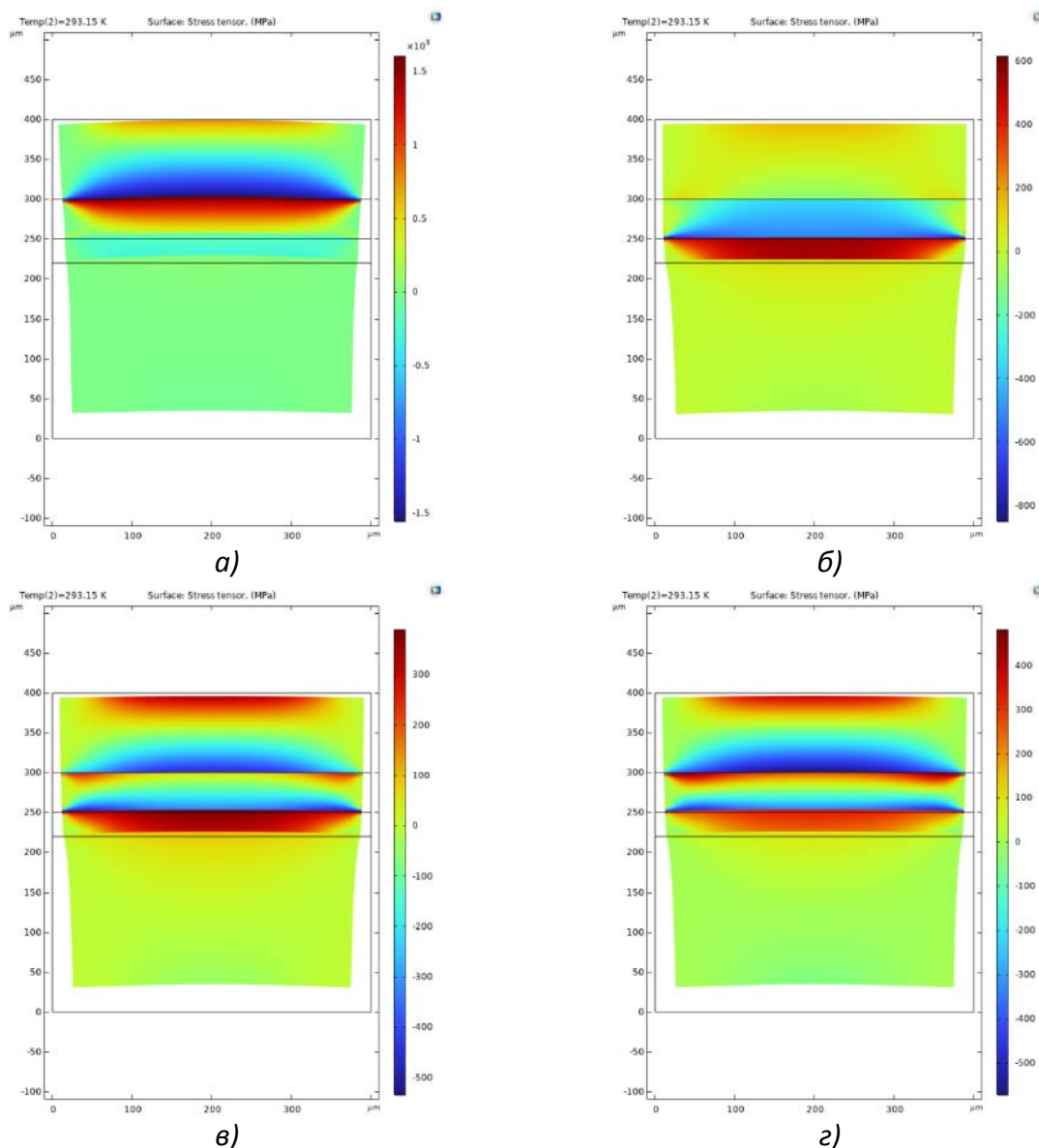
Рис. 2. Зміна напружень по перерізу градієнтного покриття $\text{MoSi}_2 - \text{MeB}_2 - \text{Mo}$

В той же час за рахунок високої відмінності в к.т.р $\text{MoSi}_2 - \text{TiB}_2$ досягаються критичні напруження близько 1400 МПа.

Порівняно з виростанням підшару Mo (рис. 2, б), шар Ti в композиції з $\text{MoSi}_2 - \text{ZrB}_2 - 10\text{SiC}$ (рис. 3, б) призводить до формування широкої області розтягу/стиску в демпферному та бар’єрному шарах. Рівень напружень досягається 550 МПа. Композиції $\text{MoSi}_2 - \text{MoB}_2 - \text{Ti}$, $\text{MoSi}_2 - \text{TaB}_2 - \text{Ti}$ (рис. 3, в, г) мають середнє значення напружень в шарах покриттів 300 МПа. Варто зазначити, що у випадку використання Ti складний напружено деформований стан формується у всіх шарах градієнтного покриття.

Висновки. В роботі проведено дослідження термомеханічної сумісності фаз багатшарових градієнтних покриттів $\text{MoSi}_2 - \text{MeB}_2 - (\text{Mo}, \text{Ti})$ на підкладці з Inconel 718 методом скінченних елементів. Відповідно до отриманих результатів, встановлено, що в процесі охолодження від 1000 °C до 20 °C відбувається формування складного напружено-деформованого стану в різних шарах покриттів. Найнижчі значення напружень на рівні 100 МПа досягаються в композиції $\text{MoSi}_2 - \text{ZrB}_2 - 10\text{SiC-Mo}$. Заміна демпферного шару на основі Mo на Ti показали, що практично для всіх

дослідних композицій зберігається високий рівень залишкових напружень від 300 МПа до 1400 МПа, що не дозволяє забезпечувати стабільну роботу та цілісність покриттів в умовах циклічного нагрівання та охолодження.



а) - TiB_2 , б) $\text{ZrB}_2\text{-}10\text{SiC}$, в) - MoB_2 , з) - TaB_2

Рис. 3. Зміна напружень по перерізу градієнтного покриття $\text{MoSi}_2\text{ – MeB}_2\text{ – Ti}$

Порівняно з виростанням підшару Mo (рис. 2, б), шар Ti в композиції з $\text{MoSi}_2\text{ – ZrB}_2\text{ – }10\text{SiC}$ (рис. 3, б) призводить до формування широкої області розтягу/стиску в демпферному та бар'єрному шарах. Рівень напружень досягається 550 МПа. Композиції $\text{MoSi}_2\text{ – MoB}_2\text{ – Ti}$, $\text{MoSi}_2\text{ – TaB}_2\text{ – Ti}$ (рис. 3, в, г) мають середнє значення напружень в шарах покриттів 300 МПа. Варто зазначити, що у випадку використання Ti складний напружено деформований стан формується у всіх шарах градієнтного покриття.

Висновки. В роботі проведено дослідження термомеханічної сумісності фаз багатшарових градієнтних покриттів $\text{MoSi}_2\text{ – MeB}_2\text{ – (Mo, Ti)}$ на підкладці з Inconel 718 методом скінченних елементів. Відповідно до отриманих результатів, встановлено, що в процесі охолодження від 1000 °C до 20 °C відбувається формування складного напружено-деформованого стану в різних шарах покриттів. Найнижчі значення напружень на рівні 100 МПа досягаються в композиції $\text{MoSi}_2\text{ – ZrB}_2\text{ – }10\text{SiC-Mo}$. Заміна демпферного шару на основі Mo на Ti показали, що практично для всіх дослідних композицій зберігається високий рівень залишкових напружень від 300 МПа до 1400

МПа, що не дозволяє забезпечувати стабільну роботу та цілісність покриттів в умовах циклічного нагрівання та охолодження.

Відомості про фінансування дослідження. Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України (проект 2025.06/0079)

Література

1. Goswami, B., Sahay, S.K. and Ray, A.K.. "Application of Thermal Barrier Coatings on Combustion Chamber Liners – A Review." High Temperature Materials and Processes, vol. 23, no. 3, 2004, pp. 211-236. <https://doi.org/10.1515/HTMP.2004.23.3.211>
2. Smith R, Lewi G, Yates D (2001), "Development and application of nickel alloys in aerospace engineering". Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, Vol. 73 No. 2 pp. 138–147, doi: <https://doi.org/10.1108/00022660110694995>
3. Structure and Properties of High-Hardness Silicide Coatings on Cemented Carbides for High Temperature Applications / by Samuel Humphry-Baker 1 and Jessica Marshall // Coatings. – 2018. – Vol. 7, Is. 7. – p. 247, <https://doi.org/10.3390/coatings8070247>
4. Palocz-Andresen, M. (2013). Airplane Engines. In: Decreasing Fuel Consumption and Exhaust Gas Emissions in Transportation. Green Energy and Technology. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-11976-7_10
5. Alam, Z., Parlikar, C., Kumawat, M., Lakshmi, S. G., & Das, D. (2023). High Temperature Resistant Coatings for Strategic Aero space Applications. Defence Science Journal, 73(No 2), 171–181. <https://doi.org/10.14429/dsj.73.18638>
6. M. Shourgeshty, M. Aliofkhazraei, and M. M. Alipour, 'Introduction to High - Temperature Coatings', High Temperature Corrosion. InTech, Sept. 07, 2016. doi: 10.5772/64282.
7. Alam, M.Z., Rao, A.S. & Das, D.K. Microstructure and High Temperature Oxidation Performance of Silicide Coating on Nb-Based Alloy C-103. *Oxid Met* 73, 513–530 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11085-010-9190-x>
8. T. Hsieh, H. Choe, E.J. Lavernia, J. Wolfenstine, The effect of Si₃N₄ on the thermal expansion behavior of MoSi₂, Materials Letters, Volume 30, Issues 5–6, 1997, Pages 407-410, ISSN 0167-577X, [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(96\)00226-1](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(96)00226-1).
9. Wei Li, Jinglian Fan, Yan Fan, Lairong Xiao, Huichao Cheng, MoSi₂/(Mo, Ti)Si₂ dual-phase composite coating for oxidation protection of molybdenum alloy, Journal of Alloys and Compounds, Volume 740, 2018, Pages 711-718, ISSN 0925-8388, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.173>.
10. Tao Fu, Yingyi Zhang, Luyu Chen, Fuqiang Shen, Junjie Zhu, Micromorphology evolution, growth mechanism, and oxidation behaviour of the silicon-rich MoSi₂ coating at 1200 °C in air, Journal of Materials Research and Technology, Volume 29, 2024, Pages 491-503, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.112>.
11. Ruixiong Zhai, Peng Song, Taihong Huang, Chao Li, Chen Hua, Wenlang Huang, Qing Li, Biju Zheng, Jiansheng Lu, Microstructure and oxidation behaviour of MoSi₂ coating combined MoB diffusion barrier layer on Mo substrate at 1300 °C, Ceramics International, Volume 47, Issue 7, Part A, 2021, Pages 10137-10146, ISSN 0272-8842, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.162>.
12. Yi Wang, Dezhi Wang, Jianhui Yan, Preparation and characterization of MoSi₂/MoB composite coating on Mo substrate, Journal of Alloys and Compounds, Volume 589, 2014, Pages 384-388, ISSN 0925-8388, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.12.023>.

Рецензент: Втерковський Михайло Ярославович, PhD, асистент КПП ім. Ігоря Сікорського, НН ІМЗ ім. Є. О. Патона, каф. ВТМ та ПМ

С. Ю. Тесля, О. І. Юркова, Ю. І. Богомол, І. Ю. Троснікова, П. І. Лобода

*Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”***ВПЛИВ ВМІСТУ ВОЛЬФАРМУ НА ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ
МІКРОСТРУКТУРИ ТА ФАЗОВОГО СКЛАДУ ПОРОШКІВ СПЛАВУ $W_xFeCoNi$ ПІД
ЧАС МЕХАНІЧНОГО ЛЕГУВАННЯ**

У роботі досліджено синтез важких високоентропійних сплавів $W_xFeCoNi$ ($x = 1; 1,5; 2$), отриманих методом механічного легування у бензиновому середовищі. Показано, що еквіатомний сплав $WFeCoNi$ формує двофазний стан ОЦК/ГЦК без інтерметалідів, тоді як збільшення вмісту вольфраму до $x = 1,5$ знижує конфігураційну ентропію змішування та посилює сегрегацію фаз. Для складу $x = 2$ встановлено утворення карбіду WC внаслідок перевищення граничної розчинності вуглецю та активованої дифузії у процесі подрібнення. Отримані результати демонструють важливість контролю концентрацій W і умов механічного легування для керування мікроструктурою та фазовою стабільністю важких ВЕС, що є перспективним для застосувань у високотемпературних та високонавантажених вузлах

Ключові слова: механічне легування, високоентропійні сплави, синтез, мікроструктура, карбід вольфраму

S. Teslia, O. Yurkova, Yu. Bogomol, I. Trosnikova, P. Loboda

**INFLUENCE OF TUNGSTEN CONTENT ON THE REGULARITIES OF
MICROSTRUCTURE AND PHASE FORMATION IN $W_xFeCoNi$ ALLOY POWDERS DURING
MECHANICAL ALLOYING**

This work investigates the synthesis of heavy high-entropy alloys $W_xFeCoNi$ ($x = 1, 1.5, 2$) produced by mechanical alloying in a gasoline medium. It is shown that the equiatomic alloy $WFeCoNi$ forms a dual-phase BCC/FCC structure without intermetallic compounds, whereas increasing the tungsten content to $x = 1.5$ reduces the configurational mixing entropy and enhances phase segregation. For the composition $x = 2$, the formation of tungsten carbide (WC) is established, resulting from the exceeded carbon solubility limit and the diffusion activation occurring during milling. The obtained results highlight the importance of controlling the W concentration and mechanical alloying conditions to tailor the microstructure and phase stability of heavy HEAs, which is promising for applications in high-temperature and highly loaded components.

Keywords: mechanical alloying, high-entropy alloys, synthesis, microstructure, tungsten carbide

Постановка проблеми. Сучасні енергетичні, промислові та оборонні технології висувають жорсткі вимоги до матеріалів, які працюють за умов екстремальних температур, високих механічних навантажень, інтенсивного зношування та корозійно-активних середовищ. У таких умовах традиційні сплави на основі нікелю, кобальту або тугоплавких металів часто демонструють недостатню структурну стабільність, схильність до швидкого окиснення чи деградації за тривалого термічного навантаження [1,2]. Одним з нових рішень щодо збільшення ресурсу роботи важко навантажених елементів конструкції є використання високоентропійних сплавів (ВЕС) [3]. На відміну від традиційних металів та сплавів ВЕСи мають високу конфігураційну ентропію змішування атомів, за рахунок чого стабілізуються прості тверді розчини, а не інтерметалідні фази. Значна відмінність атомних радіусів складових ВЕС призводить також до зниження коефіцієнтів дифузії, пригнічення розміру зерна та фазових перетворень. Дана особливість дозволяє ВЕС демонструвати відмінні значення високотемпературної повзучості та міцності в діапазоні температур 1000 – 1500 °C [4]. Основний фокус сучасних досліджень спрямований на отримання ВЕС методами безперервного литва або електродугового переплаву. За даних умов вдається отримати практично безпористі виливки, які можуть піддаватись всім відомим методам механічної обробки. Одним з недоліків вказаних методів, є високі рівноважні умови кристалізації за яких не вдається досягнути утворення моно твердих розчинів та субмікронаго розміру зерна. Під час литва можуть кристалізуватись інтерметаліди різних груп, фази Лавеса та Хойслера, що робить дані матеріали крихкими та не придатними до використання, як конструкційні матеріали. Також для вирівнювання хімічного складу ливарних сплавів обов'язковою умовою є багаторазове переплавлення та перемішування ванни розплаву [5]. Альтернативним методом отримання ВЕС є механічне легування сумішей порошків

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Механічне легування (МЛ) – це твердофазний процес отримання сплавів та сполук в порошковому стані за рахунок високоенергетичного механічного подрібнення. МЛ супроводжується процесами подрібнення, багаторазовим зварюванням та руйнування частинок порошків, перемішуванням елементів на атомному рівні [6]. Важливою перевагою методу МЛ порівняно з ливарними методами є розширення областей

© С. Ю. Тесля, О. І. Юркова, Ю. І. Богомол, І. Ю. Троснікова, П. І. Лобода

розчинності та змішування компонентів, які за рівноважних умов утворюють інтерметаліди, або не змішуються взагалі. Розширення областей розчинності зазвичай асоціюється з механізмами прискореної дифузії в ультрадисперсних частинках, які досягаються під час багатогодинного подрібнення [7]. Вперше методом МЛ сплав було синтезовано слав AlCrCuFeTiZn Vara-lakshmi та ін. [8]. Наважку вихідних елементів піддавали механічному легуванню протягом 20 годин в середовищі толуолу. Було показано, що початок формування ОЦК твердого розчину відбувається вже на початкових стадіях МЛ протягом 5 годин. Подальше подрібнення гомогенізує структуру сплаву та знижує розмір кристалітів до 10 нм. N. Jahani та ін. [9] синтезували BECu FeNiMnCuX (X: Co, Cr, Mo, Ti, W) методом МЛ з подальшим іскро-плазмовим спіканням (ІПС). Було встановлено, що в процесі механічного легування, залежно від природи вихідних компонентів, утворюються тверді розчини на основі ГЦК або суміші ОЦК/ГЦК фаз. В процесі ІПС відбувається фазові перетворення та перегрупування атомів які супроводжуються утворенням сегрегацій твердих розчинів ОЦК1 – ОЦК2, ГЦК1 – ГЦК2. Показано, що найвищу пластичність демонструють BECu FeNiMnCu (27,2 %) та FeNiMnCuCo (34,7 %). Під час механічного легування значного впливу на формування BEC мають не лише природа вихідних компонентів, але й концентрація елементів в сплаві. Chun-Liang Chen та ін. [10] провели дослідження впливу вмісту Ta на фазовий склад та мікроструктуру CoCrNiFeTa_x. Результати показують, що додавання Ta до системи CoCrNiFeTa призводить до утворення фаз твердого розчину зі структурами ГЦК та ОЦК. Крім того, ОЦК фаза, збагачена Ta, збільшується зі збільшенням вмісту Ta, що може спричинити утворення центрів зародження тріщин. Варто також зазначити, що добавка тугоплавких металів, може призводити до утворення у BEC областей зміцнених частинками тугоплавких карбідів, окидів, нітридів чи боридів. В роботі [11] проводили дослідження впливу вмісту Ti на формування фазового складу та мікроструктури BEC TaMoNbCrTi_x (x = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1). Після ІПС сумішей порошків показано, що відбувається формування матриці з ОЦК твердого розчину та фаз Лавеса. Окремо, варто підкреслити формування складних фази на основі титану Ti(O, N). Збільшення вмісту титану об'ємний вміст фаз Лавеса зменшуються, та трансформуються із сітчастої структури в дисперсну, вміст фази Ti(O, N) зростає. BEC TaMoNbCrTi_{0,75} демонструє чудовий баланс міцності та пластичності, маючи межу текучості, міцність на стиск та деформацію після руйнування 2696 МПа, 3098 МПа та 16,8% відповідно.

Постановка завдань. Основною метою даної роботи є дослідження еволюції фазового складу та мікроструктури нових середньоентропійних сплавів W_xFeCoNi (x = 1; 1,5, 2) залежно від вмісту вольфраму.

Викладення основного матеріалу. У даному дослідженні порошки BEC W_xFeCoNi (x = 1; 1,5, 2) були отримані методом механічного легування W, Fe, Co, Ni в планетарному млині за швидкості обертання – 100 об/хв протягом 10 годин. Для уникнення адгезійного схоплювання, холодного зварювання та часткового налипання порошків на розмельні тіла та стінки барабану в середовище розмелювання було введено бензин. За рахунок складної траєкторії руху куль, інтенсивної пластичної деформації та акумуляції тепла в зоні подрібнення відбуваються процеси сплавоутворення та формування наноструктур, які в рівноважному стані не можуть існувати. Отриманні порошки після подрібнення сушили у вакуумній шафі за температури 100 °C протягом 5 год з метою видалення залишкової вологи. Дослідження фазового складу порошків після отримання проводили з використанням рентгенівського дифрактометра Ultima IV, Rigaku (Японія) з Cu-Kα-випромінюванням в діапазоні кутів 2θ: 20-90°. Мікроструктуру порошків BEC досліджували методами скануючої електронної мікроскопії на Axia ChemiSEM (Thermo Fisher Scientific), який оснащено енерго-дисперсним аналізатором TrueSight X для визначення елементного складу.

В таблиці 1 наведено термодинамічні параметри дослідних сплавів. Сплав W₁FeCoNi відповідно до термодинамічної оцінки буде формувати однорідний ОЦК твердий розчин, з можливими домішками ГЦК фази. КВЕ складає 8,25, що за простим критерієм оцінки вказує на утворення чистої ГЦК фази. Проте у присутності великої частки атомів вольфраму, базовий твердий розчин може еволюціонувати та стабілізуватись в ОЦК модифікації. Сплав W_{1,5}FeCoNi найімовірніше формуватиме твердий розчин ОЦК структури, можлива поява короткодоменної хімічної упорядкованості або дрібних інтерметалевих осередків [12]. Збільшення вмісту W причиняє переміщення області КВЕ в бік утворення змішаних структур. Сплав W₂FeCoNi порівняно з іншими має КВЕ на рівні 7,8 (менше 8), що дозволяє припустити утворення стабільного ОЦК твердого

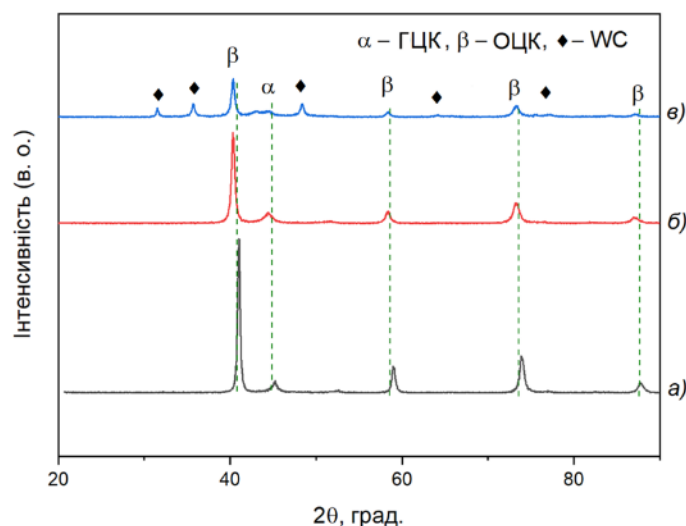
розчину та високої імовірності формування керамічних та інтерметалевих фаз, залежно від умов синтезу [13].

Табл. 1

Термодинамічні параметри сплавів $W_xFeCoNi$ ($x = 1; 1,5, 2$)

Сплав	Ентропія змішування, ΔS_{mix} (Дж / моль * К)	Різниця атомних радіусів, δ %	Концентрація валентних електронів КВЕ
$W_1FeCoNi$	11,526	4,75	8,25
$W_{1,5}FeCoNi$	11,382	5,12	8,0
$W_2FeCoNi$	11,076	5,27	7,8

На рисунку 1 наведено дифрактограми сплаву $W_xFeCoNi$ ($x = 1; 1,5, 2$) отриманого після механічного легування. За еквіатомного відношення компонентів $W_1FeCoNi$ (рис. 1, а) спостерігається утворення двох твердих розчинів ОЦК та ГЦК. Відповідно до особливостей кристалічної будови вихідних елементів можна припустити що ОЦК твердий розчин формується переважно за рахунок атомів W, Fe, в той же час ГЦК фаза утворюється на основі Co, Ni. Утворення вторинних фаз не ідентифіковано. Збільшення вмісту атомів вольфраму $W_{1,5}FeCoNi$ (рис. 1, б) не призводить до зміни профілю дифракційних максимумів. Проте відмічається зміщення рефлексів в бік менших кутів, що вказує на збільшення параметрів ґратки ВЕС. Збільшення вмісту вольфраму теоретично має призводити до утворення більшої кількості вакантних пар для розчинення атомів заліза, нікелю та кобальту, що має знижувати параметр ґратки.



а) $WFeCoNi$; б) $W_{1,5}FeCoNi$; в) $W_2FeCoNi$

Рис. 1. Дифрактограми порошків $W_xFeCoNi$ отриманих після механічного легування протягом 10 год.

Однак, виходячи з протилежного ефекту, можна припустити, що відбувається розчинення атомів вуглецю з бензину. Атоми вуглецю з малим радіусом (0,077 нм) легко займають міжвузля кристалічної ґратки W і збільшують її параметр [14]. Подальше збільшення вмісту вольфраму (рис. 1, в) призводить до перевищення граничної розчинності атомів вуглецю в матриці ВЕС, що спричиняє утворення частинок карбиду вольфраму (WC). Зниження інтенсивності дифракційних максимумів зумовлено зниженням кількості вольфраму в матриці ВЕС та формуванням нових карбідних фаз.

На рисунку 2 наведено зміну мікроструктури порошків після механічного легування. Для сплаву $WFeCoNi$ (рис. 2, а) відмічається гомогенна мікроструктура по перерізу порошку. В електронному світлі не вдається ідентифікувати фази ОЦК та ГЦК, що може вказувати на їх високу дисперсність та рівномірне перемішування. Для сплаву $W_{1,5}FeCoNi$ (рис. 2, б) відмічається формування гетерофазної структури з чітко окресленими границями фаз. Матриця складається з ОЦК твердого розчину на основі вольфраму. Спостерігається формування сегрегації, шляхом утворення крупних областей на основі ГЦК твердого розчину (сірі включення). Також в дрібнодисперсному стані в матриці присутні залишки вольфраму, які за часу легування 10 год не

розчинились в основній фазі. Збільшення сегрегації фаз може бути зумовлено різною конфігураційною ентропією змішування, яка для $W_{1,5}FeCoNi$ складає 11,38 Дж/(мол * К), а для $WFeCoNi$ складає 11,52 Дж/(мол * К). Чим нижчу ентропію має система, тим слабша однофазна стабілізація системи, та вища сегрегація. Для сплаву $W_2FeCoNi$ (рис. 2, в) спостерігається зміна мікроструктури порошку, шляхом утворення крупних зерен карбіду вольфраму в матриці ОЦК/ГЦК твердих розчинів. Формування карбіду зумовлено дією концентрованого вуглецевого середовища у вигляді бензину. Під час механічного легування відбувається активація поверхні та деструкція молекул бензину, що призводить до активації дифузії. Порівняно зі сплавами $WFeCoNi$, $W_{1,5}FeCoNi$ висока концентрація вольфраму призводить до досягнення граничної розчинності атомів вуглецю у ВЕС, та початком дифузії між атомами вуглецю та вольфрамом в реакційному просторі під час легування. Також атоми вуглецю під час дифузії в ґратку ОЦК твердого розчину можуть руйнувати металеві зв'язки утворенні W-Fe та формувати направлені ковалентні W-C.

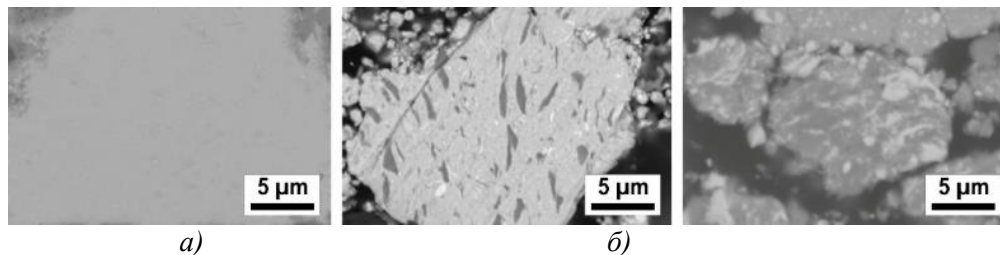


Рис. 2. Мікроструктура порошків $W_xFeCoNi$ отриманих після механічного легування протягом 10 год (а) $WFeCoNi$; б) $W_{1,5}FeCoNi$; в) $W_2FeCoNi$)

Висновки. В даній роботі встановлено, що механічне легування є ефективним методом синтезу важких високоентропійних сплавів системи $W_xFeCoNi$ ($x = 1; 1,5; 2$), дозволяючи формувати нерівноважні тверді розчини та наноструктуровані стани, недосяжні за умов традиційної металургії. Показано, що для еквіатомного складу $WFeCoNi$ утворюються два тверді розчини на основі ОЦК та ГЦК ґраток без формування інтерметалідів. Збільшення вмісту вольфраму до $x = 1,5$ спричиняє зростання сегрегації фаз, що корелює зі зниженням конфігураційної ентропії змішування (11,38 проти 11,52 Дж/(моль·К)) та утворенням гетерофазної структури з крупними областями ГЦК твердого розчину. Подальше збільшення концентрації W ($x = 2$) призводить до досягнення граничної розчинності атомів вуглецю, інтенсивного карбідоутворення та формування частинок WC у матриці ОЦК/ГЦК твердих розчинів. Встановлено, що присутність бензину як органічного середовища сприяє дисоціації молекул, дифузії вуглецю та стабілізації карбідних фаз. Отримані результати дозволяють оптимізувати умови механічного легування для керування фазовим складом і мікроструктурою важких ВЕС на основі W та забезпечують наукове підґрунтя для розробки жаростійких та зносостійких матеріалів нового покоління.

Відомості про фінансування дослідження. Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України (проект 2023.03/0053)

Література

1. Stability of the microstructure and elevated-temperature mechanical properties of additively manufactured Inconel 718 superalloy subjected to long-term in-service thermal cycling / E. M. Fayed et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2022. Vol. 838. P. 142790. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.142790>.
2. High-temperature mechanical properties and fatigue of nanocrystalline nickel-cobalt-phosphorous (NiCoP) alloy / N. Badwe et al. *Materialia*. 2021. Vol. 18. P. 101136. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101136>.
3. High entropy alloys: a review of preparation techniques, properties and industry applications / Y.-F. Yang et al. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024. P. 177691. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177691>.
4. A review on fundamental of high entropy alloys with promising high-temperature properties / J. Chen et al. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018. Vol. 760. P. 15–30. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.05.067>.

5. Güler S., Alkan E. D., Alkan M. Vacuum arc melted and heat treated AlCoCrFeNiTiX based high-entropy alloys: Thermodynamic and microstructural investigations. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. Vol. 903. P. 163901. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.163901>.
6. Vaidya M., Muralikrishna G. M., Murty B. S. High-entropy alloys by mechanical alloying: A review. *Journal of Materials Research*. 2019. Vol. 34, no. 5. P. 664–686. URL: <https://doi.org/10.1557/jmr.2019.37> (date of access: 24.11.2025).
7. Murty BS, Ranganathan S. Novel materials synthesis by mechanical alloying/milling. *International Materials Reviews*. 1998;43(3):101-141. doi:10.1179/imr.1998.43.3.101
8. Varalakshmi S., Kamaraj M., Murty B. S. Synthesis and characterization of nanocrystalline AlFeTiCrZnCu high entropy solid solution by mechanical alloying. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008. Vol. 460, no. 1-2. P. 253–257. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.05.104> (date of access: 24.11.2025).
9. Jahani N., Reihanian M., Gheisari K. Microstructure, deformation behavior, and dynamic recrystallization kinetics of FeNiMnCu-based high entropy alloys prepared by mechanical alloying and spark plasma sintering. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024. P. 173408. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.173408> (date of access: 24.11.2025).
10. Chen C.-L., Lin P.-H. Influences of Ta content and mechanical alloying on synthesis and characteristics of CoCrNiFeTa_x high entropy alloys. *Intermetallics*. 2024. Vol. 172. P. 108362. URL: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2024.108362> (date of access: 24.11.2025).
11. Effect of Ti content on microstructure and mechanical properties of TaMoNbCrTi_x refractory high-entropy alloy / S. Gao et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2024. P. 146394. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146394> (date of access: 24.11.2025).
12. Soto A. O., Salgado A. S., Niño E. B. Thermodynamic analysis of high entropy alloys and their mechanical behavior in high and low-temperature conditions with a microstructural approach - A review. *Intermetallics*. 2020. Vol. 124. P. 106850. URL: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106850>
13. Heavy carbon alloyed FCC-structured high entropy alloy with excellent combination of strength and ductility / L. B. Chen et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 716. P. 150–156. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.01.045> (date of access: 24.11.2025).
14. Microstructure and mechanical properties of FeCoCrNiMnTi_{0.1}Co_{0.1} high-entropy alloy produced by mechanical alloying and vacuum hot pressing sintering / X. Liu et al. *Vacuum*. 2019. Vol. 165. P. 297–304. URL: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2019.04.043>

Рецензент: Втерковський Михайло Ярославович, к.т.н., старший викладач КІП ім. Ігоря Сікорського, НН ІМЗ ім. Є. О. Патона, каф. ВТМ та ПМ

С. О. Наконечний, О. І. Юркова, П. І. Лобода, Ю. І. Богомол, І. Ю. Троснікова

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

СТРУКТУРА ВИСОКОЕНТРОПІЙНОГО AlNiCrTiB СПЛАВУ ПІСЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

У роботі досліджено структуру та фазовий склад легкого високоентропійного сплаву AlNiCrTiB , отриманого механічним легуванням та електронно-променевою обробкою. Встановлено формування in-situ боридних фаз TiB і Cr_2B_3 , які утворюються в процесі високотемпературного нагрівання. Показано, що під час переплавлення поверхневого шару формується металева матриця з крупними окремими боридними включеннями, тоді як за більш рівномірного нагрівання за нижчих температур відбувається ріст дрібнодисперсних частинок TiB через взаємодію титану з бором. У перехідній зоні між переплавленою та внутрішньою областями формується тонкий шар TiB , що забезпечує подальше формування рівномірної композитної структури на основі металевої матриці та дисперсних боридних включень.

Ключові слова: високоентропійний сплав, низька густина, композит, боридні включення, структура, механічне легування, електронно-променева обробка.

S. O. Nakonechnyi, O. I. Yurkova, P. I. Loboda, Y. I. Bogomol, I. Y. Trosnikova

STRUCTURE OF HIGH-ENTROPY AlNiCrTiB ALLOY AFTER HIGH-SPEED ELECTRON-BEAM HEAT TREATMENT

In this study, the structure and phase composition of lightweight high-entropy AlNiCrTiB alloy produced by mechanical alloying followed by electron-beam treatment were investigated. The in-situ formation of TiB and Cr_2B_3 boride phases during high-temperature exposure was confirmed. It was shown that remelting of the surface layer leads to the formation of a metallic matrix containing large, edged boride inclusions, whereas more uniform heating at lower temperatures promotes the growth of finely dispersed TiB particles through the interaction of titanium with boron. A thin TiB -enriched transition layer forms between the remelted surface and the inner regions, facilitating the development of a homogeneous composite structure composed of a metallic matrix reinforced with dispersed boride inclusions.

Keywords: high-entropy alloy, low density, composite, boride inclusions, structure, mechanical alloying, electron beam treatment.

Постановка проблеми. Сучасний промисловий розвиток неможливий без створення та впровадження нових матеріалів, здатних забезпечувати необхідні експлуатаційні характеристики та підвищувати ефективність і довговічність конструкційних елементів машин і механізмів. Це повною мірою стосується й авіаційної техніки, для якої актуальним є застосування легких матеріалів із підвищеними механічними властивостями, термостабільністю, а також високою стійкістю до окиснення, корозії та зношування в умовах екстремальних температур [1]. Одним із найбільш активних напрямів сучасних матеріалознавчих досліджень є розроблення інноваційних матеріалів для деталей авіаційних двигунів, зокрема лопаток газотурбінних установок.

Розвиток матеріалів для лопаток турбін упродовж останніх десятиліть був, в першу чергу, зосереджений на вдосконаленні нікелевих монокристалічних жароміцних сплавів, оптимізації їх фазового складу та мікроструктури для підвищення робочих температур і ресурсу деталей газотурбінних двигунів [1, 2]. Також активними були напрямки нанесення теплозахисних покриттів, що значно розширило температурний потенціал нікелевих суперсплавів, а також розвиток керамічних композиційних матеріалів, що поєднують високу жаростійкість, низьку густину та стійкість за підвищених робочих температур [3–6]. Поряд із цим досліджуються бориди й карбіди перехідних металів, відомі своєю винятковою термостійкістю, хоча їх використання обмежується високою густиною та складністю виробництва [7, 8].

Таким чином, традиційні технології та матеріали дозволяють в певній мірі підвищити експлуатаційні характеристики, однак обмежуються структурою вихідних компонентів, їх складових або фазового складу. Тому останніми роками значного поширення набули дослідження нового класу матеріалів – високоентропійних сплавів (ВЕС), які завдяки високій ентропії змішування демонструють підвищені жароміцність, термостабільність і стійкість до окиснення, поряд з високими механічними та експлуатаційними характеристиками [9, 10]. Особливий інтерес становлять тугоплавкі високоентропійні сплави на основі тугоплавких металів, які поєднують високу міцність і стійкість до корозії та окиснення за екстремальних температур, однак їхнє практичне застосування в авіаційній техніці обмежується високою густиною [11, 12].

У цьому контексті одним із ключових напрямів досліджень є створення легких ВЕС із

© С. О. Наконечний, О. І. Юркова, П. І. Лобода, Ю. І. Богомол, І. Ю. Троснікова

використанням легких елементів та механізмів цілеспрямованого зміцнення шляхом in-situ формування тугоплавких сполук внаслідок введення неметалевих елементів. Такі матеріали дають змогу оптимально поєднати жароміцність, термічну стабільність і низьку густину, відкриваючи перспективи формування нового покоління легких жароміцних сплавів для лопаток турбін, здатних конкурувати як із нікелевими суперсплавами, так і з важкими тугоплавкими ВЕС [13–16].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У сфері легких високоентропійних сплавів останні дослідження зосереджені на системах на основі Al, Ti, Mg, Li та Be [13–15], які забезпечують густину $< 5\text{--}6\text{ г/см}^3$ та механічні характеристики, що наближаються або перевищують показники нікелевих суперсплавів [13–15]. Оглядові та експериментальні роботи [13, 14, 16] демонструють ефективність CALPHAD-моделювання, високопродуктивних обчислювальних методів та алгоритмів машинного навчання у прогнозуванні складів із комбінованими механізмами зміцнення – твердорозчином та дислокаційним зміцненням.

Паралельно інтенсивно розвивається концепція самоармування ВЕС шляхом введення неметалевих елементів (C, B, N, O, Si) [8–10, 16]. Дослідження показують, що додавання C або B спричиняє in-situ формування частинок карбідів та боридів [8–10], які формують композиційну мікроструктуру типу «пластична матриця – жорсткі дисперсні частинки». Такий підхід забезпечує суттєве підвищення границі плинності, твердості та зносостійкості, зберігаючи необхідний рівень пластичності та інших характеристик ВЕС [8–10, 16]. До характерних прикладів належить in-situ формування карбідів у CoCrFeMnNi ВЕС внаслідок введення C або формування боридних частинок шляхом додавання частинок NbB₂ до ВЕС.

Однак, попри наявні успіхи, більшість робіт зосереджується або на важких ВЕС на основі тугоплавких елементів, або на легких ВЕС без оптимізації складу тугоплавких фаз [9, 10, 15, 16]. Це визначає актуальність подальших досліджень, спрямованих на створення легких ВЕС з керованим формуванням карбідів, боридів, нітридів та оксидів для самоармування ВЕС матриці, що забезпечуватиме низьку густину, підвищену жароміцність та стійкість до окиснення, необхідні для деталей авіаційних турбін [13–16].

Постановка завдань. Виходячи з вищевикладеного основною метою даної роботи було синтез та дослідження легкого високоентропійного сплаву з композиційною структурою типу «металева матриця – тугоплавкі сполуки», отриманою шляхом in-situ формування тугоплавких сполук внаслідок введення неметалевого елемента та швидким нагріванням матеріалу до температур плавлення.

У якості металевих складових сплаву обрано Al, Ni, Cr та Ti. Така комбінація елементів забезпечує:

- 1) зниження густини (Al, Ti);
- 2) підвищення механічних характеристик за рахунок Al, Ti та Cr [9, 13–15];
- 3) достатню пластичність завдяки Ni та Ti [13, 14, 20, 21];
- 4) стійкість до корозії та окиснення, а також термостабільність (Al, Ti, Cr) [9–12, 15];
- 5) умови для взаємодії тугоплавких металів (Ti, Cr) із бором з метою формування in-situ частинок тугоплавких сполук (боридів) [22–24, 27, 28].

У якості неметалевої складової обрано бор (B). За даними сучасних досліджень, додавання більшості неметалевих елементів (C, B, N, O, Si) до складу ВЕС сприяє зміцненню матеріалу, однак для багатьох із них критичним фактором є їх концентрація [17–19]. Наприклад, введення підвищених концентрацій C або N до твердого розчину ВЕС матриці суттєво збільшує її твердість і міцність, проте в багатьох випадках супроводжується зниженням пластичності та в'язкості руйнування [17, 18, 20, 21]. Натомість високий вміст бору у ВЕС, поєднаний з утворенням in-situ дисперсних боридних фаз і зміцненням металевої матриці атомами проникнення, формує комплекс підвищених механічних характеристик (міцність, твердість, термостійкість) за збереження прийнятної пластичності [22–28].

Методи отримання ВЕС/композиту. У даному дослідженні використовували комбінований метод отримання ВЕС шляхом довготривалого механічного легування та високошвидкісного електронно-променевого спікання. Метод механічного легування дозволяє отримати практично однорідні наноструктуровані порошки сплавів, навіть за умов значної різниці в атомних радіусах, структурі та електронегативності вихідних компонентів [18, 19]. Механічне легування проводили в планетарному млині Retsch PM100 у середовищі бензину. Швидкість обертання – 400 об/хв. Час легування – 10 год (не включаючи 10 хв зупинки після кожних 10 хв розмелювання для уникнення перегрівання порошкового матеріалу). Матеріал розмельних тіл та барабану – твердий сплав

WC-6Co.

В той же час використання електронно-променевого методу нагрівання матеріалу дозволяє зберегти вихідну наноструктуру та властивості ВЕС, отриманого після механічного легування, внаслідок високої швидкості нагрівання (30–60 с), короткого часу термічної обробки (не більше декількох хвилин) та охолодження (до 60 с) [10, 16]. При цьому наданої енергії достатньо для проходження in-situ реакцій між металами та неметалом [27]. В даному дослідженні час витримки становив 60 с, температура максимально близька до температури плавлення ВЕС.

Методи досліджень. Структуру та фазовий склад порошкових та спечених зразків сплавів вивчали за допомогою рентгенівського дифрактометра Ultima IV, Rigaku (Японія) у монохроматичному Cu-K α -випромінюванні за стандартними методиками. Мікроструктуру порошкового ВЕС та отриманого композиційного матеріалу досліджували за допомогою скануючого електронного мікроскопа Axia ChemiSEM (Thermo Fisher Scientific), оснащеного енергодисперсійним рентгенівським мікроаналізатором TrueSight X для визначення елементного складу.

Викладення основного матеріалу. На рис. 1 представлено спектри рентгенівської дифракції порошкового сплаву AlNiCrTiB ВЕС після механічного легування та електронно-променевої обробки. Як видно з отриманих результатів, вихідний порошковий сплав після механічного легування протягом 10 год (рис. 1а) складається з двох твердих розчинів заміщення на основі ОЦК (β -фаза) та ГЦК (α -фаза) кристалічних структур. Відповідно до інтенсивності дифракційних максимумів, домінуючою є β -фаза. Обидва тверді розчини характеризуються значним розширенням дифракційних максимумів, що свідчить про наноструктурний стан та наявність суттєвих внутрішніх мікродеформацій. Їх формування є наслідком інтенсивної пластичної деформації, яка відбувається під час процесу механічного легування та супроводжується подрібненням частинок і накопиченням дефектів кристалічної ґратки.

Окрім дифракційних максимумів, що відповідають твердим розчинам, у спектрах чітко ідентифіковано максимуми від нерозчиненого Ti. Це пов'язано з тим, що атом Ti має один із найбільших атомних радіусів (~147 пм) серед компонентів системи, що істотно ускладнює його розчинення у ОЦК (β -фаза) та ГЦК (α -фаза) твердих розчинах на ранніх та навіть пізніх стадіях механічного легування. Значні відмінності атомних радіусів і характер енергії змішування в системі обмежують ступінь взаємної розчинності, внаслідок чого навіть після 10 год легування частина титану зберігається у вигляді окремої фази, що проявляється у вигляді окремих дифракційних максимумів.

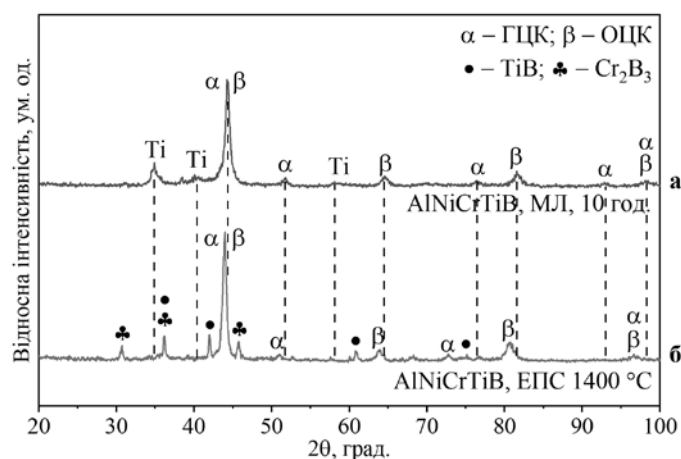


Рис. 1. Спектри рентгенівської дифракції порошкового AlNiCrTiB ВЕС після (а) механічного легування та (б) електронно-променевої обробки

СЕМ зображення частинок порошкового AlNiCrTiB ВЕС після механічного легування наведено на рис. 2. Отриманий порошковий сплав представляє собою дрібні (до 5 мкм) частинки неправильної форми (рис. 2а), що є наслідком активного подрібнення та «холодного» зварювання під час інтенсивної пластичної деформації в процесі механічного легування. Такі цикли подрібнення та зварювання призводять до накопичення внутрішніх мікронапружень, формування наноструктурного стану та, відповідно, підвищення механічних характеристик сформованого сплаву [9, 10, 17, 18, 19].

© С. О. Наконечний, О. І. Юркова, П. І. Лобода, Ю. І. Богомол, І. Ю. Троснікова

Мікроструктура окремих частинок або їх агломератів (рис. 2б) представлена двома основними фазами: світло-сірою β -фазою та сірою α -фазою. β -фаза становить основну частину матеріалу та характеризується підвищеним вмістом Cr, тоді як α -фаза формується у вигляді тонких прошарків між зернами β -фази та збагачена на Ni та Ti. Така морфологія є типовою для багатокомпонентних систем після тривалого механічного легування, коли відбувається формування наноструктурних шарів або включень через неоднорідний розподіл та різну ентальпію змішування компонентів [9, 10, 13, 18]. Окрім основних фаз, у мікроструктурі виявлено поодинокі світлі включення WC, що є результатом зношування твердосплавних розмельних тіл у процесі тривалого легування. Також спостерігаються темні включення нерозчиненого Ti, що узгоджується з даними рентгенівської дифракції і пояснюється обмеженою розчинністю Ti в ОЦК- та ГЦК-твердих розчинах за умов короткотривалого механічного легування.

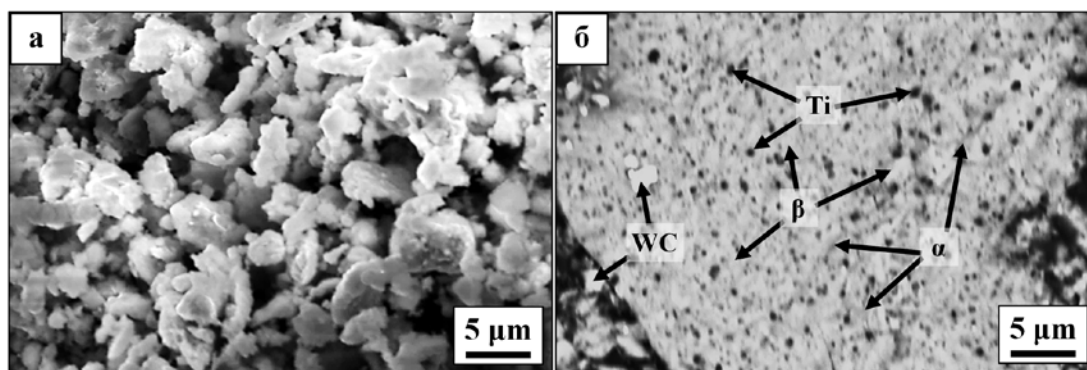


Рис. 2. СЕМ зображення частинок порошкового AlNiCrTiB WCC після механічного легування:
(а) морфологія; (б) мікроструктура

Після електронно-променевої обробки в спектрах рентгенівської дифракції спостерігаються певні зміни (рис. 1б). У першу чергу слід відмітити, що склад металевої матриці WCC на основі β - та α -фаз зберігається. Значне розширення дифракційних максимумів та незначне підвищення їх інтенсивності, незважаючи на релаксацію частини внутрішніх мікронапружень за підвищених температур, дозволяють стверджувати про збереження наноструктурного стану твердих розчинів після високотемпературної обробки. Крім цього, спостерігається невеликий зсув дифракційних максимумів обох твердих розчинів у бік менших кутів 2θ (рис. 1), що свідчить про збільшення параметрів їх кристалічних ґраток. Це обумовлено розчиненням залишкових атомів Ti в ґратках твердих розчинів за підвищених температур. Окрім максимумів, що відповідають твердим розчинам, у спектрах рентгенівської дифракції також спостерігаються достатньо інтенсивні максимуми від боридних фаз на основі Ti (TiB) та Cr (Cr₂B₃). Формування цих фаз є очікуваним, оскільки атомні пари Ti-B та Cr-B мають найнижчі значення ентальпії серед можливих бінарних боридів у даній елементній системі, що робить їх термодинамічно найстабільнішими за підвищених температур.

На рис. 3 представлено СЕМ зображення зразка AlNiCrTiB WCC після електронно-променевої обробки. Як видно з рисунку, крім нижньої частини, що складається з неспеченого порошкового матеріалу, в сплаві можна виділити 4 основні зони термічного впливу:

- 1) поверхнева зона (високі температури, відсутність прямого контакту з променем);
- 2) центральна зона (максимальні температури, прямий контакт з променем);
- 3) внутрішня зона (усереднена температура, спікання матеріалу);
- 4) дефектна зона (знижена температура, часткове спікання).

Нерівномірність ущільнення та формування великих тріщин у зразку зумовлені як високими швидкостями нагрівання та охолодження під час електронно-променевої обробки, так і недостатньою термічною витримкою, а також значною різницею в коефіцієнтах термічного розширення між металевою матрицею на основі твердих розчинів та тугоплавкими боридними сполуками. Найбільш виражені дефекти спостерігаються у зонах локального перегрівання порошкової пресовки та на межах між повністю і частково спеченими областями матеріалу.

Це може бути пов'язано зі значним дифузійним перерозподілом атомів, необхідним для утворення тугоплавких боридних фаз. Інтенсивний дифузійний потік призводить до тимчасового локального дефіциту атомів на фронті спікання та відповідного ослаблення міжатомних зв'язків, що

робить ці області особливо вразливими до руйнування під час швидкісного охолодження.

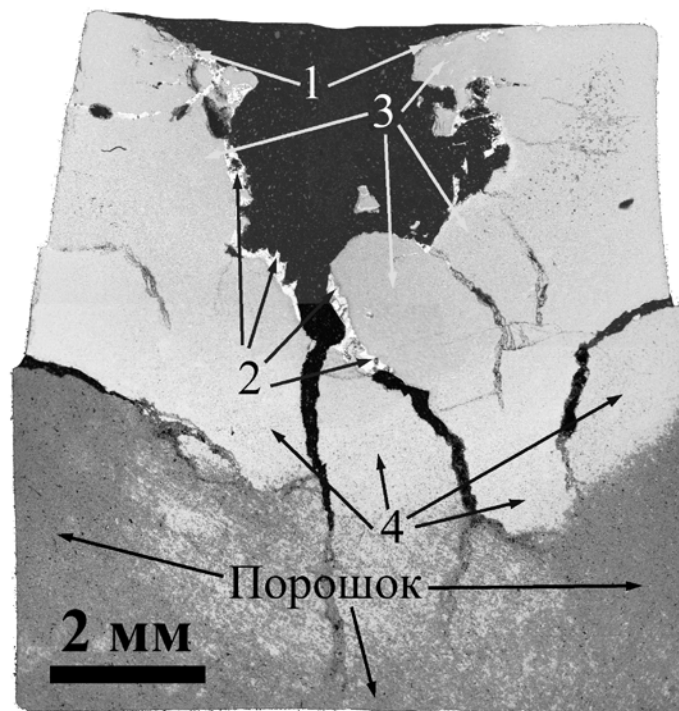


Рис. 3. СЕМ зображення зразка AlNiCrTiB BEC після електронно-променевої обробки: (1) поверхнева зона; (2) центральна зона; (3) внутрішня зона; (4) дефектна зона

Окремої уваги потребує аналіз мікроструктури всіх зон термічного впливу, що сформувалися в зразку після електронно-променевої обробки (рис. 4), оскільки саме вони відображають особливості поведінки матеріалу за умов інтенсивного високотемпературного нагрівання. Зона порошкового неспеченого матеріалу тут не розглядається, оскільки її структура повністю відповідає вихідному порошку (рис. 2б).

На поверхні зразка після обробки виділяються дві основні зони (рис. 3, зони 1 та 2). У центральній зоні фіксується максимальна дія теплового потоку, що є результатом прямого опромінення електронним пучком. У поверхневій зоні зразка нагрівання поверхні забезпечувалося тривалою тепловою дією без прямого контакту з електронним потоком, завдяки чому температура обробки була ближчою до оптимальної. У результаті в поверхневій зоні (рис. 4а) формуються майже переплавлені області, представлені світлою металевою матрицею на основі твердих розчинів та крупними прямокутними темними включеннями TiB. Також подекуди виявляються поодинокі шестигрунті частинки TiB₂ з гексагональною структурою, кількість яких є недостатньою для їх надійної ідентифікації за допомогою рентгеноструктурного аналізу (рис. 1б).

В центральній зоні зразка (рис. 4б) частинки TiB/TiB₂ вже не виявляються. Натомість у відповідній мікроструктурі спостерігається значна кількість видовжених включень Cr₂B₃. Виражена дефектність поверхні, наявність подряпин та часткове руйнування структури цих включень при шліфуванні свідчать про їх низьку механічну міцність. Формування подібної структури сплаву може бути пов'язане зі швидким плавленням наявного у складі AlNiCrTiB BEC нерозчиненого Ti, що призводить до його перенесення у глибші шари під час інтенсивного переплавлення. Одночасно частинки ОЦК твердого розчину (β-фази), які містять значну кількість атомів проникнення (бору), можуть слугувати зародками для формування в першу чергу включень Cr₂B₃, тоді як більш тугоплавкий TiB/TiB₂ утворюється пізніше. Це узгоджується з підвищеною концентрацією темних боридних включень TiB у перехідному прошарку між центральною зоною та початком внутрішньої зони з композиційною структурою (рис. 4б та 4в), що свідчить про послідовне та просторово нерівномірне формування боридних фаз залежно від локальних умов нагріву.

Натомість мікроструктура внутрішньої зони зразка (рис. 4в) після електронно-променевої обробки являє собою композит, що складається зі світлої металевої матриці на основі твердих розчинів та великої кількості дисперсних включень розміром не більше 2 мкм. Ці включення мають неправильну або прямокутну форму та, відповідно до результатів локального елементного аналізу,

© С. О. Наконечний, О. І. Юркова, П. І. Лобода, Ю. І. Богомол, І. Ю. Троснікова

відповідають TiB.

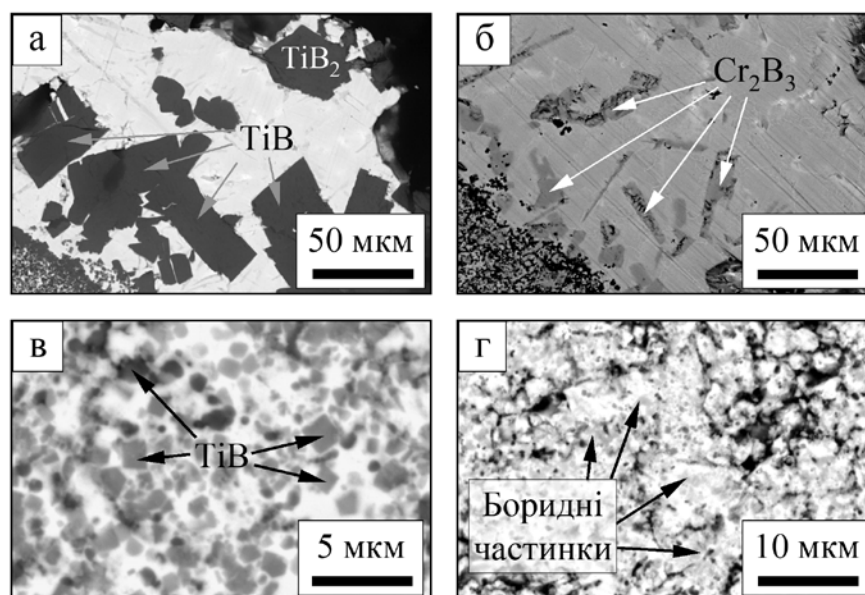


Рис. 4. Мікроструктура зразка AlNiCrTiB ВЕС після електронно-променевої обробки: (а) поверхнева зона; (б) центральна зона; (в) внутрішня зона; (г) дефектна зона

Розподіл тугоплавких боридних частинок у внутрішній зоні є більш рівномірним, що може бути пов'язано з вирівнюванням температурного поля та більш стабільним перебігом дифузійних процесів у глибині матеріалу під час більш тривалого локального нагрівання. Це також може бути обумовлено наявністю залишкового бору у вихідному порошковому сплаві. Оскільки бор є аморфним матеріалом, його неможливо ідентифікувати за допомогою рентгенівської дифракції у такій багатокомпонентній системі, однак це не виключає його концентрації на межах зерен або частинок порошку. На початкових етапах нагрівання бор може інтенсивно реагувати з металевими елементами та їх оксидами, а після завершення цих реакцій температура системи стабілізується, що сприяє більш рівномірному розподілу боридних фаз.

Ширина внутрішньої зони становить близько 2–3 мм (рис. 3) після електронно-променевої обробки протягом 1 хвилини. Після неї спостерігається дефектна зона (рис. 4г), що складається з частково спечених порошкових частинок. У цій області виявляється значна кількість пор, що свідчить про недостатній рівень теплової енергії для завершення дифузійних і реакційних процесів, необхідних для формування кінцевої структури сплаву та його ущільнення. При цьому всередині частково спечених частинок фіксується велика кількість сірих дрібнодисперсних включень, що свідчить про початок формування зародків боридних фаз уже за відносно низьких температур, суттєво нижчих за температуру плавлення основного матеріалу. Це вказує на високу термодинамічну стабільність боридів та їх раннє зародження під час низькотемпературного нагрівання, значно нижче температур плавлення.

Висновки. У роботі проведено дослідження структури та фазового складу легкого високоентропійного сплаву AlNiCrTiB, отриманого шляхом механічного легування та подальшої електронно-променевої обробки. Встановлено, що під час електронно-променевого нагрівання в порошковому AlNiCrTiB ВЕС формуються in-situ боридні включення TiB/TiB₂ та Cr₂B₃. При нагріванні до температур, що перевищують температуру плавлення матеріалу або більшості його компонентів, поверхневий шар порошкової пресовки переплавляється. Це призводить до формування металевої матриці з крупними, обмеженими за формою боридними включеннями. У випадку надмірного перегрівання першочергово утворюється Cr₂B₃, що має нижчу температуру плавлення порівняно з TiB/TiB₂. Натомість за умов більш рівномірного нагрівання при нижчих температурах спостерігається зростання кількості включень TiB внаслідок поступової взаємодії нерозчиненого титану з атомами бору. Між переплавленими зонами і внутрішніми зонами обробленого матеріалу формується тонкий перехідний прошарок, що складається з боридних включень на основі Ti. Саме він забезпечує подальше формування більш рівномірної композитної структури, що складається зі світлої металевої матриці та дрібнодисперсних рівномірно розподілених частинок TiB.

Відомості про фінансування. Це дослідження було профінансовано в рамках проєктів Національного фонду досліджень України, грант № 2023.03/0053 (мікроструктурний аналіз, включно з локальним елементним аналізом із використанням обладнання, придбаного за кошти Фонду), та Міністерства освіти і науки України, номер державної реєстрації 0124U000913 (дослідження режимів електронно-променевого спікання, підбір компонентів сплаву, рентгеноструктурний аналіз).

Література

1. Pollock, T. M. Alloy design for aircraft engines: The continued evolution of Ni-based superalloys. *Nature Materials*, vol. 19, pp. 1175–1181, 2020, doi: 10.1038/nmat4709
2. DeMott, R., Rae, C. M. F., Xie, X. et al. Advances in single-crystal superalloys for turbine blades. *Progress in Materials Science*, vol. 120, 2021.
3. S. Zhang et al., “CrTaO₄ as a new thermal barrier material?,” *Journal of Advanced Ceramics*, vol. 13, no. 3, pp. 373–387, Mar. 2024, doi: 10.26599/JAC.2024.9220862.
4. Liu, Y., Clarke, D. R. Developments in thermal barrier coatings for turbine blades. *Annual Review of Materials Research*, vol. 52, pp. 89–116, 2022.
5. Nasiri, N., Li, Q., Chen, Y. Ceramic matrix composites in aerospace: A review. *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 41, no. 2, pp. 1137–1160, 2021.
6. Bhatt, R. T. SiC/SiC ceramic matrix composites for next-generation turbine engines. NASA Technical Report, 2020.
7. G.-J. Zhang, W.-M. Guo, D.-W. Ni, Y.-M. Kan. Ultrahigh-temperature ceramics based on ZrB₂ and HfB₂ systems: Synthesis, densification and properties. *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 45, pp. 1–27, 2020.
8. Y. Wei et al., “Research progress and development of strengthening-toughening methods for molybdenum alloys prepared by powder metallurgy,” *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, p. 177099.
9. B. Gorr, M. Heilmaier. Refractory high-entropy alloys: Constitution, properties and oxidation behaviour. *International Materials Reviews*, vol. 67, no. 3, pp. 1–27, 2022.
10. S. Zhang et al., “High-entropy alloys for extreme-temperature environments,” *Coatings*, vol. 15, no. 1, 92, 2025.
11. S. Schellert, B. Gorr, S. Laube, A. Kauffmann, M. Heilmaier, and H. J. Christ, “Oxidation mechanism of refractory high entropy alloys Ta-Mo-Cr-Ti-Al with varying Ta content,” *Corrosion Science*, vol. 192, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.corsci.2021.109861.
12. S. Schellert et al., “Formation of rutile Cr, Ta, TiO₂ oxides during oxidation of refractory high entropy alloys in Ta-Mo-Cr-Ti-Al system,” *Corrosion Science*, vol. 211, no. 110885, 2023.
13. X.-F. Wang, H. Cheng, L. Guo et al. Lightweight high-entropy alloys: Structures, properties and alloy design strategies. *Materials Innovations*, vol. 7, p. 70014, 2025.
14. A. Kumar, R. Singh, Y. Li et al. Recent progress in lightweight high-entropy alloys for aerospace applications. *Materials Today Communications*, vol. 39, 2025.
15. O. N. Senkov, “Prospects of refractory and lightweight high-entropy alloys for gas-turbine applications,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 31, pp. 4508–4523, 2022.
16. S. Zhang, H. Zhang, P. Zhang et al., “Performance and mechanisms of high-entropy alloys under extreme conditions,” *Coatings*, vol. 15, no. 1, 92, 2025.
17. I. Baker, “Interstitials in f.c.c. High Entropy Alloys,” *Metals*, vol. 10, 695, 2020.
18. C. Zhu et al., “A review on improving mechanical properties of high-entropy alloys,” *Journal of Materiomics*, 2023.
19. Q. Yu et al., “Atomic-scale understanding of interstitial-strengthened high-entropy alloys,” *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2025.
20. D. Zhao et al., “Ordered nitrogen complexes overcoming strength–ductility trade-off in an additively manufactured high-entropy alloy,” *Materials Research Letters*, 2020.
21. J. Kunding et al., “Carbon effect on thermo-kinetics of Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloy,” *Acta Materialia / J. Alloys Compd.*, 2023.
22. B. Kang et al., “Effect of boron addition on the microstructure and mechanical properties of refractory high-entropy alloys,” *Materials & Design*, 2021.

23. P.-H. Ko et al., “Microstructure and Mechanical Properties of Intergranular Boron-Doped Refractory High Entropy Alloys,” *Metals*, 2022.
24. H. Pan et al., “Role of Boron Addition in Tuning Microstructure and Mechanical Properties of AlNbTiZr-Based High-Entropy Alloy,” *Preprint*, 2022.
25. Y. Wen et al., “Effect of B Content on Microstructure and Properties of [alloy],” *ACS Omega*, 2025.
26. X. Li et al., “Eutectic high-entropy alloys containing B and Si with enhanced strength–ductility synergy,” *Materials Science and Engineering A*, 2022.
27. S. Nakonechnyi et al., “The influence of boron content on the structure and mechanical properties of lightweight AlTiCrNbVBx high-entropy alloys strengthened by in-situ inclusions,” 2025.
28. J. Seol et al., “Enhancing mechanical properties of the boron-doped Al_{0.2}Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_{0.5} high-entropy alloy via tuning composition and microstructure,” ~2021.

Рецензент: Соловйова Тетяна Олександрівна, к.т.н., доцент КПІ ім. Ігоря Сікорського, НН ІМЗ ім. Є. О. Патона, каф. ВТМ та ПМ

І.В. Самоненко

Луцький національний технічний університет

**ЙМОВІРНІСНІ МОДЕЛІ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ
ДОВГОВІЧНОСТІ АРХІТЕКТУРНИХ ОБ'ЄКТІВ**

У статті розглянуто застосування ймовірнісних моделей для аналізу та прогнозування довговічності архітектурних об'єктів в умовах невизначеності експлуатаційних і матеріальних параметрів. Методологія дослідження ґрунтується на використанні моделей теорії надійності та аналізу часу до відмови, зокрема розподілів Вейбулла та логнормального розподілу, які широко застосовуються для опису процесів деградації будівельних матеріалів і конструкцій. У роботі використано синтетичні дані, змодельовані на основі емпіричних результатів попередніх досліджень довговічності бетонних і конструкційних матеріалів. Для оцінки ймовірності відмови та прогнозування строку служби архітектурних об'єктів застосовано методи структурної надійності та моделювання Монте-Карло. Отримані результати демонструють ефективність ймовірнісного підходу для кількісної оцінки ризиків деградації та дозволяють визначати очікуваний строк експлуатації з урахуванням варіабельності впливових факторів. Запропонований підхід може бути використаний як інструмент підтримки прийняття рішень у процесі проектування та оцінювання надійності архітектурних об'єктів.

Ключові слова: ймовірнісні моделі, довговічність архітектурних об'єктів, структурна надійність, розподіл Вейбулла, логнормальний розподіл, аналіз часу до відмови, моделювання Монте-Карло, прогнозування строку служби

I. V. Samonenko

**PROBABILISTIC MODELS FOR THE ANALYSIS AND PREDICTION OF THE
DURABILITY OF ARCHITECTURAL STRUCTURES**

This paper examines the application of probabilistic models for the analysis and prediction of the durability of architectural structures under uncertainty in material properties and operational conditions. The research methodology is based on reliability theory and time-to-failure analysis, with particular emphasis on the Weibull and lognormal distributions, which are widely used to describe degradation processes in building materials and structural systems. The study employs synthetic datasets generated on the basis of empirical results reported in previous investigations of the durability of concrete and structural materials. Structural reliability methods and Monte Carlo simulation are applied to estimate failure probabilities and to predict the service life of architectural objects. The results demonstrate the effectiveness of the probabilistic approach for quantitative assessment of degradation risks and enable the estimation of expected service life while accounting for the variability of influencing factors. The proposed methodology can be used as a decision-support tool in the design process and in the reliability assessment of architectural structures.

Keywords: probabilistic models, durability of architectural structures, structural reliability, Weibull distribution, lognormal distribution, time-to-failure analysis, Monte Carlo simulation, service life prediction

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Проблема довговічності архітектурних об'єктів є однією з ключових у сучасній теорії та практиці будівництва, оскільки строк служби конструкцій визначає не лише економічну ефективність, але й безпеку експлуатації та сталість архітектурного середовища. Реальні умови експлуатації будівель характеризуються значною невизначеністю, зумовленою варіабельністю властивостей матеріалів, впливом кліматичних чинників, навантажень і процесів деградації, що унеможливорює точне детерміністичне прогнозування їхнього ресурсу. У зв'язку з цим у сучасних дослідженнях усе більшого поширення набувають ймовірнісні підходи, які дозволяють кількісно враховувати випадковий характер процесів руйнування та старіння конструкцій [5].

Одним із найбільш поширених інструментів аналізу довговічності матеріалів і конструкцій є використання розподілу Вейбулла, який широко застосовується для моделювання часу до відмови та процесів втомного руйнування. У роботах [1; 6] показано, що параметри розподілу Вейбулла адекватно описують статистичні закономірності деградації матеріалів і дозволяють оцінювати ймовірність руйнування на різних етапах експлуатації. Модифікація параметрів цього розподілу, з урахуванням специфіки навантажень і умов експлуатації, дає змогу підвищити точність прогнозів довговічності, що є особливо важливим для складних архітектурних конструкцій [6].

Поряд із розподілом Вейбулла, у задачах аналізу строку служби широко застосовуються логнормальні моделі, які використовуються для опису даних виживання та часу до відмови в умовах асиметричних розподілів. Класичні дослідження з аналізу логнормальних даних виживання [3] заклали теоретичне підґрунтя для використання цього підходу у технічних системах, де деградаційні процеси накопичуються поступово. Логнормальний розподіл виявився особливо корисним для моделювання довготривалих процесів старіння будівельних матеріалів, що мають складну нелінійну природу.

Значна частина сучасних досліджень зосереджена на ймовірнісній оцінці довговічності бетонних і залізобетонних конструкцій як основних елементів архітектурних об'єктів. У працях [2; 4] розглядаються впливи циклічних температурних навантажень, механічних напружень і втомних процесів на строк служби бетонних конструкцій. Автори підкреслюють, що традиційні детерміністичні методи не дозволяють адекватно оцінити ризики відмови, тоді як ймовірнісні моделі забезпечують більш реалістичну оцінку надійності та довговічності з урахуванням випадковості зовнішніх і внутрішніх чинників.

Важливим напрямом сучасних досліджень є застосування методів структурної надійності, які поєднують ймовірнісні моделі матеріалів із математичним описом поведінки конструкцій у часі. Систематичні огляди методів структурної надійності [5] свідчать про ефективність використання ймовірнісних підходів для оцінки ризиків руйнування та оптимізації проєктних рішень. У межах цих підходів особливе місце займають методи моделювання Монте-Карло, які дозволяють відтворювати широкий спектр можливих сценаріїв деградації та отримувати статистичні оцінки строку служби конструкцій [7].

Попри значний обсяг наукових досліджень, більшість робіт зосереджена або на аналізі окремих матеріалів, або на конкретних типах конструкцій, тоді як комплексний підхід до прогнозування довговічності архітектурних об'єктів як цілісних систем залишається недостатньо розвиненим. Крім того, у наявних дослідженнях часто відсутнє порівняльне використання різних ймовірнісних моделей, що ускладнює вибір оптимального інструментарію для практичного застосування.

У зв'язку з цим актуальною є проблема розроблення та узагальнення ймовірнісного підходу до аналізу і прогнозування довговічності архітектурних об'єктів, який би поєднував моделі теорії надійності, аналіз часу до відмови та методи Монте-Карло. Такий підхід дозволяє не лише оцінювати очікуваний строк служби конструкцій, але й кількісно визначати рівень ризику деградації з урахуванням невизначеності матеріальних і експлуатаційних параметрів, що визначає наукову та практичну актуальність даного дослідження [1–7].

Мета і завдання дослідження. Метою даної статті є розроблення та застосування ймовірнісного підходу до аналізу й прогнозування довговічності архітектурних об'єктів з урахуванням невизначеності матеріальних властивостей, експлуатаційних умов і деградаційних процесів. Дослідження спрямоване на використання моделей теорії надійності та аналізу часу до відмови для кількісної оцінки строку служби конструкцій і ймовірності їхнього руйнування на різних етапах експлуатації. Особлива увага приділяється застосуванню розподілів Вейбулла та логнормального розподілу як базових ймовірнісних моделей, що широко використовуються для опису процесів старіння та втомного руйнування будівельних матеріалів і конструкцій [1; 3; 6].

Для досягнення поставленої мети у роботі передбачено розв'язання низки взаємопов'язаних завдань. Зокрема, здійснюється аналіз наукових підходів до ймовірнісного оцінювання довговічності архітектурних і будівельних конструкцій на основі сучасних методів структурної надійності [5]. Окремим завданням є дослідження можливостей застосування розподілу Вейбулла для моделювання процесів деградації матеріалів і визначення впливу його параметрів на прогнозований строк служби конструкцій [1; 6]. Також розглядається використання логнормальних моделей для аналізу даних часу до відмови в умовах накопичувального характеру пошкоджень [3].

У межах дослідження передбачається проведення ймовірнісної оцінки довговічності бетонних та конструкційних елементів архітектурних об'єктів з урахуванням циклічних навантажень і температурних впливів, що суттєво впливають на процеси втомного руйнування [2; 4]. Окрему увагу приділено застосуванню методів моделювання Монте-Карло для оцінки ймовірності відмови та отримання статистичних характеристик строку служби за різних сценаріїв експлуатації [7]. Завершальним завданням є формування узагальненого підходу до прогнозування довговічності архітектурних об'єктів, який може бути використаний як інструмент підтримки прийняття рішень у процесі проєктування, оцінювання надійності та планування експлуатації будівель [5].

Матеріали та методи. Методологія дослідження ґрунтується на застосуванні ймовірнісних моделей теорії надійності для аналізу та прогнозування довговічності архітектурних об'єктів в умовах невизначеності матеріальних властивостей і експлуатаційних впливів. У роботі використано поєднання узагальнених емпіричних результатів попередніх досліджень та синтетичних даних, що дозволяє моделювати процеси деградації конструкцій за контрольованих умов. Параметри моделей формувалися на основі статистичних характеристик, наведених у наукових публікаціях, присвячених довговічності будівельних матеріалів і конструкцій [1; 2; 4].

Синтетичні набори даних генерувалися з метою моделювання часу до відмови архітектурних конструкцій з урахуванням варіабельності фізико-механічних властивостей матеріалів, навантажень і впливу зовнішнього середовища. Такий підхід широко використовується в дослідженнях структурної надійності, оскільки дозволяє врахувати випадковий характер деградаційних процесів і оцінити можливі сценарії розвитку пошкоджень у часі [5]. Моделювання здійснювалося для типових архітектурних конструктивних елементів, зокрема бетонних і залізобетонних компонентів, довговічність яких є критично важливою для безпеки та експлуатаційної надійності будівель [2; 4].

Для аналізу довговічності в роботі застосовувалися моделі аналізу часу до відмови, зокрема розподіл Вейбулла як один із найбільш універсальних інструментів опису процесів руйнування та старіння матеріалів. Параметри розподілу Вейбулла використовувалися для моделювання різних стадій деградації, що дозволяє описувати як початкові дефекти, так і накопичення втомних пошкоджень у процесі експлуатації [1; 6]. Аналіз чутливості параметрів розподілу давав змогу оцінити їхній вплив на прогнозований строк служби та ймовірність відмови конструкцій.

Поряд із розподілом Вейбулла у дослідженні застосовувався логнормальний розподіл, який використовується для опису довготривалих процесів деградації з накопичувальним характером пошкоджень. Логнормальні моделі є особливо доцільними для аналізу даних виживання у випадках, коли час до відмови визначається сумарним впливом багатьох незалежних випадкових чинників [3]. Використання двох типів ймовірнісних розподілів дозволило здійснити порівняльний аналіз їхньої адекватності для прогнозування довговічності архітектурних об'єктів.

Для кількісної оцінки ймовірності відмови та отримання статистичних характеристик строку служби використовувалися методи структурної надійності та чисельне моделювання на основі методу Монте-Карло. Застосування цього методу дозволяє багаторазово відтворювати випадкові реалізації параметрів матеріалів і навантажень, формуючи розподіли часу до руйнування та криві надійності [7]. Такий підхід забезпечує можливість оцінювання не лише середнього очікуваного строку служби, але й ризику передчасної відмови конструкцій.

Запропонований у роботі комплекс методів дозволив поєднати аналітичні ймовірнісні моделі з чисельним моделюванням, що створює надійну основу для прогнозування довговічності архітектурних об'єктів. Отримані результати можуть бути використані для підтримки прийняття рішень у процесі проектування, оцінювання залишкового ресурсу та планування експлуатації будівель з урахуванням рівня ризику деградації [5].

Результати та обговорення. У межах проведеного дослідження ймовірнісні моделі дозволили кількісно оцінити довговічність основних конструктивних матеріалів архітектурних об'єктів та проаналізувати ризики їх деградації в часі. Отримані результати підтверджують доцільність використання розподілів теорії надійності для прогнозування строку служби конструкцій в умовах експлуатаційної невизначеності.

Для аналізу довговічності сталевих конструкцій було застосовано розподіл Вейбулла, який широко використовується для моделювання втомних процесів і часу до відмови. Побудовані криві ймовірності відмови $F(t)$ для різних режимів навантаження наведено на рис. 1

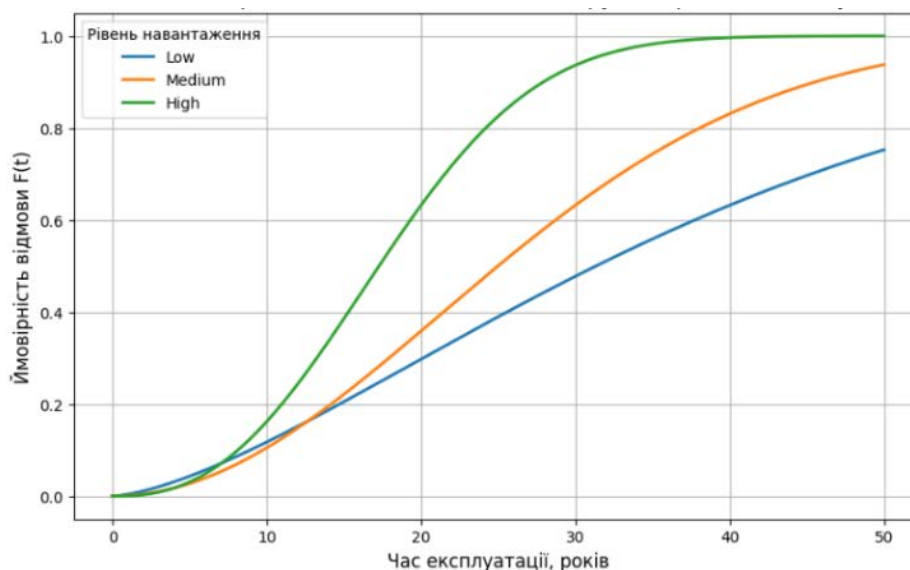


Рис. 1. Ймовірність відмови сталевих конструкцій (розподіл Вейбулла)

Як видно з графіка, за низьких навантажень імовірність відмови зростає поступово, що відповідає повільному накопиченню пошкоджень у матеріалі. Водночас за середніх і високих рівнів навантаження спостерігається значно прискорене зростання ймовірності відмови, що свідчить про інтенсифікацію втомних процесів і зменшення прогнозованого строку служби конструкцій. Така поведінка узгоджується з фізичною природою деградації сталі та підтверджує адекватність використання Вейбуллівських моделей для аналізу довговічності сталевих елементів архітектурних об'єктів.

Додатковий аналіз функції небезпеки $h(t)$, наведений на Рис. 2, показав монотонне зростання ризику відмови зі збільшенням часу експлуатації. Для конструкцій, що працюють за високих навантажень, крива функції небезпеки має значно крутіший характер, що вказує на прискорене досягнення граничних станів. Це дозволяє зробити висновок, що хоча сталь характеризується високою надійністю та передбачуваністю експлуатаційних характеристик, її довговічність суттєво залежить від режимів навантаження, які мають враховуватися при прогнозуванні строку служби архітектурних об'єктів.

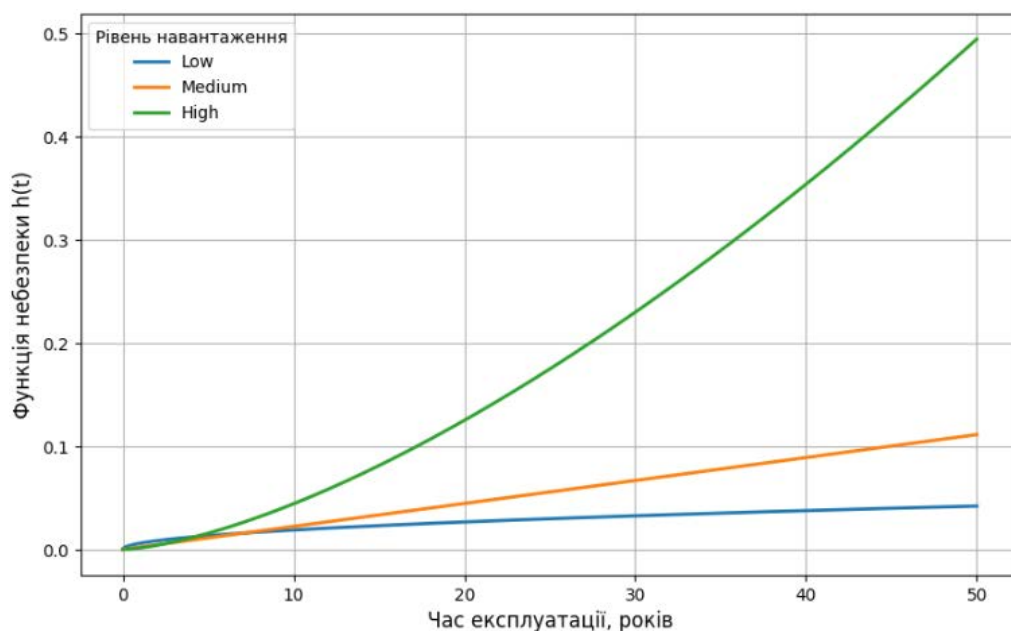


Рис. 2. Функція небезпеки сталевих конструкцій $h(t)$

Для бетонних конструкцій було використано експоненціальну модель часу до відмови, що є доцільною для опису довготривалих деградаційних процесів. Кількісні результати моделювання наведено в Таблиці 1, де подано значення інтенсивності відмов λ та середній час до появи тріщин для різних кліматичних умов.

Табл. 1.

Дані дослідження зносу бетонних конструкцій за різних кліматичних умов

Умови експлуатації	Температура (°C)	Вологість (%)	λ (інтенсивність відмов)	Середній час до тріщиноутворення (роки)
Помірний клімат	+10 ... +25	50 – 70	0.045	22.2
Вологий клімат	+5 ... +20	80 – 90	0.060	16.7
Холодний клімат	-5 ... +15	60 – 80	0.075	13.3

Аналіз таблиці показує, що в помірному кліматі бетонні конструкції демонструють найвищу прогнозовану довговічність, тоді як у холодному кліматі, де мають місце цикли заморожування–відтавання, інтенсивність деградації є максимальною.

Залежність ймовірності відмови бетонних конструкцій від часу може бути описана експоненціальною функцією, наведеною у формулі (1), параметри якої визначаються інтенсивністю відмов

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

де $P(t)$ – ймовірність відмови до моменту часу t ; λ – інтенсивність відмов. Зростання значень λ при переході від помірного до холодного клімату свідчить про істотний вплив зовнішніх середовищних факторів на довговічність бетону.

Для комплексної оцінки довговічності архітектурних об'єктів було проведено порівняльний аналіз сталевих, бетонних і дерев'яних конструкцій на основі змодельованих імовірнісних розподілів строку служби. Отримані результати показали, що сталеві конструкції характеризуються найвищими значеннями індексу надійності та найменшою варіативністю експлуатаційних характеристик, що робить їх найбільш передбачуваними з точки зору довговічності. Бетонні конструкції займають проміжне положення, демонструючи прийнятний строк служби за умови врахування кліматичних впливів. Деревина, навпаки, характеризується високою варіабельністю терміну служби, що обмежує її застосування в архітектурних об'єктах з підвищеними вимогами до довговічності.

Таким чином, результати дослідження демонструють, що ймовірнісні моделі дозволяють не лише прогнозувати очікуваний строк служби архітектурних об'єктів, але й кількісно оцінювати ризики передчасної деградації за різних умов експлуатації. Поєднання моделей Вейбулла, експоненціального розподілу та показників теорії надійності створює ефективний інструментарій для аналізу довговічності та може бути використане при оцінюванні життєвого циклу архітектурних об'єктів.

Висновки. Проведене дослідження продемонструвало ефективність застосування ймовірнісних моделей для аналізу та прогнозування довговічності архітектурних об'єктів в умовах експлуатаційної невизначеності. Отримані результати підтверджують, що використання моделей теорії надійності дозволяє кількісно описувати процеси деградації конструкцій і оцінювати ризики їх відмови протягом життєвого циклу будівель.

Застосування розподілу Вейбулла для аналізу сталевих конструктивних елементів дало змогу адекватно відобразити характер втомного руйнування та встановити залежність імовірності відмови від часу експлуатації й рівня навантаження. Аналіз функцій небезпеки та надійності показав, що сталеві конструкції характеризуються високою передбачуваністю експлуатаційних характеристик, однак потребують ретельного врахування навантажувальних режимів при прогнозуванні строку служби архітектурних об'єктів.

Для бетонних конструкцій експоненціальна модель часу до відмови дозволила виявити істотний вплив кліматичних факторів на швидкість деградації та очікуваний строк експлуатації. Отримані значення інтенсивності відмов підтвердили, що цикли заморожування–відтавання, підвищена вологість і температурні коливання суттєво знижують довговічність бетонних елементів, що має враховуватися при оцінюванні надійності архітектурних об'єктів у різних кліматичних зонах.

Порівняльний аналіз сталевих, бетонних і дерев'яних конструкцій показав, що сталь забезпечує найвищі показники довговічності та стабільності експлуатаційних характеристик, тоді як бетон є доцільним матеріалом для конструкцій середньої відповідальності за умови врахування кліматичних впливів. Деревина, з огляду на високу варіабельність строку служби, може застосовуватися переважно в архітектурних об'єктах з обмеженими навантаженнями та контрольованими умовами експлуатації. Загалом отримані результати підтверджують, що ймовірнісні підходи є ефективним інструментом прогнозування довговічності архітектурних об'єктів і можуть бути використані для підтримки прийняття рішень у процесі проектування, оцінювання залишкового ресурсу та планування експлуатації будівель з урахуванням рівня ризику деградації.

Список літератури

1. Li L., Zhang Y., Wang H., et al. Method based on Weibull distribution for strength and durability analysis of materials // Engineering Fracture Mechanics. 2021. Vol. 256. Art. 107964. DOI: 10.1016/j.engfractmech.2021.107964.

2. Tao C., Liu Y., Chen Z., et al. Reliability of compressive fatigue strength of concrete structures under temperature cycles // *Advances in Civil Engineering*. 2024. Vol. 2024. Art. 8852631. DOI: 10.1155/2024/8852631.
3. Gupta R. C., Akman H. O. Analysis of lognormal survival data // *Mathematical Biosciences*. 1997. Vol. 139, no. 2. P. 103–115. DOI: 10.1016/S0025-5564(96)00133-2.
4. Verma S. K., Bhadauria S. S., Akhtar S. Probabilistic assessment of service life of concrete structures // *Chinese Journal of Engineering*. 2014. Vol. 2014. Art. 648438. DOI: 10.1155/2014/648438.
5. Shittu A. A., Kolawole J. T., Oladimeji O., et al. A systematic review of structural reliability methods // *Metals*. 2020. Vol. 11, no. 1. Art. 50. DOI: 10.3390/met11010050.
6. Fakoor H., Ghasemi M., Gandomkar A. A modification in Weibull parameters to achieve a more accurate fatigue reliability analysis // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13, no. 1. Art. 17537. DOI: 10.1038/s41598-023-44907-9.
7. Tytarenko R. Probabilistic analysis of structural reliability: a review of Monte Carlo based approaches // *Visnyk of Lviv Polytechnic National University*. 2023. Vol. 5, no. 2. P. 48–54. DOI: 10.23939/jtbp2023.02.048.

М.С. Слободян, М.І. Шайнога

Львівський національний університет імені Івана Франка

**РОЗТЯГ ПЛАСТИНИ З ОТВОРОМ ТА РАДІАЛЬНОЮ ТРІЩИНОЮ, НА
ПРОДОВЖЕННІ ЯКОЇ УТВОРИЛИСЯ ПЛАСТИЧНІ ЗОНИ З ВИКОРИСТАННЯМ
УМОВИ ПЛАСТИЧНОСТІ ТРЕСКА-СЕН-ВЕНАНА**

У роботі побудовано розв'язок задачі про розтяг безмежної ізотропної пластини з круговим отвором та радіальною наскрізною прямолінійною тріщиною. При розв'язуванні задачі припускалося, що під дією зовнішнього навантаження на нескінченності на продовженні тріщини утворилися пластичні зони, для моделювання яких використано умови пластичності Треска-Сен-Венана. Розв'язок задачі побудований з використанням методів теорії функцій комплексної змінної та комплексних потенціалів і зведений до системи сингулярних інтегральних рівнянь, яка розв'язана чисельно за допомогою методу механічних квадратур. Проведено числовий аналіз задачі та побудовано графіки для довжин пластичних зон в залежності від прикладеного зовнішнього навантаження.

Ключові слова: пластинка, тріщина, пластичні зони, комплексні потенціали, задача лінійного спряження, сингулярні інтегральні рівняння.

M.S. Slobodian, M.I. Shaynoga

**STRETCHING OF A PLATE WITH A HOLE AND A RADIAL CRACK, THE
CONTINUATION OF WHICH FORMED PLASTIC ZONES USING TRESCA-SAINT-VENANT
PLASTICITY CONDITION**

The work presents a solution to the problem of the stretching of an infinite isotropic plate with a circular hole and a radial through straight crack. It was assumed that under the action of an external load at infinity, on the crack extension the plastic zones are formed, modeled using Tresca-Saint-Venant plasticity conditions. The solution of the problem is built using the method of the theory of functions of a complex variable and complex potentials and is reduced to a system of singular integral equations, which is numerically solved using the method of mechanical quadrature. A numerical analysis of the problem is conducted and graphic dependencies of the length of the plastic zones and applied external loads were constructed.

Key words: plate, crack, plastic zones, complex potentials, linear conjugation problem, singular integral equations.

Постановка проблеми. У багатьох галузях промисловості використовуються пластинчасті елементи конструкцій. У таких елементах можуть міститися отвори, а під час експлуатації виникатимуть тріщини, які різко знижують рівень допустимого навантаження. Під дією зовнішнього навантаження на продовженні тріщин можуть виникати пластичні зони. Тому розробка методів для визначення напружено-деформованого стану пластин з отворами та тріщинами, на продовженні яких утворилися пластичні зони, є актуальною науково-технічною задачею механіки. Одним із основних завдань при оцінці міцності конструктивного елемента з тріщинами є визначення довжин пластичних зон, з допомогою яких характеризуємо напружено-деформований стан в околі вершин тріщин, а також можна визначити критичне навантаження, яке може бути прикладене до пластини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [1] наведено метод визначення розміщення тріщини та розмірів пластичних зон на її продовженні за допомогою використання позаплощинних полів зміщень. У роботі [2] наведено аналітичний розв'язок для визначення розмірів пластичної зони у вершині тріщини в трубі з внутрішніми похилими поверхневими тріщинами, з використанням на критерію текучості Мізеса. У [3] параметри сформульовано задачу для пластичної зони в пружно-пластичному кусково-однорідному тілі, яке зазнає деформації зсуву поблизу вершини міжфазної тріщини, з використанням методу Вінера-Хопфа. У цій праці вважається, що береги тріщини контактують з тертям, а пластична зона моделюється як пряма лінія розриву переміщень. У статті [4] з використанням комплексних потенціалів плоскої задачі та задачі згину розв'язано задачу згину нескінченної кусково-однорідної ізотропної пластини з пружною круговою шайбою та радіальною наскрізною прямою тріщиною, береги якої контактуються. У дослідженні [5] запропоновано аналітичний метод визначення термічних коефіцієнтів інтенсивності напружень для композитної пластини, яка містить круглий отвір та тріщиною, і яка піддається впливу теплового потоку. У ній вперше побудовано аналітичний розв'язок, з використанням методу комплексних змінних та методу інтегрування Шварца. У роботі [6] розглянуто модель тріщини Дагдейла-Баренблатта у нескінченній смугі шляхом, при чому тріщина є перпендикулярною до меж смуги та розташована в її центрі. Розв'язок задачі будується з допомогою на поліномів Чебишева другого порядку. У статті [7] розв'язано задачу про згин смуги, яка містить наскрізну тріщину, береги якої гладко контактують, а на продовженні тріщини утворилися пластичні зони. У [8] розв'язана задача згину з розтягом ізотропної пластини, яка містить наскрізну тріщину, за наявності пластичних зон у її вершинах. Причому у цій праці враховано зміцнення матеріалу і виконуються умови пластичності

© М.С. Слободян, М.І. Шайнога

Треска у вигляді поверхневого шару та пластичного шарніру. У статті [9] розв'язана задача чистого згину балки з тріщиною, перпендикулярною до її осі, на продовженні якої утворилися пластичні зони. Використовуючи методи теорії функцій комплексної змінної та комплексних потенціалів, задача зводиться до задач лінійного спряження, які розв'язано аналітично.

На основі наведеного вище можемо зробити висновок, що задачі розтягу пластин з отвором та тріщинами, на продовженні яких утворилися пластичні зони, є актуальними. У роботі сформульована модель тріщини, на продовженні якої утворилися пластичні зони, за розтягу пластини зусиллями на безмежності. Ця модель дає змогу з більшою точністю оцінити вплив тріщини на напружено-деформований стан пластини та на її міцність.

Метою статті є визначення напружено-деформованого стану за розтягу безмежної пластини з круговим отвором та тріщиною, на продовженні якої утворилися пластичні зони, з використанням умови пластичності Треска-Сен-Венана.

Виклад основного матеріалу.

Формулювання задачі.

Розглянемо нескінченну ізотропну пластину завтовшки $2h$, яка містить круговий отвір радіуса R і наскрізну прямолінійну радіальну тріщину завдовжки $2l$. Межа кругового отвору та береги тріщини вільні від зовнішнього навантаження. Припустимо, що за дії рівномірно розподіленого розтягуючого навантаження на безмежності P_1 і P_2 (див. рис. 1) на продовженні тріщини утворилися прямолінійні пластичні зони завдовжки w_1 і w_2 . Розмістимо декартову систему координат $Ox_1y_1z_1$ у серединній площині пластини з початком у центрі кругового отвору, при чому вісь Ox_1 направимо по тріщині, а вісь Oz_1 – перпендикулярно до серединної площини пластини. Теж виберемо полярну систему координат $Or\theta$ з центром у точці O та полярною віссю Ox_1 . У центрі тріщини розмістимо декартову систему координат $O_1x_1y_1z_1$. Через L позначимо межу кругового отвору; лінію, де розміщена тріщина позначимо L_1 , прямолінійні пластичні зони – L'_1 і L''_1 , відстань між центром отвору та центром тріщини – x_0 ; область всередині кругового отвору – S^+ , а ззовні – S^- ; довжини пластичних зон – w_1 і w_2 ; вершини тріщини – a і b ; вершини пластичних зон – c і d ; $\tilde{L}_1 = L_1 \cup L'_1 \cup L''_1$.

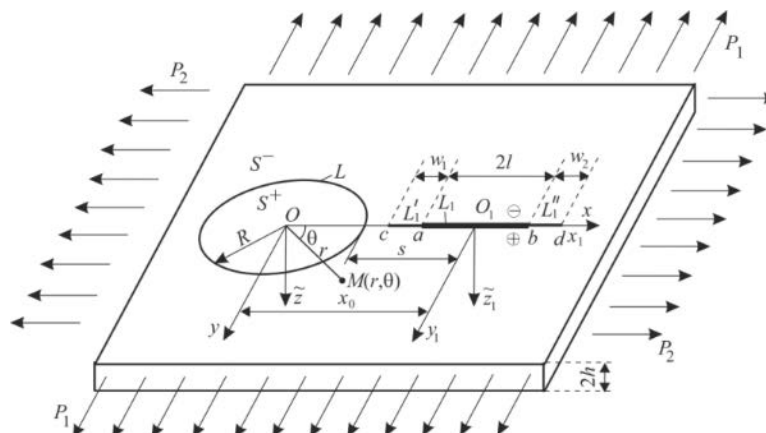


Рис. 1. Схема навантаження пластини та розміщення тріщини

На межі кругового отвору будемо мати такі крайові умови

$$\sigma_{rr} = 0, \tau_{r\theta} = 0, x \in L, \quad (1)$$

де σ_{rr} і $\tau_{r\theta}$ – компоненти тензора напружень у полярній системі координат.

На берегах тріщини будемо мати

$$\sigma_{y_1y_1}^{\pm} = 0, \tau_{x_1y_1}^{\pm} = 0, x_1 \in L_1, \quad (2)$$

де $\sigma_{y_1y_1}$ і $\tau_{x_1y_1}$ – компоненти тензора напружень у декартовій системі координат, значками “+” і “-” позначені граничні значення функцій при прямуванні точки площини до тріщини з пластичними зонами при $y_1 \rightarrow \pm 0$.

У пластичних зонах будемо мати такі крайові умови

$$\sigma_{y_1y_1}^{\pm} = \sigma_0^{(1)}, \tau_{x_1y_1}^{\pm} = \tau_0^{(1)}, x_1 \in L'_1, \quad (3)$$

$$\sigma_{y_1y_1}^{\pm} = \sigma_0^{(2)}, \tau_{x_1y_1}^{\pm} = -\tau_0^{(2)}, x_1 \in L''_1, \quad (4)$$

де $\sigma_0^{(1)}$, $\sigma_0^{(2)}$, $\tau_0^{(1)}$, $\tau_0^{(2)}$ – невідомі нормальні та дотичні напруження у пластичних зонах.

Побудова розв'язку задачі.

За узагальненого плоского напруженого стану компоненти тензора напружень $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \tau_{xy}$ і вектора переміщень u_x, u_y у декартовій системі координат або тензора напружень $\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}, \tau_{r\theta}$ і вектора переміщень u_r, u_θ у полярній системі координат виражають через дві функції комплексної змінної $\Phi(z)$ і $\Psi(z)$ [10]

$$\Phi(z) = \Phi_K(z) + \Phi_1(z_1), \Psi(z) = \Psi_K(z) + \Psi_1(z_1) - x_0 \Phi_1'(z_1), \quad (5)$$

де функції $\Phi_K(z)$ і $\Psi_K(z)$ голоморфні в області S^- , а функції $\Phi_1(z)$ і $\Psi_1(z)$ голоморфні ззовні тріщини з пластичними зонами; $z = x + iy, i^2 = -1$.

Введемо функції

$$\begin{aligned} \Omega_1(z_1) &= \bar{\Phi}_1(z_1) + z_1 \bar{\Phi}_1'(z_1) + \bar{\Psi}_1(z_1), \\ \Phi_K(z) &= -\bar{\Phi}_K\left(\frac{R^2}{z}\right) + \frac{R^2}{z} \bar{\Phi}_K'\left(\frac{R^2}{z}\right) + \frac{R^2}{z^2} \bar{\Psi}_K\left(\frac{R^2}{z}\right), z \in S^+, \end{aligned} \quad (6)$$

де $\bar{\Phi}_1(z_1) = \overline{\Phi_1(\bar{z}_1)}$.

Зауважимо, що

$$\Phi_K(z) = \frac{(P_2 - P_1)R^2}{2z^2} + O(1), z \rightarrow 0.$$

З урахуванням (5) та (6), напружено-деформований стан пластини з отвором та тріщиною визначимо з формул [10]

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} + i\tau_{r\theta} &= \Phi_K(z) - \frac{R^2}{r^2} \Phi_K\left(\frac{R^2}{z}\right) + \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) \{\overline{\Phi_K(z)} - \bar{z} \overline{\Phi_K'(z)}\} + \\ &+ \left\{ \Phi_1(z_1) + \left(1 + \frac{\bar{z}}{z}\right) \overline{\Phi_1(z_1)} - \frac{\bar{z}}{z} (\Omega_1(\bar{z}_1) + (z_1 - \bar{z}_1) \overline{\Phi_1'(z_1)}) \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} 2\mu \frac{\partial}{\partial \theta} (u_r + iu_\theta) &= \kappa \Phi_K(z) + \frac{R^2}{r^2} \Phi_K\left(\frac{R^2}{z}\right) - \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) \{\overline{\Phi_K(z)} - \bar{z} \overline{\Phi_K'(z)}\} + \\ &+ \left\{ \kappa \Phi_1(z_1) - \left(1 + \frac{\bar{z}}{z}\right) \overline{\Phi_1(z_1)} + \frac{\bar{z}}{z} (\Omega_1(\bar{z}_1) + (z_1 - \bar{z}_1) \overline{\Phi_1'(z_1)}) \right\}, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{yy} - i\tau_{xy} &= \Phi_1(z_1) + \Omega_1(\bar{z}_1) + (z_1 - \bar{z}_1) \overline{\Phi_1'(z_1)} + \Phi_K(z) + \left(1 + \frac{R^2}{z^2}\right) \overline{\Phi_K(z)} + \\ &+ z \overline{\Phi_K'(z)} + \frac{R^2}{z^2} \left\{ \Phi_K\left(\frac{R^2}{z}\right) - \bar{z} \overline{\Phi_K'(z)} \right\}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} 2\mu \frac{\partial}{\partial x_1} (u_x + iu_y) &= \kappa \Phi_1(z_1) - \Omega_1(\bar{z}_1) - (z_1 - \bar{z}_1) \overline{\Phi_1'(z_1)} + \kappa \Phi_K(z) - \\ &- \left(1 + \frac{R^2}{z^2}\right) \overline{\Phi_K(z)} - z \overline{\Phi_K'(z)} - \frac{R^2}{z^2} \left\{ \Phi_K\left(\frac{R^2}{z}\right) - \bar{z} \overline{\Phi_K'(z)} \right\}, \end{aligned} \quad (10)$$

де $\mu = E/(2(1 + \nu))$ – модуль зсуву матеріалу пластини, $\kappa = (3 - \nu)/(1 + \nu)$, E – модуль пружності матеріалу пластини, ν – коефіцієнт Пуассона.

З (9) та крайових умов (2)-(4) маємо таку задачу лінійного спряження

$$(\Phi_1(t) - \Omega_1(t))^+ - (\Phi_1(t) - \Omega_1(t))^- = 0, t \in \tilde{L}_1, \quad (11)$$

розв'язавши яку, отримаємо

$$\Omega_1(z) = \Phi_1(z).$$

Додамо (9) та (10)

$$\sigma_{yy} - i\tau_{xy} + 2\mu \frac{\partial}{\partial x_1} (u_x + iu_y) = (1 + \kappa) \{\Phi_1(z_1) + \Phi_K(z)\}.$$

Врахувавши крайові умови (2)-(4), з попередньої формули отримаємо

$$(1 + \kappa) \{\Phi_1^+(t) - \Phi_1^-(t)\} = 2\mu \left[\frac{\partial}{\partial x_1} (u_x + iu_y) \right], t \in \tilde{L}_1, \quad (12)$$

де $[f] = f^+ - f^-$.

Введемо позначення

$$g_1'(t) = \frac{2\mu}{(1 + \kappa)i} \left[\frac{\partial}{\partial x_1} (u_x + iu_y) \right], t \in \tilde{L}_1.$$

Тоді з (12) маємо таку задачу лінійного спряження

$$\Phi_1^+(t) - \Phi_1^-(t) = i g_1'(t),$$

розв'язок якої буде мати вигляд

$$\Phi_1(z_1) = \frac{1}{2\pi} \int_c^d \frac{g_1'(t) dt}{t - z_1}. \quad (13)$$

З (7) та крайових умов (1) отримаємо

$$\begin{aligned} & \Phi_K^-(t) - \Phi_K^+(t) + \Phi_1(t - x_0) + \left(1 + \frac{R^2}{t^2}\right) \bar{\Phi}_1\left(\frac{R^2}{t} - x_0\right) - \\ & - \frac{R^2}{t^2} \left\{ \Omega_1\left(\frac{R^2}{t} - x_0\right) + \left(t - \frac{R^2}{t}\right) \bar{\Phi}_1'\left(\frac{R^2}{t} - x_0\right) \right\} = 0, t \in L. \end{aligned} \quad (14)$$

Введемо функцію

$$F(z) = \begin{cases} \Phi_K(z) - \Phi_1(z - x_0), z \in S^+, \\ \Phi_K(z) + \left(1 + \frac{R^2}{z^2}\right) \bar{\Phi}_1\left(\frac{R^2}{z} - x_0\right) - \frac{R^2}{z^2} \left\{ \Omega_1\left(\frac{R^2}{z} - x_0\right) + \left(z - \frac{R^2}{z}\right) \bar{\Phi}_1'\left(\frac{R^2}{z} - x_0\right) \right\}, \\ z \in S^-. \end{cases} \quad (15)$$

Якщо підставити (15) у (14), тоді отримаємо задачу лінійного спряження

$$F^+(t) - F^-(t) = 0, t \in L,$$

розв'язок якої буде мати вигляд

$$F(z) = \frac{(P_2 - P_1)R^2}{2z^2} + \frac{P_1 + P_2}{4} + \frac{1}{2\pi} \int_c^d \frac{\bar{g}_1'(t) dt}{t + x_0}. \quad (16)$$

Оскільки функція $F(z)$ відома, тоді з (15) отримаємо

$$\Phi_K(z) = \begin{cases} F(z) + \Phi_1(z - x_0), z \in S^+, \\ F(z) - \left(1 + \frac{R^2}{z^2}\right) \bar{\Phi}_1\left(\frac{R^2}{z} - x_0\right) + \frac{R^2}{z^2} \left\{ \Omega_1\left(\frac{R^2}{z} - x_0\right) + \left(z - \frac{R^2}{z}\right) \bar{\Phi}_1'\left(\frac{R^2}{z} - x_0\right) \right\}, \\ z \in S^-. \end{cases} \quad (17)$$

З (9) та крайових умов (2)-(4), врахувавши (1), будемо мати

$$\begin{aligned} & \Phi_1^+(x_1) + \Phi_1^-(x_1) + \Phi_K(x_1 + x_0) + \left(1 + \frac{R^2}{(x_1 + x_0)^2}\right) \overline{\Phi_K(x_1 + x_0)} + \\ & + \left(x_1 + x_0 - \frac{R^2}{x_1 + x_0}\right) \overline{\Phi_K'(x_1 + x_0)} + \frac{R^2}{(x_1 + x_0)^2} \Phi_K\left(\frac{R^2}{x_1 + x_0}\right) = \\ & = \begin{cases} 0, x_1 \in [a, b], \\ \sigma_0^{(1)} + i\tau_0^{(1)}, x_1 \in [c, a], \\ \sigma_0^{(2)} - i\tau_0^{(2)}, x_1 \in [b, d]. \end{cases} \end{aligned} \quad (18)$$

Підставивши (13), (16), (17) у (18) у безрозмірних змінних отримаємо сингулярне інтегральне рівняння для визначення невідомої функції $g_1'(t)$, яке буде мати вигляд

$$\int_{-1}^1 \{R(\eta, \xi)G(\eta) + S(\eta, \xi)\overline{G(\eta)}\}d\eta = H(\xi), \xi \in [-1, 1], \quad (19)$$

де

$$H(\xi) = p_2 - \frac{p_1 - p_2}{2X^4} + \begin{cases} 0, \xi \in (-1 + 2w_1^*/(2+w_1^* + w_2^*), 1 - 2w_2^*/(2+w_1^* + w_2^*)), \\ (\sigma_0^{(1)} + i\tau_0^{(1)})/\sigma_Y, \xi \in [-1, -1 + 2w_1^*/(2+w_1^* + w_2^*)], \\ (\sigma_0^{(2)} - i\tau_0^{(2)})/\sigma_Y, \xi \in [1 - 2w_2^*/(2+w_1^* + w_2^*), 1], \end{cases}$$

$$R(\eta, \xi) = \frac{1}{\pi(\eta - \xi)} +$$

$$+ \frac{\lambda}{2} \left\{ \frac{1}{X(TX - 1)} - \frac{T^2 - 1}{T(TX - 1)^2} + \frac{(T^2 - 1)(2TX^3 - 3TX + 1) + TX(TX - 1)^2}{TX^2(TX - 1)^3} \right\},$$

$$S(\eta, \xi) = \frac{\lambda}{2} \left\{ \frac{1}{X(TX - 1)} - \frac{T^2 - 1}{T(TX - 1)^2} + \frac{1}{TX^2} + \frac{3TX - X^2(2TX - 1) - 2}{X^3(TX - 1)^2} \right\},$$

$$\begin{aligned} X &= 1 + \varepsilon + 0.5\lambda\{w_2^* - w_1^* + (2 + w_1^* + w_2^*)\xi\}, \\ T &= 1 + \varepsilon + 0.5\lambda\{w_2^* - w_1^* + (2 + w_1^* + w_2^*)\eta\}, \end{aligned}$$

$$\varepsilon = \frac{s}{R}, \lambda = \frac{l}{R}, w_1^* = \frac{w_1}{l}, w_2^* = \frac{w_2}{l}, p_1 = \frac{P_1}{\sigma_Y}, p_2 = \frac{P_2}{\sigma_Y}, G(\eta) = G_1(\eta) + iG_2(\eta) = \frac{hg_1'(t)}{\sigma_Y},$$

де $G_1(\eta)$, $G_2(\eta)$ – дійсні невідомі функції, σ_Y – межа текучості матеріалу пластини.

З умови однозначності переміщень при обході контуру тріщини з пластичними зонами отримаємо

$$\int_{-1}^1 \{G_1(\eta) + iG_2(\eta)\}d\eta = 0. \quad (20)$$

Коефіцієнти інтенсивності зусиль (КІЗ) $k = k_1 + ik_2$ визначимо за формулами [11]

$$k^{c,d} = \mp h \lim_{x_1 \rightarrow c,d} \left(g_1'(x_1) \sqrt{(c + x_1)(d - x_1)/l} \right).$$

Оскільки у вершинах пластичних зон c, d КІЗ рівні нулеві, тоді

$$k^c = 0, k^d = 0. \quad (21)$$

Для пластичних зон L'_1 і L''_1 запишемо умови пластичності Треска-Сен-Венана [11]

$$\max\{|\sigma_1^{(j)}|, |\sigma_2^{(j)}|, |\sigma_1^{(j)} - \sigma_2^{(j)}|\} = \sigma_Y, \quad (22)$$

де

$$\sigma_{1,2}^{(j)} = 0.5 \left(\sigma_{xx}^{(j)} + \sigma_0^{(j)} \pm \sqrt{(\sigma_{xx}^{(j)} - \sigma_0^{(j)})^2 + 4(\tau_0^{(j)})^2} \right), j = 1, 2.$$

Отже, для знаходження невідомих функцій $G_1(\eta)$, $G_2(\eta)$, невідомих нормальних і дотичних напруження у пластичних зонах $\sigma_0^{(1)}$, $\sigma_0^{(2)}$, $\tau_0^{(1)}$, $\tau_0^{(2)}$ та довжин пластичних зон w_1^* , w_2^* , отримано систему рівнянь (19)-(22).

Числовий аналіз.

Був проведений числовий аналіз задачі, який поданий на Рис. 2-3 при $\nu = 0.3$. Система сингулярних інтегральних рівнянь (19), (20) розв'язувалася числовим методом механічних квадратур, а система рівнянь (21), (22) розв'язувалася числовим методом Ньютона.

На Рис. 2 зображено залежність безрозмірених довжин пластичних зон w_1^* , w_2^* від параметра $\varepsilon = \frac{s}{R}$ при фіксованому значенні $\lambda = \frac{l}{R} = 0.5$, $p_2 = 0$. Графік 1 (для w_1^*), 2 (для w_2^*) побудовано при $p_1 = 0.6$, графік 3 (для w_1^*), 4 (для w_2^*) – $p_1 = 0.5$, графік 5 (для w_1^*), 6 (для w_2^*) – $p_1 = 0.4$.

На Рис. 3 зображено залежність безрозмірених довжин пластичних зон w_1^* , w_2^* від параметра $\varepsilon = \frac{s}{R}$ при фіксованому значенні $\lambda = \frac{l}{R} = 0.3$, $p_2 = 0$. Графік 1 (для w_1^*), 2 (для w_2^*) побудовано при $p_1 = 0.6$, графік 3 (для w_1^*), 4 (для w_2^*) – $p_1 = 0.5$, графік 5 (для w_1^*), 6 (для w_2^*) – $p_1 = 0.4$.

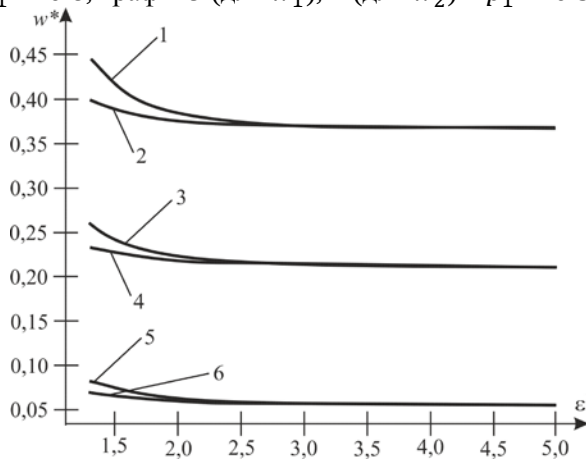


Рис. 2.

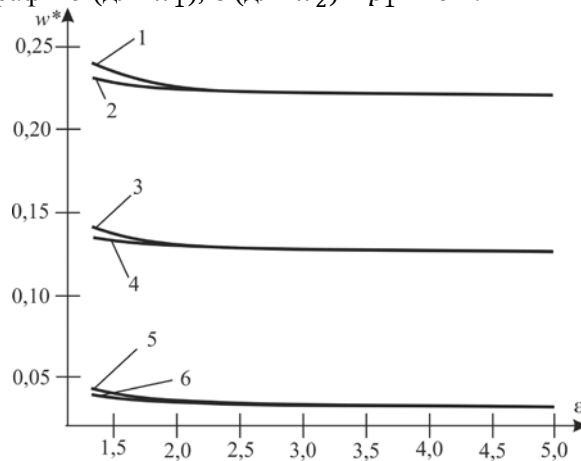


Рис. 3.

Висновки.

З використанням методів теорії функцій комплексної змінної та комплексних потенціалів розв'язано задачу про розтяг безмежної ізотропної пластини з круговим отвором та радіальною наскрізною прямолінійною тріщиною на продовженні тріщини утворилися пластичні зони. Утворені пластичні зони моделювалися умови пластичності Треска-Сен-Венана. Розв'язок задачі зведений до системи сингулярних інтегральних рівнянь, яка розв'язана чисельно за допомогою методу механічних квадратур. На сонові числового аналізу задачі побудовано графіки для довжин пластичних зон в залежності від прикладеного зовнішнього навантаження.

Список використаних джерел

1. X. Zhao, J. Li, J.-M. Ge, T. Sun, H. Deng, J.-G. Zhu, "Determination of fatigue crack tip location and plastic zone dimensions using displacement fields measured by digital image correlation method", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 320, 111060, 2025, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2025.111060>.
2. Q. Pei, X.-M. Yao, L.-Z. Jin, C.-Y. Zhou, "Constraint effect and crack-tip plastic zone of the pipe with internal inclined surface cracks under external pressure", *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 147 (2), 021306, 2025, <https://doi.org/10.1115/1.4067676>.
3. A.O. Kaminsky, M.V. Dudyk, "Development of plastic zone near tip of interfacial crack with contacting faces", *International Applied Mechanics*, Vol. 60 (2), pp. 149–162, 2024, <https://doi.org/10.1007/s10778-024-01269-7>.

4. **M. Slobodian**, I. Zvizlo, O. Bilash, M. Sorokaty, O. Petruchenko, L. Markevych, “Bending of a piecewise homogeneous plate with a circular interfacial materials separation zone and radial crack considering the strip contact of its edges”, *Vibroengineering Procedia*, Vol. 55, pp. 54–59, 2024, <https://doi.org/10.21595/vp.2024.24515>.
5. S.H. Moussavian, M. Jafari, M. Hajimohammadi. “Thermal stress intensity factors in composite plates with cracks arising from a circular hole”, *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 47 (12), pp. 1634–1651, 2024, <https://doi.org/10.1080/01495739.2024.2428922>.
6. I. Slamani, H. Ferdjani, “Solution of a Dugdale-Barenblatt crack in an infinite strip by a hyper-singular integral equation”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 133, 104625, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2024.104625>.
7. O. Bilash, **M. Slobodian**, R. Seliverstov, I. Zvizlo, O. Petruchenko, R. Kovalchuk, “Pure bending of a strip (Beam) with a transversal through crack located asymmetrically relative to its axis on the assumption of crack closure and striplike plastic zone near one of the tips”, *AIP Conference Proceedings*, 2949, 020002, 2023, <https://doi.org/10.1063/5.0165477>.
8. V.K. Opanasovych, M.M. Nykolyshyn, **M.S. Slobodian**, S.O. Alfavitska, O.K. Bilash, “Combined action of bending and tension of an isotropic plate with through crack in the absence of contact between the faces and with regard for the plastic zones and hardening of material at the tips”. *Journal of Mathematical Sciences (United States)*, Vol. 254 (1), pp. 117–128, 2021, <https://doi.org/10.1007/s10958-021-05292-8>.
9. H. Sulym, V. Opanasovych, **M. Slobodian**, O. Bilash, “Pure bending of strip (beam) with crack in strip of tensile stress with allowance for plastic strips near crack tips”, *Acta Mechanica et Automatica*, Vol. 14, No. 1, pp. 44-49, 2020, <https://doi.org/10.2478/ama-2020-0007>.
10. “Контактна механіка. Шорсткість, розшарування і зношування поверхонь: колективна монографія”, М.М. Кундрат, Н.А. Гук, Н.Л. Козакова та інші; за заг. ред. Р.М. Мартиняка, Львів: Видавець Вікторія Кундельська, 392 р., 2022.
11. Р.М. Кушнір, М.М. Николишин, В.А. Осадчук, “Пружний та пружно-пластичний граничний стан оболонок з дефектами”, СПОЛІОМ, 2003.

Рецензент: Станкевич Володимир Зенонович, доктор фізико-математичних наук, професор, в.о. завідувача кафедри механіки Львівського національного університету імені Івана Франка.

Л.О. Сапронова, В.В. Торопенко

Херсонська державна морська академія

**ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ МЕТОДОМ
ОПТИЧНОЇ МІКРОСКОПІЇ ТА ІЧ-СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ**

Для формування полімерних матеріалів використано епоксидний діановий олігомер ЕД-20, полімеризацію якого виконували за допомогою аміного твердника поліетиленполіаміну ПЕПА. Підвищення властивостей епоксидних композитів досягали шляхом використання суміші дискретних волокон на основі поліестеру, візкози, еластану, вміст яких змінювали у межах $q = 0,25 \dots 2,00$ мас.%. У роботі досліджували характер руйнування поверхні епоксидних композитів методом оптичної мікроскопії, що дозволив визначити особливості взаємодії інгредієнтів і стійкість розроблених матеріалів до впливу навантажень ударного характеру. Додатково досліджували міжфазову взаємодію інгредієнтів композиту з використанням методу ІЧ-спектрального аналізу. Встановлено зміну параметрів інтенсивності (T , %), відносної площі піку (S , %), а також незначні зміщення хвильових чисел ($\Delta\nu$, см^{-1}), що відповідає коливанням груп: -NH- , O-H ($\nu = 3408 \text{ см}^{-1}$), C-H , ($\nu = 2922 \dots 2848 \text{ см}^{-1}$), C=O ($\nu = 2019 \text{ см}^{-1}$), поліестерної складової ($\nu = 1700 \text{ см}^{-1}$), C-O-C ($\nu = 1112 \dots 914 \text{ см}^{-1}$) та вказує на структурні перетворення при полімеризації інгредієнтів композиту.

Ключові слова: епоксидний олігомер ЕД-20, твердник ПЕПА, суміш дискретних волокон, оптична мікроскопія, ІЧ-спектральний аналіз.

L.O. Sapronova, V.V. Toropenko

**RESEARCH OF THE STRUCTURE OF EPOXY COMPOSITES BY OPTICAL
MICROSCOPY AND IR-SPECTRAL ANALYSIS**

For the formation of polymer materials, the epoxy dian oligomer ED-20 was used, and its polymerization was performed using the amine hardener polyethylenepolyamine PEPA. The properties of epoxy composites were improved by using a mixture of discrete fibers based on polyester, viscose, and elastane, the content of which was varied within $q = 0.25 \dots 2.00$ wt.%. In this work, the nature of surface destruction in epoxy composites was investigated using optical microscopy, which enabled us to determine the interaction features between ingredients and the resistance of the developed materials to shock loads. Additionally, the interfacial interaction of the composite ingredients was investigated using the IR spectral analysis method. A change in the intensity parameters (T , %), relative peak area (S , %), as well as insignificant shifts in wave numbers ($\Delta\nu$, cm^{-1}) was established, which corresponds to vibrations of the groups: -NH- , O-H ($\nu = 3408 \text{ cm}^{-1}$), C-H , ($\nu = 2922 \dots 2848 \text{ cm}^{-1}$), C=O ($\nu = 2019 \text{ cm}^{-1}$), polyester component ($\nu = 1700 \text{ cm}^{-1}$), C-O-C ($\nu = 1112 \dots 914 \text{ cm}^{-1}$) and indicates structural transformations during polymerization of the composite ingredients.

Keywords: epoxy oligomer ED-20, hardener PEPA, mixture of discrete fibers, optical microscopy, IR spectral analysis

Problem statement. Today, there is an urgent need to improve the performance characteristics of composite materials (CM), which is due to a set of industry requirements (reliability, product weight, manufacturing processability, durability, and a set of improved characteristics). That is why the study of new approaches to modifying polymer materials and improving the interfacial interaction of ingredients is a priority direction in performing materials science research. It should be noted that the introduction of active fibrous fillers into the polymer binder affects the course of physicochemical processes during crosslinking of epoxy composites [1]. In this case, the choice of fillers should take into account their chemical activity, i.e., the presence of active groups on the surface and in the structure capable of interacting with the epoxy and amine groups of the binder. Such an approach enables you to influence the kinetics of physicochemical processes in the polymerization of epoxy composites, the deformation mobility of the main chain and its segments, their ordering, and the formation of additional intermolecular bonds. At the same time, standardized methods for studying the properties of polymers do not always allow us to determine the regularities of structural transformations in polymers. Therefore, the use of precision methods for analyzing the structure, in particular optical microscopy and IR spectroscopy [2-4], is relevant. Such research methods aim to determine both the morphological features of polymer composites and the degree of their crosslinking, which enables us to influence the properties of these materials.

Analysis of recent studies and publications. The analysis of the authors' work [5] allows us to state that filling the epoxy matrix with discrete carbon fibers contributes to the reduction of thermal stresses in composites during operation at elevated temperatures. Such an effect is associated with the difference in the thermal coefficient of linear expansion between individual reinforcing components, which reduces the risk of local stress concentration zones in the matrix. The analysis of the authors' work [6] enables us to conclude that nitron fibers are effectively used for reinforcing the polymer matrix. Based on IR spectral analysis and optical microscopy, the authors proved the interfacial interaction of the ingredients. Such an effect is due to the absence of an absorption band in the filled polymer, which is responsible for the hydroxyl (-OH) groups at a vibration frequency of $\nu = 3450 \text{ cm}^{-1}$. This indicates the intermolecular interaction of the ingredients

© Л.О.Сапронова, В.В.Торопенко

used, and therefore, high mechanical characteristics. Thus, based on the analysis of scientific works [6-10], it can be stated that the combination of modern methods for studying the structure of epoxy composites filled with fibrous additives allows us to localize areas of weakened adhesion and fiber aggregation, and prevent similar anomalous morphological and chemical changes in the polymer volume.

The purpose of the work is to study the inter-vessel interaction of ingredients during the structure formation of epoxy composites.

Materials and research methods. As the main component for the formation of epoxy composites, epoxy resin of the ED-20 brand (ISO 18280:2010) was used.

For the polymerization of epoxy composites, the hardener polyethylene polyamine PEPA (TU 6-05-241-202-78) was used, which is characterized by the presence of amine groups as reaction centers, allowing for curing of polymers at room temperature.

As a filler, a mixture of discrete fibers (MDFOOPVE) of organic origin based on polyester (75%), viscose (23%), elastane (2%) with the following parameters was used: $l = 15...30 \mu\text{m}$, $d = 15...20 \mu\text{m}$.

Epoxy composites were formed according to the technology described in the work [7].

The study of the composite structure was conducted using a microscope model XJL-17AT. For digital image processing, the software "Levenhuk Toup View" was used.

To study chemical bonds and their changes in the epoxy composite, IR spectral analysis was used [2, 4]. IR spectra were recorded on a spectrophotometer of the brand "IRAffinity-1" (Japan) in the wavenumber range $\nu = 400...4000 \text{ cm}^{-1}$ by the single-beam method in reflected light.

Discussion of the results. Based on the previous results of the study [7] of the influence of a mixture of discrete fibers (MDFOOPVE) on the properties of epoxy composites, an increase in their characteristics was established at the additive content $q = 0.50...0.75 \text{ wt.}\%$ (compared to an unfilled epoxy matrix). In particular, an increase in the value of the destructive stresses during bending from $\sigma_b = 48.0 \text{ MPa}$ to $\sigma_b = 74.0...90 \text{ MPa}$, the modulus of elasticity during bending from $E = 2.7 \text{ GPa}$ to $E = 3.1...3.4 \text{ GPa}$, and the impact strength from $W = 7.0 \text{ kJ/m}^2$ to $W = 10.0...12.8 \text{ kJ/m}^2$ was observed. A similar effect of the mixture of discrete fibers was also found in the study of thermophysical properties, in particular, an increase in the Martens heat resistance from $T = 341 \text{ K}$ to $T = 343-344 \text{ K}$ and a decrease in the thermal coefficient of linear expansion (TCLE), respectively, were observed. To analyze morphological changes in the material structure, a microscope model XJL-17AT with the software "Levenhuk Toup View" was used. The nature of the fracture in epoxy composites, as determined by TCLR and impact toughness studies, was investigated. Thus, the method of optical microscopy established the localized distribution of microcracks within the polymer volume (Fig. 1a). The nature of the fracture of the epoxy composite filled with $q = 0.25 \text{ wt.}\%$ of MDFOOPVE indicates moderate adhesion between the fibrous filler and the polymer matrix.

In contrast, the formation of microcracks in the direction of the applied load was observed. Based on the obtained fracture images, the polymer's structure is relatively plastic, characteristic of a low level of reinforcement. When introducing MDFOOPVE at a content of $q = 0.50 \text{ wt.}\%$ into the epoxy oligomer ED-20, a combined fracture mechanism was observed (Fig. 1b). That is, signs of quasi-brittle behavior with the formation of large fragments and plastic crushing of the polymer matrix are simultaneously detected. In this case, the surface of the composite material exhibits pronounced wavy shear zones, which alter the trajectory of crack propagation and are accompanied by the dissipation of impact energy within the polymer volume. This indicates increased interphase interaction, which provides high-strength indicators. A somewhat different nature of fracture was observed when $q = 0.75 \text{ wt.}\%$ of MDFOOPVE was introduced. The polymer surface is characterized by a pronounced quasi-brittle nature of fracture (Fig. 1c), where the propagation of the crack network occurs through cells of increased rigidity. An increase in the MDFOOPVE content ($q = 1.00...2.00 \text{ wt.}\%$) ensures the formation of a defective polymer structure. For example, a KM filled with $q = 1.00 \text{ wt.}\%$ MDFOOPVE is characterized by the most brittle type of fracture, where large fragments and a significant number of cracks with slight air inclusions prevail (Fig. 1d). Such morphological defects indicate oversaturation of the matrix with fibers, which changes the mechanics of load transfer. Analysis of the fracture surface of CM filled with $q = 2.00 \text{ wt.}\%$ of MDFOOPVE enabled us to identify brittle fracture centers characterized by the formation of a significant number of microcracks and stress concentrators, as indicated by traces of air inclusions (Fig. 1e). This nature of the fracture of the polymer surface indicates an excess content of fibers, which reduces the efficiency of their interaction with the matrix and contributes to the rapid propagation of cracks.

Additionally, the chemical interaction of the CM ingredients was determined by IR spectral analysis (Fig. 2). The absorption bands of composites filled with $q = 0.25-0.50 \text{ wt.}\%$ of MDFOOPVE were analyzed

in the wave number range $\nu = 400 \dots 4000 \text{ cm}^{-1}$ (Table 1). The IR-spectral analysis method established the presence of a broad spectrum of absorption bands that characterize the valence, pendulum, and deformation vibrations of the side groups and segments of CM.

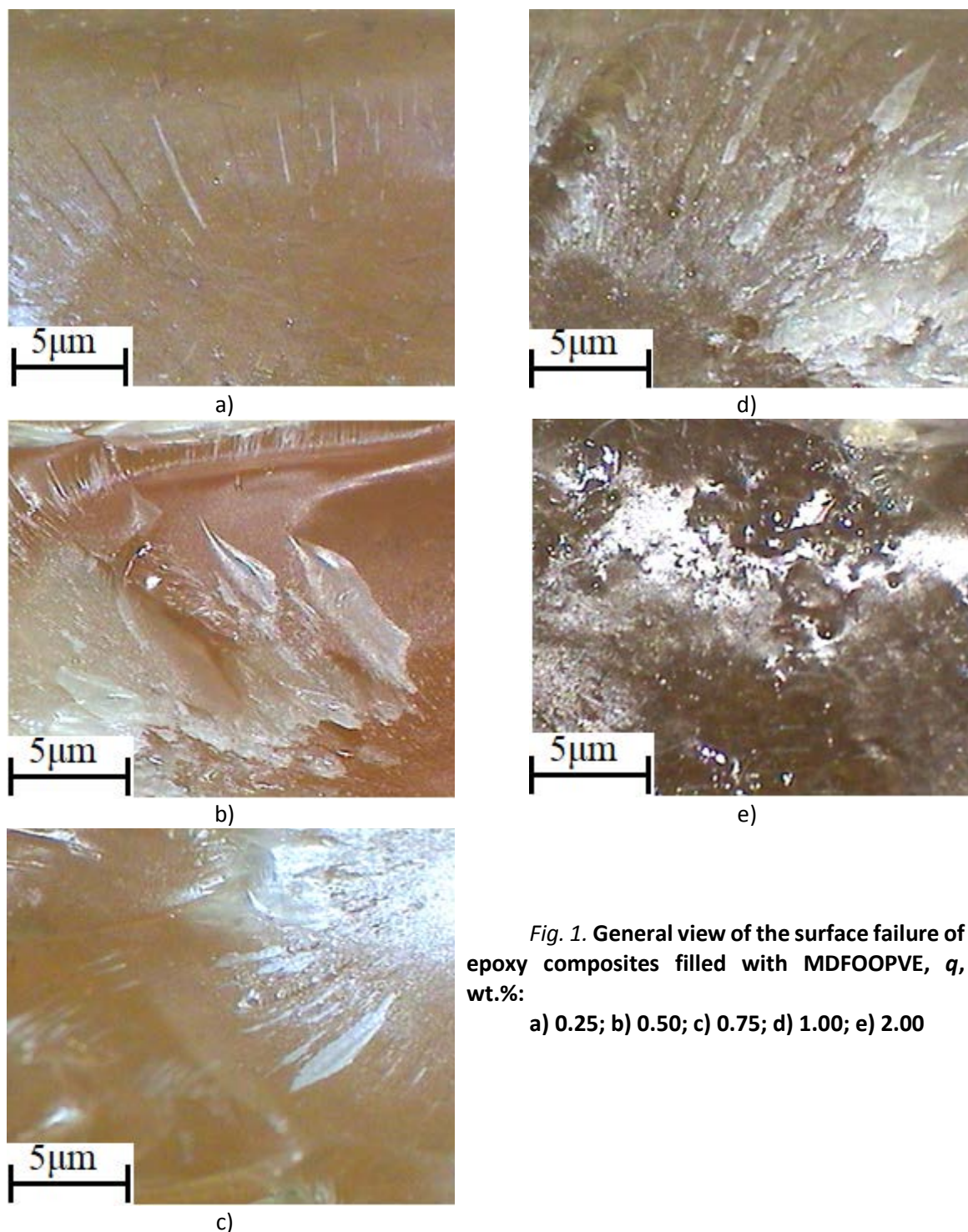


Fig. 1. General view of the surface failure of epoxy composites filled with MDFOOPVE, q , wt. %:

a) 0.25; b) 0.50; c) 0.75; d) 1.00; e) 2.00

Analysis of IR spectra enabled us to detect structural changes, specifically a shift in frequency (ν, cm^{-1}), a change in transmission intensity ($T, \%$), and a change in relative peak area ($S, \%$). This indicates a different number of chemical bonds in the polymer, and, consequently, a change in the degree of crosslinking of the developed composites. Analysis of IR spectra (Fig.2a-c) allowed us to detect absorption bands characteristic of the hydroxyl group OH ($\nu = 3408 \text{ cm}^{-1}$) for composites containing $q = 0.25$ - 0.50 wt.% of MDFOOPVE.

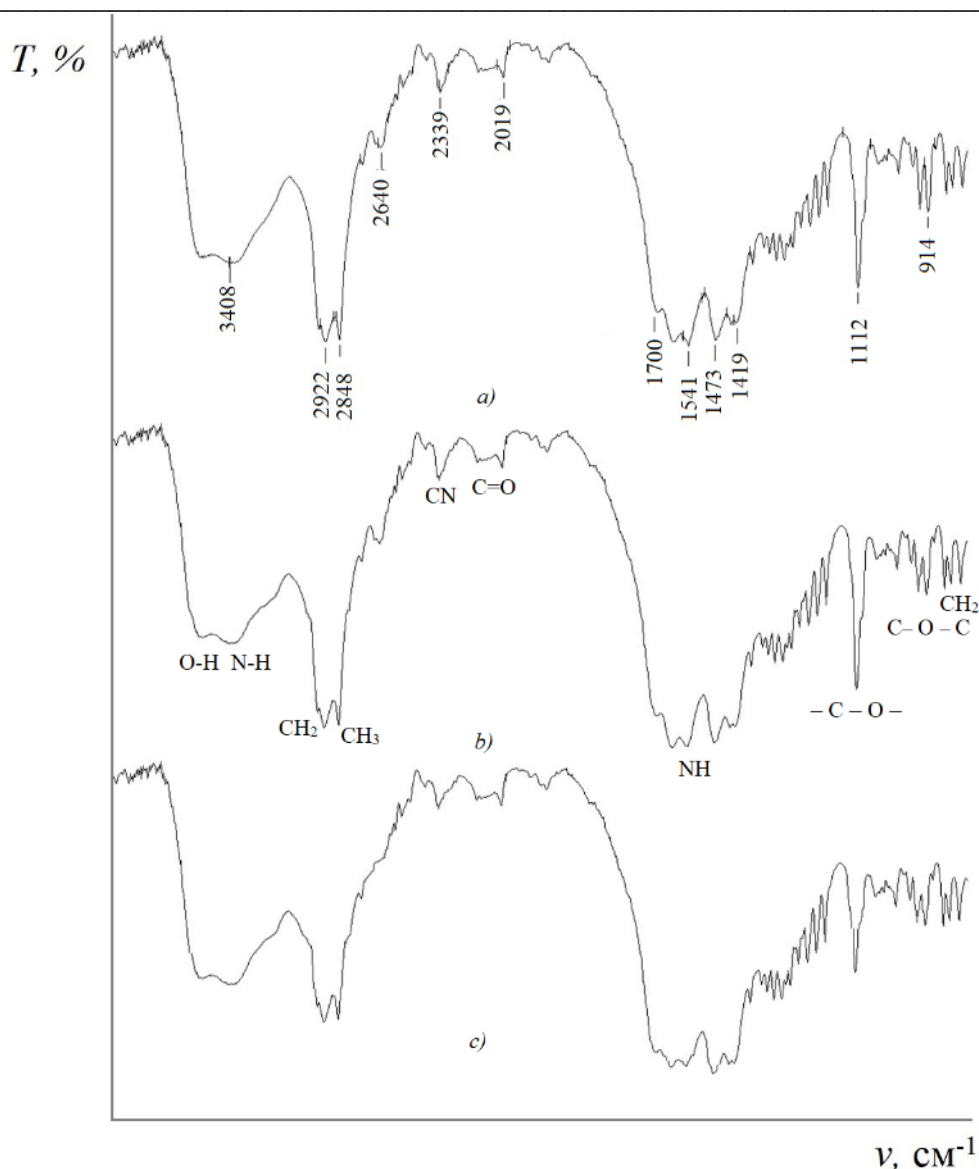


**Fig. 2. IR spectra of composite materials in the wavenumber range $\nu = 400...4000 \text{ cm}^{-1}$:
a – 0.25 wt.% of MDFOOPVE; b – 0.50 wt.% of MDFOOPVE; c – 0.75 wt.% of MDFOOPVE**

At the same time, a shift of the peak towards lower frequencies and a change in the relative area of the peaks were observed. The maximum shift of the peak towards lower frequencies ($\Delta\nu = 3.86 \text{ cm}^{-1}$) was observed for CM containing $q = 0.75 \text{ wt.}\%$ of MDFOOPVE. Such materials are characterized by the smallest value of the relative peak area – $S = 88.1 \%$ (Table 1). This indirectly indicates the formation or strengthening of hydrogen bonds between the hydroxyl groups of viscose and the polar groups of the epoxy matrix. The absorption bands at the wave number $\nu = 2922 \text{ cm}^{-1}$ were attributed to asymmetric/symmetric CH_2 groups, and at $\nu = 2848 \text{ cm}^{-1}$ – to asymmetric/symmetric CH_3 , characteristic of all components of the mixture of discrete fibers (polyester, viscose, elastane). The increase in the intensity of the absorption bands ($T, \%$) with increasing MDFOOPVE content (Table 1) indicates an increase in the proportion of organic fibers in the composition, confirming their presence in the polymer structure. The presence of a peak at $\nu = 2640 \text{ cm}^{-1}$ is characteristic of overtones of other groups. That is, these are bands that arise not from vibrations, but from multiple energy transitions in molecular groups during valence stretching.

The absorption band at $\nu = 1700 \text{ cm}^{-1}$ is characteristic of the polyester component $\text{C}=\text{O}$ (ester, polyester). While the range of wave numbers $\nu = 1419...1541 \text{ cm}^{-1}$ indicates deformation vibrations of CH_2/CH_3 groups, which are due to an increase in the additive content. The absorption band at $\nu = 1112 \text{ cm}^{-1}$ indicates ether bridges of epoxy groups and ether bonds of polyester, which are indicators of fibers adsorbed by the polymer and affect the interfacial interaction. Changes in the relative area of the

peak at $\nu = 914 \text{ cm}^{-1}$ (Table 1) indicate the interaction of epoxy groups (C–O–C) during polymerization with a mixture of discrete fibers.

Table 1.

Characteristic absorption bands according to IR-spectral analysis of composites filled with MDFOOPVE

Характеристики смуги		ІЧ-спектри композитів					
		0,25 мас.ч.		0,50 мас.ч.		0,75 мас.ч.	
Група	ν, cm^{-1}	T, %	S, %	T, %	S, %	T, %	S, %
Коливання епоксидних груп C–O–C	914	17,8	25,4	17,9	20,1	18,2	17,5
				Зміщення $\rightarrow$ $\Delta\nu = 3,86 \text{ cm}^{-1}$		Зміщення $\rightarrow$ $\Delta\nu = 3,86 \text{ cm}^{-1}$	
C–O–C, –C–O– Характерні для ефірів/ефірні містки поліестеру і епоксидних груп	1112	13,8	54,1	13,8	54,1	14,1	49,8
Деформаційні коливання N–H, CH ₂ , CH ₃ груп Характерні для еластану/твердника	1419	11,0	15,4	11,2	15,0	11,4	14,9
	1473	11,2	17,3	11,2	17,3	11,8	17,0
	1541	11,1	16,1	11,2	16,0	11,3	15,9
C=O (ester, polyester) Характерні для поліестерної складової	1700	12,1	11,3	12,1	11,3	12,6	19,8
Карбонільна група C=O	2019	21,6	16,0	21,6	16,0	21,6	16,0
-CN- валентні коливання	2339	24,9	36,3	24,9	36,3	25,2	35,1
Овертрони інших груп	2640	19,9	17,1	20,0	16,9	-	-
Асиметричні та симетричні коливання зв'язків C–H аліфатичних груп (CH ₂ , CH ₃)	2848	11,1	54,2	11,9	50,1	12,6	48,3
	2922	11,1	58,2	11,8	55,2	11,9	53,1
Валентні коливання O–H N–H груп	3408	13,6	98,9	14,2	90,2	15,6	88,1
				Зміщення $\rightarrow$ $\Delta\nu = 1,1 \text{ cm}^{-1}$		Зміщення $\rightarrow$ $\Delta\nu = 3,86 \text{ cm}^{-1}$	

Therefore, there are structural changes in the studied CM. It was established that for the composite filled with $q = 0.25 \text{ wt.}\%$ of MDFOOPVE, the maximum relative peak area ($S = 25.4\%$) was observed at $\nu = 914 \text{ cm}^{-1}$, which indicates a lower degree of conversion of epoxy groups compared to composites filled with $q = 0.50\text{--}0.75 \text{ wt.}\%$ of MDFOOPVE. Additionally, the maximum value of the relative peak area ($S = 98.6\%$) was observed at $\nu = 3408 \text{ cm}^{-1}$, indicating an insignificant interfacial interaction between the hydroxyl groups of viscose and the polar groups of the epoxy matrix. Then, as the decrease in the relative area of the peaks at $\nu = 3408 \text{ cm}^{-1}$, the weakening of the epoxy peak at $\nu = 914 \text{ cm}^{-1}$ is an indicator of

improved interaction of discrete fibers with the matrix, which is typical for CM filled with MDFOOPVE at a content of $q = 0.50-0.75$ wt.%.

Conclusions. The work compares the results of a study on the physical and mechanical properties and structure of epoxy composite materials filled with a mixture of discrete fibers based on polyester, viscose, and elastane. The work substantiates the possibility of controlled mechanical modification of the epoxy binder by introducing the optimal amount of a mixture of discrete fibers, which ensures improvement of the characteristics of epoxy composites. Additionally, generalized conclusions are made:

1. By optical microscopy, it was established that composites filled with $q = 0.50-0.75$ wt.% of MDFOOPVE are characterized by a combined fracture mechanism, which involves both localization and redirection of cracks in the polymer network, and therefore indicates effective interfacial interaction of the ingredients. Due to the nature of this fracture, the developed materials exhibit improved mechanical properties compared to other CMs studied in this work.

2. Based on IR-spectral analysis, it was found that when introducing a mixture of discrete fibers based on polyester, viscose, and elastane with a content of $q = 0.50-0.75$ wt.%, a decrease in the relative peak area from $S = 98.9\%$ to $S = 88.1\%$ at $\nu = 3408 \text{ cm}^{-1}$ was observed and at the same time a decrease in the relative peak area from $S = 25.4\%$ to $S = 17.5\%$ at $\nu = 914 \text{ cm}^{-1}$. The results obtained can be interpreted as confirmation of intensive hydrogen interactions between the hydroxyl groups of viscose and the polar groups of the epoxy matrix, as well as an indicator of the reactive interaction of the ingredients. In parallel, an increase in the intensity of the absorption bands at $\nu = 1700 \text{ cm}^{-1}$ and $\nu = 1112 \text{ cm}^{-1}$ was observed, which characterizes the double and single bonds of the C=O and C–O groups, respectively, and indicates the participation of the polyester component in the interfacial interaction.

List of sources used

1. Lila. M.K., Saini. G.K., Kannan. M., Singh. I.: Effect of Fiber Type on Thermal and Mechanical Behavior of Epoxy Based Composites. *Fibers and Polymers*. 18, 806-810 (2017).
2. Sapronov, O., Cherniavskya, T., Sapronova, A., Sotsenko, V., Bertem, A. Investigation of the structure of phthalimide-modified epoxy matrix by IR-spectral analysis. *Metallurgy*. 1, 53-59 (2021).
3. Sapronov, O., Buketov, A., Sapronova, L., Moki, O., Vorobiov, P., Moki, O.: Improvement of thermophysical characteristics of polymer coatings for protecting water transport by using a mixture of discrete organic fibers. *Management Systems in Production Engineering*. 33(4), 576-585 (2025).
4. Sapronov, O., Buketov, A., Kim, B., Vorobiov, P., Sapronova, L.: Increasing the Service Life of Marine Transport Using Heat-Resistant Polymer Nanocomposites. *Materials*. 17, 1503 (2024).
5. Khalimov, S., Nurmuhhammadov, R., Sadikov, M., Khasanov, M.: Study evaluation of adhesion between polymer and reinforcing fillers. *International journal of research in commerce, IT, Engineering and social sciences*. 16(5), 67-72 (2022).
6. Shukhrat Khalimov, Farkhodkhon Nishonov, Dilmurod Begmatov, Farooq Wani Mohammad, Umida Ziyamukhamedova.: Study of the physico-chemical characteristics of reinforced composite polymer materials. *CONMECHYDRO – 2023*. 401, 05039 (2023).
7. Sapronov, O., Vorobyov, P., Sapronova, L., Brailo, V.: Influence of organic content fibrous additives of natural and synthetic origin on the properties of epoxy protective coatings. *Metallurgy*. 1, 56-66 (2022).
8. Norkulov, A.A., Khalimov, S.A.: Features of the forming of the viscoelastic and strength properties of reinforced epoxy heterocomposites for high-pressure gas cylinders. *International Polymer Science and Technology*. 38(6), 61-63 (2011).
9. Ziyamukhamedova, U.A., Almataev, T.O., Dzhumabaev, A.B., Bakirov, L. Y.: Improvement of methods and means of testing non-conventional tribosystems. In *AIP Conference Proceedings*. 2432(1), 030031 (2022).
10. Nurkulov, F., Ziyamukhamedova, U., Rakhmatov, E., Nafasov, J.: Slowing down the corrosion of metal structures using polymeric materials. In *E3S Web of Conferences*. 264, 02055 (2021).

І.В. Говоруха¹, О.О. Ларін¹, І.В. Полівенок², К.Є. Потопальська¹, Н.О. Фоменко¹*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»¹
Інститут загальної та невідкладної хірургії ім. В.Т.Зайцева НАМН України²***СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТАТИЧНОГО ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ АТЕРОСКЛЕРОТИЧНИХ СУДИН НА ОСНОВІ ДАНИХ ОСТ ЗОБРАЖЕНЬ**

У роботі представлено методику оцінки напружено-деформованого стану атеросклеротичних судин на основі клінічних даних оптичної когерентної томографії (ОКТ). Розроблено алгоритм автоматизованої побудови параметричної геометрії судини. За допомогою методу скінченних елементів проаналізовано три типи бляшок: некальциновану, кальциновану та низької щільності. Встановлено зони концентрацій напружень у «плечах» бляшки, що дозволяє прогнозувати ризик її розриву.

Ключові слова: атеросклеротичні судини, МСЕ, бляшка, напружено-деформований стан

I.V. Hovorukha, O.O. Larin, I. V. Polivenok, K. Ye. Potopalska, N.O. Fomenko

FE SIMULATIONS OF THE STATIC DEFORMED STATE OF ATHEROSCLEROTIC VESSELS BASED ON OCT IMAGE DATA

This study focuses on the biomechanical modeling of atherosclerotic vessels to predict the risk of plaque rupture, a primary cause of acute cardiovascular events. A methodology integrating clinical Optical Coherence Tomography (OCT) imaging with Finite Element Analysis (FEA) is proposed. An automated Python-based algorithm was developed to reconstruct patient-specific geometries of vessel layers (intima, media, adventitia) and plaque components directly from OCT images.

Numerical simulations were conducted for three different plaques cases under physiological pressure. The results revealed that maximum stresses are consistently localized at the plaque shoulders. The proposed approach provides a quantitative tool for assessing plaque vulnerability beyond geometric analysis.

Key words: atherosclerotic vessels, FE, Plaque, stress strain state.

Introduction. Atherosclerotic plaque is a common condition where the walls of blood vessels become thick and stiff, leading to an increased risk of cardiovascular diseases such as heart attack and stroke. Despite significant advances in the bio-medical understanding of the disease, its complex nature has some randomness, and early diagnosis and treatment are crucial for preventing the spread of atherosclerosis and its life-threatening complications. Mathematical and computer modeling can provide valuable insights into the complex processes of blood vessels' mechanical response considering inside plaque formation and growth. The main challenge of computational modeling here is the accurate reconstruction of patient-specific vessel geometry from diagnostic images, such as Optical Coherence Tomography (OCT), and its conversion into a parametric finite element model. This requires precise differentiation of vessel layers and plaque components to ensure the reliability of stress-strain analysis and the subsequent prediction of plaque vulnerability.

Furthermore, the widespread clinical application of such biomechanical analysis is currently limited by the complexity of model generation. Converting raw OCT images into finite element models typically involves tedious manual segmentation, which is time-consuming and subject to operator variability. Therefore, a pressing scientific and practical task is to automate this workflow. Developing a robust algorithm that can instantly translate diagnostic data into a parametric geometric model—preserving the anatomical features of layers and plaque components—is a key step toward making patient-specific rupture risk prediction a viable tool for real-time decision-making.

Analysis of the latest research and publications. There are numerous researchers considering the predictive modelling of the mechanics of human atherosclerotic blood vessels. Part of that involves investigating the process solely through the mathematical formulation of the problem, based on approaches to assessing the strength of a vessel with plaque. [2,3] The other investigations employ numerical methods to predict probable critical situations. [1,4,5-9].

One approach to assessing blood vessel strength is modelling residual stresses in arterial walls by simulating a radial cut through an unloaded artery. This simulation helps determine the strain gradient associated with residual stresses, which is then applied in subsequent simulations. Age-related changes, such as the widening of the thoracic aorta, affect vessel size and strength, with differences noted between sexes based on body size. [9].

Research shows that age-related changes also affect the size and strength of blood vessels. For example, the thoracic aorta typically widens with age and was larger in people with larger frames. Differences in aortic diameter between sexes are associated with differences in body size. In individuals without significant aortic disease, aortic growth was faster in younger individuals with a smaller indexed diameter [3].

To assess plaque vulnerability, three-dimensional finite element models are used that take into account biomechanical factors such as capsule thickness, lipid core stiffness, remodeling index, blood pressure, and the presence of microcalcifications in the capsule tissue. Within the framework of this technique, a vulnerability index was determined based on the ratio of maximum stresses to the tensile strength of the capsule tissue. The most significant factors were capsule thickness and lipid core rigidity. This technique was able to predict the risk of human atheroma rupture under different conditions [4].

Beyond the plaque itself, the microenvironment—specifically neovascularization—reshapes local lipid and inflammatory profiles. Simultaneously, physical forces such as pulsatile hemodynamics and arterial wall stiffness contribute to intimal hypoxia. These mechanical factors ultimately determine the distribution of Wall Shear Stress (WSS), thereby regulating the pathological entry of monocytes and plasma LDL into the lesion [5].

Simulation studies show that reducing slice thickness in MRI studies does not always lead to improved measurements of the lumen, vessel wall, or necrotic lipid core size. In some cases, a more important factor is to obtain anisotropic voxels to improve measurement accuracy and estimate stresses in the plaque capsule. Such studies are needed to quantify the benefits of different MRI techniques [6].

Mathematical modeling of the process of formation of atherosclerotic plaques makes it possible to simulate various dynamic behaviors in various clinical cases. The model system can determine the critical conditions separating stable and unstable plaques. The most important parameter for maintaining system stability is the rate of proliferation of smooth muscle cells. If the proliferation rate exceeds a certain threshold, the system can become unstable, increasing the risk of cardiovascular disease. [7].

Modeling of atherosclerotic plaque growth, including both macroscopic and molecular and cellular processes, allows the interaction between the blood flow and the arterial wall to be taken into account. The model uses the TAWSS dependence of endothelial permeability to describe the entry of substances from the bloodstream and subsequent accumulation of elements such as LDL, macrophages and foam cells. The influence of initial geometry and various model parameters on plaque growth highlights the importance of a multi-level approach to solving the problem [2].

Finally, modeling of hemodynamics and mechanical properties of arterial walls with different types of plaques shows that WSS around calcified plaques (low stenosis) is lower than around lipid plaques (high stenosis). This can lead to further accumulation of new plaques around the calcified areas. Lipid plaques, on the other hand, cause WSS fluctuations in healthy areas behind them, which can initiate the formation of new plaques in these areas. The maximum stress is usually located at the shoulder of the plaque, which is considered to be the site of plaque rupture [1, 8].

To summarize all of the above the purpose of the work is: to create the methodology of prediction rupture of human blood atherosclerotic vessels with plaque based on diagnostic of real patients using numerical methods.

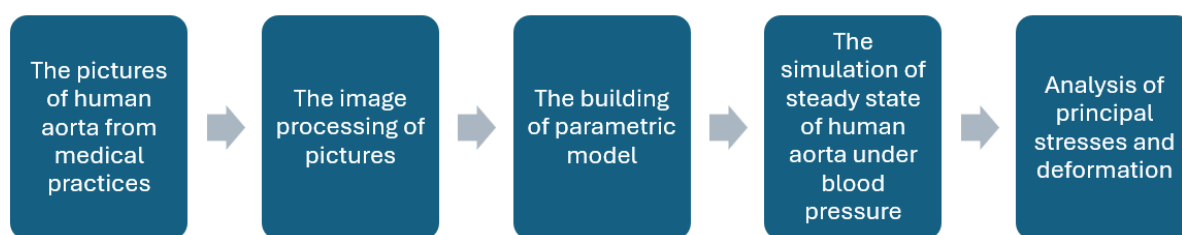


Fig.1. The general scheme of research

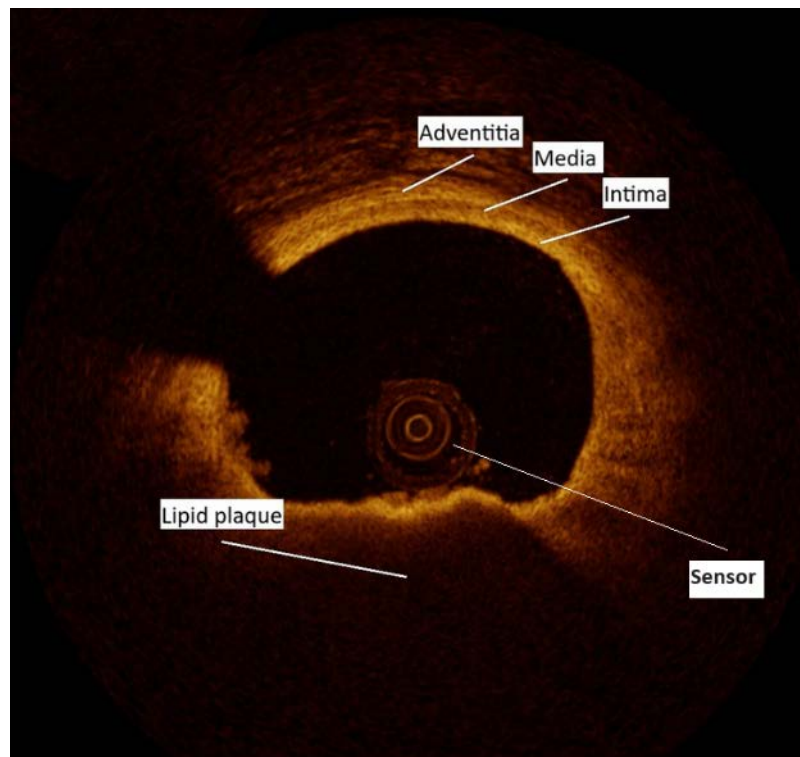
OCT Image Processing and Model Reconstruction.

As initial data for the paper, the results of patient vessel observation were provided by Optical Coherence Tomography (OCT) in the form of pictures of the vessel cross-section. Coronary plaques are classified into three different categories: calcified, non-calcified, and low-density non-calcified plaques. Idealized plane models of longitudinal atherosclerotic arteries are used to investigate the impact of stenotic severity on the circumferential stress exerted on plaque.

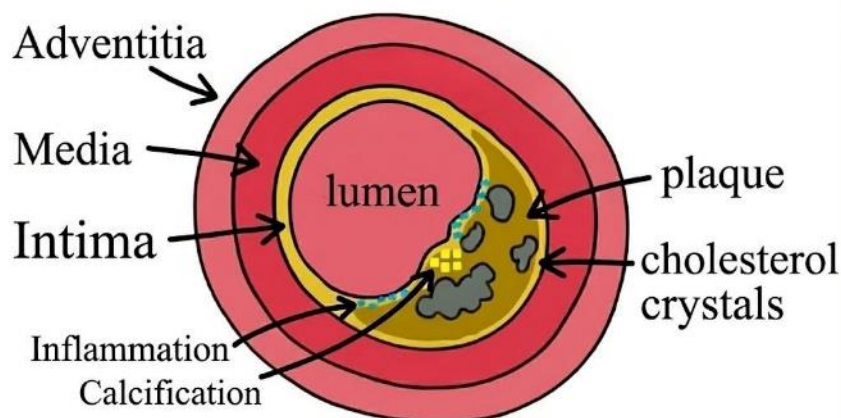
The vessel model with plaque consists of three layers (Intima, Media, and Adventitia layers) and the plaque itself (Fig. 2).

Description of algorithm for building the parametric model of vessel. To analyze the structure of the vessel with plaque components, numerical simulation is applied to illustrate the variation in mechanical properties due to the lipid core. An algorithm is proposed for building the geometrical model of a vessel

with plaque based on OCT results.



a)



b)

Fig. 2. Schematic definition layers and plaque of vessel a) OCT results, b) schematic view

The dimensions and coordinates of all vessel layers and plaques are determined based on OCT images using a Python script for image processing.

The Media and Adventitia layers are represented as a ring, corresponding to OCT pictures. The Intima layer and Plaque are represented as spline parameters, which are defined according to the proposed algorithm, as shown in fig.2. The Intima layer consists of an arc and a spline. The ends of the arc are connected by a spline, which can take various shapes, simulating different forms and thicknesses of the plaque cap. The plaque is represented by spline parameters, which are defined according to the proposed algorithm, as shown in Fig. 3. The geometry of the plaque is created using two splines (upper and lower). These splines, similar to the cap spline, can take various shapes, simulating different structures and positions of the plaque.

The detailed description of the main stages of the algorithm for determining the geometrical parameters of vessel layers and plaque is shown in fig.3.

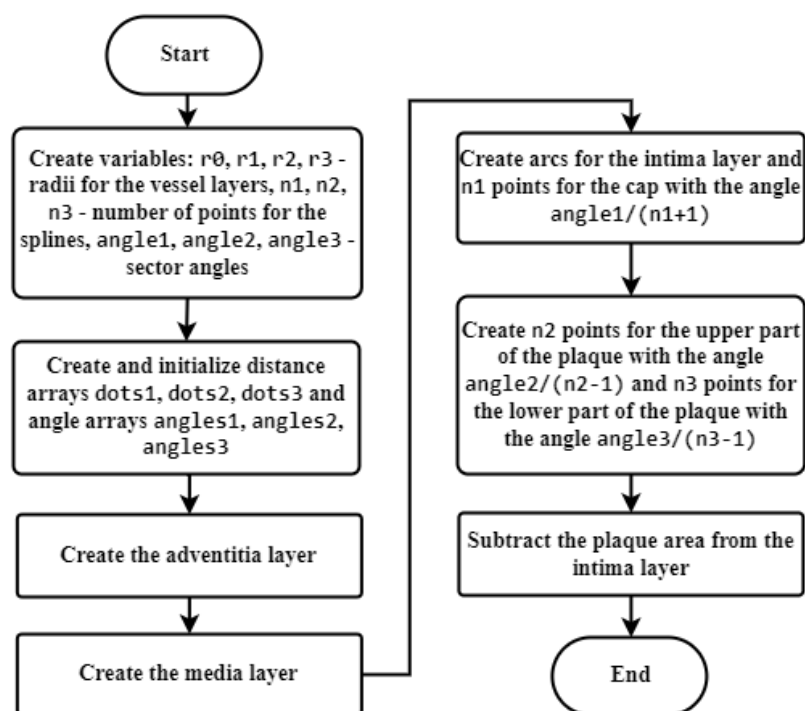


Fig.3. The algorithm of determining geometrical parameters of vessel with plaque

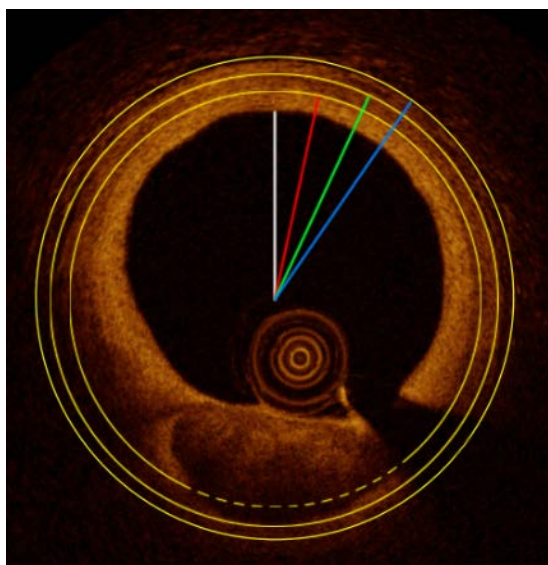


Fig.4. The Media and Adventitia layers of vessel with plaque

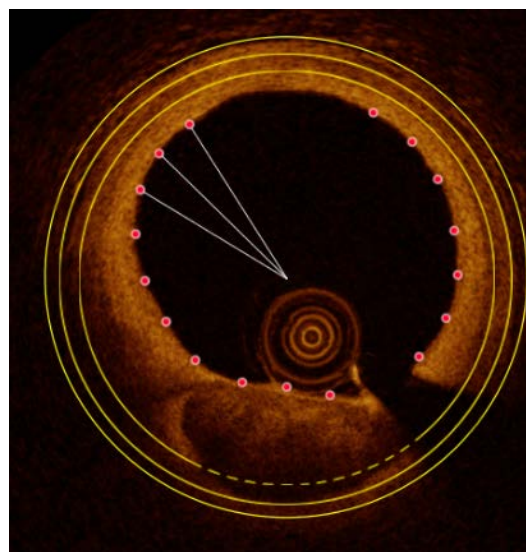


Fig.5. The intima layer of vessel with plaque

The detailed description of algorithm is presented below:

1. The artery's geometry is idealized to a circle with a constant diameter for further numerical modeling.
2. The midpoint of the idealized artery is determined at the intersection of the circle's diameters. The outer radius of the adventitia (outer layer) is identified. (fig.4)
3. Key parameters are defined, such as the thickness of the intima layer (inner layer, fig.5), the thickness of the media layer (middle layer), and the thickness of the adventitia (outer layer).
4. Using the midpoint of the artery, the sector of the plaque cap is determined.
5. An application is used to construct the cap over the plaque, determining the distance and angle of inclination relative to the artery's midpoint.
6. For constructing the upper part of the plaque (fig.6), an application is used to determine the distance and angle of inclination relative to the artery's midpoint.
7. For constructing the lower part of the plaque (fig.7), an application is used to determine the

distance and angle of inclination relative to the artery's midpoint.

8. The modeled geometry of the artery with the lipid plaque is created in ANSYS software.

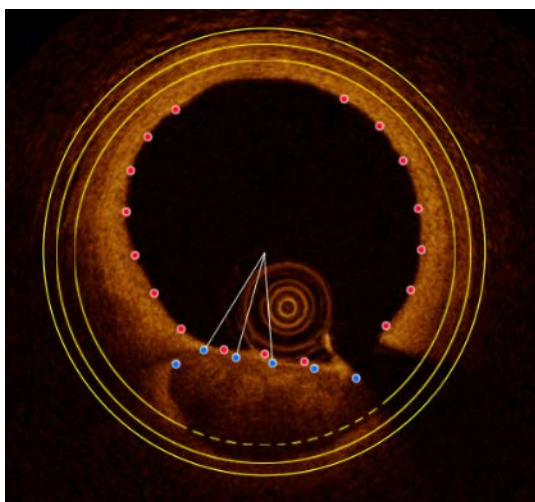


Fig.6. The upper part of the plaque

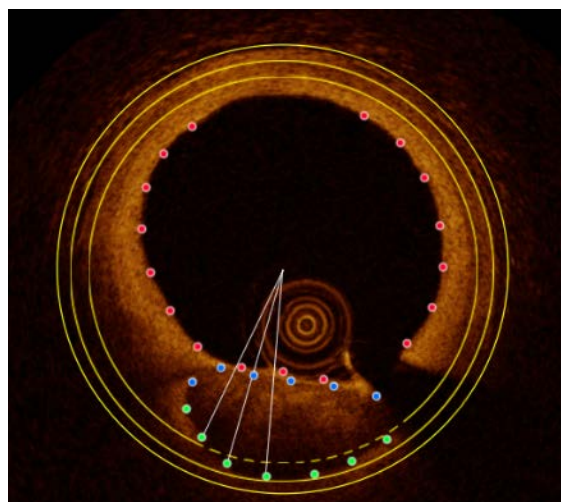


Fig.7. The lower part of the plaque

All layers and plaque are created as separate areas but considering geometry of each other as well as all of them has a different material properties. The material properties as Young's modulus (E_r , E_θ , E_z), shear modulus ($G_{r\theta}$, $G_{\theta z}$, G_{rz}) and Poisson's ratios ($\nu_{r\theta}$, ν_{rz} , $\nu_{\theta z}$) are presented of the plaque constituents are consolidated from Wong [1] and shown in table 1.

Table 1

Material properties for vessel layers and plaque

Parameter	Vessel layers			Plaque (Lipid pool)
	Intima	Media	Adventitia	
E_r, E_z kPa	300	100	350	$E = 10$ kPa (isotropic)
E_θ kPa	3000	1000	3500	
$G_{r\theta}$ kPa	1500	500	2000	
$G_{\theta z}, G_{rz}$ kPa	150	50	200	
$\nu_{r\theta}, \nu_{rz}$ -	0.01	0.01	0.01	$\nu = 0.45$
$\nu_{\theta z}$ -	0.27	0.27	0.27	

Numerical results. The Finite element method were used for determining the stress strain state of vessel with plaque. The single layer model was set in solid plane strain, structural, linear, isotropic quadrilateral elements (8 node PLANE 183) throughout the analysis as shown in fig. 8.

The study was conducted for different plaque geometries based on OCT results and subjected to a pressure of 16,200 Pa, corresponding to normal human systolic pressure.

The proposed approach for building FE-model was applied for three different cases.

The simulation results reveal the complex nature of stress and strain distribution within the vessel wall and plaque components. Figure 9 illustrates the contour plots of the 1st principal stress for three clinical cases. The results indicate that the maximum stress concentrations are consistently located at the "shoulders" of the plaque (the transition zone between the plaque and the normal vessel wall).

In case 1 the stress distribution (fig.9) is relatively uniform compared to other cases. The maximum 1st principal stress reached approximately 236 kPa. The deformation pattern follows the geometry of the fibrous cap without critical localization (fig.10). In case 2 the maximum 1st principal stress reached approximately 537 kPa

Case 3 exhibited the most critical behavior in terms of deformation. Figure 10 shows the distribution of the 1st principal elastic strain. Due to the low stiffness of the lipid core, the plaque underwent significant deformation under systolic pressure. The maximum elastic strain reached 0.157 (15.7%), while the peak stress was recorded at approximately 160 kPa. Such high strain levels indicate a significant stretching of the thin fibrous cap, marking it as highly vulnerable to rupture.

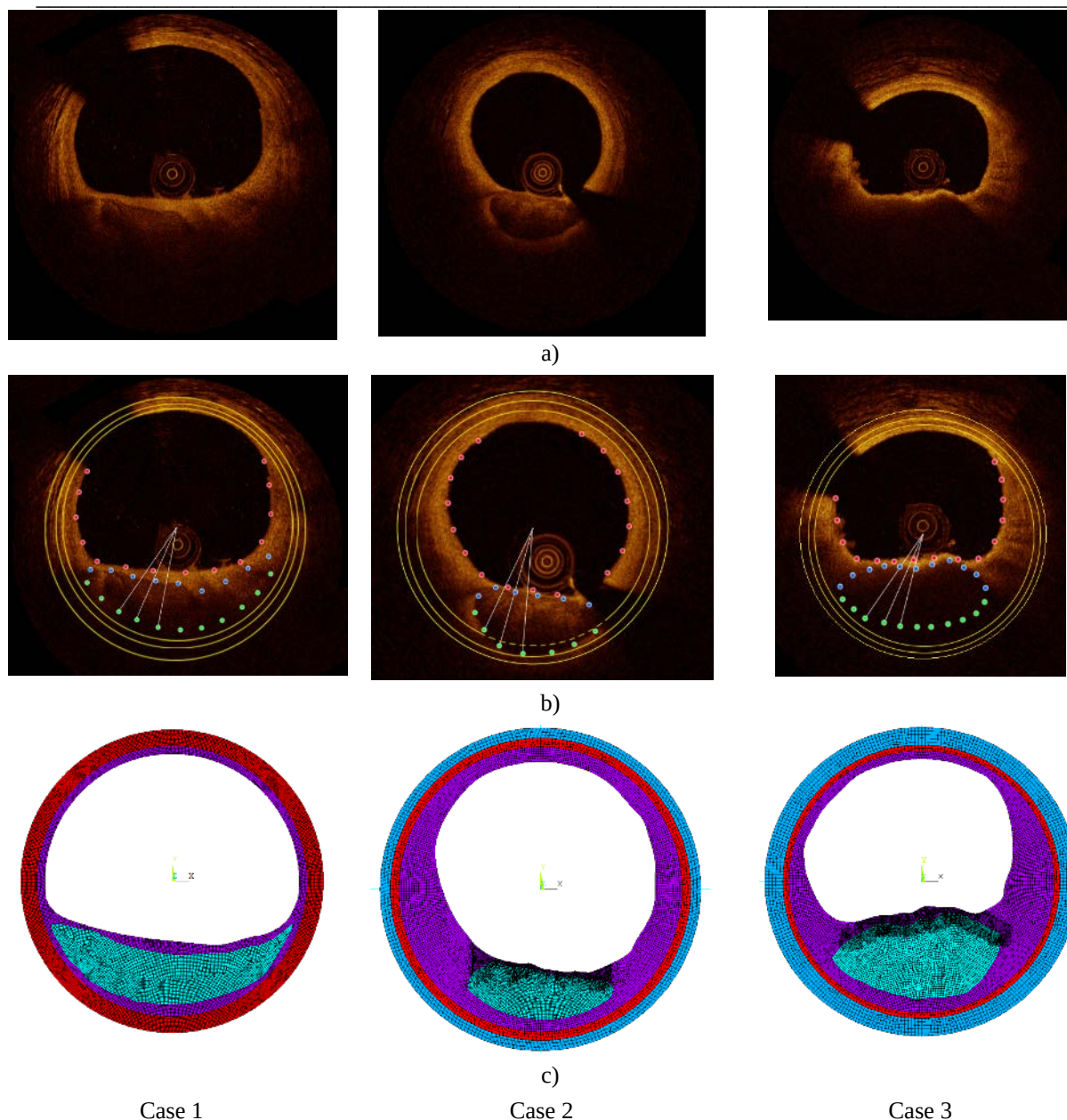


Fig.8. The vessel models: a) initial data, b) schematic view of vessel parts separation, c) mesh models based on provided data and build by proposed algorithm

Conclusions and prospects for further exploration in this direction. In this study, a methodology for the patient-specific finite element modeling of atherosclerotic vessels based on Optical Coherence Tomography (OCT) data was developed and implemented. The following conclusions can be drawn: an algorithm using Python scripting was successfully created to process OCT images and automatically generate parametric geometric models of the vessel layers (intima, media, adventitia) and plaque components. This approach reduces manual processing time and preserves the anatomical accuracy of patient-specific data.

Finite element analysis of three models with plaques showed that mechanical stress is distributed unevenly. Maximum stress concentrations are localized at the edges of the plaques, which are considered to be the weakest points.

Future research in this direction will focus on:

- refining the load applied to the vessel walls and better simulate blood pulsation;
- expanding the current 2D cross-sectional models to fully three-dimensional reconstructions to account for the longitudinal variability of the plaque;
- implementing hyperelastic material models (e.g., Mooney-Rivlin or Ogden) to better

describe the behavior of arterial tissues at higher strain levels.

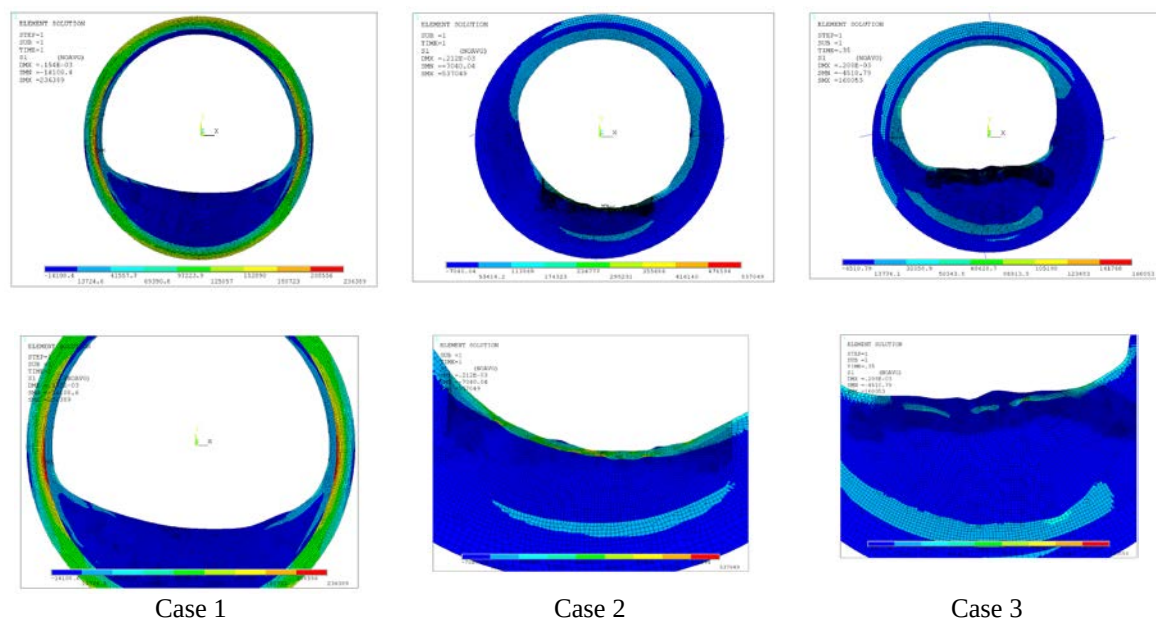


Fig.9. Contour plot of the 1st principal stress

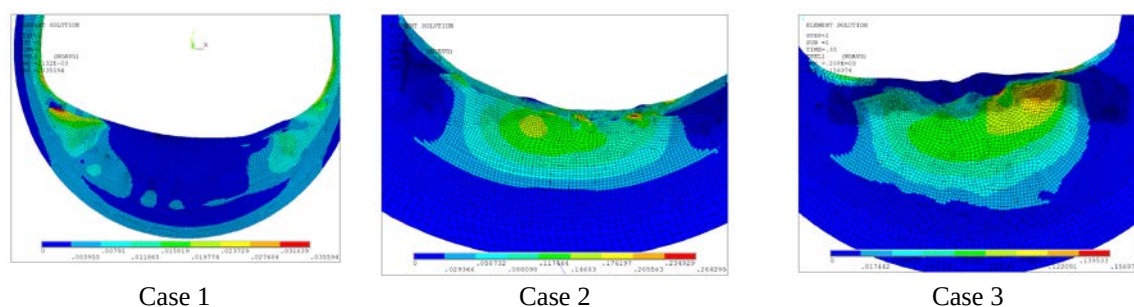


Fig.10. Contour plots of the 1st principal elastic strain. Maximum values are localized in the plaque contact area

References:

1. Wong K.K.L., Thavornpattanapong P., Cheung S.C.P., Tu J. Effect of calcification on the mechanical stability of plaque based on a three-dimensional carotid bifurcation model // BMC Cardiovascular Disorders. – 2012. – 12(1). – P. 7. – DOI: 10.1186/1471-2261-12-7.
2. Pozzi S., Redaelli A., Vergara C., et al. Mathematical Modeling and Numerical Simulation of Atherosclerotic Plaque Progression Based on Fluid-Structure Interaction // Journal of Mathematical Fluid Mechanics. – 2021. – 23. – P. 74. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00021-021-00598-8>.
3. Chang H.W., Kim S.H., Hakim A.R., Chung S., Kim D.J., Lee J.H., Kim J.S., Lim C., Park K.-H. Diameter and growth rate of the thoracic aorta—analysis based on serial computed tomography scans // Journal of Thoracic Disease. – 2020. – 12(8). – P. 4002–4013. – DOI: 10.21037/jtd-20-1275.
4. Corti A., De Paolis A., Grossman P., Dinh P.A., Aikawa E., Weinbaum S., Cardoso L. The effect of plaque morphology, material composition and microcalcifications on the risk of cap rupture: A structural analysis of vulnerable atherosclerotic plaques // Frontiers in Cardiovascular Medicine. – 2022. – 9. – P. 1019917. – DOI: 10.3389/fcvm.2022.1019917.
5. Guo M., Cai Y., He C., et al. Coupled Modeling of Lipid Deposition, Inflammatory Response and Intraplaque Angiogenesis in Atherosclerotic Plaque // Annals of Biomedical Engineering. – 2019. – 47. – P. 439–452. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10439-018-02173-1>.
6. Nieuwstadt H.A., Kassab Z.A.M., van der Lugt A., Breeuwer M., van der Steen A.F.W., Wentzel J.J., et al. A Computer-Simulation Study on the Effects of MRI Voxel Dimensions on Carotid Plaque Lipid-Core and Fibrous Cap Segmentation and Stress Modeling // PLoS ONE. – 2015. – 10(4). – P. e0123031. – DOI: 10.1371/journal.pone.0123031.

DOI: 10.1371/journal.pone.0123031.

7. Anlamlert W., Lenbury Y., Bell J. Modeling fibrous cap formation in atherosclerotic plaque development: stability and oscillatory behavior // *Advances in Difference Equations*. – 2017. – 2017. – P. 195. – DOI: <https://doi.org/10.1186/s13662-017-1252-9>.

8. Wang D., Serracino-Inglott F., Feng J. Numerical simulations of patient-specific models with multiple plaques in human peripheral artery: a fluid-structure interaction analysis // *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*. – 2021. – 20. – P. 255–265. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s10237-020-01381-w>.

9. Balzani D., Schröder J., Gross D. Numerical simulation of residual stresses in arterial walls // *Computational Materials Science*. – 2007. – 39(1). – P. 117–123. – ISSN: 0927-0256.

Рецензент: В. Негодуйко, док. мед. н., професор кафедри хірургії №4 ХНМУ

О. І. Венгринюк, О. І. Звірко*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України***ОБҐРУНТУВАННЯ КРИТЕРІЮ ГРАНИЧНОГО СТАНУ СТАЛЕЙ ГАЗОПРОВОДІВ
ЗА ЇХ ПЕРЕПРОФІЛЮВАННЯ ДЛЯ ВОДНЮ**

Тривала експлуатація магістральних трубопроводів спричиняє істотне зниження вихідних механічних характеристик. Проаналізовано вплив експлуатаційних умов наводнювання сталей газопроводів на їх деградацію за опором крихкому руйнуванню. Обґрунтовано критерій досягнення граничного стану сталей за тріщиностійкістю залежно від тиску газу в трубі та наявності тріщиноподібних дефектів. Отримані результати можна використати для оцінювання роботоздатності сталей магістральних газопроводів в умовах транспортування водню.

Ключові слова: сталь, трубопровід, механічні властивості, водень, деградація, концентрація водню, тріщиностійкість, J -інтеграл, напівеліптична тріщина, роботоздатність.

O. I. Venhryniuk, O. I. Zvirko**SUBSTITUTION OF THE LIMIT STATE CRITERIUM OF GAS PIPELINE STEEL DURING
THEIR REPROFILING FOR HYDROGEN**

Long-term operation of natural gas transmission pipelines causes a significant decrease in the initial mechanical characteristics of pipeline steels. The influence of operating conditions of hydrogen uptake by natural gas pipeline steels on their degradation in terms of resistance to brittle fracture is analyzed. The criterion for achieving a limit state of steels in terms of crack growth resistance considering the operational degradation, hydrogen charging conditions, gas pressure in the pipe and the presence of crack-like defects is substantiated. The obtained results can be used for assessment the serviceability of gas transit pipeline steels reprofiling for gaseous hydrogen transportation.

Key words: steel, pipeline, mechanical properties, hydrogen, degradation, hydrogen concentration, crack growth resistance, J -integral, semi-elliptical crack, serviceability.

Постановка проблеми. Магістральні трубопроводи відносять до особливо відповідальних, оскільки порушення їх цілісності спричиняє значні негативні наслідки. Актуальним завданням декарбонізації енергетики є перепрофілювання газової інфраструктури для транспортування водню [1, 2]. Для його вирішення необхідно врахувати низку чинників, визначальних для безпечної та надійної експлуатації трубопроводів. Це, зокрема, загальновідомий негативний вплив водню на механічні властивості сталей [1–5], а також деградація тривало експлуатованих сталей трубопроводів [2, 6–8]. Оскільки магістральні газопроводи спроектовані для транспортування природного газу, то взаємодія водню з трубними сталями у поєднанні з їх експлуатаційною деградацією вимагає розроблення нових критеріїв оцінювання їх роботоздатності за дії водню.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження стану тривало експлуатованих магістральних газопроводів свідчать про істотне погіршення вихідних фізико-механічних характеристик сталей, якщо їх деградація відбувається за сумісної дії механічних навантажень і абсорбованого металом водню [2, 6–8]. Вона проявляється окрихченням сталей, розвитком у них пошкодженості та зниженням їх опору крихкому руйнуванню. Водночас, може зростати схильність сталей до водневого окрихчення [8, 9]. Особливо небезпечним результатом пошкодженості є утворення та розвиток тріщин. Загалом, уже на стадії проектування таких великих конструкцій розглядають ймовірність наявності в них невиявлених мікротріщин [10], що не можливо уникнути навіть при застосуванні сучасних діагностичних систем. Експлуатаційна деградація посилює розвиток наявних та зародження нових мікротріщин. Тому тріщиностійкість є важливою характеристикою металу, яка визначає роботоздатність трубопроводів [1].

В умовах транспортування водню він буде взаємодіяти з трубними сталями, внаслідок чого відбуватиметься воднева деградація сталей, насамперед через їх водневе окрихчення [1–3]. Це спричиняє погіршення механічних характеристик сталей [1–5, 8], що негативно впливає на їх роботоздатність, оскільки підвищує ризик аварійних відмов через зростання імовірності крихкого руйнування. На сьогодні немає розроблених критеріїв граничного стану металу для перепрофілюваних трубопроводів, зокрема, за умов використання газопроводів для транспортування водню.

Постановка завдань. Мета роботи полягає в обґрунтуванні критерію досягнення граничного стану трубних сталей за параметром тріщиностійкості з урахуванням експлуатаційної деградації, умов наводнювання, тиску газу в трубі та наявності тріщиноподібних дефектів.

Виклад основного матеріалу. Для обґрунтування критерію досягнення критичного стану трубних сталей використовували результати про їх тріщиностійкість залежно від умов експлуатації, наводнювання та швидкості деформування. Тріщиностійкість металу визначали методом J -інтеграла, враховуючи методичні вимоги [11] з використанням поздовжніх балкових зразків розмірами 4х15х150 мм з боковим надрізом. Досліджували трубу сталі 17Г1С, типу API 5L X52, експлуатовану 38 років на магістральному газопроводі [8, 9]. Її чутливість до водневого окрихнення оцінювали за випробувань без та після попереднього електролітичного наводнювання зразків з тріщинами, яке реалізували в електроліті H_2SO_4 (рН1) + 10 г/л сечовини тривалістю 50 год. за густини струму 0,05 мА/см² та 1 мА/см². Зразки випробовували за швидкості навантаження $v = 0,5, 0,05$ і 0,005 мм/хв. Результати випробувань експлуатованої 38 років сталі 17Г1С приведені на рис. 1 (показник J_{0H} – значення J -інтеграла, визначене для старту тріщини).

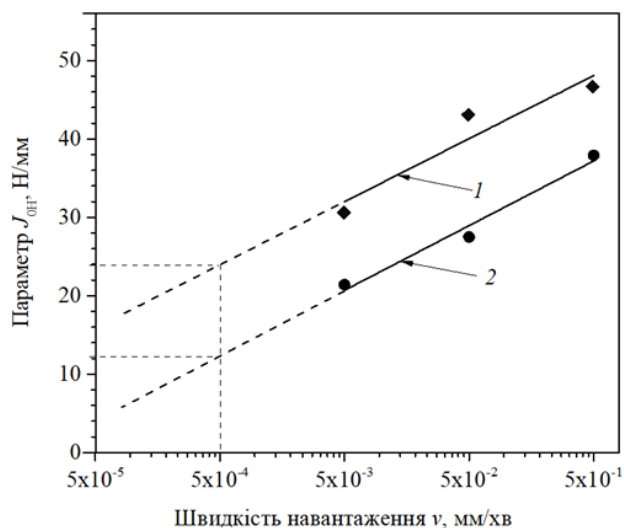


Рис. 1. Залежність параметра J_{0H} від швидкості навантаження v для зразків 38 років експлуатованої сталі 17Г1С після їх попереднього електролітичного наводнювання за густини струму 0,05 мА/см² (1) та 1 (2) мА/см²

Як критерій граничного стану сталі експлуатованого трубопроводу запропоновано використовувати показник в'язкості руйнування K_H , який перераховується з J_{0H} , що визначається експериментально відповідно до підходів нелінійної механіки руйнування, за формулою [11]:

$$K_H = \sqrt{J_{0H} E_{el} (1 - \nu^2)}, \quad (1)$$

де J_{0H} – рівень в'язкості руйнування, за якого ініціюється ріст тріщини за активного навантаження у сталі, що містить певну концентрацію водню C_H , E_{el} – модуль пружності (Юнга), ν – коефіцієнт Пуассона. Сталь досліджуваного експлуатованого трубопроводу досягає граничного стану за умови, що її в'язкість руйнування K_H за наявної концентрації абсорбованого в процесі експлуатації водню C_H досягла критичного значення K_H^{cr} :

$$K_H = K_H^{cr}. \quad (2)$$

Прийняли, що $K_H^{cr} = 55 \text{ МПа} \cdot \sqrt{\text{м}}$ відповідно до американського нормативного документу ASME B31.12 [12] щодо водневих трубопроводів із сталей такої ж категорії міцності API 5L X52, що і сталь 17Г1С, що відповідає у перерахунку $J_{0H}^{cr} = 13,3 \text{ Н/мм}$.

У процесі експлуатації показник в'язкості руйнування сталі 17Г1С J_{0H} знижується [8, 9]. І тим сильніше, що більша концентрація водню у металі (інтенсивність наводнювання), а з іншого – менша швидкість навантаження. Звідси для коректної оцінки значення в'язкості руйнування сталі досліджуваного газопроводу слід враховувати швидкість навантаження попередньо наводнених зразків при визначенні J_{0H} та напружений стан в тріщині в показниках K_H для певних силових та геометричних умов.

З рис. 1 видно, що навіть за найнижчої швидкості навантаження та високої інтенсивності наводнювання (крива 2) на сталі не досягається рівня J_{0H}^{cr} .

З використанням програми ORIGIN отримані дані описали рівняннями у вигляді лінійних залежностей (рис. 1):

$$\text{Залежність 1 (рис. 1): } J_{0H} = 50,51 + 8,05 \cdot v; \quad (3)$$

$$\text{Залежність 2 (рис. 1): } J_{0H} = 39,67 + 8,05 \cdot v. \quad (4)$$

Залежності апроксимували на менші швидкості навантаження і визначили (рис. 1), що за високої інтенсивності наводнювання за швидкості $5 \cdot 10^{-4}$ очікувано J -інтеграл по старту тріщини може бути близьким до граничного значення, для меншої інтенсивності наводнювання – ця швидкість буде нижчою.

Відомо [13], що між фугитивністю в процесі електролітичного наводнювання та тиском газоподібного водню, які забезпечують однакову концентрацію водню у сталі, встановлена кореляція. Тому у досліджуваних зразках за електролітичного наводнювання за коректно встановленої його фугитивності (і, відповідно, густини струму наводнювання за катодної поляризації) буде досягнута така ж концентрація абсорбованого водню, що і за їх витримки при експлуатаційних тисках водню. Водночас, перевагами застосування електролітичного наводнювання є безпечніші та швидші лабораторні випробування, а отже і експертизи оцінювання технічного стану сталей експлуатованих газопроводів.

Враховуючи встановлений взаємозв'язок між фугитивністю та еквівалентним тиском водню, а також між фугитивністю та густиною струму наводнювання, побудували залежність між еквівалентним тиском водню та густиною струму наводнювання (рис. 2), яку описали лінійним рівнянням з використанням програми ORIGIN:

$$P_{H_2}^{екв} = 0,12 + 9,59 \cdot i. \quad (5)$$

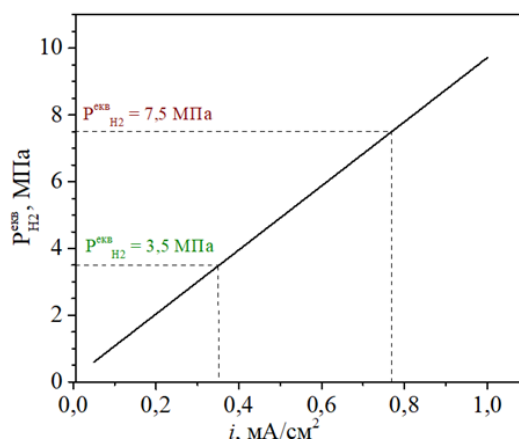


Рис. 2. Залежність між еквівалентним тиском водню в трубі $P_{H_2}^{екв}$ за його фугитивністю, виходячи з величини густини струму наводнювання i

Для обґрунтування (перевірки) критерію вибрали два значення тиску водню: 3,5 та 7,5 МПа. Визначили, що для тиску водню 3,5 МПа еквівалентною є фугитивність 35,5 атм і, відповідно, густина струму катодної поляризації за вибраним режимом електролітичного наводнювання $i = 0,35$ мА/см², тоді як для тиску водню 7,5 МПа фугитивність – 76,1 атм, а $i = 0,77$ мА/см².

Припустивши, що між параметрами J_{0H} та i лінійна залежність, провели розрахунок залежності між параметрами J_{0H} та v для $i = 0,35$ та $0,77$ мА/см². Дані представлені у табл. 1 та на рис. 3. Залежність має наступний вигляд:

$$J_{0H} = 26 \cdot v + 36 - 12 \cdot i. \quad (6)$$

Табл. 1.

Експериментальні і розрахункові дані параметра J_{0H} для експлуатованої сталі 17Г1С

Експеримент		Розрахунок		Розрахунок		Експеримент	
$i = 0,05$ мА/см ²		$i = 0,35$ мА/см ²		$i = 0,77$ мА/см ²		$i = 1,0$ мА/см ²	
v , мм/хв	J_{0H} , Н/мм	v , мм/хв	J_{0H} , Н/мм	v , мм/хв	J_{0H} , Н/мм	v , мм/хв	J_{0H} , Н/мм
0,5	46,6	0,5	44,8	0,5	39,76	0,5	37,9
0,05	43,0	0,05	33,1	0,05	28,06	0,05	27,5
0,005	30,5	0,005	31,93	0,005	26,89	0,005	21,4

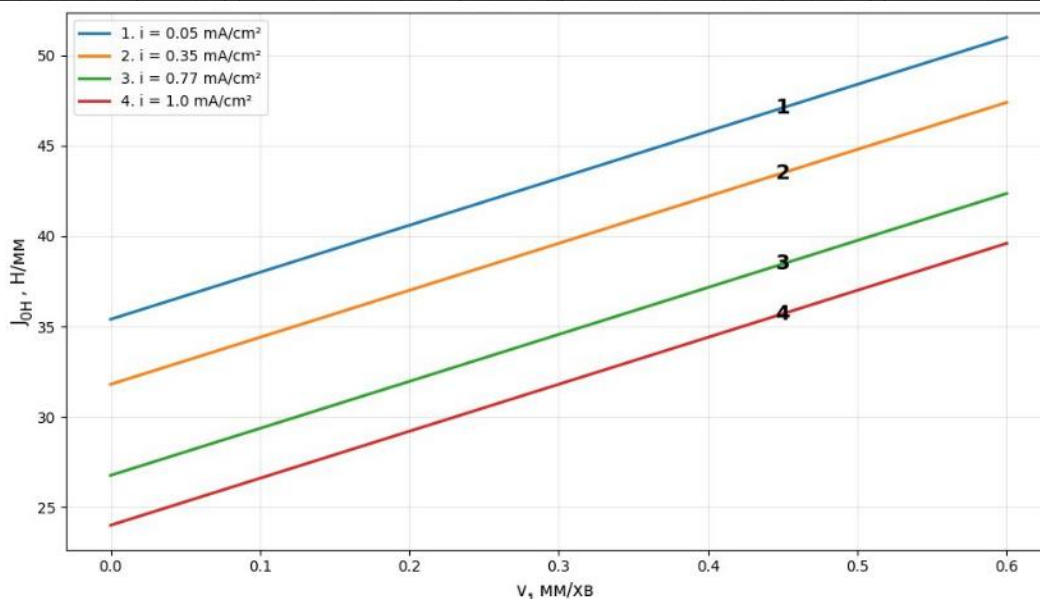


Рис. 3. Залежність параметра J_{0H} від швидкості навантаження для поздовжніх зразків 38 років експлуатованої сталі 17Г1С після електролітичного наводнювання за $i = 0,05$ (1); $0,35$ (2); $0,77$ (3) та $1,0$ mA/cm^2 (4) відповідно до вибраного режиму

Порівняння експериментальних значень параметра J_{0H} та прогнозованих згідно з залежністю (6) наведено на рис. 4. Середньо-квадратична похибка прогнозованих та експериментальних даних складає $3,16$ Н/мм.

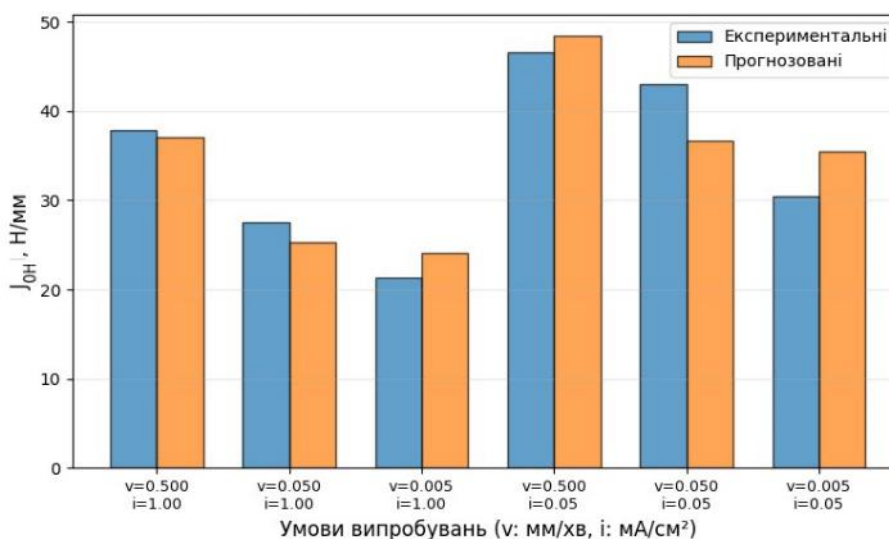


Рис. 4. Порівняння експериментальних значень параметра J_{0H} та прогнозованих згідно з залежністю (6)

Отримані розрахункові результати вказують, що за швидкості навантаження $v = 0,5 \dots 0,005$ мм/хв значення параметра J_{0H} не є нижчими за гранично допустиме ($13,3$ Н/мм) навіть за високої інтенсивності наводнювання, що вказує на можливість за прийнятим критерієм визнати придатною сталь для подальшої експлуатації за таких умов наводнювання (максимальний еквівалентний тиск водню $9,71$ МПа, який відповідає вибраному режиму електролітичного наводнювання за $i = 1,0$ mA/cm^2).

При обґрунтуванні гранично допустимих мінімальних значень показників опору крихкому руйнуванню важливо брати до уваги також можливий напружений стан у вершині внутрішньої тріщини від тиску водню (в параметрах коефіцієнту інтенсивності напружень (КІН), а при потребі і J -інтеграла). Підхід ґрунтується на припущенні, що в експлуатованих трубах газопроводів можуть бути тріщини певних розмірів (глибини a_{cr}), які з різних причин не були виявлені дефектоскопією. Нами розглянуто $a_{cr} = 1\text{--}2$ мм.

Згідно з запропонованим підходом прийнято, що сталь досліджуваного експлуатованого трубопроводу досягає граничного стану за умови, що її в'язкість руйнування K_H досягла значення $K_H^{cr}(2)$, яке відповідає коефіцієнту інтенсивності напружень, що реалізується у вершині тріщини за експлуатаційного тиску водню у трубі. Тобто наявна тріщина у стінці труби почне поширюватися коли показник тріщиностійкості наводненого металу K_H знизиться до рівня коефіцієнту інтенсивності напружень K_H^{cr} , що реалізується у вершині тріщини від експлуатаційних напружень.

Для цього у роботі, базуючись на підходах лінійної механіки руйнування, обчислено КІН для труби 1220 x 12 мм для двох значень тиску газу в трубі 3,5 і 7,5 МПа за наявності в ній на внутрішній поверхні напівеліптичної тріщини з осовою або коловою орієнтацією (рис. 5) глибиною $a = 1$ і 2 мм та співвідношенням глибини тріщини до напівдовжини $a/c = 1/3$ та $2/3$ [10].

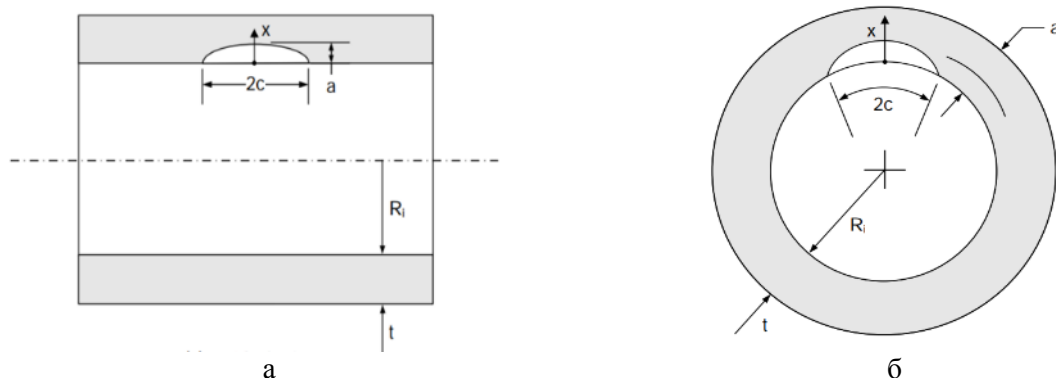


Рис. 5. Схеми труби з внутрішніми напівеліптичними тріщинами осової (а) та колової (б) орієнтації [10]

Для розрахунку КІН для напівеліптичних тріщин в циліндрі в осьовому та коловому напрямку використовували формули відповідно до API 579-1 [10]:

$$K_I = \frac{pR_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \left[2G_0 - 2G_1 \left(\frac{a}{R_i} \right) + 3G_2 \left(\frac{a}{R_i} \right)^2 - 4G_3 \left(\frac{a}{R_i} \right)^3 + 5G_4 \left(\frac{a}{R_i} \right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}, \quad (7)$$

$$K_I = \left[G_0 \left(\frac{pR_o^2}{R_o^2 - R_i^2} + \frac{F}{\pi(R_o^2 - R_i^2)} \right) \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}}. \quad (8)$$

де

$$Q = 1 + 1.464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65}, \quad (9)$$

R_i – внутрішній радіус труби 598 мм, R_o – зовнішній радіус труби 610 мм, φ – параметричний кут, $\frac{2\varphi}{\pi} = 0$ – відповідає точці на поверхні, $\frac{2\varphi}{\pi} = 1$ – найбільш глибокій точці тріщини. Значення коефіцієнтів $G_j \left(\frac{a}{c}, \frac{a}{t}, \frac{t}{R}, \varphi \right)$ – згідно з API 579-1 [9].

У табл. 2 наведено результати розрахунків КІН для колових та осових тріщин на внутрішній поверхні труби.

Табл. 2.

Результати розрахунків КІН (МПа·√м) для поверхневих напівеліптичних тріщин

Тиск P, МПа	Глибина a, мм	Осова орієнтація		Колова орієнтація	
		$a/c = 1/3$	$a/c = 2/3$	$a/c = 1/3$	$a/c = 2/3$
3,5	1	9,95	8,12	4,99	4,05
	2	14,18	11,48	7,12	5,72
7,5	1	21,32	17,40	10,69	8,68
	2	30,38	24,60	15,26	12,25

Обчислені значення КІН (табл. 2) вказують на те, що за наведених умов навантаження та геометрії тріщини вони не досягають критичного значення 55 МПа·√м. Це вказує на можливість безпечної подальшої експлуатації труби навіть за довжини тріщини 2 мм та максимального тиску 7,5 МПа. Для параметрів тріщини, за яких отримали найвищий КІН (для $P = 7,5$ МПа, довжини $a = 2$ мм та $a/c = 1/3$) додатково розраховували КІН за довжини тріщини 3 мм – 38,29 МПа·√м. Відповідно, рівень КІН для більшої довжини тріщини та її глибини вже може сягати близького до граничного значення і експлуатація труби з такою тріщиною може бути проблематичною.

Проведений аналіз слід розглядати як перший етап в обґрунтуванні безпечної експлуатації трубопроводів в контексті транспортування водню.

Висновки. Тривало експлуатована сталь магістрального газопроводу є чутливою до водневого окрихнення за параметром тріщиностійкості, що особливо проявляється за низьких швидкостей навантаження зразків та високої інтенсивності наводнювання. Запропоновано критерій граничного стану сталей за показником в'язкості руйнування, який визначається експериментально методом J -інтеграла з урахуванням умов наводнювання, тиску газу в трубі, наявності тріщиноподібних дефектів та ступеня експлуатаційної деградації. Показано, що для сталі 17Г1С після тривалої експлуатації за певних режимів наводнювання та низьких швидкостей навантаження тріщиностійкість може знижуватись до граничного рівня, що свідчить про втрату її придатності до подальшої експлуатації, зокрема, в умовах транспортування водню. Розрахунки коефіцієнта інтенсивності напружень для напівеліптичних тріщин у трубах засвідчили, що за розглянутих умов навантаження та геометрії дефектів рівні КІН не досягають граничного значення, що вказує на можливість безпечної експлуатації труб з дефектами глибиною до 2 мм при тиску до 7,5 МПа. Запропонований підхід може бути використаний для оцінювання роботоздатності сталей магістральних газопроводів при їх перепрофілюванні для транспортування водню, а також для розробки критеріїв їх безпечної експлуатації з урахуванням експлуатаційної деградації сталей та впливу водню.

Список використаних джерел.

1. Campari A., Ustolin F., Alvaro A., Paltrinieri N. A review on hydrogen embrittlement and risk-based inspection of hydrogen technologies // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2023. – Vol. 48, No. 90. – P. 35316–35346.
2. Zvirko O., Tsyulnyk O., Venhryniuk O., Nykyforchyn H. Hydrogen related issues at hydrogen transport via existing gas pipelines. In: *Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure*. Springer, Cham. – 2025. – P. 210–219.
3. Dadfarnia M., Sofronis P., Brouwer J., Sosa S. Assessment of resistance to fatigue crack growth of natural gas line pipe steels carrying gas mixed with hydrogen // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2019. – Vol. 44, No. 21. – P. 10808–10822.
4. Cabrini M., Sinigaglia E., Spinelli C., Tarenzi M., Testa C., Bolzoni, F.M. Hydrogen embrittlement evaluation of micro alloyed steels by means of J -integral curve // *Materials*. – 2019. – Vol. 12, Art. No. 1843. – P. 1–17.
5. Kyriakopoulou H.P., Karmiris-Obratański P., Tazedakis A.S., Daniolos N.M., Dourdounis E.C., Manolakos D.E., Pantelis D. Investigation of hydrogen embrittlement susceptibility and fracture toughness drop after in situ hydrogen cathodic charging for an X65 pipeline steel // *Micromachines*. – 2020. – Vol. 11, Art. No. 430. – P. 1–20.
6. Maruschak P.O., Danyliuk I.M., Bishchak R.T., Vuherer T. Low temperature impact toughness of the main gas pipeline steel after long-term degradation // *Central European Journal of Engineering*. – 2014. – Vol. 4. – P. 408–415.
7. Zvirko O.I. In-service degradation of structural steels (A Survey) // *Materials Science*. – 2022. – Vol. 57, No. 3. – P. 319–330.
8. Nykyforchyn H.M., Zvirko O.I., Tsyulnyk O.T., Venhryniuk O.I. Assessing hydrogen embrittlement of gas pipeline steels using fracture mechanics approaches // *International Applied Mechanics*. – 2025. – Vol. 61. – P. 207–211.
9. Nykyforchyn H., Tsyulnyk O., Krechkovska H., Hredil M., Venhryniuk O. The effect of in-service degradation of X52 gas pipe steel on fracture toughness of hydrogenated specimens evaluated by the J -integral method // *Procedia Structural Integrity*. – 2025. – Vol. 68. – P. 861–867.
10. API 579-1/ASME FFS-1, Fitness-For-Service. – June, 2016.
11. Standard test method for J -integral characterization of fracture toughness. ASTM. E 1737. Unified method of test for the determination of quasistatic fracture toughness.
12. ASME B31.12. Hydrogen Piping & Pipelines. – Digital Book. – ASME, 2023. – 268 p.
13. Liu Q., Gray E., Venezuela J., Zhou Q., Tapia-Bastidas C., Zhang M., Atrens A. Equivalent hydrogen fugacity during electrochemical charging of 980DP steel determined by thermal desorption spectroscopy // *Advanced Engineering Materials*. – 2018. – Vol. 20, No. 1, Art. No. 1700469.

Рецензент: Никифорчин Григорій Миколайович, провідний науковий співробітник відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України, д.т.н., проф.

М.Л. Рябчиков, О.Л. Ткачук, Т.М. Головенко

Луцький національний технічний університет

ПОБУДОВА БРЕНДУ МОДНОГО ОДЯГУ НА ПРИНЦИПАХ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

У статті досліджено теоретичні та практичні засади формування бренду модного одягу на принципах сталого розвитку. Проаналізовано сучасні підходи до сталого брендингу, зокрема концепції *slow fashion*, економіки замкненого циклу та міжнародні стандарти екологічної сертифікації. Узагальнено поведінкові чинники, що впливають на лояльність споживачів до сталих брендів, а також визначено ключові бар'єри впровадження сталих практик у *fashion-індустрії*. Особливу увагу приділено характеристиці текстильних матеріалів із позиції їх екологічного впливу та можливості переробки. Наведено порівняльний аналіз переробки основних волокон і систематизовано конструктивні принципи створення сталого одягу, такі як модульність, ремонтпридатність, *zero-waste* дизайн, моно-матеріальність та довговічність. На основі узагальнених вимог розроблено колекцію чоловічого одягу, що відображає можливості практичного застосування еко дизайн-підходів. Результати продемонстрували, що інтеграція екологічних матеріалів, відповідальних технологій та продуманої конструкції дозволяє підвищити функціональність, зменшити ресурсомісткість та продовжити життєвий цикл виробів. Дослідження підкреслює необхідність комплексного підходу до сталого брендингу, який охоплює не лише продукти і матеріали, а й комунікацію, виробничі процеси, поведінкові аспекти та бізнес-моделі.

Ключові слова: сталий брендинг; циркулярна економіка; еко дизайн; модульність одягу; екологічний слід.

M.L. Riabchykov, O.L. Tkachuk, T.M. Holovenko

BUILDING A FASHION BRAND BASED ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT PRINCIPLES

The article examines the theoretical and practical foundations of building a fashion brand on the principles of sustainable development. It analyzes contemporary approaches to sustainable branding, including the concepts of *slow fashion*, the circular economy, and international environmental certification standards. The study summarizes behavioral factors that influence consumer loyalty to sustainable brands and identifies the key barriers to implementing sustainable practices in the fashion industry. Particular attention is paid to the characteristics of textile materials in terms of their environmental impact and recyclability. A comparative analysis of the recyclability of major fiber groups is presented, and design principles for sustainable garments are systematized, including modularity, repairability, *zero-waste* design, *mono-materiality*, and *durability*. Based on these principles, a men's clothing collection was developed, demonstrating the practical application of eco-design solutions. The results show that integrating eco-friendly materials, responsible technologies, and carefully considered construction can improve functionality, reduce resource intensity, and extend the product life cycle. The study highlights the necessity of a holistic approach to sustainable branding that encompasses not only the product and materials, but also communication, production processes, consumer behavior, and business models.

Keywords: sustainable branding; circular economy; ecodesign; clothing modularity; ecological footprint.

Problem Statement. The contemporary fashion industry is one of the most dynamic yet at the same time one of the most environmentally intensive sectors of the global economy. According to international organizations, clothing production entails significant consumption of water and energy and is a major source of environmental pollution due to the generation of textile waste and greenhouse gas emissions. These challenges shape a new global demand – the creation of brands that reflect the principles of sustainable development and minimize their negative impact on the environment.

Under these conditions, sustainable branding is becoming a strategic tool for ensuring the competitiveness of companies. Consumers increasingly prefer products with a transparent origin that comply with ethical standards and demonstrate a responsible attitude toward resources. However, building a sustainable brand is a complex process that requires aligning the environmental, social, and economic dimensions of a company's activities.

Analysis of Recent Research and Publications. The main branding strategies in sustainable fashion business include positioning through *slow fashion*, emphasizing material provenance, ethical working conditions, and service components (repair/upcycling). This is confirmed by studies that consider *slow fashion* as a communication strategy and a tool for brand positioning [1].

From the perspective of marketing and consumer behavior, research indicates that the perception of sustainability strengthens purchase intention in certain segments, but the effect depends on trust in labels/certifications and on consumers' willingness to pay a price premium. At the same time, there is a pronounced gap between environmental awareness and actual behavior (the attitude-behavior gap) [2]. A number of publications emphasize the importance of communication and trust [3]. Third-party certificates and indicators can enhance credibility, yet some tools (such as the Higg MSI) are criticized for their methodology, which generates risks of greenwashing and distrust. Therefore, brand communication must be transparent and evidence-based.

© М.Л. Рябчиков, О.Л. Ткачук, Т.М. Головенко

In terms of business models and profitability, the shift to a sustainable model requires rethinking the value chain. Some studies demonstrate potential pathways to profitability (revenue diversification, service-based models, local production). However, the issue of long-term financial sustainability for small and medium-sized brands remains unresolved [4]. Research on design and circularity highlights design as a driver of change (durability, repairability, modularity) and stresses the importance of integrating circular practices into product strategy as a prerequisite for the practical implementation of a sustainable brand [5].

The review of the state of the art reveals a number of gaps and unresolved issues in relation to sustainable fashion brands.

First, the problem of standardized impact metrics for fashion brands remains unresolved. There is no widely accepted, industry-specific system for assessing “brand sustainability,” which complicates cross-brand comparison and communication with investors and consumers [6]. The review also identifies the local (Ukrainian) context as a research vacuum. Most empirical studies focus on Western Europe, Asia, and the United States; there is a lack of research on Ukrainian consumers, local supply chains, policy and economic barriers, and cultural factors in brand building under post-conflict/war conditions. The relevance of such directions is confirmed in international benchmarks [7] and in a small number of Ukrainian studies [8].

Second, the long-term profitability of small sustainable brands has not been convincingly demonstrated. It remains unclear which business models actually generate profit in different market segments, as there are not enough randomized empirical studies [9]. Open questions persist as to why conscious intentions do not translate into purchases (price, availability, status codes of fashion) and which brand practices can change this situation [10].

There is existing research on communication in social networks, but there is a lack of systematic experiments comparing specific tactics (storytelling, evidence-based documentation, AR links to life cycle assessment (LCA) results) in terms of their impact on consumer behavior [11]. Environmental metrics are relatively widespread, while social aspects are often communicated in a merely declarative manner; there is a shortage of transparent data and documented case confirmations [12]. Cross-national comparisons are also lacking regarding how public policies (taxation, incentives, standards) influence the opportunities for building a sustainable brand [13].

A number of publications outline potential directions for further research in this field. In particular, authors propose comprehensive case studies of Ukrainian brands [14]. There is a need for comparative analysis of incentives and barriers for brands in Eastern European countries (including Ukraine) and their impact on the pace of transition to sustainable models [15].

Task formulation. The aim of this study is to investigate the theoretical and practical foundations of building a fashion brand based on the principles of sustainable development and to identify the key sustainable branding tools in the contemporary fashion industry.

The research objectives are as follows:

- to analyze the essence of sustainable branding in the context of the fashion industry;
- to systematize the approaches and standards applied in sustainable fashion;
- to examine practical tools for building sustainable brands;
- to identify behavioral factors influencing consumer loyalty to sustainable brands;
- to determine the barriers and prospects for the development of sustainable branding.

Presentation of the Main Material.

Theoretical Foundations of Building a Brand on the Principles of Sustainable Development.

Sustainable development in the fashion sector implies producing goods with minimal negative impact on the environment, as well as treating all people involved in the value chain responsibly. This includes the use of eco-friendly materials, optimization of energy consumption, innovative recycling technologies, fair working conditions, and process transparency.

Sustainable branding is the process of building a brand that integrates marketing activities with the values of responsible consumption and ethical business conduct. Its foundations include: environmental performance (eco-friendly materials, low-impact production); social responsibility (fair working conditions, fair remuneration); ethics (supply chain transparency, absence of exploitation); and economic efficiency (product durability, minimized costs of recycling and disposal).

International standards and practices show that the key global concepts include: Sustainable Fashion – an approach to design and production that reduces the environmental footprint; Circular Economy – a closed-loop model in which products are created with their subsequent recycling in mind; and certifications such as GOTS, Fair Trade, and OEKO-TEX, which ensure transparency and quality control at all stages of production.

The value model of a sustainable brand presupposes a harmonious combination of four components: environmental, social, ethical, and economic. A brand built on these foundations fosters lasting consumer trust and a positive reputation.

The practical aspects of forming a sustainable fashion brand consist of a series of stages and steps. The sustainable product development stage [16] is based on the use of organic or recycled materials; low-impact dyeing technologies; eco-design that extends the life cycle of garments; and modular or transformable designs that reduce the amount of waste generated.

The communication strategy of a sustainable brand should be based on openness regarding materials and suppliers; an evidence-based approach (infographics, eco-labels, reports); and positioning the brand as a bearer of a social mission.

Transparency and traceability make it possible to follow the product's journey from raw material to finished garment. This strengthens consumer trust and is a key factor in combating greenwashing. Elements of social responsibility in the fashion industry include ensuring fair wages; rejecting exploitation and child labor; supporting local manufacturers; and establishing ethical standards for interaction.

A sustainable brand uses storytelling to demonstrate its values, mission, and concrete actions. Eco-labeling confirms compliance with international standards.

The interaction of a sustainable brand with consumers is determined by a number of factors, among which one of the most important is consumer behavioral trends. Contemporary generations tend to prefer brands with a clear social and environmental stance. They evaluate not only the product itself but also the story behind its creation.

The key loyalty factors are determined by the following indicators: transparency of the company's activities; high quality and durability of products; consistency with declared values; and authenticity of communication. In the fashion segment, effective tools for engagement include educational content on the environmental impact of textile production; user-generated content and the creation of communities of responsible consumers; as well as take-back and reuse programs for clothing.

Among the main barriers to the development of a sustainable brand are the high cost of eco-friendly materials, insufficient recycling infrastructure, low consumer awareness in some countries, and the risks of greenwashing, which undermine trust in sustainable brands as a whole.

Practical Directions for Implementing Sustainable Brands

The practical directions for implementing sustainable brands encompass environmental, economic, social, technological, and communication-related actions. A successful sustainable brand is not only an environmentally safe product, but also a comprehensive strategy that transforms the business model, corporate culture, and interaction with consumers.

In sustainable clothing production, the most significant are organic natural fibers, recycled synthetic materials, and novel biomaterials that reduce environmental impact. The choice among them depends on the market segment: everyday wear, sportswear, premium fashion, or the vegan segment.

Indicators of resource efficiency and circularity of textile materials determine their recyclability, in particular the percentage of material that can be reused or recycled. The values of this parameter for different materials are presented in Fig. 1.

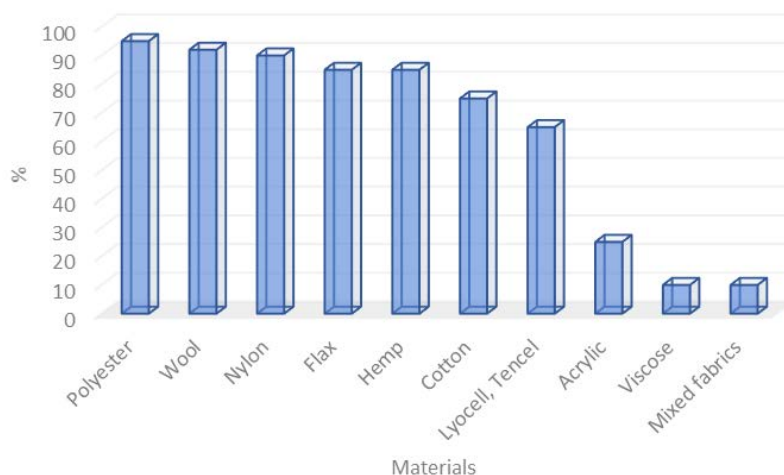


Fig. 1. Comparison of the recyclability of textile materials

When designing garments on the principles of sustainable development, it is advisable to take into account the use of detachable, easily replaceable trimming and hardware elements, as well as segmented components.

In creating such garments, it is recommended to consider the principles of modularity; construction solutions that facilitate recycling; low-waste (zero-waste) design; versatile and durable cuts; designs that are easy to care for; and the possibility of reusing individual components [17].

The requirements for designing clothing based on the principles of sustainable development are presented in Table.

Table

Design features of sustainable clothing		
Group of design features	Example of design solution	Explanation
1. Ease of repair	Detachable cuffs and collars	Allow easy replacement of the most wear-prone components.
	Externally sewn zippers	The zipper can be replaced quickly without complex disassembly of the garment.
	Patch pockets sewn on top of seams	Easier to re-stitch or replace without affecting the main construction.
2. Modularity and transformability	Jacket with detachable sleeves	Converts into a vest, increasing functionality.
	Convertible trousers	The lower part of the legs can be removed, turning the trousers into shorts.
	Removable insulating linings	Allow the garment to be used in different seasons.
3. Facilitated recycling	Single-material garment (mono-material)	Simplifies sorting and textile recycling.
	Minimal amount of hardware/trims	Fewer components make the garment easier to disassemble into parts.
	Avoidance of complex composite fabrics	Reduces problems with separating fibers during recycling.
4. Zero-waste construction	Rectangular or simple geometric pattern pieces	Pattern layouts use fabric efficiently, minimizing cutting waste.
	Garments designed using the “envelope cutting” method	Pattern pieces are cut as a single surface with minimal off-cuts.
5. Durability and versatility	Adjustable volume (drawstrings, casings)	A single garment can fit different body types and “grow” with the wearer.
	Double or reinforced seams	Increase the service life of the garment.
	Classic or minimalist cut	Reduces the risk of the item becoming aesthetically outdated.
6. Easy care	Flat seams	Accumulate less dirt and are easier to iron.
	Detachable lining elements	The lining can be washed separately from the outer garment.
7. Reuse of components	Standardized pocket and flap sizes	Can be transferred to other garments or reused.
	Detachable hardware (screw-on buttons, carabiners)	Enables the reuse of metal components.

Based on the table, a design prompt was formulated for developing a clothing collection on the principles of sustainable development: “Design a men’s clothing collection (a jacket and trousers) based on sustainable development principles. The garments should feature detachable cuffs and collars, externally sewn zippers, patch pockets sewn on top of seams, a jacket with detachable sleeves, convertible trousers, removable insulating linings, pattern pieces of rectangular geometric shape, garments designed using the

envelope-cutting method, adjustable volume (drawstrings, casings), double or reinforced seams, and a classic or minimalist cut.”

The results of creating this collection are presented in Fig. 2.



Fig. 2. Clothing collection designed on sustainable development principles

As a result of analyzing the clothing collection shown in Fig. 2 from the standpoint of sustainable development – with an emphasis on durability, functionality, minimalism, and the potential environmental friendliness of materials and production – the following conclusions can be drawn.

All four looks are built around concise, basic silhouettes: short jackets, straight trousers, and neutral footwear. Such aesthetics are key for a sustainable wardrobe, as they do not go out of style quickly, are easy to combine with other garments, and require less frequent replacement.

The appearance of the jackets and trousers suggests dense nylon or recycled polyamide, i.e. technical fabrics with water-repellent finishes. The more natural tones are characteristic of outdoor brands that employ sustainable approaches (for example, through the use of recycled materials).

Color harmony as an element of a conscious wardrobe is defined by several factors. The palette includes dark blue, olive, brown, and black. These are universal, nature-inspired colors that are independent of short-term trends, conceal signs of wear, and reduce the need for frequent purchases of new items. Such colors are fundamental to the concept of a capsule wardrobe.

The looks are constructed by combining versatile trousers (straight or relaxed), basic layers (T-shirts, sweaters), and jackets with technical details. This creates multifunctional clothing suitable for wearing in the city, in nature, and in everyday situations. The more usage scenarios can be developed for a garment, the more sustainable the wardrobe becomes.

The clothing appears to be oriented toward modularity and layering, which allows adaptation to different weather conditions, reduces seasonality, and diminishes the need to buy highly specialized items for particular environments. The silhouettes and design approach are reminiscent of brands that typically use responsible supply chains, adhere to ethical labor standards, and minimize production waste.

The outfits in the photos align well with sustainable development principles thanks to minimalist design, universal colors, potentially functional and durable materials, multifunctionality and layering potential, and their compatibility with the idea of a capsule wardrobe. Even without brand information, it can be stated that the silhouettes and composition correspond to the contemporary concept of conscious fashion.

Conclusions. In the course of the study, the theoretical foundations for building a fashion brand on the principles of sustainable development were defined, and practical tools that ensure environmental performance, social responsibility, and economic efficiency in the fashion business were analyzed. A review of recent scientific sources showed that sustainable branding is becoming a key strategic direction in the development of the global fashion industry. However, this process is accompanied by a number of

challenges, ranging from the lack of transparent metrics of environmental impact to limited recycling infrastructure and the risks of greenwashing.

It has been demonstrated that an effective sustainable brand is based on a comprehensive value system that includes environmentally friendly materials, transparent supply chains, ethical working conditions, durability-oriented design, and responsible communication with consumers. The synthesis of international practices (Circular Economy, Slow Fashion, GOTS, OEKO-TEX, etc.) has shown that standards have become an integral element in strengthening brand trust and a tool for reducing the environmental footprint of products.

The analysis of textile materials confirmed that raw material selection is critically important for a sustainable brand. Natural organic fibers, recycled synthetic materials, and novel biomaterials demonstrate the best recyclability indicators and the lowest environmental impact. The comparative analysis (Fig. 1) revealed significant differences between material groups and made it possible to identify those most suitable for circular production models.

An important practical component of the study was the development of design solutions that ensure garment longevity and repairability: modularity, detachable elements, simplified recycling of mono-materials, zero-waste cutting technologies, and the possibility of reusing trims and components. The presented collection demonstrates how eco-design principles can be integrated at the levels of silhouette, construction, and functionality. The analysis of the looks confirmed that minimalist design, a universal color palette, technical fabrics, and the ideology of a capsule wardrobe help increase product resilience and extend the life cycle of garments.

Thus, the results of the study allow us to assert that a successful sustainable brand in the fashion industry requires not isolated environmental measures, but a holistic systemic approach that encompasses the product, the production process, the business model, and communication. The proposed recommendations, construction principles, and design outcomes can be used to create new collections, to develop educational programs in eco-design, and as practical guidelines for Ukrainian brands seeking to integrate the principles of sustainable development into their activities.

References:

1. Jung S., Jin B. E. Slow fashion branding: understanding what consumers value most. *Journal of Brand Management*. 2022. Vol. 29, No. 2. P. 141–149. DOI: <https://doi.org/10.1057/s41262-021-00256-4>.
2. Velasco-Molpeceres A., Zarauza-Castro J., Pérez-Curiel C., Mateos-González S. Slow Fashion as a Communication Strategy of Fashion Brands on Instagram. *Sustainability*. 2022. Vol. 15, No. 1. Article 423. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15010423>.
3. Sarokin S. N., Bocken N. Pursuing profitability in slow fashion: Exploring brands' profit contributors. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 444. Article 141237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141237>.
4. Li M., Choe Y. H., Gu C. How perceived sustainability influences consumers' clothing preferences. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Article 28672. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-80279-4>.
5. Schiaroli V., Dangelico R. M., Fraccascia L. Mapping sustainable options in the fashion industry: A systematic literature review and a future research agenda. *Sustainable Development*. 2025. Vol. 33, No. 1. P. 431–464. DOI: <https://doi.org/10.1002/sd.3129>.
6. D'Itria E., Vacca F. Shaping sustainable solutions in fashion through design-led strategies, approaches, and practices. *Discover Sustainability*. 2024. Vol. 5. Article 409. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00624-5>.
7. Petänen P., Tuovila H., Heikkilä P. Strategic marketing of sustainable fashion: Exploring approaches and contradictions in the positioning of fashion rental. *Cleaner Production Letters*. 2024. Vol. 7. Article 100075. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clpl.2024.100075>.
8. Соловій І. Sustainable fashion / стала мода: дефініції та їхнє трактування в українському науковому дискурсі. *Деміург: ідеї, технології, перспективи дизайну*. 2024. Т. 7, № 2. С. 248–262. DOI: <https://doi.org/10.31866/2617-7951.7.2.2024.315457>.
9. Behre B., Cauberghe V. Signaling sustainability in online fashion consumption: The role of credibility induced by certification labels. *Cleaner and Responsible Consumption*. 2025. Vol. 17. Article 100287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2025.100287>.
10. Hasan M. A., Talukder S. C., Lakner Z., Temesi Á. Clothing Brands' Sustainability Practices: A Bibliometric Approach. *Administrative Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 6. Article 221. DOI: <https://doi.org/10.3390/admsci15060221>.

11. Kemi A. P., Hasan M. A. Sustainable clothing consumption behaviour: a bibliometric review. *Discover Sustainability*. 2025. Vol. 6. Article 624. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01549-3>.
12. Соловій І. Особливості комунікації сталої моди в Україні: у фокусі уваги бренди та споживачі. *APHN Journal*. 2024. № 79(2). С. 121–128. DOI: <https://doi.org/10.24919/2308-4863/79-2-18>.
13. Лісица В. В. Сучасні виклики індустрії моди в контексті забезпечення її сталого розвитку. *Науковий вісник Полтавського університету економіки і торгівлі*. 2025. № 1(115). С. 152–161. DOI: <https://doi.org/10.37734/2409-6873-2025-1-22>.
14. Колосніченко О., Кротова Т., Пашкевич К. Sustainable Fashion як тренд сучасності. *Мистецтвознавство України*. 2021. № 21. С. 35–42. DOI: <https://doi.org/10.31500/2309-8155.21.2021.254670>.
15. Дугінець Г. Особливості холістичного маркетингу глобальної індустрії моди в XXI столітті. *Bulletin of Sumy National Agrarian University*. 2023. № 3. С. 5–8. DOI: <https://doi.org/10.32782/bsnau.2023.3.5>.
16. Рябчиков М. Л., Головенко Т. М., Назарчук Л. В., Ткачук О. Л., Шовкомуд О. В. Технології та дизайн у модній індустрії : навч. посіб. Луцьк : ЛНТУ, 2023. 855 с.
17. Зимогляд Н. С., Рябчиков М. Л. Проектування швейних виробів в моделях : навч. посіб. Харків : ZEBRA, 2011. 162 с.

Рецензент: Назарчук Людмила Володимирівна, зав. кафедри технологій легкої промисловості, к.т.н., доцент Луцького національного технічного університету

В.Г. Михайлик, М.В. Шаповал, А.І. Криворот

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМУ ЄМНОСТІ КОМБІНОВАНОГО КОМПЕНСАТОРА ЗА РОБОТОЮ АКУМУЛЮВАННЯ РОЗЧИНУ ОДНОПОРШНЕВОГО ГІДРОПРИВОДНОГО РОЗЧИНОНАСОСА

Аналіз сучасних насосів вказує на пошук шляхів спрощення їх конструкцій і на вдосконалення принципової схеми однопоршневих розчинонасосів при зведенні до мінімуму пульсацій у трубопроводі під час транспортування будівельних розчинів.

Зниження пульсацій тиску в сучасних однопоршневих розчинонасосах забезпечується застосуванням компенсаторів тиску у вигляді повітряних ковпаків різного об'єму. Але повітряні компенсатори, виконуючи свою функцію поряд з перевагами, мають суттєві недоліки, а саме: об'єм стиснутого повітря, що безпосередньо контактує з перекачуваним розчином інтенсивно видаляється з компенсатора під час роботи розчинонасоса. Особливо інтенсивність видалення повітря зростає при тиску подачі розчину (вище 1,5 МПа). При цьому корисний об'єм компенсатора зменшується, ефективність акумулювання розчину компенсатора суттєво знижується, а ступінь пульсацій розчину пропорційно зростають.

У статті проаналізовано роботу та математично обґрунтовано визначення корисного об'єму на основі правил поведінки газу в ізотермічному процесі нової конструкції комбінованого компенсатора підвищеної ефективності зменшення ступеня пульсацій тиску під час перекачування будівельних розчинів різної рухомості гідроприводним однопоршневим розчинонасосом.

Ключові слова: розчинонасос, комбінований компенсатор, ступінь пульсацій тиску, вільна камера, замкнена камера, будівельний розчин, тиск, закон Бойля–Маріотта.

V.G. Mykhailik, M.V. Shapoval, A.I. Kryvorot

DETERMINATION OF THE CAPACITY OF A COMBINED COMPENSATOR BY THE OPERATION OF THE SOLUTION ACCUMULATION OF A SINGLE-PISTON HYDRAULIC MORTAR PUMP

Analysis of modern pumps indicates the search for ways to simplify their designs and improve the basic scheme of single-piston mortar pumps while minimizing pulsations in the pipeline during the transportation of building mortars.

Reducing pressure pulsations in modern single-piston mortar pumps is ensured by the use of pressure compensators in the form of air caps of various volumes. But air compensators, while performing their function along with advantages, have significant disadvantages, namely: the volume of compressed air that is in direct contact with the pumped solution is intensively removed from the compensator during the operation of the mortar pump. Especially the intensity of air removal increases at the pressure of the solution supply (above 1.5 MPa). In this case, the useful volume of the compensator decreases, the efficiency of the solution accumulation of the compensator significantly decreases, and the degree of solution pulsations increases proportionally.

The article analyzes the work and mathematically substantiates the determination of the useful volume based on the rules of gas behavior in the isothermal process of a new design of a combined compensator of increased efficiency in reducing the degree of pressure pulsations during pumping of mortars of different mobility by a hydraulically driven single-piston mortar pump.

Keywords: mortar pump, combined compensator, degree of pressure pulsations, free chamber, closed chamber, mortar, pressure, Boyle-Mariotte law.

Постановка проблеми. Важливою вимогою до сучасних розчинонасосів є рівномірність подачі штукатурного чи будівельного розчину. Широко розповсюджені однопоршневі розчинонасоси односторонньої дії характеризуються значною пульсацією подачі. Ця обставина є серйозною перешкодою для виконання механізованого соплування до одержання штукатурного шару необхідної товщини, оскільки для нормальної роботи повітряної форсунки й особливо безкомпресорного сопла необхідна стійка подача розчину. У протилежному випадку струмінь штукатурного розчину є нестійким, цілеспрямоване нанесення розчину на оброблювану поверхню стає утрудненим, а втрати розчину суттєво збільшуються. Важливо також, що при рівномірному русі розчину опір його просуванню в трубопроводі у 1,5 рази нижчий, ніж у випадку пульсації швидкості потоку, що позитивно позначається на енергоспоживанні насоса.

Найбільш простим за конструкцією є однопоршневий розчинонасос з гідроприводом поршня та мінімальним "шкідливим" об'ємом усмоктувальної робочої камери, але такий розчинонасос працює за принципом одинарної дії та характеризується значною пульсацією тиску подачі.

Для забезпечення згладжування пульсації тиску до помірного рівня необхідно застосувати у складі розчинонасоса комбінований повітряний компенсатор, який містить дві камери – одна з

вільним, а друга – зі стиснутим повітрям. Перша камера буде працювати при низькому тиску подачі розчину, а друга – при більш високому.

Сумарний корисний приведений до атмосферного тиску об'єм повітря в обох камерах повинен бути таким, щоб забезпечувалося необхідне згладжування пульсацій при робочому тиску подачі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розчинонасос має широкий спектр використання, а саме: при виконанні торкрет-робіт під час нанесення загальних і спеціальних рідких сумішей, для перекачування, подачі як спеціальних розчинів, так і готових передзамішаних сумішей у важких умовах, а також сумішей з регулюванням тиску подачі.

Вітчизняні поршневі розчинонасоси застосовують для перекачування розчинів рухомістю не менше 5...7 см і крупністю фракції не більше 5... 12 мм [1, 6, 14].

Поршневі розчинонасоси марки СО та РНП, РН [1, 6, 14], складаються із електромеханічного привода, всмоктувального та нагнітального патрубків, циліндро-поршневої групи, робочої і клапанної камер із всмоктувальним і нагнітальним кульовими самодіючими клапанами, повітряного ковпака (окрім двопоршневих) для згладжування пульсацій тиску розчину, пульта управління і рами, на якій змонтовані всі складові розчинонасоса. Основними характеристиками поршневих розчинонасосів є: висока продуктивність, високий рівень об'ємного ККД, незалежна подача розчину від розвинутого напору, хороша всмоктувальна здатність, високий ресурс циліндро-поршневої групи (близько 2000 маш-год). Поршневі розчинонасоси призначені для комплектації штукатурних агрегатів і станцій, найпоширеніші та максимально уніфіковані. Також для забезпечення мобільності розчинонасоси монтуються, колісними візками.

Putzmeister P13 (Німеччина)[13] – це надійний штукатурний агрегат, який оснащений поршневим розчинонасосом із подвійною дією та використовується для приготування та подачі штукатурних сумішей з вапна, піску, цементу та інших матеріалів, із важким циклом змішування. Навіть при великих навантаженнях на даний поршневий насос його деталі майже не зношуються через свою надійність і якість.

Розчинонасоси фірми Turbosol (Італія) [8] оснащуються автоматичним пристроєм захисту від надлишкового тиску, пристроєм рециркуляції, пневматичним дистанційним управлінням (пуск/зупинка).

За модифікацією розчинонасоси оснащені: ES стандартно електродвигуном 5,5 кВт/ EMF електродвигуном із змішувачем 1,5 кВт 180 л/ DS дизелем 10,5 кВт стандарт/ DMF дизелем із змішувачем примусової дії. Агрегати також оснащені: привод насоса 2-швидкісною МКП; запобіжником перевищення тиску; рамним двоколісним візком; вібраційним відсіювачем з ситом 8 мм; системою рециркуляції суміші; вбудованим повітряним компресором 270 л/хв з дистанційним керуванням.

Недоліком розчинонасосів Turbosol є підвищені ступені пульсацій тиску за рахунок одинарної дії роботи, невисокий рівень об'ємного ККД, підвищена металоємність.

Насоси з гідравлічним приводом ще недостатньо відомі на вітчизняному ринку, в той же час як у багатьох країнах світу, наприклад, в США, Німеччині, Норвегії, Італії, та інших країнах завдяки своїм перевагам вони широко розповсюджені в багатьох галузях промисловості. На даний час у багатьох розвинених країнах насоси з гідравлічним приводом випускають ряд фірм: Milton Roy (США), Alemite (США), Feluwa Pumpen GMBH (Німеччина), Maritime Hydraulics (Норвегія), Wagner, Dellmeco, FlowMaster, Graco, Tapflo, Wilden Pump & Engineering, Grundfos, Maxroy (США) та ін. [9, 10, 11, 12]. Такі насоси широко використовуються у різних галузях промисловості, і, приміром, з метою відкачування в'язких, корозійно-активних і забруднених середовищ з резервуарів і відстійників, збирання розлитих нафтопродуктів, перекачування бурового розчину і будівельних сумішей, а також в якості насосів-дозаторів під час різних технологічних процесів харчової, хімічної та інших галузях промисловості.

Аналіз наукових джерел, вказує на те, що сучасні насоси є досконалими високотехнологічними агрегатами, які мають високі характеристики і забезпечують високий рівень перекачування різного роду сумішей. Але насоси не є універсальними, а спрямовані здійснювати перекачування обмежений перелік сумішей. Тому питання універсальності насосів питання відкрите, а тому потрібно керуватися багатьма чинниками для досягнення поставлених задач. У теорію і практику економічно доцільнішого трубопровідного транспортування будівельних розчинів розчинонасосами вагомий вклад внесли вчені та інженери: С.І. Алексєєв, М.І. Альошин, С.С. Абель, Ю.М. Баженов, А.М. Баранов, Ю.І. Беляков, М.С. Болотських, В.М. Євстифєєв, І.А. Ємельянова, М.М. Завражин, А.О. Задорожний, Г.В. Івянський, М.С. Канюка, Б.О. Коробко,

І.І. Назаренко, О.Г. Онищенко, С.П. Парфенов, А.М. Проценко, Є.С. Стайченко, В.Д. Топчий, В.У. Уст'янець, Ю.П. Чирков та ряд інших відомих дослідників.

Актуальність дослідження полягає в необхідності підвищення параметрів роботи однопоршневого гідроприводного розчинонасоса за рахунок ефективного акумулювання розчину комбінованим компенсатором та зменшення рівня ступення пульсацій тиску подачі розчину.

Метою дослідження встановлення алгоритму визначення параметрів комбінованого компенсатора, а саме визначення корисного об'єму акумулювання розчину компенсуючого пристрою в такті всмоктування гідроприводним розчинонасосом під час ізотермного процесу (на основі законів Бойля-Маріотта і Гей-Люссака), який протікає під час перекачування розчинів, так як вважається миттєвим.

Викладення основного матеріалу. При проведенні аналізу наявних конструкцій розчинонасосів встановлено ряд переваг насосів із гідроприводом (рис. 1) відносно насосів з механічним приводом, зокрема: високий рівень ККД, надійність під час експлуатації, рівномірність подачі та можливість її безступінчастого регулювання, тривалий термін служби, простота виготовлення, зручність експлуатації, малі розміри й маса. Завдяки вказаним перевагам, будівельна техніка з гідравлічним приводом для транспортування малорухомих сумішей трубопроводами знайшла як в Україні, так і за кордоном широке впровадження. У випадках, коли насос повинен забезпечити змінну продуктивність, застосування насосних агрегатів з гідравлічним приводом стане ще вигіднішим. Це обумовлено наявністю більших габаритів і маси в механічному регульованому приводі порівняно з регульованим гідравлічним приводом [149]. Проте аналіз розчинонасосів із гідроприводом, проведений за даними літературних джерел, свідчить і про те, що конструкціям таких машин притаманні певні недоліки, які гальмують широке застосування гідравлічних приводів у насособудуванні.

Сучасні однопоршнєві розчинонасоси характеризуються високим рівнем ступеня пульсації $\delta \geq 25\%$. Це пов'язано у першу чергу роботою розчинонасоса, який забезпечує подачу тільки в такті нагнітання. Застосування компенсаторів високої ефективності на напірній магістралі розчинонасоса забезпечить стабілізацію тиску та подачі в такті всмоктування.

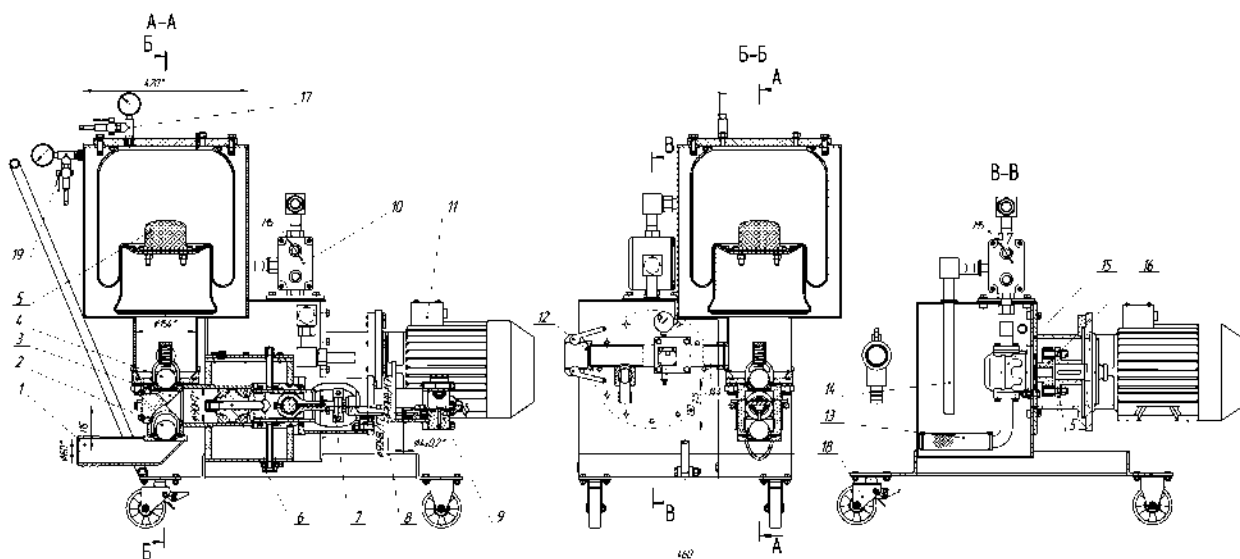


Рис. 1. Конструктивна схема однопоршневого гідроприводного розчинонасоса з комбінованим компенсатором збільшеного об'єму: 1, 12 – усмоктувальний та нагнітальний патрубок; 2, 4 – всмоктувальний та нагнітальний підпружинений кульові клапани; 3 – усмоктувальна камера; 5 – комбінований компенсатор; 6 – поршень з направляючим плунжером; 7 – хомут гідравлічний привідний циліндр з розподільювачем; 8 – гідроциліндр з поршнем і штоком; 9 – золотниковий розподільник; 10 – регулятор подачі гідравлічної рідини; 11 – електродвигун; 13 – фільтр мастильної рідини; 14 – патрубок зливу гідравлічної рідини; 15 – гідронасос шестеренний; 16 – муфта

Необхідно провести дослідження компенсатора, з визначення конструктивної повної ємності, приведеного об'єму до атмосферних умов V_{np} і корисного об'єму $V_{кор}$ розчину (об'єм рідини, що витискається газом (повітрям) з компенсатора під час процесу його повної розрядки, під час

зниження тиску газу в такті всмоктування розчинонасосом). Тому застосування комбінованого компенсатора нового типу з вільною у вигляді циліндра та замкненої у вигляді пневмобалону вантажного автомобіля повинно забезпечити низький рівень ступеня пульсацій $\delta \leq 25\%$.

Добуток корисного об'єму на середній тиск газу в цьому діапазоні тисків визначає зовнішню роботу (енергію) акумулятора.

Під час конструювання та встановлення робочих параметрів компенсатора керуються в основному прагненням отримати мінімальну вагу і об'єм, тобто робочі параметри компенсатора повинні бути такими, щоб при мінімальному конструктивному його об'ємі та заданому мінімальному діапазоні тиску була досягнута максимальна корисна ємність (об'єм) компенсатора.

Якщо виходити з ізотермічного процесу, то приблизно в загальному випадку можна прийняти

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta p}{p}, \quad (1)$$

де ΔV – зміна об'єму газу (або накопиченого об'єму розчину); V – об'єм газу в компенсаторі; p і Δp – середній тиск, та зміна тиску газу.

Згідно рис. 2 і виразу на відміну від капілярних рідин в'язкість газів збільшується з підвищенням температури. Ця залежність досить точно характеризується залежністю Сатерленда

$$\mu = \mu_0 \cdot \left(\frac{T_0 + C}{T + C} \right) \cdot \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2}, \quad (2)$$

де μ_0 і μ – абсолютна в'язкість при вихідній температурі T_0 і температурі T ; C – постійний для даного газу коефіцієнт.

Ця залежність може бути виражена рівнянням

$$\mu = \mu_0 \cdot \left(\frac{T_0 - 273}{T + 273} \right)^n, \quad (3)$$

де n – показник, рівний для повітря $n = 0,76$; T – температура в $^{\circ}K$.

В'язкість газів залежить від тиску і зростає при значних значеннях, як наприклад в'язкість вуглекислого газу до 90 кг/см^2 зростає приблизно в 5 раз.

В реальних умовах при зміні стану газу неминуче відбувається обмін тепла (між газом і стінками компенсатора і розчину), на практиці відбувається політропна зміна стану, яка виражається наступним рівнянням

$$pV^n = \text{const} \text{ і } \frac{p}{\gamma^n} = \text{const}, \quad (4)$$

де n – показник політропи; при $n = 1$ ізотермний і при $n = k$ – адіабатний процеси.

Числове значення показника політропи n можна визначити лише для конкретних умов з урахуванням величини тиску і інтенсивності стиснення або розширення газу і умов відводу тепла, що характерне для нашого випадку.

Необхідно відмітити, що якщо для газових систем, в котрих використовуються двоатомні гази при тисках ($< 1,0 \text{ МПа}$) величина показника політропи процесів спорожнення (і заповнення) вільної камери компенсатора (ємності) практично коливається між показниками ізотермного і адіабатного процесів $k > n > 1$, на відміну процесів в системах високого тиску більше ($< 5,0 \text{ МПа}$).

Інтенсивність теплообміну газу в камерах компенсатора з його стінками та навколишнім середовищем будуть впливати матеріал і форма ємності компенсатора, а також фізичні властивості і параметри застосовуваного газу, властивості навколишнього середовища та інше.

Тому з (рис. 1 5 – комбінований компенсатор) на основі властивостей ідеальних газів характеризується законами Бойля-Маріотта і Гей-Люссака [5].

В нашому випадку роботу компенсатора можна розділити на два режими: при тиску при якому відбувається акумулювання розчину за рахунок об'єму газу вільної камери до рівня тиску у замкненій; і режим при якому відбувається акумулювання розчину за рахунок об'єму газу вільної камери та замкненої при тиску вище тиску $p_{з.к.}$ тиску в замкненій камері.

А тому з урахуванням залежності (3) слідує для ізотермного процесу

$$V_2 = V_1 \frac{p_1}{p_2}; \quad p_2 = p_1 \frac{V_1}{V_2}; \quad (5)$$

де p_1 і V_1 – початковий тиск і об’єм повітря до заповнення (заряджання) компенсатора розчином $V_1 = V_{в.к.} + V_{з.к.} \cdot p_{з.к.}$; $V_{в.к.}$ – об’єм вільної камери компенсатора; $V_{з.к.}$, $p_{з.к.}$ – об’єм та тиск замкненої камери компенсатора

p_2 і V_2 – кінцевий тиск і об’єм повітря в кінці заповнення (заряджання) компенсатора розчином.

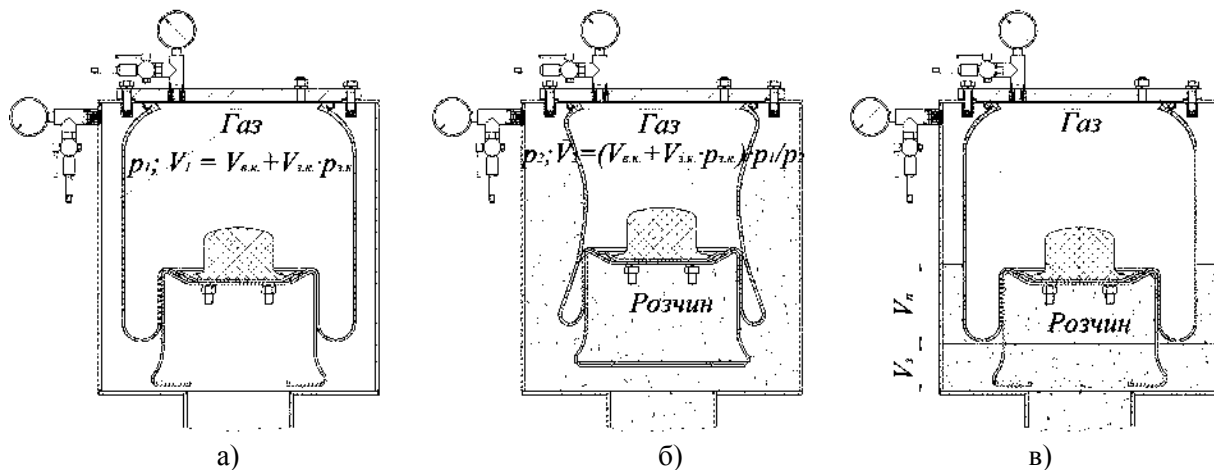


Рис. 2. Зображення роботи компенсатора: а) з початковим тиском у вільній камері; б) з тиском, який вище тиску у замкненій камері; в) процес стиснення газу від початкового $p_{ноч}$ до мінімального робочого p_{min}

Конструктивна ємність (повний об’єм вільної камери) V_k компенсатора рівний початковому об’єму ($V_1 = V_k$), корисний об’єм $V'_{кор}$ повітря рівний різниці об’ємів

$$V'_{кор} = V_1 - V_2 = (V_{в.к.} + V_{з.к.} \cdot p_{з.к.}) - (V_{в.к.} + V_{з.к.} \cdot p_{з.к.}) \cdot \frac{p_1}{p_2}, \quad (6)$$

Підставивши в у залежність (5) маємо

$$V'_{кор} = V_1 \cdot \left(1 - \frac{p_1}{p_2}\right) = V_k \cdot \left(1 - \frac{p_1}{p_2}\right) = (V_{в.к.} + V_{з.к.} \cdot p_{з.к.}) \cdot \left(1 - \frac{p_1}{p_2}\right), \quad (7)$$

Остання залежність справедлива за умови повного витіснення розчину з вільної камери компенсатора при його розрядці.

На практиці тиск p_1 прийнято називати початковим (попереднім) тиском зарядки компенсатора повітряного і позначати $p_{ноч}$ і тиск p_2 – максимальним робочим тиском в кінці зарядки розчином і позначаємо p_{max} .

У відповідності з цим останній вираз прийме вид

$$V'_{кор} = V_k \cdot \left(1 - \frac{p_{ноч}}{p_{max}}\right) = (V_{в.к.} + V_{з.к.} \cdot p_{з.к.}) \cdot \left(1 - \frac{p_{ноч}}{p_{max}}\right), \quad (8)$$

Практично розрядку компенсатора не доводять до повного витіснення розчину, а зберігають в ньому деякий запас об’єму розчину V_3 , що необхідний в основному для забезпечення надійної роботи автоматики роботи вмикання насоса на підзарядку компенсатора після того, як тиск в результаті витрати розчину (розрядки компенсатора) знизиться до мінімального тиску p_{min} . Конструктивний об’єм компенсатора в даному випадку використовується не повністю (компенсатор буде частково заповнений непрацюючим об’ємом розчину V_3 , що знижує його корисну ємність. Цей непрацюючий об’єм розчину V_3 (запас) повинен існувати, якщо не висунуті інші вимоги, мінімальним.

Відповідно до цього має бути дотримана умова $p_{min} \succ p_{noch}$; причому мінімальне значення цієї різниці повинно бути таким, щоб вона перекривала величину можливої неточності налаштування та роботи автоматики увімкнення підзарядки. Однак у всіх випадках при виборі початкового тиску повітря необхідно, якщо не пред'явлено інші вимоги, до найбільшого наближення його до мінімального робочого тиску p_{min} .

Процес стиснення газу від початкового до мінімального робочого тиску протікатиме за тими ж законами, що й у розглянутому випадку, відповідно до чого можемо написати

$$V'_{кор} = V_{\kappa} \cdot \left(1 - \frac{p_{noch}}{p_{min}}\right) = (V_{\epsilon.\kappa.} + V_{\text{з.к.}} \cdot p_{\text{з.к.}}) \cdot \left(1 - \frac{p_{noch}}{p_{min}}\right), \quad (9)$$

З урахуванням цього корисний об'єм (рис. 2, в) зменшується за всіх інших рівних умов на обсяг запасу V_3 за рахунок збиткового тиску, який створюється завдяки опору зрушення розчину у нагнітальному трубопроводу до його виходу і буде рівний

$$V_{кор} = V'_{\kappa} - V_3, \quad (10)$$

Підвівши в цей вираз значення виразу знайдемо корисний об'єм (ємність) компенсатора за умови

$$V_{кор} = V'_{\kappa} - V_3 = (V_{\epsilon.\kappa.} + V_{\text{з.к.}} \cdot p_{\text{з.к.}}) \cdot \left(1 - \frac{p_{noch}}{p_{max}}\right) - (V_{\epsilon.\kappa.} + V_{\text{з.к.}} \cdot p_{\text{з.к.}}) \cdot \left(1 - \frac{p_{noch}}{p_{min}}\right) = (V_{\epsilon.\kappa.} + V_{\text{з.к.}} \cdot p_{\text{з.к.}}) \cdot \left(\frac{p_{noch}}{p_{min}} - \frac{p_{noch}}{p_{max}}\right) \quad (11)$$

або

$$\frac{V_{кор}}{(V_{\epsilon.\kappa.} + V_{\text{з.к.}} \cdot p_{\text{з.к.}})} = \frac{p_{noch}}{p_{min}} - \frac{p_{noch}}{p_{max}}, \quad (12)$$

Об'єм V_2 газової частини компенсатора в кінці зарядки розчином (при p_{max}) визначений з урахуванням заданого допустимого діапазону робочих тисків у компенсаторі та корисної його ємності, можна знайти для ізотермного процесу стиснення газу із співвідношення

$$\frac{V_{кор}}{V_2} = \frac{p_{max}}{p_{min}} - 1, \quad (13)$$

після підстановки

$$\frac{(V_{\epsilon.\kappa.} + V_{\text{з.к.}} \cdot p_{\text{з.к.}}) \cdot \left(\frac{p_{noch}}{p_{min}} - \frac{p_{noch}}{p_{max}}\right)}{(V_{\epsilon.\kappa.} + V_{\text{з.к.}} \cdot p_{\text{з.к.}}) \cdot \left(1 - \frac{p_{noch}}{p_{max}}\right)} = \frac{p_{max}}{p_{min}} - 1, \quad (14)$$

Для політропної зміни стану ($n \succ 1$) виразу набудуть вигляду

$$V_2 = V_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{n}} = V_{\epsilon.\kappa.} + V_{\text{з.к.}} \cdot p_{\text{з.к.}} \cdot \left(\frac{p_{noch}}{p_{max}}\right)^{\frac{1}{n}}; \quad (15)$$

$$p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n = p_{max} = p_{noch} \cdot \left(\frac{V_{\epsilon.\kappa.} + V_{\text{з.к.}} \cdot p_{\text{з.к.}}}{(V_{\epsilon.\kappa.} + V_{\text{з.к.}} \cdot p_{\text{з.к.}}) \cdot \left(1 - \frac{p_{noch}}{p_{max}}\right)}\right)^n;$$

Відповідно до цього будемо мати

$$\frac{V_{кор}}{V_{\kappa}} = \left(\frac{p_{noch}}{p_{min}}\right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{p_{noch}}{p_{max}}\right)^{\frac{1}{n}}; \quad (16)$$

$$\frac{V_{кор}}{V_2} = \left(\frac{p_{max}}{p_{min}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1; \quad (17)$$

де n – показник політропи.

Рациональна величина початкового тиску зарядки для цього випадку може бути розрахована за виразом

$$p_{поч} = p_{max}^{1-\frac{1}{n}} \cdot p_{min}^{\frac{1}{n}} \quad \text{при } n=1 \quad p_{поч} = p_{min} \quad (18)$$

Також при розрядці компенсатора розчин, що витісняється, здійснює роботу, рівну роботі розширення газу від максимального тиску p_{max} , відповідного початку розрядки, до p_{min} – в кінці розрядки компенсатора розчином.

Робота, що здійснюється при розрядці компенсатора, може бути виражена за залежністю для ізотермного циклу

$$A_{ізотерм.} = p_{поч} \cdot V_{кор} \cdot \ln \frac{p_{max}}{p_{поч}} \quad (19)$$

Вплив температури на кількість розчину $V_{кор}$, що віддається під час розрядки компенсатора (корисний об'єм), може бути визначений за залежністю

$$\begin{aligned} V_{кор} &= V_{\kappa} \cdot \left[\frac{p_{поч}}{p_1 \cdot p_2} \right]^{\frac{1}{n}} \cdot \left[\frac{1}{p_1^n} \frac{1}{p_2^n} \right] \cdot \left[\frac{T_2}{T_1} \right]^{\frac{1}{n}} = \\ &= (V_{\kappa} + V_{з.к.} \cdot p_{з.к.}) \cdot \left(\frac{p_{поч}}{p_{min}} - \frac{p_{поч}}{p_{max}} \right) \left[\frac{p_{поч}}{p_1 \cdot p_2} \right]^{\frac{1}{n}} \cdot \left[\frac{1}{p_1^n} \frac{1}{p_2^n} \right] \cdot \left[\frac{T_2}{T_1} \right]^{\frac{1}{n}} \end{aligned} \quad (20)$$

де V_{κ} – конструктивний (повний) об'єм компенсатора; $p_{поч}$ початковий тиск зарядки газової порожнини; $p_1 = p_{min}$ і $p_2 = p_{max}$ – тиск газу в початковий і кінцевий моменти зарядки компенсатора при постійній температурі; T_1 і T_2 – абсолютна температура у двох аналізованих моментах; n – показник політропи за даної температури газу

Висновок. Залежності (17), (18) показують, що корисна ємність (енергоємність) $V_{кор}$ компенсатора залежить за всіх інших рівних умов від відношення $\frac{p_{поч}}{p_{max}}$ і для даного p_{max} – від величини початкового тиску $p_{поч}$ зарядки компенсатора газом.

Вплив режиму стиснення і розширення газу в компенсаторі при зміні температури ($n > 1$) зменшують корисний об'єм компенсатора.

Залежностями (12) і (16) вказують, що об'єм розчину в компенсаторі при $n=1$ буде більшим ніж при умові $n > 1$.

Також, якщо заряджання компенсатора відбувається відносно повільно ($n=1$), а розряджання відбувається відносно швидко ($n > 1$), тому не вся енергія стиснення газу може бути використана при розрядці до заданого тиску внаслідок охолодження газу, що розширюється (у компенсаторі буде залишатися невикористований обсяг розчину, обумовлений переохолодженням газу при розширенні).

Список використаних джерел

1. Онищенко О.Г. Механізація опоряджувальних робіт у будівництві / О.Г. Онищенко, Б.Ф. Драченко, О.В. Головкін. – К.: Урожай, 1998. – 320 с.
2. Андренко П.М. Гасителі пульсацій тиску об'ємних гідроагрегатів: Монографія / П.М. Андренко, О.В.Дмитрієнко, М.С. Свиначенко – Х.: Видавництво "НТМТ", 2012. – 160 с.
3. Кулінченко В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід. К.: ЦНЛ, 2006. 616 с.
4. Буренніков Ю. А., Немировський І. А., Козлов Л. Г. Гідравліка, гідрота пневмоприводи. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 273 с.

5. Науменко І. І. Технічна механіка рідини і газу / І. І. Науменко. – Рівне: Видавництво РДТУ, 2000. – 528 с.
6. 3. Пат. 112734 Україна, МПК F04B 11/00 Малоімпульсний насос / І.А. Ємельянова, Б. О. Коробко, М. В. Шаповал (Україна); заявник і патентовласник Полт. нац. техн. ун-т. ім. Ю. Кондратюка, № а 2015 11219; заявл. 16.11.2015; опубл. 10.10.2016, Бюл. №.19.
7. Bogdan Korobko, Viktor Virchenko, Mykola Shapoval. Feed Solution in the Pipeline aith the Compensators Mortar Pump of Various Design Solutions Pressure Pulsations Degree Determination // International Journal of Engineering & Technology, Vol 7, № 3.2 (2018). – P. 195 – 202. Published on: 20-06-2018. <http://reposit.pntu.edu.ua/handle/PoltNTU/4946>
<https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/14402>
<https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14402> Scopus, Google Scholar та ін.
8. TURBOSOL: BLOG URL: <https://turbosol.com/blog/en/home/> (access date: 03/19/2025).
9. Milton Roy URL: <https://www.miltonroy.com/en/about-us> (access date: 03/19/2025).
10. Wilden Pumps from Air Pumping Ltd. URL: <https://www.wilden-pumps.co.uk/contact.php>, <https://www.wilden-pumps.co.uk/> (access date: 03/19/2025).
11. Dellmeco. Pump manufacturer. If our partners succeed, then so does DELLMECO URL: <https://www.dellmeco.com/> (access date: 03/19/2025).
12. Tapflo Group – high-quality European industrial pumps from the manufacturer TAPFLO. Official representative office in Ukraine – LLC "TAPFLO". sales@tapflo.ua URL: <https://tapflo.ua/> (access date: 03/19/2025).
13. Putzmeister: Concrete equipment and concrete pumps. putzmeister.ukr@gmail.com URL: <https://www.kvbukraine.com.ua/> (access date: 03/19/2025).
14. Коробко Б. О. Створення та дослідження розчинонасосів нового покоління [Текст] : монографія / Б. О. Коробко. – Полтава : поліграфцентр Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка, 2016. – 252 с.

Р. Пастернак

Луцький національний технічний університет

ПЕРЕВІРКА СУМІСНОСТІ ПРИНЦИПІВ СПЕЦІАЛЬНОЇ ТЕОРІЇ ВІДНОСНОСТІ

Апарат спеціальної теорії відносності (СТВ) є основою досліджень як мікро-, так і мегасвіту [1]. Астрономічні спостереження останніх років та розрахунки відповідно до Λ CDM-моделі Всесвіту [2] виявили нові різновиди матерії – темні, засоби опису яких в апараті простору-часу відсутні. Шляхом прецизійних вимірювань анізотропії космічного мікрохвильового фону (КМФ) Дж. Смут [3] надійно зареєстрував у Галактиці виділений напрям [4]. Додаткового вивчення вимагає порушення в ньютонічній СТВ принципу А. Ейнштейна еквівалентності маси та енергії частинок. Результати названих досліджень можуть вказувати на надлишковість (чи розширене трактування) окремих постулатів СТВ. Перевірка названих розбіжностей і є основною метою даної роботи.

У роботі [5] представлено порівняння апарату СТВ з тестовими теоріями (включаючи теорії Робертсона та Мансурі-Секста), що допускають розширення перетворень Лоренца [1] додатковими параметрами. Виявилось, що використані ними теорії нічим не відрізняються від СТВ. При побудові релятивістської хвильової механіки П. Дірак показав [6], що адекватним релятивістській механіці є 4-вимірний простір імпульсів частинок, тому в [7] запропоновано іншу методику тестування СТВ – в евклідовому 4-просторі, що має засоби опису як темних різновидів матерії так і виділеного напрямку.

Причиною несумісності апарату СТВ з принципом еквівалентності маси та енергії виявилась низька вимірність простору імпульсів частинок. Для обґрунтування такого висновку розвинуто апарат релятивістської механіки в 4-просторі. Виявлено обмеження, що накладаються законом збереження енергії на принцип суперпозиції імпульсів частинок та звернено увагу на недетермінованість взаємодії частинок. Введено поняття непланарного дисипативного вузла взаємодії, без використання якого неможливо будувати апарат динаміки в евклідовому просторі. Враховано унікальність в релятивістській механіці виділеної системи відліку та властивостей темних частинок матерії і енергії. Встановлено, що використання принципу загальної коваріантності призводить до різного ходу часу в різних системах відліку.

Ключові слова: принцип відносності, ранг частинок, непланарність взаємодії частинок.

R. Pasternak

CHECKING THE COMPATIBILITY OF THE PRINCIPLES OF THE SPECIAL THEORY OF RELATIVITY

The apparatus of the special theory of relativity (SR) is the basis for the study of both micro- and mega-world [1]. Astronomical observations and calculations, including the Λ CDM-model of the Universe [2], have revealed new types of matter - dark matter, which have no means of description in space-time. By means of precision measurements of the anisotropy of the cosmic microwave background (CMB), J. Smoot [3] reliably registered an unobservable directly distinguished direction in the Galaxy [4]. Additional study requires the violation of the principle of equivalence of by A. Einstein of the mass and energy particles in SR. Based on the results of these studies, one can assume the redundancy (or a broader interpretation) of some of the postulates of the SR, the re-verification of which is the purpose of this work.

The paper [5] presents a comparison between the SR apparatus and test theories (including the Robertson and Mansouri-Sext theories), which are an extended Lorentz transformation [1] with additional parameters. It turned out that the theories used did not in any way dispute the SR. With the help of relativistic wave mechanics, P. Dirac showed [6] that the 4 momentum space of particles is adequate to relativistic mechanics. In [7], the approach proposed by P. Dirac was extended to another method for checking SR – in Euclidean 4 space, in which directly unobservable particles can also be described. It is shown that the reason for the discrepancy between the SR apparatus and the equivalence principle is the low dimension of the momentum space. Restrictions imposed by the law of conservation of energy on the principle of superposition of particle momentum are revealed, and the indeterminacy of particle interaction is pointed out. The uniqueness in relativistic mechanics of the selected reference system and the properties of dark particles of matter and energy is taken into account. It is shown that the use of the principle of general covariance leads to a different course of time in different frames of reference. The concept of a non-planar dissipative interaction node is introduced, without which it is impossible to build a dynamic apparatus in Euclidean space.

Key words: principle of relativity, rank of particles, non-planar interactions.

1. Простір 4-імпульсів.

1.1. Принцип Дірака. Основною характеристикою частинок у механіці є їхні імпульси, питання вимірності яких досі дискутується [1]. При побудові апарату релятивістської хвильової механіки П. Дірак запропонував замість 3-імпульсу $\vec{P}$ частинок використовувати такий вектор імпульсу $\vec{\bar{P}}$ (кватерніон), норма P якого пропорційна енергії E частинки [6] (принцип Дірака)

$$E = cP, \quad (1)$$

де c – постійний коефіцієнт (швидкість), що узгоджує хід параметричного часу t релятивістської механіки з астрономічним ефемерним часом [2]. Принцип Дірака еквівалентний гамільтоніану [1]

$$\mathcal{H} = c\sqrt{p_0^2 + (\vec{p}, \vec{p})} = cP = E, \text{ де} \quad (2)$$

$$p_0^2 = (\vec{p}_0, \vec{p}_0) = (cm_0)^2 = \text{const}. \quad (3)$$

Тут m_0 – маса частинки при $p = 0$ [1]. Вектор $\vec{p}_0 = p_0\vec{\zeta}$ нульової складової 4-імпульсу, де $\vec{\zeta}$ – одиничний вектор (орт) базису $(\vec{\zeta}, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ евклідового (відповідно до властивостей гамільтоніану) простору $\mathbb{P}^4$ 4-імпульсів, називатимемо **власним** (виділеним). П. Дірак показав, що четвертий вимір реально існує і пов'язаний, зокрема, зі спіном частинок та наявністю антиматерії [6]. Побудований на узгоджених між собою фізичних принципах тестовий апарат релятивістської механіки частинок змінної маси [7] з 4-імпульсами $\vec{P} = (p_0, \vec{p})$ супроводжуватимемо префіксом 4D, а його відповідник у просторі-часі з тензором енергії-імпульсу $(E/c, \vec{p}) = (P, \vec{p})$ [1] – 3D.

1.2. Космічні системи відліку. Всесвіт ієрархічно структурований – тіла, зоряні системи, галактики, космічні комірки [2]. В основу апарату тестової 4-вимірної релятивістської механіки [7] покладено гіпотезу існування структуроутворюючого фактора, яким може бути радіальний потік частинок темної матерії (DaM) у 4-вимірному центральносиметричному Всесвіті [2].

Відповідно до властивостей гамільтоніану поняття системи відліку відноситься лише до обмежених кластерів S частинок, напрям власних векторів $\vec{p}_0$ яких спільний, виділений 4-вектором $\vec{\zeta}_S$. Системи відліку з виділеним напрямом $\vec{\zeta}_S$ називатимемо космічними (КСВ). Існування виділеного напрямку для кластеру S частинок називатимемо принципом Лоренца. Саме Г. А. Лоренц вперше звернув увагу на особливість виділеного напрямку при розгляді умов поширення світла [5] (фотонів, для яких $p_0 = 0$). Шляхом прецизійних вимірювань анізотропії КМФ у [3] вперше надійно зареєстровано виділений напрям в Галактиці. Зважаючи на важливість отриманих результатів, Дж. Смут у своїй Нобелівській лекції назвав їх «новим дослідом Майкельсона-Морлі» [3].

Відповідно до (3) та принципу Лоренца, для кожної з частинок кластеру S :

$$\vec{p}_0 = p_0\vec{\zeta}_S = \text{const} \quad \forall t. \quad (4)$$

У [7] показано, що система відліку S з умовою (4) є інерційною. Надалі розглядатимемо лише КСВ. Перемноживши скалярно $\vec{P}$ та $\vec{\zeta}_S$

$$p_0 = (\vec{P}, \vec{\zeta}_S) = P \cos \alpha = \text{const}, \quad (5)$$

отримаємо значення кута α аберації (відхилення напрямку 4-імпульсу $\vec{P}$ частинки від виділеного $\vec{\zeta}_S$ КСВ). Умову (5) можна переписати у вигляді $E(\alpha) = cP = cp_0(\cos \alpha)^{-1}$, що подає залежність енергії частинки від кута α . У центральносиметричному Всесвіті [2] існує безліч розділених потенціальними бар'єрами КСВ – систем відліку, де енергія довільної частинки при $p = 0$ є мінімальною поряд з її значенням в інших інерційних системах відліку. Відповідно до принципу Лоренца в 4D-механіці вводять поняття внутрішніх (нативних) станів частинок, що належать кластеру S (у яких $\vec{\zeta} = \vec{\zeta}_S$). Частинки з інших КСВ, для яких $\vec{\zeta} \neq \vec{\zeta}_S$, називатимемо зовнішніми по відношенню до КСВ з виділеним напрямом $\vec{\zeta}_S$.

За даними астрономічних спостережень [2] у межах космічної комірки кут Θ між напрямками вектора $\vec{\zeta}_S$ для різних КСВ (у перерахунку) може змінюватися в межах $\Delta\Theta < 0,01$ рад. Дж. Смут показав, що тіла, нерухомі в системі відліку М. Коперника, мають кут аберації біля $\alpha = 0,001$ рад [3]. Оскільки при малих α залежність $E(\alpha)$ квадратична, точність таких вимірювань повинна перевищувати 10^{-6} (при меншій точності вимірювань практично неможливо зареєструвати відхилення від принципу відносності Г. Галілея).

В апараті 3D-механіки четвертий просторовий вимір відсутній, тому властивості інерційних систем відліку формують іншими засобами за виконання трьох умов:

- а) для кожної з частинок $m_0 = \text{const}$ (не змінюється в часі);
- б) система відліку не зазнає пришвидшень;
- в) виконується принцип відносності Г. Галілея.

Із викладеного вище випливає, що умова в) вимагає розширення умови а) до $m = m_0 = \text{const}$.

1.3. Класи та ранги частинок у КСВ. Принцип Лоренца (4) робить власний напрям неспостережуваним у динаміці та ділить простір $\mathbb{P}^4$ на два незалежні підпростори – одновимірний $\mathbb{P}^1$ та тривимірний $\mathbb{P}^3$. Якщо в хвильовій механіці розрізняють класи частинок відповідно до спіну – скалярні, векторні, спинорні [6], то в 4D-механіці – додатково за рангом матриці коефіцієнтів можливих станів 4-імпульсів частинок:

- $\mathbb{P}^1$ – підпростір частинок першого рангу (скалярних), 4-імпульси яких $\vec{P}_s = (p_s, 0) = P_s \vec{\zeta}_s$;
- $\mathbb{P}^3$ – підпростір частинок третього рангу (векторних), 4-імпульси яких $\vec{P}_o = (0, \vec{p}) = P_o \vec{\zeta}_o$.

Фундаментальним частинкам першого рангу можуть відповідати гіпотетичні частинки DaM, єдиним проявом яких є гравітаційна взаємодія [2], а фундаментальним частинкам третього рангу (темній енергії) – фотони [8]. Із умови поділу частинок першого та третього рангів на підпростори $\mathbb{P}^1$ та $\mathbb{P}^3$ випливає, що

$$(\vec{\zeta}_s, \vec{\zeta}_o) = 0, \quad (6)$$

тобто в КСВ нативні фотони належать виключно підпростору $\mathbb{P}^3$ і не можуть безпосередньо взаємодіяти з частинками DaM. Відповідно до Стандартної космологічної моделі (Λ CDM), на частинки першого та третього рангів сумісно припадає 95 % Всесвіту [2] (в енергетичному вимірі).

Крім названих, існують частинки четвертого рангу (спинорні), з 4-імпульсами $\vec{P} = (p_o, \vec{p}) = P \vec{\chi}$, що є зв'язаним (гібридним) станом частинок першого та третього рангів (тут $\vec{\chi}$ – одиничний вектор напряму 4-імпульсу $\vec{P}$). За означенням, гібридні частинки ніколи не можуть перебувати виключно в підпросторах $\mathbb{P}^1$ чи $\mathbb{P}^3$. Навіть при $p = 0$ вони містять 4-імпульси частинок третього рангу, тому $\vec{\chi} \neq \vec{\zeta}_s$ (що підтверджують вимірювання спіральності гібридних частинок [8]). За знаком скалярного добутку $(\vec{\zeta}_s, \vec{\chi})$ розрізняють гібридні частинки матерії та антиматерії. Так, умова $(\vec{\zeta}_s, \vec{\chi}) > 0$ характеризує речовину, а $(\vec{\zeta}_s, \vec{\chi}) < 0$ – антиматерію [8].

У Стандартній моделі частинок використовують також поняття партонів [8] – частинок другого рангу. Гіпотетично партони утворюються в результаті дисоціації фотона, двовимірний фрагмент якого є глюоном, а гібридна частинка другого рангу, що містить одновимірний фрагмент фотона та частинку першого рангу є кварком [8]. Замість поділу партонів за кольорами [8], у 4D-механіці їх розрізняють відповідно до координатних осей підпростору $\mathbb{P}^3$, які вони представляють. Партони нестабільні і не можуть існувати самостійно – об'єднуючись, вони або повертаються до фундаментальних частинок, або утворюють більш стійкі адрони чи ядра атомів [8].

2. Простір 4-переміщень.

Доступними спостереженню є лише вузли взаємодії частинок. Для запису їхніх позицій у 4D-механіці використано простір $\mathbb{R}^4$ векторів $\vec{R}$ 4-переміщень [7], де усе розмаїття частинок представлено сукупністю графів взаємодій. Такі графи містять точкові вузли, що характеризують розташування актів взаємодій частинок, та орієнтовані прямолінійні вітки між вузлами, які відповідають вільним частинкам. У 4D-механіці частинки протяжні (векторні криві). Стабільні частинки, що охоплюють багато вузлів взаємодій, виділяємо ламаними лініями (4-траєкторіями). Вимірювання підтверджують, що межах похибки Всесвіт плоский (за даними [3] його кривина $\Omega_K = 0,001 \pm 0,002$), тому надалі прийматимемо простір $\mathbb{R}^4$ евклідовим.

Зважаючи на наявність у кластерів частинок опорного напрямку, серед складових векторів 4-переміщень $\vec{R} = (s, \vec{r})$ частинок виділяємо підпростір $\mathbb{R}^1$ неспостережуваної компоненти s та підпростір $\mathbb{R}^3$ спостережуваних складових $\vec{r}$. Гіпотезою 4D-механіки є порівняння потоку частинок першого рангу з нерухомим ефіром Г. А. Лоренца.

2.1. Час КСВ. 4-швидкість. Поширивши принцип Л. Ейлера $\vec{p} = m\vec{v}$ [1] на простір 4-імпульсів $\vec{P} = m\vec{V}$, де m – маса частинки, а $\vec{V}$ – гіпотетичний вектор її 4-швидкості, отримуємо висновок про колінеарність векторів $\vec{P}$ та $\vec{V}$. Отже, орти (інтегральної КСВ) простору $\mathbb{R}^4$ колінеарні аналогічним КСВ у просторі $\mathbb{P}^4$.

При параметризації 4-траєкторій будемо використовувати єдиний для усіх частинок Всесвіту параметр t

$$dR = c dt, \quad (7)$$

© Р. Пастернак

де c – швидкість розширення Всесвіту. Необхідність використання в механіці параметра t продиктована неспостережуваністю переміщень уздовж власного напрямку. Практично для вимірювання dR використовують параметр t 4-траєкторії спеціально градуйованої системи тіл – годинника [1]. Зважаючи, що дві точки в підпросторі $\mathbb{R}^3$ можна поєднати 4-траєкторіями різної довжини, поняття проміжків параметричного часу потрібно уточнити – відповідно до показів годинника, кут аберації якого $\alpha_C = 0$ (час КСВ).

Введемо поняття 4-швидкості та розкладемо її вектор на складові по підпросторах $\mathbb{R}^1$ та $\mathbb{R}^3$:

$$\vec{V} = \frac{d\vec{R}}{dt} = \frac{ds}{dt} \vec{\zeta}_s + \frac{d\vec{r}}{dt} = (v_0, \vec{v}) = c\vec{\chi}. \quad (8)$$

Тут v_0 – нульова (неспостережувана) компонента, а $\vec{v}$ – вектор пекулярної (спостережуваної) швидкості. Дж. Смут показав [3], що пекулярна швидкість частинок практично збігається з класичною в системі відліку, що пов'язана з Галактикою.

2.2. Спостережувані прояви власного напрямку. Відповідно до (5), неспостережуваний кут аберації α та величина спостережуваної (пекулярної) швидкості v частинок пов'язані

$$v = c \sin \alpha = c\beta; \quad v_0 = c \cos \alpha = c\sqrt{1 - \beta^2}, \quad (9)$$

де β – зведена (безрозмірна) пекулярна швидкість, а $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ – Лоренц-фактор [1]. Лише для нативних фотонів, для яких $(\vec{\zeta}_s, \vec{P}_0) = 0$, спостережувана швидкість максимальна (дорівнює c) та однакова по всіх напрямках підпростору $\mathbb{R}^3$.

Враховуючи (1) та (8), енергія і маса частинки пропорційні величині її 4-імпульсу:

$$E = cP = c^2 m. \quad (10)$$

(У 4D-механіці зв'язок (10) є наслідком принципів Ейлера та Дірака.) Із (5) та (10) отримуємо формули залежності енергії та маси частинки від Лоренц-фактора:

$$E = E_0 (\cos \alpha)^{-1} = E_0 \gamma; \quad m = m_0 \gamma. \quad (11)$$

Мінімальні значення $E_0 = cp_0$ і $m_0 = c^{-1} p_0$ енергії та маси в КСВ, що пов'язані з величиною p_0 власного імпульсу частинки, називатимемо власними.

2.3. Хід часу в СТВ. У [7] показано, що основними маркерами релятивістської механіки є система відліку з виділеним напрямом та означення ходу часу t . Оскільки в СТВ пряме означення часу відсутнє, для порівняння його ходу з ходом часу t в 4D-механіці використаємо непрямий спосіб, для чого розглянемо елемент довжини dR дуги 4-траєкторії частинки у виразі (7) з поділом простору $\mathbb{R}^4$ на підпростори:

$$dR^2 = dr^2 + ds^2 = c^2 dt^2. \quad (12)$$

Зважаючи, що в КСВ величина неспостережуваної складової ds переміщення dR пов'язана зі змінними t , r та v , які можна поміряти, запишемо її у вигляді:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dr^2 = (c^2 - v^2) dt^2 = c^2 d\tau^2. \quad (13)$$

Таку конструкцію зі спостережуваних змінних Г. Мінковський назвав простір-час, а величину ds (скаляр Лоренца) – його метричною мірою [4]. (тут замість псевдоевклідового використано простір кватерніонів [6]).

Слід наголосити на суттєвій відмінності трактувань величини ds у 4D-механіці та тривимірній СТВ. Якщо в 4D-механіці $d\vec{s} = ds\vec{\zeta}_s$ є вектором і умова (13) виконується виключно для напрямку $\vec{\zeta}_s$, то в СТВ ds є скаляром, що необґрунтовано поширює умову (13) на довільний напрям вектора $d\vec{s}$. Порівнявши вираз (12) зі способом Г. Мінковського параметризації інтервалу ds світової лінії у просторі-часі координатним часом τ [1] з'ясуємо, що лише у виділеній системі відліку за умови $\tau = \gamma^{-1} t$, хід часу в 3D та 4D-механіках однаковий.

Розглянемо властивості фотона з 4-імпульсом $\vec{P}_0$ у двох різних інерційних системах відліку: в КСВ₁, з виділеним напрямом $\vec{\zeta}_{s1}$, та в КСВ₂, з виділеним напрямом $\vec{\zeta}_{s2}$, який не колінеарний з $\vec{\zeta}_{s1}$. Нехай у КСВ₁ фотон внутрішній (нативний), для якого $(\vec{\zeta}_{s1}, \vec{P}_0) = 0$, тобто величина його

спостережуваної швидкості поширення однакова в усіх напрямках та дорівнює c . Натомість для системи відліку KCB_2 цей фотон зовнішній, де $(\vec{\zeta}_{S2}, \vec{P}_0) \neq 0$, тому тут величина його спостережуваної швидкості поширення буде

$$v_F = c(\vec{\zeta}_{S1}, \vec{\zeta}_{S2}) = c \cos \Theta, \quad (14)$$

де Θ – кут між напрямками виділених векторів $\vec{\zeta}_{S1}$ та $\vec{\zeta}_{S2}$ двох КСВ. У загальному випадку (в рухомих системах відліку відносно виділеної) замість c в (13) необхідно використовувати зв'язок (14), тому поряд з τ появиться додатковий множник $\tau = \gamma^{-1} \cos \Theta t$. Внаслідок різного ходу часу СТВ $t' = \cos \Theta t$, порівняно з його ходом у 4D-механіці, фізичне трактування процесів відрізнятиметься від аналогічного в 4D-механіці. Математично бездоганний апарат простору-часу з не менш елегантними перетвореннями Лоренца в ньому [1] є необхідними, але не достатніми для побудови апарату релятивістської механіки. Фізичне трактування самого поняття виділена інерційна система відліку стало можливими лише після розширення вимірності апарату механіки до чотирьох і доповнення його частинками першого та третього рангів.

3. Взаємодія частинок.

Поширимо класичні закони збереження сумарної енергії та імпульсу частинок [1] у точковому вузлі взаємодії на простір 4-імпульсів (доповнивши їх умовами збереження результуючих власного імпульсу та спінового числа).

3.1. Непланарний дисипативний вузол взаємодії. Запишемо сумісно закони збереження імпульсу та енергії для вузла взаємодії двох частинок з 4-імпульсами $\vec{P}_1$ та $\vec{P}_2$, результатом якої могла б бути частинка з 4-імпульсом $\vec{P}_3$:

$$\vec{P}_3 = \vec{P}_1 + \vec{P}_2; \quad P_3 = P_1 + P_2. \quad (15)$$

Незалежно від значень векторів $\vec{P}_1$ та $\vec{P}_2$ забезпечити виконання умов (15) в евклідовому просторі $\mathbb{P}^4$ неможливо, оскільки відсутня частинка-акцептор надлишку сумарної енергії взаємодії:

$$E_A = c \left(P_1 + P_2 - \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + 2(\vec{P}_1, \vec{P}_2)} \right). \quad (16)$$

Для реалізації умов (15) у [7] запропоновано використовувати непланарний дисипативний середньостатистичний п'ятивітковий вузол взаємодії (НДВ), де $\vec{P}_{O2} = -\vec{P}_{O1}$ – симетричні вітки частинок-акцепторів третього рангу (схема подана на рис. 1). У середньостатистичному НДВ буде виконуватися закон збереження імпульсу $\vec{P}_3 = \vec{P}_1 + \vec{P}_2$ двох частинок, а енергія, пов'язана з вітками $\vec{P}_{O1}$ та $\vec{P}_{O2}$, у середньому відповідатиме (16). Саме випадковий характер елементарних взаємодій робить перебіг фізичних процесів у НДВ незворотним (стріла часу).

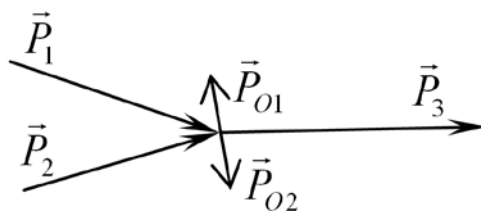


Рис. 1. Схема середньостатистичного вузла взаємодії.

Використання п'ятивіткового середньостатистичного НДВ є наріжним в апараті 4D-механіки. Саме він дає можливість зберегти умову (4) інерційності системи відліку, поширити на механіку апарат математичного аналізу і використовувати в механіці евклідов простір імпульсів частинок.

3.2. Силевий підхід. Основа динаміки частинок – закон руху Р. Декарта [1] – базується (за замовчуванням) саме на використанні НДВ. Приріст 4-імпульсу матеріальної точки на ділянці $d\vec{R}$ траєкторії, яку називатимемо лінійним вузлом (подією), запишемо у вигляді

$$d\vec{P}_0 = \vec{J}_0 dR = \vec{J}_0 c dt = \vec{F} dt, \quad (17)$$

де $\vec{J}_O$ – середня лінійна густина впливів частинок третього рангу в лінійному вузлі. Отже, відповідно до (4), у вектора $\vec{F} = c\vec{J}_O$ 4-сили, відсутня нульова компонента: $\vec{F} = (0, \vec{f})$.

Деталізуючи умову (17) для події з урахуванням змін маси m частинки, одержимо:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} = \frac{dm}{dt}\vec{V} + m\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{dm}{dt}\vec{V} + m\vec{A}. \quad (18)$$

Перемноживши (18) скалярно на вектор $\vec{V}$ і враховуючи ортогональність векторів 4-пришвидження $\vec{A}$ та 4-швидкості $\vec{V}$ (базис Серре-Френе [1]), отримуємо експериментально встановлену формулу Ж. Понселе [1]:

$$(\vec{F}, \vec{V}) = (\vec{f}, \vec{v}) = c^2 \frac{dm}{dt} = \frac{dE}{dt}. \quad (19)$$

Разом із (19), рівняння (18) отримає вигляд:

$$m\vec{A} = \vec{F} - \frac{1}{c^2}(\vec{F}, \vec{\chi})\vec{V}. \quad (20)$$

На основі (20) та зв'язку $\vec{A} = c^2 K \vec{n}$ [7], де $\vec{n}$ – одиничний вектор головної нормалі до 4-траєкторії, отримуємо вираз для кривини K 4-траєкторії частинки:

$$EK\vec{n} = \vec{F} - (\vec{F}, \vec{\chi})\vec{\chi}. \quad (21)$$

Тобто, при відсутності силових взаємодій, 4-траєкторія частинки є прямою.

Нульова складова векторів у (20) відповідає за зміну маси частинки, тому при редукції нульового виміру запис рівняння (20) формально збігається з рівнянням руху матеріальної точки в 3D-механіці [1]. Відповідно до (11) величина $p_0 = m_0 c = m v_0$, тому запис спостережуваної складової $\vec{p}$ 4-імпульсу формально однаковий як в 4D $\vec{p}_{4D} = (m_0 \gamma) \vec{v}$, так і в 3D-механіці $\vec{p}_{3D} = m_0 (\gamma \vec{v})$. За формою $\vec{p}_{4D}$ та $\vec{p}_{3D}$ збігаються з виразом, вперше отриманим незалежно А. Айнштейном та А. Пуанкаре [1], однак, внаслідок різного ходу часів t та t' , в імпульсів $\vec{p}_{4D}$ та $\vec{p}_{3D}$ зовсім різне фізичне трактування – апарат СТВ несумісний з принципом еквівалентності маси та енергії.

3.3. Балістичний принцип. Застосуємо поняття середньостатистичного НДВ до аналізу процесу випромінювання потоку фотонів. Нехай випромінювач, що нерухомий ($p_R = 0$) в КСВ, породжує фотони з 4-імпульсами $\vec{P}_R(0) = P_R(0)\vec{\chi}$. Якщо випромінювач рухомий ($p_R \neq 0$), зв'язані з ним фотони нестимуть додатковий імпульс $\Delta\vec{P}_R = P_R(0)\sin\alpha_R\vec{\tau}$, де $\vec{\tau}$ – формально розширений до 4-простору одиничний вектор напрямку класичної швидкості $\vec{v}_R = v_R\vec{\tau}$ випромінювача [1] (обидва вектори ($\vec{\chi}$ та $\vec{\tau}$) належать підпростору $\mathbb{R}^3$).

Якщо випромінювання фотонів відбувається під кутом φ до напрямку $\vec{\tau}$ руху випромінювача, де $\cos\varphi = (\vec{\tau}, \vec{\chi})$, кожен фотон винесе додатковий імпульс $\Delta\vec{P}_\chi = \Delta P_R(\vec{\tau}, \vec{\chi})\vec{\chi}$, величина якого залежить від напрямку $\vec{\chi}$ випромінювання. Відповідно до закону збереження, величина імпульсу випроміненого фотона буде:

$$P'_R = P_R(0)(1 + \sin\alpha_R \cos\varphi). \quad (22)$$

Дослід Майкельсона-Морлі [1] показав, що балістичний принцип виконується також і при поглинанні світла, тобто названий дослід не має жодного відношення до принципу відносності [1].

3.4. Космологічна натуралізація фотонів. Перейдемо до розгляду середньостатистичного НДВ для фотона, що може почергово перебувати в двох локальних КСВ з різними опорними напрямками $\vec{\zeta}_R$ та $\vec{\zeta}_A$, як наведено на рис. 2. Нехай випромінювач, що перебуває у КСВ_R (з опорним напрямом $\vec{\zeta}_R$), породжує фотони з 4-імпульсами $\vec{P}_R$, для яких $(\vec{P}_R, \vec{\zeta}_R) = 0$. Оскільки фотони не підпорядковані принципу Лоренца, вони можуть вільно та без змін переходити від однієї локальної КСВ до іншої. Поширившись до КСВ_A (з опорним напрямом $\vec{\zeta}_A$), напрям 4-імпульсу $\vec{P}_R$ фотона-мігранта не задовольнятиме умову (6) нативності.

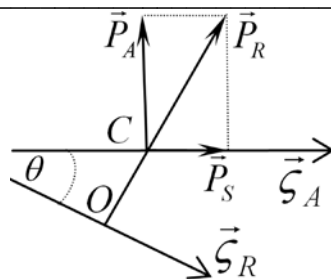


Рис. 2. Схема вузла КНФ

Для подолання цього протиріччя, в 4D-механіці запропоновано гіпотезу космологічної натуралізації фотонів (КНФ). Остання зводиться до дисоціації в КСВ_A фотона-мігранта (в присутності гібридної частинки, що є донором енергії), на фотон з 4-імпульсом $\vec{P}_A$ та частинку першого рангу з 4-імпульсом $\vec{P}_S$ (на рис. 2 вектор імпульсу частинки-донора не наведено). Для нерухомого ($p_A = 0$) в КСВ_A реєстратора отримаємо:

$$P_A = P_R(\vec{\zeta}_R, \vec{\zeta}_A) = P_R \cos \theta. \quad (23)$$

Оскільки основна маса речовини зосереджена в газопилових хмарах галактик, частинки першого рангу будуть генеруватися переважно тут, що підтверджено астрономічними спостереженнями [2]. Існування процесу КНФ підтверджено астрономічними спостереженнями як червоного космологічного зсуву спектру, так і вивченням розподілу DaM в галактиках – концентрованого в її центральній частині та дифузного в газопилових хмарах на периферії [2].

Гіпотезу КНФ введено на заміну формулі Х. Доплера [1], що порушує закони збереження та породжує парадокси. Наприклад, відповідно до хвильового підходу [2], фотони у Всесвіті, що розширюється, змінюють довжину хвилі, тобто енергію [8], тоді як енергія решти вільних частинок залишається незмінною.

Список використаних джерел.

1. Ландау Л. Д. Лифшиц Е. М. Теория поля (Наука, М., 1988).
2. Weinberg S. Cosmology (Oxford University Press, 2008).
3. Lämmerzahl C, Braxmaier C. et al. Kinematical Test Theories for Special Relativity: a comparison. International Journal of Modern Physics D. 11 (7): (2002), pp. 1109–1136. doi:10.1142/S021827180200261X
4. Смут Дж. Ф. Анизотропия реликтового излучения, УФН. 177, 12 (2007). doi.org/10.3367/UFNr.0177.200712d.1294.
5. Эйнштейн А. Принцип относительности и его следствия в современной физике. // Эйнштейн А. Сборник научных трудов. Наука, М., 1965. Т. 1, с. 138-164.
6. Дирак П. А. М. Принципы квантовой механики (Наука, М., 1979).
7. Pasternak R. Means of the restrictions elimination of the space-time apparatus in relativistic mechanics. Вісник ТНТУ, № 1 (89), 2018, с. 64-71.
8. Окунь Л. Б. Физика элементарных частиц (Наука, М., 1988).

О.А. Урбан, С.А. Федосов, Л.В. Ящинський

Луцький національний технічний університет

ОКРЕМІ АСПЕКТИ ТЕОРІЇ ВІДПАЛУ ДЕФЕКТІВ В ОПРОМІНЕНИХ КРИСТАЛАХ CdSb

Процеси утворення і перебудови радіаційних дефектів при опроміненні і відпалі можна розглядати як сукупність квазіхімічних реакцій різного порядку. Деякі із них важко звести до форми, яка б давала можливість проаналізувати часову залежність концентрацій дефектів при відпалі.

Важливим параметром, який визначає кінетику відпалу дефектів, є енергія активації відпалу. Існує багато методів визначення цієї енергії. Ми користувалися методом перерізів, який ґрунтується на аналізі кривих Арреніуса при різних температурах відпалу. Для визначення області термостійкості радіаційних дефектів використовувалася методика ізохронного відпалу.

Ключові слова: радіаційний дефект, опромінення, відпал, кристал CdSb, енергія активації, дифузія.

O. Urban, S. Fedosov, L. Yashchynskyy

SOME ASPECTS OF THE THEORY OF DEFECT ANNEALING IN IRRADIATED CdSb CRYSTALS

The processes of formation and rearrangement of radiation defects during irradiation and annealing can be considered as a set of quasichemical reactions of different orders. Some of them are difficult to reduce to a form that would allow analyzing the time dependence of the defect concentration during annealing.

An important parameter that determines the kinetics of defect annealing is the annealing activation energy. There are many methods for determining this energy. We used the cross-section method, which is based on the analysis of Arrhenius curves at different annealing temperatures. To determine the thermal stability region of radiation defects, the isochronal annealing method was used.

Keywords: radiation defect, irradiation, annealing, CdSb crystal, activation energy, diffusion.

Statement of the problem. The annealing process is part of a complex of measurements to establish the nature and mechanisms of the physicochemical properties of materials. Theoretical approaches to annealing are based on the kinetics of defect reactions – diffusion of interstitial and vacancy components, their mutual recombination, or the formation of more stable complexes. Important concepts are defect mobility (diffusion coefficients), migration activation energies, charge carrier capture/emission by defects, and kinetic models of isochronal and isothermal annealing. The classical picture involves successive stages of annealing with increasing temperature – low-temperature recombination (mobile interstitial atoms), intermediate association (formation of complexes), and high-temperature reformation (movement of vacancies/clusters). Mathematically, the processes are described by systems of diffusion-reaction equations or exponential relaxation laws with characteristic activation energies [1]. Theoretical aspects of semiconductor defect annealing have been analyzed in the literature [2-8].

Analysis of recent research and publications. In the modern semiconductor industry, there is a growing need to understand and combat potential radiation damage problems. Space applications are an obvious case, but, beyond that, today's device and circuit fabrication rely on increasing numbers of processing steps that involve an aggressive environment where inadvertent radiation damage can occur [3].

The authors [4] proposed and simulated the radiation defects type and amount of $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}:\text{In}$ crystals after neutron irradiation with the Monte-Carlo software SRIM. The calculated data are also compared with experimental results of detector performance and the crystal defects obtained using thermally stimulated current (TSC) measurement. The effect of a fast neutron flux ($\Phi = 10^{14} - 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) on the electrical and photoluminescence properties of p-CdZnTe single crystals is studied [5]. Isothermal annealing is performed ($T = 400 - 500 \text{ K}$), and the activation energy of the dissociation of radiation-induced defects is determined at $E_D \approx 0.75 \text{ eV}$. The parameters that characterize process the annealing (the activation energies and frequency factors) of the main radiation defects in silicon (A-centers, E-centers, divacancies, etc.) have been ascertained, and various mechanisms and reactions that determine the conditions for the annealing of the defects were proposed [6].

It is revealed [7] that radiation defects of both donor and acceptor types are introduced into the lattice of the CdSb crystals with gamma-irradiation. The effectiveness of removal of carriers is a consequence of the involvement of impurity atoms in the formation of corresponding radiation defects with deep energy levels. Starting from the annealing temperature of 80°C , deep donors with $E_C - 0.16 \text{ eV}$ are annealed in the irradiated crystals [8]. During annealing, shallow acceptors ionized at $T = 78 \text{ K}$ are formed, which leads to a decrease in the crystal resistance and a change in its conductivity type. After annealing at 130°C , the

© О.А. Урбан, С.А. Федосов, Л.В. Ящинський

irradiated crystals were converted from n to p -type conductivity, as before irradiation. Neutron-irradiated crystals annealed at a temperature of 200 °C practically did not differ in electrical and optical properties from unirradiated CdSb crystals.

Problem setting. The aim of the paper is to consider methods for studying the kinetics and establishing the mechanisms of annealing of radiation defects in cadmium antimonide crystals.

Presentation of the main material. The processes of formation and rearrangement of radiation defects during irradiation and annealing can be considered as a set of quasichemical reactions of different orders. Some of them are difficult to reduce to a form that would allow analyzing the time dependence of the defect concentration during annealing.

Very often, the elementary activation annealing process is described by the equation:

$$\frac{dN}{d\tau} = -k_0 \cdot f(N) \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (1)$$

where $\frac{dN}{d\tau}$ is the rate of change of the defect concentration at a constant annealing temperature and a constant activation energy of the process E ;

N is the concentration of point defects or a physical parameter proportional to the concentration;

$f(N) = N^\gamma$ is some function;

γ determines the order of the process;

k_0 is a constant, which at $\gamma = 1$ is a frequency factor.

The simplest annealing of defects is the case where $\gamma = 1$ (a first-order process). Such a process occurs, for example, during the diffusion of defects (during annealing) to constant drains far from saturation. Most experimental data indicate that isothermal annealing curves described by first-order kinetics can be represented by an exponential function:

$$\frac{dN}{d\tau} = -kN, \quad (2)$$

where

$$k = AD, \quad (3)$$

N is the concentration of defects at time τ ;

A depends on the geometry of the drains;

D is the diffusion coefficient.

The solution to Eq. 2 is:

$$N = N_0 \cdot \exp(-k\tau),$$

where N_0 is the concentration of defects at the initial moment of annealing, when $\tau = 0$.

The coefficient A in Eq. 3 can be determined knowing the geometry of the sinks. In the case when the sink is the outer surface of the crystal, the coefficient $A = \frac{\pi^2}{R^2}$ for a spherical surface with radius R

and $A = \frac{\pi^2}{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2}}$ for a surface in the form of a rectangular parallelepiped with edge sizes a , b , c .

An important parameter that determines the kinetics of defect annealing is the annealing activation energy E . There are many methods for determining this energy. We used the cross-section method, which is based on the analysis of Arrhenius curves at different annealing temperatures.

The rate of change of the defect concentration at a constant annealing temperature and a constant activation energy is expressed by Eq. 1, written as:

$$\frac{1}{k_0} \cdot \frac{dN}{f(N)} = -\exp\left(-\frac{E}{kT}\right) d\tau. \quad (4)$$

Let us determine the change in the left-hand side of Eq. 4 for a certain time interval τ from the beginning of isothermal annealing:

$$-\frac{1}{k_0} \int_{N_0}^N \frac{dN}{f(N)} = \tau \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (5)$$

where N_0 is the initial concentration of defects at time $\tau = 0$ (the beginning of annealing).

We will perform isothermal annealing at various close temperatures. At each temperature, we will choose such a time interval τ_0 , during which the change in the defect concentration will be the same. Under such conditions, the left-hand sides of Eq. 5 will be the same, which we will denote by:

$$C = -\frac{1}{k_0} \int_{N_0}^N \frac{dN}{f(N)}. \quad (6)$$

Eq. 5, taking into account Eq. 6, will take the form:

$$\tau_0 = C \cdot \exp\left(\frac{E}{kT}\right). \quad (7)$$

This Eq. 7 expresses the functional dependence between the annealing temperature T and the annealing time τ_0 , during which the defect concentration decreases by the same amount at each annealing temperature. Taking the logarithm of Eq. 7, we obtain:

$$\ln \tau_0 = \ln C + \frac{E}{kT}. \quad (8)$$

From the dependence $\ln \tau_0 = f\left(\frac{1}{T}\right)$, we can determine the activation energy E of the process.

To determine the thermal stability region of radiation defects, the isochronal annealing method was used. The irradiated crystal was isothermally annealed for the same time interval $\Delta\tau = \tau_n - \tau_{n-1}$ at different temperatures $T_1, T_2, T_3, \dots$, which increased after each previous annealing. The isochronal annealing curve can be obtained by integrating Eq. 1 over time:

$$\int_{N_n}^{N_{n-1}} \frac{dN}{N^\gamma} = k_0 \cdot \exp\left(-\frac{E}{kT_n}\right) \Delta\tau. \quad (9)$$

Figure 1 shows the dependences of the time during which the resistance of the freshly treated surface decreased by a factor of $e = 2.7$ (in the exponential interval) on the storage temperature of the irradiated crystal. The activation energy of the process determined from this dependence using Eq. 8 is equal to (0.36 ± 0.03) eV. Obviously, this energy is the energy of defect migration, which is formed during the decay of defect clusters in neutron-irradiated CdSb crystals. For the exponential interval of the dependence of the resistance on time, we can determine the value k and, accordingly, the coefficient of defect diffusion D at different temperatures (Eq. 3).

When determining the coefficient A , it was assumed that the sink for defects is the surface of the crystal in the form of a parallelepiped, far from saturation. The calculated value of D at different temperatures is given in Table 1.

Table 1.

Temperature dependence of the diffusion coefficient D	
T, K	$D, \text{cm}^2/\text{s}$
273	$1.6 \cdot 10^{-4}$
293	$3.6 \cdot 10^{-4}$
308	$7.6 \cdot 10^{-4}$
318	$1.4 \cdot 10^{-3}$

Conclusions. At annealing temperatures T_n , for which $kT_n \ll E$, the left-hand side of Eq. 9, which determines the change in the defect concentration during the annealing time $\Delta\tau$, will be very small. Significant annealing of defects will be observed at temperatures for which kT_n is close to the activation energy of defect annealing E . By conducting isochronal annealing, the main stages of annealing of radiation defects in irradiated crystals are established.

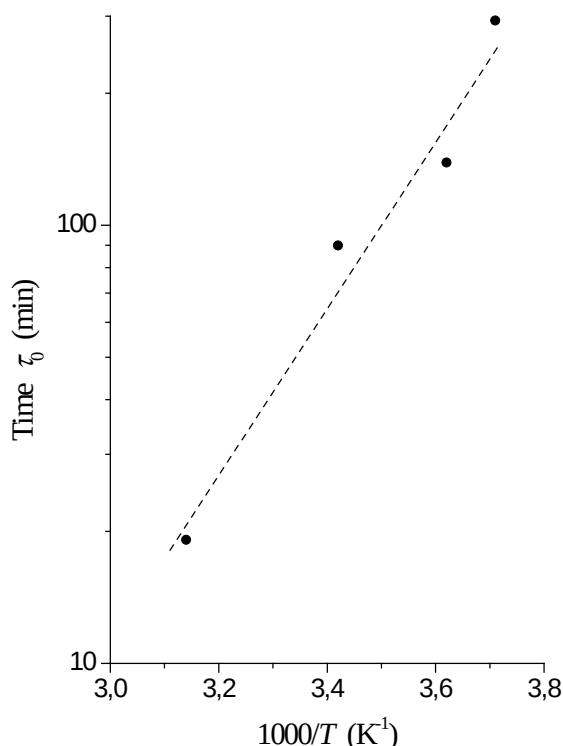


Fig. 1. Temperature dependence of the time interval during which the defect concentration in the exponential region of the curves decreases by the same amount during annealing of neutron-irradiated ($\Phi = 2 \cdot 10^{18} \text{ n/cm}^2$) CdSb crystals

References:

1. Brown W.L., Augustyniak W.M., Waite T.R. Annealing of radiation defects in semiconductors. *Journal of Applied Physics*. 1959. Vol. 30. P. 1258–1268.
2. Davydyuk G.E. Radiation effects in semiconductors : textbook. Lutsk : Vezha-Druk, 2014. 278 p.
3. Claeys C., Simoen E. Radiation effects in advanced semiconductor materials and Devices. Springer Science & Business Media, 2013. 404 p.
4. Bao L., Gangqiang Z., Xu L., Zhang B., Dong J., Li Y., Jie W. Neutron irradiation-induced defects in $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}:\text{In}$ crystals. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2019. Vol. 100. P. 179–184.
5. Plyatsko S.V., Rashkovetskyi L.V. Deep radiation-induced defect centers created by a fast neutron flux in CdZnTe single crystals. *Electronic Properties of Semiconductors*. 2018. Vol. 52. P. 305–309.
6. Gaidar G.P. Annealing of radiation-induced defects in silicon. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2012. Vol. 48. P. 78–89.
7. Fedosov S.A., Zakharchuk D.A., Koval Yu.V., Yashchynskiy L.V., Urban O.A. Kinetic effects in Cadmium Antimonide crystals before and after gamma-irradiation. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020. Vol. 21, № 2. P. 266–271.
8. Fedosov S.A., Panasyuk L.I., Yashchynskiy L.V., Shymchuk S.P., Urban O.A. Surface effects in neutron-irradiated CdSb crystals. *XX International Freik Conference on Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems (ICPTTFN-XX)*, Oct. 06–10, 2025, Ivano-Frankivsk, Ukraine : Materials. Ivano-Frankivsk : Publisher Vasyl Stefanyk Carpathian National University, 2025. P. 215.

О. Ягелюк

Луцький національний технічний університет

ФУНКЦІОНАЛЬНА РОЛЬ ПОДІЛЬНИКІВ ПІД ЧАС ЗБОРУ ПОЛЕГЛОГО ЛЬОНУ

Полеглість – одна з критичних проблем під час збирання льону. Функціональна роль подільників у системах збирання льону-довгунця достатньо повно висвітлена в класичній і сучасній технічній літературі. Водночас питання їх застосування під час збирання сучасних сортів олійного льону залишаються недостатньо дослідженими. Підвищені показники висоти та густоти рослин олійного льону формують поведінку стеблостою, подібну до поведінки полеглого льону-довгунця. У статті наведено аналітичну оцінку конструкцій подільників, виконану на основі синтезу результатів сучасних інженерних досліджень і технічної документації виробників льонозбиральних машин. Оглянуто механізми розділення стебел, дію підйомних сил та формування контрольованого попереднього нахилу, щоб з'ясувати, як подільники впливають на стабільність подачі та якість збирання. Особливу увагу приділено порівнянню жорстких і пружинних подільників та визначенню їх ефективності за різних рівнів полеглості. Аналіз показує, що подільники суттєво підвищують повноту захоплення стебел, зменшують пошкодження, спричинені згинанням, і стабілізують потік стебел не лише під час витягування льону-довгунця, а й під час зрізання льону олійного. Розроблено конструктивні рекомендації щодо інтеграції подільників у сучасні льонозбиральні машини, зокрема оптимізації висоти встановлення, застосування гнучкого кріплення, раціональної кривизни носової частини та поверхонь із низьким коефіцієнтом тертя. Отримані результати підкреслюють, що подільники слід розглядати як невід'ємний функціональний компонент під час збирання обох категорій льону, оскільки вони безпосередньо впливають на ефективність роботи машини, рівномірність формування стрічок та збереження якості матеріалу.

Ключові слова: збирання льону; льон полеглий; подільник; льон-довгунець; льон олійний; відділення стебел; нахил стебла; механічна взаємодія.

O. Yaheliuk

FUNCTIONAL ROLE OF DIVIDERS IN HARVESTING LODGED FLAX

Lodged flax remains one of the most critical challenges in mechanized harvesting due to stem interlocking, ground-level deformation, and the high elasticity of flax stems. While the functional role of crop dividers in fiber flax pulling systems is well described in classical literature, little attention has been paid to their applicability in harvesting modern oilseed flax, whose increasing plant height and density lead to stem-flow behaviour similar to lodged fiber flax. This paper presents an analytical evaluation of divider designs, synthesizing findings from recent engineering studies and technical documentation. The mechanisms of stem separation, lifting forces, and controlled pre-bending are examined to clarify how divider affect feeding stability and harvesting quality. Particular emphasis is placed on comparing rigid and spring-loaded dividers and identifying their performance under varying lodging conditions. The analysis demonstrates that dividers significantly improve the completeness of stem capture, reduce bending-induced damage, and stabilize crop flow not only in fiber flax pulling but also in cutting-based oilseed flax systems. Design implications are formulated to guide the integration of divider into modern flax harvesters, including adjustable height settings, flexible mounting, optimized nose curvature, and low-friction surfaces. The findings highlight that crop dividers should be considered a functional component for both flax categories, with direct impact on harvesting efficiency, ribbon uniformity, and material preservation.

Keywords: Flax harvesting; Lodged flax; Crop divider; Fiber flax; Oilseed flax; Stem separation; Stem bending; Mechanical interaction;

Introduction. Flax (*Linum usitatissimum* L.) is a historically important crop grown for fiber and seed [1]. Unlike most grain crops, fiber flax is harvested by pulling the entire plant (including roots) from the soil rather than cutting [2]. This preserves the full length of the stem for maximum fiber yield. Flaxseed is harvested using flax harvesters or separation technology, but the stems are cut [3]. A critical component of mechanized flax pulling harvesters is the crop divider – a wedge-like guiding device at the front of the harvester. The divider's role is to separate standing flax plants into manageable strips and guide them into the pulling mechanism of the machine [3].

However, flax is a slender, elastic and tall crop, with fiber varieties reaching 0.9–1.2 m height [4, 5] and exceptionally high elastic and slenderness ratios [4]. This makes flax prone to lodging – bending or falling over due to wind, rain, or dense sowing [6]. Lodged (flattened or severely inclined) flax presents a major challenge during harvesting. The divider must lift and part tangled, leaning stems without excessive losses or fiber damage. [6, 7] Modern engineering research, much of it from flax-growing regions of Eastern Europe (e.g. the western regions of Ukraine), has focused on improving divider [8].

This paper reviews modern types of flax crop dividers and evaluates which designs perform most effectively under lodging conditions. We examine the stem separation process by the divider, the forces acting on flax stems, and how stem length and inclination angle affect harvest quality.

Analysis of recent studies. The harvesting methods differ between the two types of the flax (fiber and oilseed) due to the distinct agronomic and morphological characteristics of the plants. Fiber flax

© О. Ягелюк

requires pulling the entire plant from the ground, preserving the full stem for fiber extraction. This is typically done using specialized flax pulling machines (fig. 1). [2, 11] In contrast, oilseed flax is generally harvested by cutting the stems using conventional combine harvesters or specially adapted mechanisms [3].



Fig. 1. The Flax double rows pulling machine. Illustration provided by source [2]

While there is a broad body of literature and technical development focused on dividers for fiber flax harvesters, there is a noticeable lack of unified classification or comparative evaluation of different divider types across both flax categories. Previous studies by Dai et al. [3] and Mańkowski et al. [7] have detailed designs for dividers in fiber flax pulling systems. Similarly, Didukh et al. [2] investigated mechanical solutions for pulling oleaginous flax but did not elaborate on divider configuration. This fragmentation creates an opportunity for holistic analysis of crop divider function and design in flax harvesting.

Additionally, most existing studies focus on the operational dynamics of dividers for a specific flax type, without drawing broader design principles or universal recommendations. For example, research has shown that the geometry and positioning of the divider influence how the stems enter the pulling unit – which directly affects pulling purity, fiber alignment, and overall harvest quality [8, 10]. However, few studies attempt to provide a unified typology of flax dividers or systematically compares their suitability for varying field conditions and flax varieties.

Moreover, with current trends towards mechanizing oilseed flax harvesting and improving the fiber potential of linseed stems, there is a growing need to incorporate divider technologies into machines used for oleaginous flax. High-density sowing and improved varietal height have made the oilseed flax crop more susceptible to overlapping and irregular feeding, even in standing crops. Despite this, dividers are rarely integrated into combines used for linseed, partly due to the assumption that cutting eliminates the need for guided feeding. However, recent engineering analyses suggest that stem orientation and guidance remain important even during cutting, especially to ensure uniform swathing, reduce fiber entanglement, and prevent reel blockage [9].

Table 1.

Comparison of flax divider types

Divider Type	Design Features	Performance in Lodged Flax
Rigid bar divider	Long steel wedge bar with fixed mounting; bent upward tip; often has skid plate for ground contact.	Can part standing crop well, but tends to push or ride over severely lodged stems. High resistance in downed crop can cause missed stems or tangling. Less forgiving over obstacles, so lodged patches may reduce reliability.
Spring-loaded divider	Wedge bar with spring-loaded or pivoting attachment to frame. Tip (toe) can move upward when resistance is encountered, then return. Height often adjustable.	Much better adaptation to lodged or uneven crop. Divider “floats” to maintain contact, lifting fallen stems gently. Reduces risk of bulldozing lodged plants and improves reliability when harvesting lodged flax. Helps ensure more complete gathering of low-lying stems with less fiber damage.

From an engineering standpoint, crop dividers are responsible for three main functions: 1. Isolating a band of stems corresponding to the width of the pulling or cutting mechanism. 2. Pre-aligning or inclining the stems in a manner that facilitates smooth entry into the harvesting zone. 3. Minimizing resistance and losses by reducing tangling, overlapping, or stem breakage at the machine's entry point.

When used with fiber flax, dividers ensure stems remain intact and properly aligned for downstream processing, such as retting and scutching. For oilseed flax, dividers could assist in reducing losses by guiding stems consistently into the cutter bar and maintaining a cleaner swath for post-harvest seed separation or potential fiber extraction. Research shows that the consistency of stem orientation directly correlates with the efficiency of harvesting belts or reel-cutter interaction [3, 9].

Given the importance of these processes, and in light of the limited cross-type studies, the present work aims to fill this research gap. The goal is to provide a comprehensive analysis of divider design and operation for flax harvesting under varied agronomic conditions. This involves studying both fiber and oilseed flax and exploring their shared requirements for crop feeding into the harvesting apparatus. This is especially relevant for regions such as Western Ukraine, where both types of flax are cultivated and advanced harvesting techniques are under development.

The aim of this analytical study is to evaluate the functional suitability of different types of flax crop dividers under conditions of lodged and uneven stands, and to identify the key engineering factors that influence stem separation, lifting efficiency, and feeding quality during harvesting.

The study also aims to generalize the operational principles of dividers for both fiber and oilseed flax and to determine which geometrical and mechanical characteristics of dividers most significantly affect harvesting quality, completeness of picking, and the preservation of stem integrity.

Materials and Methods. This study is analytical in nature and is based on a structured review and synthesis of scientific, technical, and engineering sources related to flax harvesting mechanisms. The material for analysis includes peer-reviewed research articles published between 2015 and 2025 [2-4, 7-10], patents on pulling and dividing devices [12-16], operational documentation for flax harvesters, and technical manuals describing divider configurations [6, 7, 11]. Special attention was given to studies examining -stem-divider interaction, lodged crop behaviour, and the influence of divider geometry on the feeding quality of both fiber and oilseed flax.

The methodological approach involves comparative evaluation of the two dominant categories of flax crop dividers – rigid bar dividers and spring-loaded or floating dividers. It based on their structural characteristics, adaptability to uneven or lodged crops, and their documented impact on stem lifting, separation quality, and the completeness of feeding into the pulling or cutting mechanism. The analysis incorporates engineering criteria such as divider height, nose curvature, side-rod geometry, and the kinematic relationship between the divider and the forward motion of the harvester.

To clarify how the divider influences harvesting quality, the process of stem separation was examined through functional descriptions available in the literature and technical documentation. These sources provide information on the forces acting on stems as they pass through the divider zone, including lateral bending forces, lifting forces, frictional interactions, and the transitional tensile forces applied by pulling belts or disk-belt mechanisms. The evaluation focuses on understanding how stem length, lodging angle, crop density, and divider positioning contribute to successful stem isolation, lifting, and feeding continuity.

The study employs synthesis of reported engineering findings, qualitative comparison of device designs, and interpretation of agrotechnical recommendations regarding acceptable harvesting losses, stem stretching, and ribbon alignment. This integrative analytical method allows the identification of the most influential factors determining the performance and suitability of different divider types under lodged flax conditions, and enables formulation of generalized principles applicable to harvesting both fiber and oilseed flax.

Results. As the flax (fiber flax) harvester advances, the divider initiates the harvesting process by isolating a defined strip of flax stems and guiding it toward the pulling apparatus. This interaction can be described as a sequence of functional stages (Fig. 2).

1. Entry of stems. The pointed nose of the divider penetrates the flax stand, while the lower rod or skid operates at ground level or near the crop base. Side rods extend upward and backward, forming a wedge-shaped structure that separates the standing crop into discrete strips corresponding to the width of the pulling mechanism. As a result, the flax stand is divided into parallel bands, each directed into the intake zone between converging pulling belts or between a belt and a disk.

2. Initial separation and controlled inclination. As stems come into contact with the side rods of the divider, they are displaced laterally and begin to incline relative to their original upright position. This inclination is induced by the divider geometry and forward motion of the machine. Stems directly contacted by the divider are guided outward or toward the pulling throat, while central stems within the strip also incline due to mechanical interaction and entanglement with neighboring plants. When properly adjusted in terms of height, angle, and spacing, the divider produces a controlled pre-inclination of the entire stem group, which facilitates smoother entry into the pulling zone and reduces excessive bending during subsequent gripping.

3. Clamping and pulling. Once the separated and pre-oriented strip reaches the pulling apparatus, the stems are clamped and uprooted. In conventional systems, converging rubber belts grip the stems, whereas more recent designs employ a belt-disk combination in which a rotating disk presses the stems against a moving belt. In both configurations, the stems are securely clamped and conveyed upward and backward as the harvester advances, resulting in their extraction from the soil. At this stage, the divider has completed its primary function by ensuring orderly delivery of stems to the pulling mechanism.

4. Merging and laying. Following uprooting, multiple streams of flax from adjacent pulling sections are combined into a single flow. The belts typically converge downstream of the pulling zone, merging the plant streams before transferring them to the rear of the machine. A transverse conveyor or laying mechanism then deposits the stems onto the field as a uniform ribbon suitable for drying and retting. The quality of this ribbon depends strongly on the initial separation performed by the divider; inadequate strip formation may lead to stem crossing, uneven ribbon thickness, or overlapping swaths, adversely affecting retting uniformity and fiber quality.

Throughout this process, the forces on the flax stems change in nature: Initially, at the divider, stems experience lateral bending forces and friction; later, the pulling apparatus applies tensile force (vertical pulling) to uproot them. Let's examine the forces at the divider stage in more detail.

During the stem-dividing process, flax stems are subjected to a combination of lateral, lifting, frictional, and inertial forces, the interaction of which determines the effectiveness of stem separation under lodged conditions. The lateral force generated by the divider rod induces stem bending and initiates separation of interlocked stalks. Its magnitude is governed by divider geometry, surface characteristics, and forward speed; smooth profiles and low-friction surfaces promote stem sliding and reduce resistance, whereas blunt or poorly aligned dividers increase bending stress and the risk of stem damage. Such effects are particularly pronounced in lodged flax, where stems tend to ride along the divider surface before entering the pulling or cutting zone [3, 7, 10].

An upward force component arises from the combined effect of divider inclination, nose curvature, and forward motion of the harvester. Although typically smaller than the lateral force, this lifting action is critical for raising flat-lying stems and enabling their engagement with the pulling or cutting mechanism. Passive lifting through wedge-shaped or curved divider elements is the prevailing solution in flax harvesters, contrasting with active lifting systems used in other crops. Under severe lodging, increased stem mass and moisture intensify gravitational resistance, requiring more effective geometric lifting rather than increased forward speed [7, 9].

In addition to bending and lifting forces, lodged flax presents substantial drag and inertial resistance due to stem entanglement and soil contact. When divider geometry or operating speed is suboptimal, stems may be displaced as a compact mass rather than being cleanly separated, leading to unstable feeding and uneven harvesting. Studies indicate that, in such conditions, a portion of the pulling effort is effectively transferred to the traction force of the machine, particularly when stems are inclined relative to the pulling direction [2, 8, 10].

Overall, the divider governs the redistribution of forces acting on lodged flax by converting excessive bending and drag into controlled stem inclination prior to tensile loading by the pulling or cutting apparatus. Modern flexible or spring-loaded divider designs mitigate force peaks by yielding under resistance, thereby reducing stem breakage, fiber damage, and feeding interruptions. Effective divider design therefore relies on balancing lateral separation, passive lifting, and friction control to ensure stable stem flow with minimal mechanical stress [7, 9].

The quality of flax harvesting is strongly influenced by stem length and the angle at which stems enter the harvesting apparatus, particularly under lodged conditions. In this context, harvesting quality is assessed through several interrelated indicators, including picking completeness, the extent of stem damage, and the uniformity of the formed flax ribbon. Lodging severity is directly associated with reduced stem

inclination relative to the horizontal plane, while excessive stem length increases the likelihood of lodging and complicates controlled feeding into the header (Table 2).

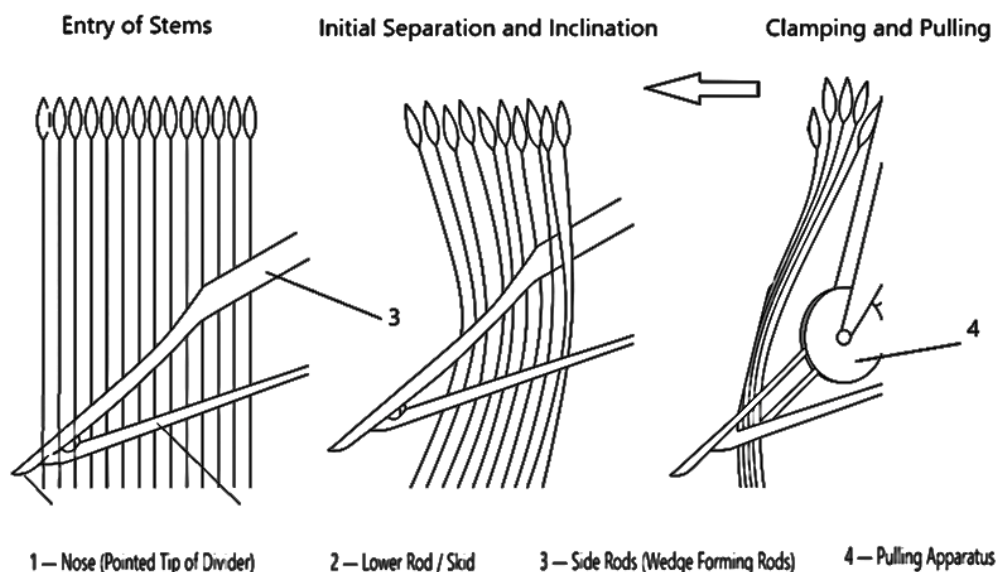


Fig. 2. Stages of Stem Separation by the Divider. Illustration provided by author

Under optimal conditions, upright flax stands with stem lengths of approximately 0.8–1.5 m allow harvesting systems to achieve near-complete picking efficiency, typically exceeding 99%. However, lodging significantly alters stem orientation and accessibility. When stems lie close to the ground or are inclined opposite to the direction of travel, the effectiveness of stem capture decreases, and acceptable picking purity may drop to around 95%. Missed stems are predominantly those that remain below the effective operating zone of the divider or are insufficiently separated prior to entering the pulling or cutting mechanism. Short lodged stems (<0.5 m) are particularly challenging, as they may escape divider contact or fail to be securely engaged by pulling belts, necessitating careful adjustment of divider height and operating direction.

Table 2.

Key harvesting quality parameters for flax (fiber and oilseed) under upright and lodged conditions

Parameter	Typical value / threshold	Practical implication	Source
Stem length (upright flax)	0.8–1.5 m	Enables high picking completeness	[7]
Stem length (short lodged flax)	<0.5 m	Increased risk of missed stems	[2,10]
Picking completeness (upright)	≥99%	Optimal harvesting quality	[7]
Picking completeness (lodged)	≈95%	Acceptable losses under lodging	[7,10]
Maximum allowable stem stretch	≤1.2× (20%)	Preserves fiber integrity	[2,8]
Allowable ribbon skew angle	≤20°	Prevents ribbon entanglement	[7,10]
Critical lodging angle	30–40°	Cutter bar alone becomes ineffective	[6,9]

Lodging also increases the risk of mechanical damage to stems and fibers. Long flax stems subjected to pulling at shallow angles experience increased bending and tensile deformation. Excessive longitudinal stretching, exceeding approximately 20% of stem length, is generally associated with fiber slippage, partial breakage, or surface damage, which negatively affects fiber quality and seed retention. Moreover, uneven stem orientation during feeding can result in skewed alignment within the flax ribbon. While a misalignment angle of up to 20° is typically acceptable, larger deviations promote ribbon

entanglement and irregular deposition on the field. These effects are exacerbated when divider geometry or positioning does not adequately account for stem length and lodging angle.

The uniformity of the laid flax ribbon represents a further critical quality criterion, as it directly influences subsequent retting processes. Uneven feeding caused by lodging may produce ribbons with gaps, overlaps, or localized bunching. Engineering and agrotechnical guidelines therefore emphasize the formation of straight, continuous ribbons with minimal skew and consistent thickness, conditions that are difficult to achieve without effective stem guidance.

Recent engineering studies consistently identify the divider as a decisive element governing feeding stability, pulling continuity, and stem integrity in fiber flax harvesting. Experimental and analytical investigations have shown that dividers not only separate crop strips but also induce controlled pre-orientation of stems, ensuring smooth entry into belt or disk-belt pulling systems [2, 7, 10]. In the absence of such guided pre-alignment, long and elastic flax stems tend to cross, twist, or bypass the pulling zone, resulting in reduced picking purity and increased mechanical damage.

Although these findings were originally established for fiber flax, they are increasingly applicable to modern oilseed flax. Intensified cultivation practices aimed at maximizing seed yield have led to higher plant densities and increased stem height, causing oilseed flax to exhibit mechanical behavior comparable to lodged fiber flax. Under such conditions, stems interlock, resist separation, and enter the cutting zone at inconsistent angles, reproducing the same mechanical challenges observed in pulling-based systems [6, 9]. Consequently, effective harvesting requires not only cutting action but also controlled stem orientation prior to engagement with the working organs.

In oilseed flax harvesting, the absence of a divider often results in uneven cutter-bar loading, incomplete capture of low-lying stems, elevated seed losses due to repeated reel impact, and irregular swath formation. Published field observations indicate that when lodging angles exceed approximately 30–40°, the cutter bar alone is insufficient to lift and guide stems, leading to accumulation and non-uniform flow at the header [6, 9]. Therefore, the engineering principles underlying divider use in fiber flax – stabilizing stem flow, lifting low-lying plants, reducing resistance, and preventing entanglement – are directly transferable to oilseed flax harvesting. Recent developments in oilseed flax machinery, including prototypes from Chinese manufacturers (Fig. 3), confirm a growing tendency to integrate divider-like guiding elements into cutting-based harvesting systems, reflecting their recognized role in improving crop engagement and harvesting quality [9, 16].



Fig. 3. Example of a modern tracked-type flax harvester developed in China, equipped with guiding elements that perform divider functions. Illustration provided by source [9] and manufacturer open-access materials

Based on the synthesis of mechanical interaction principles, divider configurations, and lodging-related stem behavior, the following design implications can be formulated for both fiber and oilseed flax harvesting systems (Table 3).

In summary, the analysis of lodged fiber flax demonstrates that stem inclination, interlocking, and ground-level deformation fundamentally disrupt the harvesting flow unless the stems are separated and lifted prior to entering the pulling or cutting mechanism. Across multiple studies, the divider consistently

appears as the component that restores order to the flow by reducing lateral resistance, initiating controlled stem inclination, and ensuring that even low-lying plants are captured.

Table 3.

Design Implications for Crop Divider Application in Fiber and Oilseed Flax Harvesting

Design Implication	Engineering Rationale	Relevance for Fiber Flax	Relevance for Oilseed Flax
Low divider height near soil level	Ensures capture of low-lying stems; prevents stems from slipping under the divider	Critical for lodged fiber flax due to long, flexible stems	Necessary for tall, dense modern oilseed flax prone to lodging
Spring-loaded / floating mounting	Reduces peak forces, adapts to uneven terrain, prevents bulldozing	Maximizes picking completeness in lodged stands	Stabilizes cutter-bar feeding and reduces seed loss
Moderate upward nose curvature	Generates a lifting vector; avoids excessive bending	Prevents fiber damage; improves orientation before pulling	Ensures uniform feeding into cutter bar in lodged conditions
Smooth tapering of side rods	Controls gradual stem inclination; reduces resistance	Maintains stable stem flow into belts/disks	Reduces bunching and reel overload
Passive guiding elements for cutting-based systems	Compensates for lack of pulling mechanism; aligns stems.	Optional but beneficial under severe lodging	Strongly recommended for modern oilseed flax combines
Divider selection by lodging severity	Matches mechanical behavior to field conditions	Flexible dividers required at lodging >30–40°	Same threshold applies; cutter bar alone insufficient
Universal adjustable divider for dual-purpose harvesters	Increases machine versatility; reduces need for header changes	Applicable when harvesting mixed flax varieties	Supports oilseed harvesting with varying stem density
Low-friction contact surfaces	Minimizes snagging and surface abrasion	Preserves fiber quality	Reduces boll loss and stem tearing

These findings are directly applicable to oilseed flax harvesting, as contemporary agronomic practices increasingly result in denser stands and greater average stem height than those typical of traditional oilseed flax production. Under lodging conditions, such stands exhibit mechanical behavior analogous to fiber flax, characterized by stem interlocking, low entry angles relative to the header, and increased resistance to separation at ground level. In the absence of a guiding element at the header front, oilseed flax stems tend to enter the cutting zone irregularly, leading to incomplete stem capture, uneven loading of the cutter bar, increased seed loss due to repeated reel impact, and non-uniform swath formation [3, 9, 16]. Consequently, the functional role of the divider extends beyond pulling-based systems: by stabilizing stem flow, promoting controlled pre-orientation, and mitigating the mechanical effects of lodging, dividers become a critical component in reducing harvesting losses and ensuring consistent feeding in cutting-based oilseed flax harvesters.

Conclusions. This analytical study clarifies the functional role of crop dividers as a key interface between lodged flax stems and harvesting mechanisms. By synthesizing recent engineering studies, technical documentation, and patent-based solutions, the paper demonstrates that dividers are not auxiliary components but critical elements governing stem separation, lifting, and flow stabilization prior to pulling or cutting.

The analysis shows that under lodged conditions the divider redistributes mechanical loads acting on flax stems by converting excessive bending and drag into controlled stem inclination before tensile loading occurs. Lateral forces initiate separation of interlocked stems, while passive lifting generated by divider geometry enables engagement of flat-lying plants with the harvesting apparatus. In such conditions, divider design directly affects harvesting completeness, feeding stability, and the risk of stem damage.

A comparative evaluation of rigid and spring-loaded divider configurations indicates that flexible or floating designs provide superior adaptability to uneven terrain and severe lodging. Their ability to yield under resistance mitigates force peaks, reduces bulldozing of lodged stems, and minimizes stress concentrations that can lead to fiber breakage or uneven uprooting.

Although divider applications have traditionally been associated with fiber flax pulling systems, this study demonstrates that the same functional principles are increasingly relevant for modern oilseed flax

harvesting. Increased plant height and stand density cause oilseed flax to exhibit mechanical behavior similar to lodged fiber flax, making controlled stem guidance essential even in cutting-based systems. Recent machinery concepts and patented solutions confirm a technological shift toward integrating divider or divider-like guiding elements into oilseed flax harvesters.

The main contribution of this work lies in formulating design implications that link divider geometry, mounting elasticity, and operating conditions to the mechanical behavior of lodged flax. These implications provide a structured framework for selecting and adapting divider designs for both fiber and oilseed flax harvesting. Future research should focus on quantitative validation of these relationships through field experiments and numerical modeling to refine divider parameters under varying lodging scenarios.

References

1. Yaheliuk, S., Fomych, M., & Rechun, O. (2024). Global market trends of grain and industrial crops. *Commodity Bulletin*, 17(1), 134-145. doi: 10.62763/ef/1.2024.134.
2. Volodymyr Didukh, Svitlana Yaheliuk, Volodymyr Bodak, Maksym Bodak, Olexandr Yaheliuk (2024) Pulling device for harvesting of Oleaginous Flax. *Bulgarian Journal of Agricultural Science (BJAS)* 30(3), 539–546 (Scopus) https://journal.agrojournal.org/page/en/details.php?article_id=4677
3. Dai, F.; Zhao, W.Y.; Shi, R.J.; Zhao, Y.M.; Zhang, F.W.; Liu, X.L.; Zhang, S.L. (2022) Research progress analysis of key technology and equipment for mechanized harvest of flax. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences* 44 (6), 1148–1158 <https://doi.org/10.19802/j.issn.1007-9084.2021293>
4. Didukh, V., Yaheliuk, S. Artyukh, T, Albota, D, Holiiy, O (2022) Decrease of elastic properties of oleaginous flax residues by decortication. *INMATEH-Agricultural Engineering* 67(2), 285–292 <https://doi.org/10.35633/inmateh-67-29>
5. Flax Council of Canada – Flax Production Manual, Chapter 2: Seed and Seeding Practices (2015). <https://archive.flaxcouncil.ca/growing-flax/chapters/seed-and-seeding-practices/#:~:text=Chapter%20%3A%20Seed%20and%20Seeding,not%20prone%20to%20Sclerotinia> (date of access: 02.11.2025).
6. Canola Council of Canada (2017). Straight cutting tips for leaning and lodged crop. <https://www.canolacouncil.org/canola-watch/2010/09/01/how-to-set-a-swather-for-lodged-crop/> (date of access: 02.11.2025).
7. Mańkowski, J., Maksymiuk, W., Sychalski, G., Kołodziej, J., Kubacki, A., Kupka, D., & Pudelko, K. (2018). Research on New Technology of Fiber Flax Harvesting. *Journal of Natural Fibers*, 15(1), 53–61. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1302390>
8. Yukhymchuk, S. et al. (2023). New design of disc-belt flax pulling apparatus and energy analysis of pulling process. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 71(3), pp.368-375.
9. Shi, R. et al. (2023). Optimal Design and Testing of a Crawler-Type Flax Combine Harvester. *Agriculture*, 13(2):229.
10. Yukhymchuk, S. et al. (2025). Research on inclination of flax stems that do not interact with dividers of pulling apparatus. *Engineering for Rural Development*
11. ZFJ TEXTILE MACHINERY CO. Hemp/Flax Harvester Machine. <https://www.hthiglobal.com/hemp-flax-harvester-machine-product/#:~:text=,machine> (date of access: 02.11.2025).
12. European Patent Office (2024) *Crop divider of a harvesting device with divider tip*. (EP4480300A1) <https://patents.google.com/patent/EP4480300A1/en>
13. United States Patent Office (2016) *Modular crop divider and base cutter arrangement for sugarcane harvesters* (US10058028B2) <https://patents.google.com/patent/US10058028B2/en?q=A01D63%2f04>
14. United States Patent Office (2012) *Divider support apparatus with integral adjustable torsional preload mechanism and vibration damper* (US8141331B2) [https://patents.google.com/patent/US8141331B2/en?q=\(A01D63%2f04\)](https://patents.google.com/patent/US8141331B2/en?q=(A01D63%2f04))
15. Netherlands Patent Office (1989) *Stem-crop harvesting machine - grips stems and seed heads and pulls them apart* (NL8900759A) <https://patents.google.com/patent/NL8900759A/en>
16. China National Intellectual Property Administration (2021) *Biomimetic flax harvesting device and harvesting method* (CN108575269B) <https://patents.google.com/patent/CN108575269B/en>

Л. Ю. Федік, Ю. В. Федорусь

Луцький національний технічний університет

АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ У ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ: SOLIDWORKS ELECTRICAL, EPLAN ELECTRIC P8 ТА AUTOCAD ELECTRICAL

У статті здійснено порівняльний аналіз сучасних ECAD-систем, що застосовуються для автоматизованого проєктування електричних схем у харчовій промисловості. Розглянуто архітектуру та функціональні можливості SolidWorks Electrical, EPLAN Electric P8 та AutoCAD Electrical, наведено практичні кейси їх використання у виробничих процесах і навчальних закладах. Показано, що SolidWorks Electrical забезпечує інтеграцію ECAD-MCAD, EPLAN Electric P8 характеризується високим рівнем стандартизації та автоматизації, а AutoCAD Electrical вирізняється доступністю та ефективністю для локальних систем керування. Визначено перспективи розвитку ECAD-рішень у контексті Industry 4.0, зокрема інтеграцію з хмарними сервісами, IoT та цифровими двійниками.

Ключові слова: ECAD, автоматизоване проєктування, SolidWorks Electrical, EPLAN Electric P8, AutoCAD Electrical, харчова промисловість, Industry 4.0.

L. Fedik, Yu. Fedorus

AUTOMATED DESIGN OF ELECTRICAL SYSTEMS IN THE FOOD INDUSTRY: SOLIDWORKS ELECTRICAL, EPLAN ELECTRIC P8 AND AUTOCAD ELECTRICAL

This article provides a comparative analysis of modern ECAD systems used for automated design of electrical circuits in the food industry. It examines the architecture and functionality of SolidWorks Electrical, EPLAN Electric P8, and AutoCAD Electrical, and provides practical examples of their use in manufacturing processes and educational institutions.

SolidWorks Electrical provides ECAD/MCAD integration, EPLAN Electric P8 is characterized by a high level of standardization and automation, and AutoCAD Electrical is accessible and efficient for local control systems. The development prospects for ECAD solutions in the context of Industry 4.0 are identified, including integration with cloud services, IoT, and digital twins.

Keywords: ECAD, computer-aided design, SolidWorks Electrical, EPLAN Electric P8, AutoCAD Electrical, food industry, Industry 4.0.

Постановка проблеми та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. У сучасній харчовій промисловості електричні системи відіграють ключову роль у забезпеченні безперервності технологічних процесів, підвищенні енергоефективності та дотриманні санітарних норм. Проте традиційні методи проєктування електричних схем залишаються трудомісткими, схильними до помилок і не забезпечують належної інтеграції з механічними системами. Тому виникає потреба оптимізувати процеси проєктування, що можливо завдяки використанню сучасних систем автоматизованого проєктування (САПР). Такі системи здатні поєднувати електричні та механічні компоненти, автоматично генерувати точну технічну документацію та відповідати міжнародним стандартам [3; 5; 7; 11; 17].

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми. Дослідження Smith J., Brown A. Robotics and Automation in Food Manufacturing (Springer Nature, 2025) свідчать про значення інтеграції CAD/ECAD у концепції Industry 4.0 та створенні цифрових двійників. А аналіз Garcia M., Lee K. Computer-aided design and manufacturing in food processing (JISEM, 2025) показує вплив CAD на ефективність виробництва та відповідність міжнародним стандартам HACCP і ISO 22000. Практичні кейси, представлені офіційними ресурсами Autodesk, SolidWorks та EPLAN Software, демонструють успішне застосування SolidWorks Electrical, EPLAN Electric P8 та AutoCAD Electrical у харчовій галузі. Це дозволяє скоротити час проєктування, підвищити точність технічної документації та забезпечити відповідність міжнародним нормам [2-4; 7; 11].

Дослідження, представлені у виданнях Robotics and Automation in Food Manufacturing (Springer Nature, 2025), Computer-aided design and manufacturing in food processing (JISEM, 2025), а також у працях Сіваковської О. М., Трофімової Ю. В., Кондіус І. С. (2023), підтверджують, що використання сучасних комп'ютерних технологій та проєктування ліній зв'язку у системах автоматизації сприяє підвищенню ефективності виробничих процесів і формуванню комплексних рішень для харчової промисловості [7; 11; 14; 20].

У той же час демонстрація ефективності застосування ECAD-рішень у поєднанні з проєктуванням виконавчих механізмів, пунктів управління та інтеграцією промислових роботів FANUC, YASKAWA, ABB, KUKA у виробничі процеси виконані Федорусем Ю. В. (2025), Гуньком

Ю. Л. (2024) та Кондіус І. С., Остапчуком Д. О. (2023). Це забезпечує гнучкість систем та їх відповідність міжнародним стандартам [7; 11; 14; 17; 18; 21].

Висновки авторів (Федік Л. Ю., Сіваковської О. М., 2023) свідчать, що інтеграція комп'ютерних технологій у навчальний процес забезпечує студентам можливість моделювати реальні виробничі ситуації та формувати професійні компетентності. Таким чином, ECAD-рішення виступають важливим інструментом не лише для промисловості, але й для освіти. Дослідження цих авторів підтверджують, що комплексний підхід до проектування систем автоматизації – від ліній зв'язку та пунктів управління до інтеграції виконавчих механізмів і робототехніки – забезпечує практичну цінність, унікальність завдань та відповідність міжнародним стандартам [14; 17; 18].

Отже, сучасні публікації підтверджують актуальність інтеграції систем автоматизованого проектування у проектування електричних систем харчових підприємств.

Постановка завдань. Враховуючи результати аналізу сучасних досліджень основними завданнями цієї роботи є:

1. Визначення функціональних можливостей програмних комплексів SolidWorks Electrical, EPLAN Electric P8 та AutoCAD Electrical у контексті харчової промисловості;
2. Аналіз практичних аспектів їх застосування для проектування систем автоматизації;
3. Оцінка освітнього та інженерного потенціалу ECAD-рішень у підготовці майбутніх фахівців;
4. Узагальнення переваг та обмежень інтеграції CAD/ECAD у виробничі процеси харчових підприємств.

Ціллю статті є оцінка інтеграції сучасних систем автоматизованого проектування (CAD/ECAD) у процес розробки електричних систем харчових підприємств з урахуванням санітарних вимог, специфіки обладнання та результатів власних наукових розробок.

Викладення основного матеріалу дослідження. Традиційні методи проектування електричних систем часто не враховують специфічні санітарні вимоги харчових підприємств та не забезпечують належної інтеграції з механічними моделями. Це створює потребу у сучасних ECAD-рішеннях, здатних поєднувати електричні та механічні компоненти в єдиному середовищі. Одним із таких інструментів є SolidWorks Electrical – програмне забезпечення, що забезпечує повний цикл електротехнічного проектування: від створення схеми до її інтеграції у тривимірну модель [3; 7; 11].

SolidWorks Electrical складається з двох основних модулів: Schematic та 3D.

Модуль Schematic призначений для створення однолінійних та багатолінійних електричних схем із використанням вбудованої бібліотеки символів, що відповідають міжнародним стандартам IEC та NFPA. Програма автоматично нумерує проводи, компоненти та теги, що значно прискорює процес проектування. Крім того, система формує звіти – списки кабелів, проводів і клем, необхідні для виробництва та монтажу.

Другий модуль – SolidWorks Electrical 3D – забезпечує інтеграцію електричної схеми з механічною моделлю виробу. Інженер отримує можливість розміщувати компоненти у тривимірному просторі, прокладати кабелі та джгути, здійснювати перевірку на зіткнення й оптимізувати їх розташування. Така функціональність є особливо важливою для проєктів із обмеженим простором та високими вимогами до точності – зокрема у виробничих цехах харчових підприємств, де необхідно дотримуватися зон гігієнічного контролю [3; 5].

Завдяки взаємодії цих двох модулів SolidWorks Electrical гарантує узгодженість між електричними схемами та механічними моделями. Це має ключове значення для харчових підприємств, де слід враховувати санітарні норми, просторові обмеження та вимоги до монтажу. Такий підхід дозволяє мінімізувати кількість помилок, скоротити час проектування та забезпечити відповідність міжнародним стандартам.

Застосування версії SolidWorks Electrical 2025 відкрило новий етап розвитку програмного комплексу. У версії 2025 реалізовано низку важливих удосконалень, спрямованих на підвищення ефективності роботи інженерів. Зокрема: вдосконалено імпорт електротехнічного контенту; оновлено документацію для клем і колодок; додано функцію створення тривимірних масивів джгутів; впроваджено хмарне рішення Electrical Schematic Designer, яке дозволяє працювати над електричними схемами безпосередньо у веб-браузері, зберігаючи структуру виробу на платформі 3DEXPERIENCE [3].

Ці нововведення відкривають нові можливості для віддаленої співпраці між інженерами, технологами та сервісними фахівцями, забезпечуючи інтеграцію проєктних даних у єдиному цифровому середовищі.

SolidWorks Electrical знайшов широке застосування під час проектування електричних шаф управління, систем автоматизації, машин та обладнання, що застосовуються на харчових підприємствах. Зокрема, інженер може: створити схему керування для лінії фасування; розмістити компоненти у тривимірній моделі шафи з урахуванням габаритів і санітарних вимог; автоматично згенерувати виробничу документацію; синхронізувати всі зміни між електричною схемою та тривимірною моделлю [3; 5].

Такий підхід забезпечує точність проектування, скорочує час підготовки документації та сприяє відповідності гігієнічним нормам харчової галузі.

У харчовій галузі особливо важливо враховувати специфіку обладнання: застосування нержавіючих матеріалів, захист від вологи та пилу (IP65/IP67), відповідність стандартам HACCP та ISO 22000, а також можливість швидкого демонтажу для санітарної обробки. SolidWorks Electrical дозволяє моделювати ці аспекти вже на етапі проектування, що знижує ризики під час експлуатації та забезпечує відповідність міжнародним вимогам.

Врахування цих аспектів на етапі проектування створює основу для подальшої інтеграції електричних схем у загальну структуру виробничої лінії, що дозволяє: оптимізувати енергоспоживання обладнання; скоротити час на монтаж і введення в експлуатацію; підвищити точність технічної документації; забезпечити відповідність нормам безпеки та гігієни; підготувати цифрові двійники для реалізації концепції Industry 4.0 [3; 7; 11].

Завдяки можливості створення цифрової моделі виробу підприємства отримують інструмент для проведення віртуального тестування, аналізу навантажень, прогнозування зношування компонентів і планування технічного обслуговування. Ефективність SolidWorks Electrical підтверджується не лише теоретичними дослідженнями, а й практичними прикладами його застосування у виробничих умовах.

SolidWorks Electrical має не лише виробниче, а й освітнє значення. Завдяки інтуїтивному інтерфейсу, гнучкості та інтеграції з SolidWorks CAD, програмний комплекс є ефективним інструментом як для досвідчених інженерів, так і для студентів, які навчаються електротехнічному проектуванню.

У навчальних закладах він використовується для моделювання реальних виробничих ситуацій, що дозволяє студентам отримати практичні навички роботи з електричними схемами, інтеграції ECAD-MCAD та створення технічної документації відповідно до міжнародних стандартів (IEC, NFPA). Це сприяє формуванню компетентностей, необхідних для роботи на сучасних підприємствах, де критично важливими є точність, відповідність санітарним нормам та інтеграція у концепцію Industry 4.0 [3; 5; 18].

Дослідження, опубліковані у виданнях *Robotics and Automation in Food Manufacturing* (Springer Nature, 2025) та *Computer-aided design and manufacturing in food processing* (JISEM, 2025), підтверджують, що застосування CAD/ECAD у навчальному процесі сприяє підвищенню якості підготовки інженерів [7; 11].

Практичні кейси, представлені компанією Select Technologies (2024), демонструють ефективність використання SolidWorks Electrical у скороченні часу проектування та підвищенні точності технічної документації завдяки інтеграції електричних схем із механічними моделями та відповідності міжнародним стандартам [3; 5].

Отже, освітній та інженерний потенціал SolidWorks Electrical полягає у поєднанні практичного досвіду з академічною підготовкою, що робить його важливим інструментом як для промисловості, так і для освіти. Програмний комплекс виступає платформою цифрової трансформації харчових підприємств, забезпечуючи відповідність міжнародним стандартам, підвищення ефективності виробничих процесів та створення основи для впровадження концепції Industry 4.0.

Перспективними напрямками розвитку SolidWorks Electrical є: розширення хмарних рішень; інтеграція з технологіями IoT; використання цифрових двійників.

Реалізація цих напрямів дозволить харчовим підприємствам ще більше оптимізувати енергоспоживання, підвищити точність технічної документації та забезпечити гнучкість виробництва відповідно до сучасних вимог [3; 11].

Окрім SolidWorks Electrical, важливе значення під час проектування електричних систем харчових підприємств має програмний комплекс EPLAN Electric P8, який забезпечує високий рівень автоматизації та інтеграції з виробничими процесами.

Традиційні методи електротехнічного проектування часто не гарантують належної стандартизації та інтеграції з виробничими процесами харчових підприємств. Що в свою чергу призводить до затримок у модернізації обладнання, складнощів у дотриманні санітарних норм та до зниження ефективності виробництва. У таких умовах виникає потреба використання сучасних ECAD-рішень, здатних автоматизувати проєктні процеси, забезпечити точність технічної документації та інтеграцію з системами управління підприємством [4; 9; 13].

Сучасні дослідження (SpringerLink і JISEM, 2025) підтверджують, що використання EPLAN Electric P8 у харчовій промисловості сприяє цифровій трансформації підприємств, підвищенню продуктивності та відповідності міжнародним стандартам. Практичні огляди (A2M Engineering і EPLAN Software, 2025) демонструють, що система дозволяє усунути повторне введення даних, автоматизувати створення звітів та інтегрувати проєкти з ERP-системами. Це особливо важливо для підприємств із великою кількістю змінних партій продукції [4; 7; 9; 11; 13].

EPLAN Electric P8 забезпечує високий рівень автоматизації проєктних процесів завдяки створенню: принципів електричних схем; кабельних журналів; специфікації обладнання; інших документів, необхідних для виробництва та монтажу.

Крім цього система підтримує міжнародні стандарти IEC, DIN, NFPA, що забезпечує адаптацію проєктів до вимог різних країн. Вона враховує специфіку харчового обладнання, зокрема: використання компонентів із підвищеним ступенем захисту (IP65/IP67); застосування матеріалів, стійких до корозії; вимоги до легкого демонтажу для санітарної обробки [4; 9; 13].

Таким чином, EPLAN Electric P8 виступає потужним інструментом для створення стандартизованих, точних та адаптованих до міжнародних вимог електричних проєктів у харчовій промисловості.

Застосування EPLAN Electric P8 у харчовому виробництві підтверджується прикладами модернізації ліній розливу напоїв і впровадження систем термоконтролю. У цих випадках система дозволяє оперативно адаптувати електричні схеми, оновлювати технічну документацію та забезпечувати безперервність виробничих процесів. Практичні кейси (Timkiv & Moshnoriz і EPLAN Software, 2025) демонструють скорочення часу реалізації проєктів та зменшення кількості помилок у технічній документації.

EPLAN Electric P8 також активно використовується у навчальних закладах для підготовки інженерів. Завдяки модульному підходу та автоматизованим функціям студенти отримують практичні навички роботи з електричними схемами, створення звітів та інтеграції проєктів із системами управління виробництвом. Це сприяє формуванню компетентностей, необхідних для роботи в умовах цифрової трансформації харчової промисловості [4; 13].

Таким чином, EPLAN Electric P8 є не лише програмою для креслення електричних схем, а комплексною платформою інженерного проектування, що забезпечує точність, стандартизацію та ефективність. У харчовій промисловості вона виступає ключовим інструментом цифрової трансформації, дозволяючи підприємствам відповідати сучасним вимогам ринку, підвищувати продуктивність та гарантувати безпеку продукції.

Перспективними напрямками розвитку системи є: розширення інтеграції з хмарними сервісами; застосування технологій IoT; використання цифрових двійників.

Реалізація цих напрямів відкриває нові можливості для оптимізації виробничих процесів і впровадження концепції Industry 4.0, що забезпечує гнучкість та конкурентоспроможність харчових підприємств у глобальному середовищі [4; 9; 13].

Таким чином, SolidWorks Electrical та EPLAN Electric P8 демонструють широкий спектр можливостей для цифрової трансформації харчових підприємств – від інтеграції електричних і механічних моделей до автоматизації створення технічної документації та забезпечення відповідності міжнародним стандартам.

Водночас, для вирішення завдань локального рівня, зокрема проектування систем керування окремими виробничими ділянками, важливу роль відіграє програмний продукт AutoCAD Electrical. Його функціонал орієнтований на ефективне створення та модернізацію локальних систем керування, що забезпечує гнучкість та адаптацію до специфічних вимог харчової промисловості. А саме: електричні системи керування повинні відповідати суворим санітарним нормам, забезпечувати енергоефективність та легко адаптуватися до змін у виробничих процесах. Проте, традиційні методи проектування часто не гарантують належної автоматизації та стандартизації, що створює ризики збоїв у роботі обладнання та втрати продукції. У таких умовах виникає потреба у

використанні спеціалізованих ECAD-рішень, здатних поєднувати точність проєктування з гнучкістю адаптації до міжнародних стандартів [2; 12].

Сучасні дослідження (SpringerLink, 2025; Academia.edu, 2022) підтверджують, що застосування AutoCAD Electrical у харчовій галузі дозволяє скоротити час проєктування, зменшити кількість помилок та забезпечити відповідність міжнародним стандартам ІЕС, ІС, IEEE. Це особливо важливо для підприємств, де точність електротехнічних рішень безпосередньо впливає на безпеку продукції та ефективність виробничих процесів [2; 6; 11].

Практичні огляди, представлені компанією Autodesk (2025) та ресурсом Polimetro.com (2024), демонструють ефективність використання AutoCAD Electrical для модернізації виробничих ділянок та створення локальних систем керування. Застосування цієї програми в цих умовах забезпечує гнучкість проєктних рішень, адаптацію до специфічних вимог харчової промисловості та підвищення рівня автоматизації [2; 23; 24].

AutoCAD Electrical являє собою розширення класичного AutoCAD, яке містить спеціалізований набір інструментів для створення, редагування та документування електричних схем керування. Серед ключових переваг системи є: автоматизація рутинних завдань (нумерація проводів, крос-посилання, генерація звітів); підтримка міжнародних стандартів (ІЕС, ІС, IEEE), що забезпечує відповідність проєктів вимогам різних країн; адаптація схем до локальних вимог з метою проходження технічних аудитів та сертифікацій; інтеграція електричних схем із механічними кресленнями, що є особливо важливим для комплексних проєктів у харчовій промисловості [2; 6; 24].

Отже, AutoCAD Electrical можна розглядати як комплексне рішення для створення точних, стандартизованих і зручних у редагуванні електричних схем. У харчовій промисловості його застосування забезпечує безперервність технологічних процесів, сприяє підвищенню ефективності виробництва та гарантує відповідність міжнародним стандартам. Завдяки доступності та гнучкості AutoCAD Electrical залишається практичним інструментом для реалізації локальних систем керування, що потребують швидкої адаптації до специфічних умов виробничого середовища.

Таким чином, AutoCAD Electrical поєднує точність проєктування з гнучкістю адаптації, забезпечуючи ефективність локальних систем керування та відповідність міжнародним стандартам.

AutoCAD Electrical широко використовується для модернізації та обслуговування виробничих ділянок у харчовій галузі. Наприклад, під час створення електросхеми керування для фасувального автомата інженер може розмістити компоненти на монтажній панелі з урахуванням габаритів, санітарних вимог і розташування кабельних ввідів. Такий підхід дозволяє уникнути помилок під час монтажу та забезпечити відповідність гігієнічним нормам.

У цьому контексті важливо окреслити перспективні напрями розвитку системи, які визначають її подальшу роль у цифровій трансформації виробництва. А саме: розширення інтеграції з хмарними сервісами; застосування технологій IoT; використання цифрових двійників [2; 6; 24].

Реалізація цих напрямів відкриває нові можливості для цифрової трансформації харчових підприємств у контексті концепції Industry 4.0, забезпечуючи їхню гнучкість і конкурентоспроможність на глобальному ринку.

Практичні приклади, наведені компанією Autodesk (2025) та ресурсом Polimetro.com (2024), підтверджують, що використання AutoCAD Electrical сприяє скороченню часу проєктування та підвищенню точності технічної документації. Такий підхід робить програмний комплекс ефективним інструментом для створення локальних систем керування, які відповідають специфічним вимогам харчової промисловості [2; 23; 24].

Завдяки зручному середовищу AutoCAD та інтерактивним навчальним матеріалам, AutoCAD Electrical є доступним для студентів і молодих інженерів. У навчальних закладах він використовується для моделювання реальних виробничих ситуацій, що дозволяє формувати компетентності у сфері електротехнічного проєктування та підготовки технічної документації відповідно до міжнародних стандартів. Це робить програмний комплекс важливим інструментом як для промисловості, так і для освіти [2; 6; 12].

Ефективність використання ECAD-рішень у харчовій промисловості підтверджується як теоретичними дослідженнями, так і практичними кейсами, таблиця 1 [2-4; 6; 7; 9-13; 23; 24].

Аналіз таблиці 1 показує, що кожен із програмних продуктів має унікальні можливості та визначені напрями використання. SolidWorks Electrical вирізняється інтеграцією ECAD-MCAD, що є критично важливим для комплексних проєктів із високим рівнем деталізації та потребою узгодження електричних і механічних моделей. EPLAN Electric P8 характеризується високим рівнем

стандартизації та автоматизації, завдяки чому він оптимально підходить для масштабних виробничих систем і міжнародних проєктів, де необхідна відповідність міжнародним стандартам та інтеграція з ERP-рішеннями. Водночас AutoCAD Electrical забезпечує доступність та ефективність у створенні локальних систем керування, що дозволяє гнучко адаптувати проєктні рішення до специфічних вимог харчової промисловості та оперативно реагувати на зміни виробничих процесів.

Табл. 1.

Порівняльний аналіз програмних комплексів

Критерій	SolidWorks Electrical	EPLAN Electric P8	AutoCAD Electrical
Стандарти	IEC, NFPA	IEC, DIN, NFPA	IEC, JIC, IEEE
Автоматизація	Автоматична нумерація, генерація звітів	Макроси, шаблони, інтеграція з ERP	Автоматичне нумерування, крос-посилання
Інтеграція	ECAD-MCAD, 3DEXPERIENCE	ERP-системи, логістика	Інтеграція з механічними кресленнями
Освітній потенціал	Використання у навчальних закладах	Підготовка інженерів для цифрової трансформації	Доступність для користувачів AutoCAD

Висновки. Дослідження сучасних ECAD-рішень показало, що SolidWorks Electrical, EPLAN Electric P8 та AutoCAD Electrical мають різні архітектурні особливості, функціональні можливості та сфери застосування, проте всі вони сприяють цифровій трансформації харчових підприємств.

SolidWorks Electrical забезпечує інтеграцію ECAD-MCAD, що дозволяє створювати комплексні цифрові моделі виробів, оптимізувати розміщення кабелів і джгутів та враховувати санітарні вимоги харчової галузі. EPLAN Electric P8 вирізняється високим рівнем стандартизації та автоматизації, підтримкою міжнародних стандартів та інтеграцією з ERP-системами, що робить його оптимальним для масштабних виробничих систем і міжнародних проєктів. Водночас AutoCAD Electrical є доступним та ефективним рішенням для локальних систем керування, забезпечуючи швидку адаптацію схем до специфічних вимог харчової промисловості та відповідність технічним аудиторіям.

Таким чином, кожен із розглянутих програмних комплексів має власні переваги й може бути використаний залежно від масштабу завдань та рівня інтеграції, а їхнє впровадження сприяє підвищенню ефективності виробничих процесів і відповідності міжнародним стандартам у контексті Industry 4.0.

Перспективними напрямками розвитку ECAD-рішень є розширення інтеграції з хмарними сервісами, застосування технологій IoT та використання цифрових двійників, що відкриває нові можливості для оптимізації виробничих процесів, підвищення ефективності та забезпечення гнучкості харчових підприємств у глобальному конкурентному середовищі.

Література:

1. Автоматизація і оптимізація технологічних процесів: ЕНП. Федік Л. Ю. 2022. 132 с. URL: https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/%D0%A4%D0%B5%D0%B4%D1%96%D0%BA/index%202.html (дата звернення: 17.12.2025).
2. Autodesk. AutoCAD Electrical Toolset, 2025. URL: <https://www.autodesk.com/learn/ondemand/tutorial/installing-the-autocad-electrical-toolset> (дата звернення: 17.12.2025).
3. SolidWorks Electrical, 2025. URL: <https://www.solidworks.com/domain/solidworks-electrical>
4. EPLAN Electric P8 – офіційна сторінка продукту. URL: <https://www.eplan-software.com/solutions/eplan-electric-p8/> (дата звернення: 17.12.2025).
5. Ворошук В. Я., Вітенько Т. М. Інжиніринг та 3D моделювання в середовищі SolidWorks: навч. посіб. Тернопіль: ТНТУ, 2023. 164 с. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/42849/3/Engineering%20and%203D%20modeling%20in%20SolidWorks.pdf> (дата звернення: 17.12.2025).
6. Ванін В. В., Вірченко Г. А., Яблонський П. М. Комп'ютерна графіка в системі AUTOCAD (з елементами математичних основ і програмування): підручник. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 341 с. URL:

https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/60965/1/Kompiuterna_hrafika_v_systemi_AUTOCAD_Pidruchnyk.pdf (дата звернення: 17.12.2025).

7. Garcia M., Lee K. Computer-aided design and manufacturing in food processing // Journal of Information Systems Engineering and Management (JISEM). – 2025. – Режим доступу: <https://www.jisem-journal.com/index.php/journal> (дата звернення: 17.12.2025).

8. Основи САПР SOLIDWORKS: Навчальний посібник / Д. Е. Селезньов, Ю. В. Муравинець, В. С. Пуць Луцьк: ЛНТУ, 2023. 140 с. URL: https://lib.lntu.edu.ua/sites/default/files/2025-04/1_%D0%A1%D0%90%D0%9F%D0%A0%20%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%96%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA.pdf (дата звернення: 17.12.2025).

9. Savechka A. Що таке EPLAN? Короткий огляд можливостей. A2M Engineering, 2025. URL: <https://www.a2m.com.ua/ua/post/what-is-eplan> (дата звернення: 17.12.2025).

10. Schneider Electric. Цифрові рішення для харчової промисловості. URL: <https://www.se.com/ua/uk/work/solutions/for-business/food-and-beverage/> (дата звернення: 17.12.2025).

11. Smith J., Brown A. Robotics and Automation in Food Manufacturing. – Springer Nature, 2025. – Режим доступу: <https://link.springer.com> (дата звернення: 17.12.2025).

12. Сліденко В. М., Осадчук М. П., Поліщук В. О. Комп'ютерна графіка. Практикум з AutoCAD: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 101 с. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48482/1/AutoCad.pdf> (дата звернення: 17.12.2025).

13. Тимків З. О., Мошноріз М. М. Проектування систем автоматизації у середовищі EPLAN. Репозитарій БНТУ, 2025. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/49447> (дата звернення: 17.12.2025).

14. Трофімова Ю. В., Кондіус І. С., Федік Л. Ю. Особливості проектування ліній зв'язку обчислювальних мереж об'єктів систем автоматизації. Наукові нотатки, 2023. Вип. 75. С. 168-171. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2023_75_30 (дата звернення: 17.12.2025).

15. Троянчук Б. В., Федік Л. Ю. Використання системи автоматизованого керування в проектуванні систем автоматизації. III Міжнародна студентська наукова конференція. Трускавець, 2021. Т. 3. Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа». С. 61-62. URL: <https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/liga/issue/view/inter-10.12.2021/694> (дата звернення: 17.12.2025).

16. Троянчук Б. В., Федік Л. Ю. Використання САПР у проектуванні систем автоматизації. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. Луцьк: ЛНТУ, 2021. Вип. 45. С. 39-43. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2021-45-06. URL: <http://www.cit-journal.com.ua/index.php/cit/article/view/318/408> (дата звернення: 17.12.2025).

17. Федік Л. Ю., Федорусь Ю. В. Вплив штучного інтелекту на оптимізацію логістичних процесів у харчовій промисловості України. Наукові нотатки. Луцьк, 2025. Вип. 82. С. 132-139. DOI: 10.36910/775.24153966.2025.82.21. URL: https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky/issue/view/155/163 (дата звернення: 17.12.2025).

18. Федік Л. Ю., Федорусь Ю. В. Особливості проектування виконавчих механізмів у системах автоматизації харчової промисловості. Грааль науки, 2025. № 54. С. 483-489. DOI: 1036.074/grail-of-science.18.07.2025/054. ISSN 2710-3056. URL: <https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/article/download/3030/3021/3277> (дата звернення: 17.12.2025).

19. Федік Л. Ю., Гунько Ю. Л. Аналіз промислових роботів світових лідерів FANUC, YASKAWA, ABB, KUKA. Матеріали XI Всеукр. наук.-практ. конф. Херсон-Хмельницький, 2024. С. 34-36. URL: <https://lib.lntu.edu.ua/uk/147258369/20326> (дата звернення: 17.12.2025).

20. Федік Л. Ю., Сіваковська О. М. Особливості застосування комп'ютерних технологій під час автоматизації виробничих процесів. International Scientific and Practical Conference «Actual Problems of Automation and Control». Луцьк: ЛНТУ, 2023. Вип. 11. С. 42-48. URL: http://av.lntu.edu.ua/images/im_2013/konf_2023.pdf (дата звернення: 30.10.2025).

21. Федік Л. Ю., Кондіус І. С., Остапчук Д. О. Особливості проектування пунктів управління систем автоматизації. Матеріали X Всеукр. наук.-практ. конф. Херсон-Хмельницький, 2023. С. 39-40. URL: <https://lib.lntu.edu.ua/uk/147258369/20327> (дата звернення: 17.12.2025).

22. Як спроектувати повне електричне коло в AutoCAD Electrical: детальний посібник. Polimetro.com, 2024. URL: <https://www.polimetro.com/uk/autocad-electrical/> (дата звернення: 17.12.2025).

23. Polimetro.com. Automation technologies in the food industry. 2024. URL: <https://polimetro.com/automation-food-industry-2024> (дата звернення: 17.12.2025).

24. Select Technologies. Practical applications of CAD/ECAD in food manufacturing. 2024. URL: <https://www.relocalize.com/blog/food-manufacturing-technologies-2024> (дата звернення: 17.12.2025).

П.О. Коробко¹, А.В. Кузьмов^{1,2}, М.Б. Штерн¹*Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України¹
Київський академічний університет²***МОДЕЛЮВАННЯ ПЛАСТИЧНОЇ ПОВЕДІНКИ ПОРИСТОГО МАТЕРІАЛУ ЗІ СТРУКТУРОЮ ІНВЕРСНОГО ОПАЛУ ПРИ ВЕЛИКИХ ДЕФОРМАЦІЯХ**

Шляхом скінчено-елементного моделювання на представницькому осередку досліджено процес незворотного пластичного деформування пористого матеріалу з інверсно-опаловою структурою аж до моменту, коли структура пор стає майже повністю закритою. Це є важливим для прогнозування збереження адсорбційних та хімічно-каталітичних функціональних властивостей інверсно-опалових матеріалів при експлуатації та обробці тиском. Виявилось, що структура інверсного опалу зберігає відкриту пористість навіть за досить великих деформацій. Встановлена суттєва розбіжність між інженерним критерієм текучості 0.2 % залишкової деформації та фізичною границею текучості.

Ключові слова: метаматеріали, інверсний опал, представницький осередок, пластична деформація, відкрита пористість, границя текучості.

P. Korobko, A. Kuzmov, M. Shtern

MODELING THE PLASTIC BEHAVIOR OF A POROUS MATERIAL WITH AN INVERSE OPAL STRUCTURE AT LARGE DEFORMATION

By means of finite element modeling on a representative cell, the process of irreversible plastic deformation of a porous material with an inverse opal structure was investigated up to the moment when the pore structure becomes almost completely closed. This is important for predicting the preservation of the adsorption and chemical-catalytic functional properties of inverse opal materials during operation and pressure treatment. It was found that the structure of inverse opal retains permeable porous structure even under fairly large deformations. A significant discrepancy was found between the engineering yield criterion of 0.2% residual strain and the physical yield point.

Keywords: metamaterials, inverse opal, unit cell, plastic deformation, permeable porous structure, yield limit.

Introduction.

With the development of materials production technologies, composite materials with a periodic ordered structure have recently begun to be distinguished into a separate class and called metamaterials [1]. Such metamaterials include, in particular, porous materials with an inverse opal structure [2, 3], which can have high adsorption [4], catalytic [5], photocatalytic [6], and capillary [7] properties. The structure of such porous materials is formed by filling the voids between the regular dense packing of spheres with some interparticle contacts with a substance. After that, the substance of densely packed spheres is removed from the composite material and a porous material with an inverse opal structure is obtained (Fig. 1 a). Subsequently, a coating of a certain thickness can be applied to this frame while maintaining the open pore structure (Fig. 1 b).

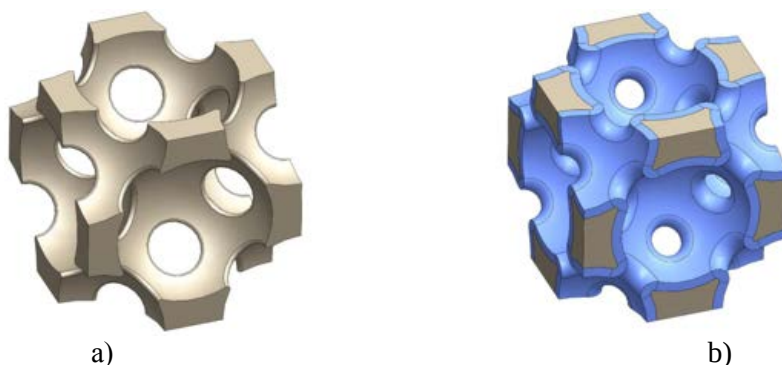


Fig.1. Periodic structure of inverse opal a) without coating; b) with coating

In their previous works, the authors modeled the elastic [8] and plastic [9] properties of inverse opal structures, while the plasticity criterion, similar to work [2], was taken as the common engineering criterion of achieving 0.2% irreversible deformation. However, for such a highly porous material as inverse opal, it is also interesting to study its plastic behavior at much higher degrees of deformation than 0.2%. Therefore, the **aim** of this work was to study the plastic behavior of a porous material with an inverse opal structure at significant deformation. At the same time, by means of finite element modeling in the volume of a unit cell,

© П.О. Коробко, А.В. Кузьмов, М.Б. Штерн

deformation was studied up to the moment of contact of different edges of the pore surface, that is, in fact, until the moment when the pore structure loses permeability and becomes closed. Studying the issue of the transition of the structure type from open porosity to closed porosity is important for predicting the preservation of adsorption and chemical-catalytic functional properties. As in the previous works of the authors [8,9] and work [2], nickel was used as the material for both the initial inverse opal structure and the additional deposited layer. In this work, we will limit ourselves to the case of uniaxial compression of an inverse opal porous material, in particular for the purpose of comparing the physical yield point σ_T with the engineering criterion $\sigma_{0.2}$. The structure of inverse opal can be described by two parameters, which in this work were used as the porosity Θ and the thickness of the additionally deposited nickel layer.

Micromechanical averaging of the stress-strain state in inverse opal.

Due to symmetry, in the case where the XYZ coordinate system shown in Fig. 2 lacks shear components of macroscopic "effective" [10, 11] deformations, the cell will retain a rectangular shape during such deformation. Therefore, even under macroscopic uniaxial compressive loading along the Z axis (i.e., when σ_{zz} is the only non-zero component in the macroscopic "effective" stress tensor), the shape of the periodic cell will remain rectangular. Let's denote the dimensions of a rectangular cell h_x, h_y, h_z . Micromechanical boundary conditions [10, 11], which relate the stress-strain state in the cell volume to the "effective" strain ε_{zz} or stress σ_{zz} , in this case will take the form:

- The points of each wall continue to lie in a plane with the same normal $u_n^i - u_n^i = 0$
- For the upper wall, some fixed component of displacement is given $u_n^i = u_z^i = u_0 = \varepsilon_{zz} h_z$, and for the lower wall $u_n^i = u_z^i = 0$.

At the same time, knowing, as a result of solving the equilibrium equations with these boundary conditions, the resultant force P_z on the upper wall (which, according to the problem formulation, can only be in the Z direction), one can easily calculate the macroscopic stresses $\sigma_{zz} = P_z/S$ corresponding to u_0 and ε_{zz} , where S is the area of the upper wall of the rectangular cell. Due to symmetry, the simulation was carried out on a quarter of the periodic cell Fig. 2.

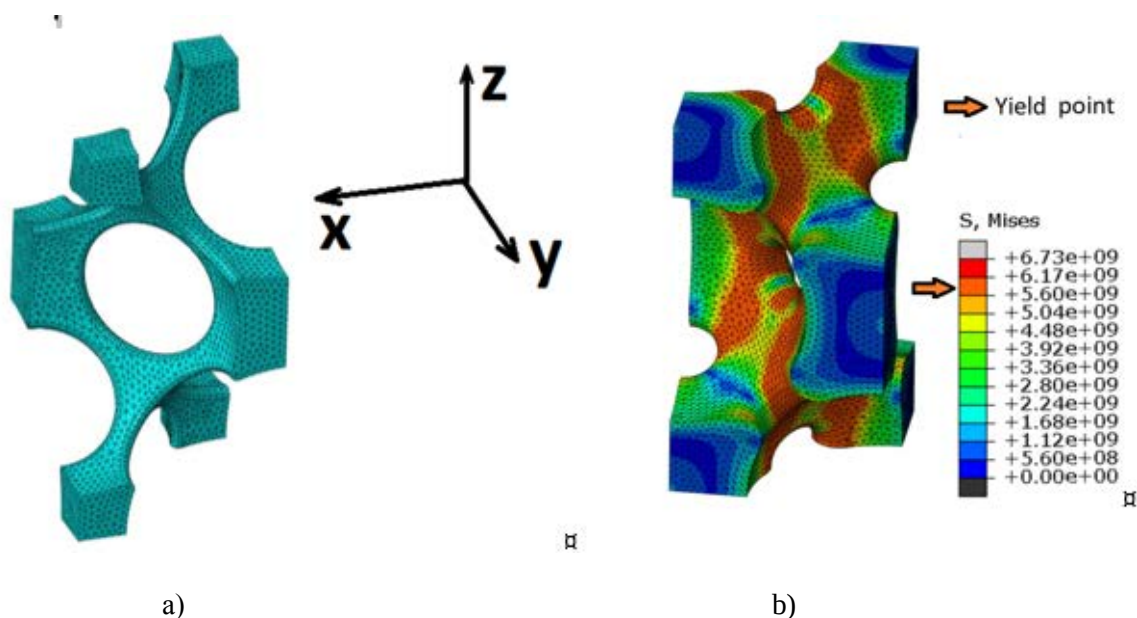


Fig.2. Finite element modeling in the volume of a periodic unit cell:
a) finite element mesh; b) von Mises stress distribution

It is worth noting that since in the boundary conditions there are restrictions only on the normal component of the velocity of the nodes on the walls of the cell, the tangential stresses on each of the walls, and accordingly the tangential components of the macroscopic "effective" stresses, will be zero. We also note that the finite element modeling software we used makes it possible to tie a certain component of the

movement of all points of the plane to the movement of some fixed point on it. And if the magnitude of such a displacement itself is not specified, then this displacement will take on such a value that the resultant force on this plane is zero. Thus, the absence of other components of the "effective" stress tensor except σ_{zz} is achieved.

By changing the sign of u_0 , one can go from uniaxial loading to uniaxial unloading, up to the moment when $\sigma_{zz} = 0$. At the same time, if during loading the frame material underwent irreversible plastic deformation, then at the moment of complete unloading, when $\sigma_{zz} = 0$, the magnitude of macroscopic deformations is $\varepsilon_{zz} = \varepsilon_{zz}^{pl} \neq 0$. This non-zero value of ε_{zz}^{pl} will be the "effective" macroscopic plastic deformations of the porous material.

Behavior of porous inverse opal material at significant deformation.

The study of significant deformations of a structure is dictated by the need to find critical values of the deformation of the material at which it will be considered destroyed or distorted sufficiently to represent a different structure than the one being studied. The criterion for the limit state of deformation was taken by us as the moment at which the opening between two pores was completely closed (Fig. 3). This criterion was chosen to track the magnitude of plastic deformations that lead to the transition of porosity from open to closed, that is, the moment when flow cannot occur between different points of the porous material. Moreover, depending on the porosity of the structure, the magnitude of the ultimate deformation is different. Thus, for a porosity of 56% (Fig. 3. a)) this deformation is about 30%, while for a porosity of 90% the deformation reaches about 70%.

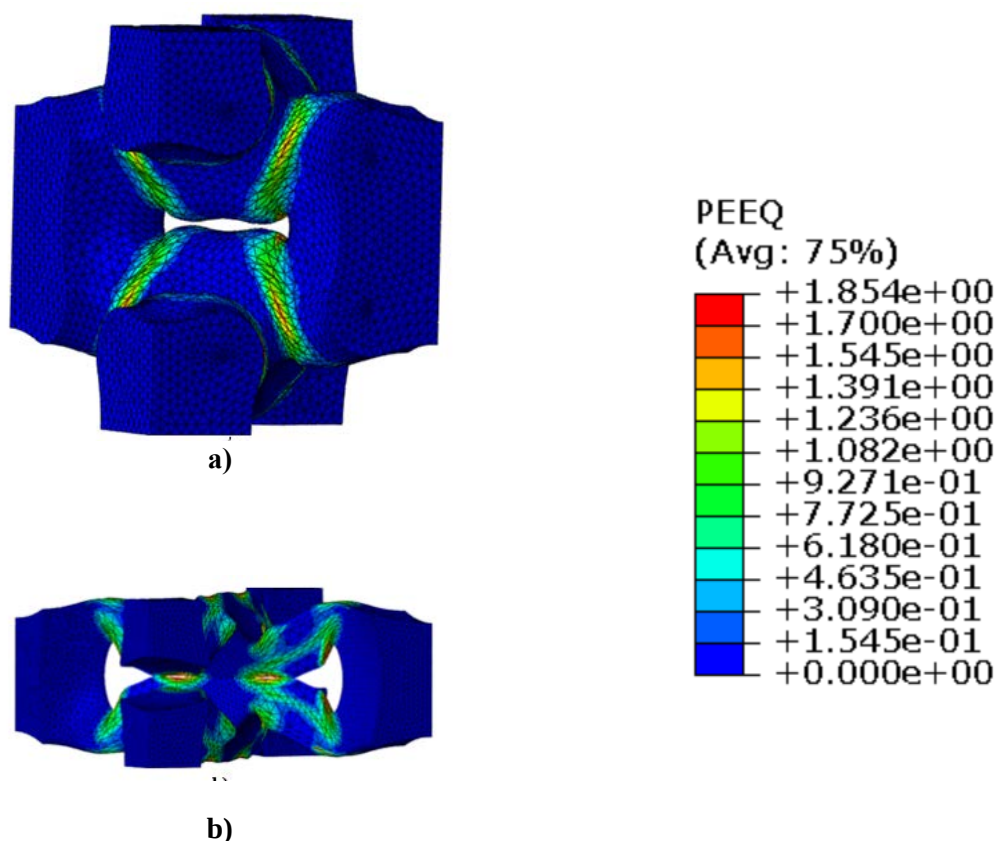


Fig.3. Accumulated strain of the structure: a) $\Theta=56,1\%$; b) $\Theta=90\%$

For the structure of inverse opal, we will show the dependence of the effective stress on deformation (Fig. 4). As can be seen from the graph, the deformation of the cell can be divided into three stages: a linear increase in stress to the value of the calculated yield strength $\sigma_{0,2}$, an inclined section of stress increase, and a horizontal section corresponding to the physical yield strength σ_T .

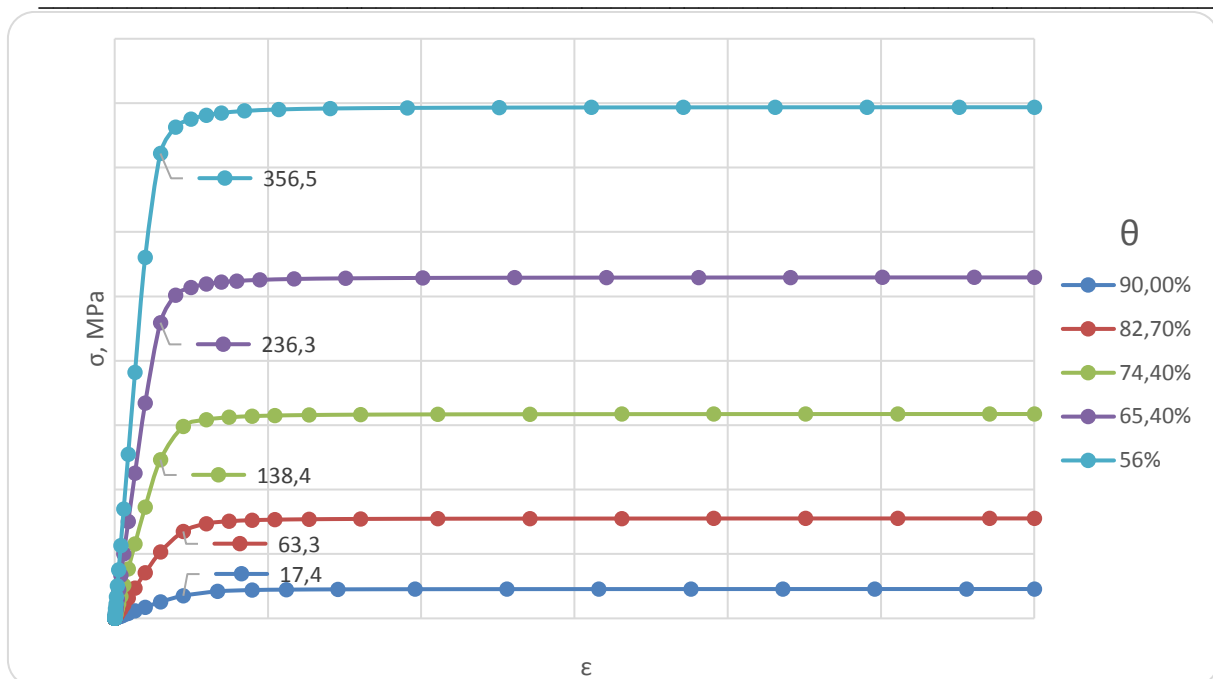


Fig.4. Dependence of effective stress on the degree of deformation for different porosities. The value of $\sigma_{0,2}$ is numerically indicated for each curve

It is important to note that the physical yield point σ_T for the inverse opal structure is higher than the engineering criterion $\sigma_{0,2}$. Moreover, with increasing porosity, this difference increases nonlinearly and for porosity 0.9 it reaches 31%.

At the first stage, elastic deformation of the cell occurs, which corresponds to the straight-line section of the graphs shown in Fig. 4. The geometry of the structure almost does not change, and stress concentration occurs at the transition points from the strut to the nodes of the inverse opal structure (Fig. 5).

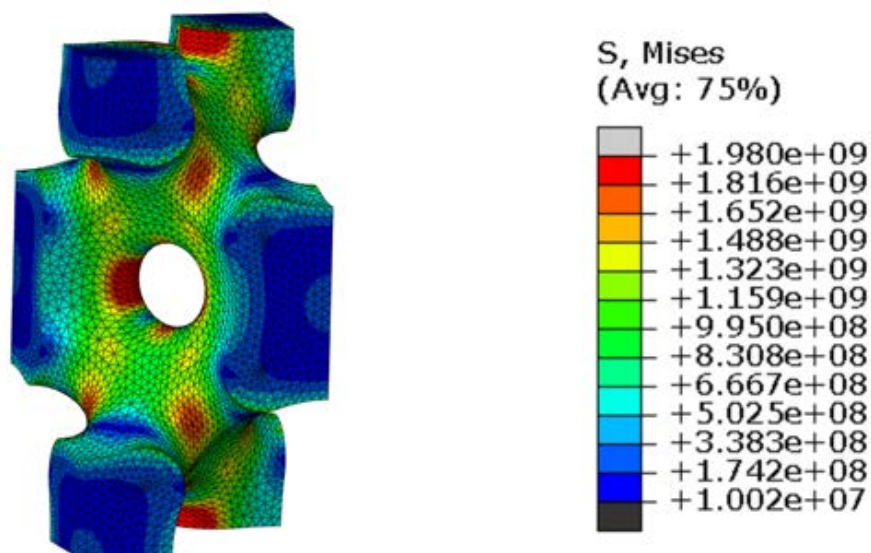


Fig.5. von Mises stress for the strain 1%, Pa

At the second stage, which corresponds to the nonlinear zone of the graph, the center of plastic deformation spreads (Fig. 6) in the volume of the solid phase material; it is in this area that the point corresponding to the residual deformation of 0.2% is located (the value of the yield strength $\sigma_{0,2}$ is shown as a footnote in Fig. 4). For this residual deformation, the total deformation value is from 1.4% to 2.2%,

depending on the porosity of the structure. In the second stage, plastic deformation occurs, which leads to a noticeable distortion of the structure, but the geometry itself remains characteristic of inverse opal.

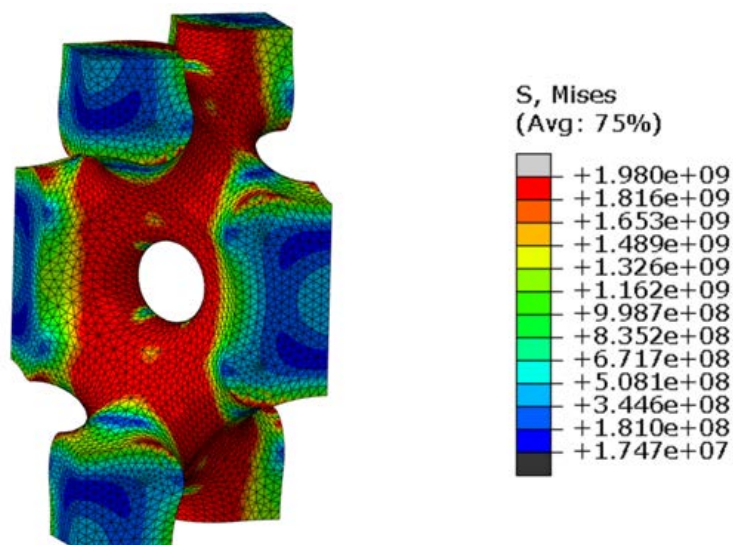


Fig.6. von Mises stress for the strain 1,5%, Pa

The third stage corresponds to the horizontal section of the graph - here the geometry of the structure undergoes significant distortions and mainly plastic bending of the struts connecting the nodes occurs for structures with high porosity, or approximate shear deformation along the rod cross-section for structures with medium porosity (Fig. 7).

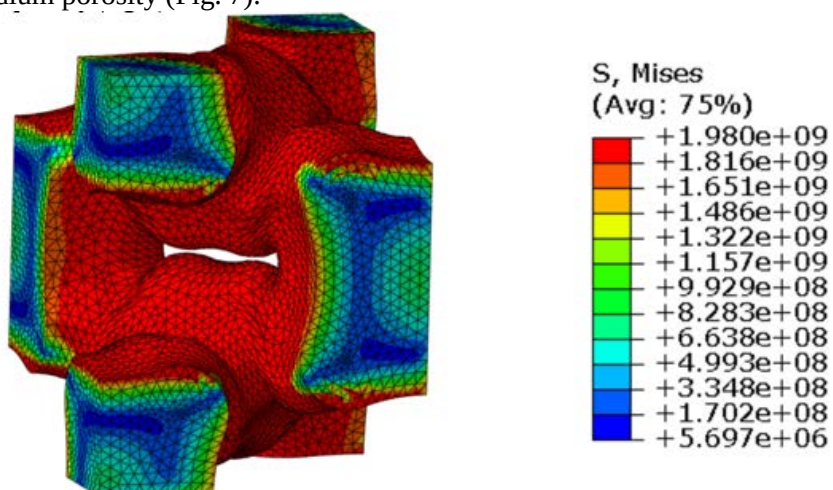


Fig.7. von Mises stress for the strain 30%, Pa

When the pore boundaries close, the effective behavior of the porous material begins to be variable resistance to tension-compression and possibly dilatant (non-zero average pressure under purely shear deformations and some volume growth under purely tangential stresses) [12].

Studying the behavior of the structure under significant deformations allows us to assess the technological qualities of the material in classical technologies of pressure processing of materials. Studying the issue of the critical value of the acquired deformation is also one of the main parameters for reproducing the material model in commercial application software packages. As shown above, the structure of inverse opal retains pore permeability at fairly high degrees of deformation.

Conclusions.

The process of irreversible plastic compression of a porous material with an inverse opal structure was simulated until the pore structure becomes almost completely closed. What is important for predicting the preservation of adsorption and chemical-catalytic functional properties of inverse opal materials during operation and pressure treatment. It was found that the structure of inverse opal retains open porosity even at relatively high degrees of deformation. The deformation value at which the contact of opposite parts of the pore surface occurs and the pore permeability is drastically reduced ranges from 0.3 for porosity 0.56

to 0.7 for porosity 0.9. It was also found that the physical yield point σ_T for the inverse opal structure is higher than the engineering criterion $\sigma_{0.2}$, and this tendency increases with increasing porosity, and for a porosity of 0.9 it reaches 31%. In addition, it was found that during uniform uniaxial compression of a porous inverse opal material, a significantly inhomogeneous stress-strain state is observed in the volume of a unit cell, so much so that in certain cases we can speak of localization of plastic flow of the base material.

References.

1. F. Capolino Theory and Phenomena of Metamaterials, CRC Press, 2017, 974 pp..
2. Pikul J.H., Özerinç S., Liu B., Zhang R., Braun P.V., Deshpande V.S., King W. P. High strength metallic wood from nanostructured nickel inverse opal materials. Scientific Reports 9, 719 (2019) <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36901-3>
3. Rosario J.J., Berger J.B., Lilleodden E.T., McMeeking R.M., Schneider G.A. The stiffness and strength of metamaterials based on the inverse opal architecture. Extreme Mechanics Lett. 2016. Vol. 12. P. 86—96. <https://doi.org/10.1016/j.eml.2016.07.006>
4. Cao X., Wang Y., Wu X., Wang J., Ren H., Zhao Y. Multifunctional structural color Chinese herb hydrogel patches for wound management. Chemical Engineering Journal. 2024. Vol. 485, 149957 <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149957>
5. Carroll A., Grant A., Zhang Y., Gulzar U., Douglas-Henry D., Nicolosi V., O'Dwyer C., The effect of TiO₂ and GeO₂ composite mixing on the behavior of macroporous Li-ion battery anode materials. J. Electrochemical Soc. 2023. Vol. 170. № 12. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad1371>
6. Sandu I., Antohe I., Fleaca C.T., Dumitrache F., Urzica I., Brajnicov S., Iagaru R., Sava B., Dumitru M., Shaping in the third direction: self-assembly of convex colloidal photonic crystals on an optical fiber tip by hanging drop method. Polymers. 2024. Vol. 16(1), 33 <https://doi.org/10.3390/polym16010033>
7. Shuhang Lyu , Qianying Wu , Zheng Gong , et al. Thermomechanical Modeling and Stress Analysis of Copper Inverse Opals (CIO) Structure for Capillary-Fed Boiling. TechRxiv. December 04, 2023. <https://doi.org/10.36227/techrxiv.24654336.v1>
8. Коробко П.О., Кузьмов А.В. Ефективні пружні властивості пористих матеріалів зі структурою інверсного опалу. Наукові Нотатки. – 2024. – №77. – С. 46-50. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2024.77.7>
9. Korobko P.O., Kuzmov A.V. Effective Plastic Properties of Porous Materials with an Inverse Opal Structure. Powder Metall Met Ceram. – 2024. – Vol. 62. – Issue 9–10. <https://doi.org/10.1007/s11106-024-00418-4>
10. R. M. Christensen Mechanics of composite materials, , Wiley-Interscience, New York, 1979, 348 pp.
11. Bakhvalov N.S., Panasenko G.P. Homogenisation: Averaging processes in periodic media. Kluwer Academic Publishers, 1989. 366 pp.
12. Кузьмов А.В., Штерн М.Б., Коробко П.О. Моделювання впливу площинних дефектів на пластичність порошкових матеріалів обчислювальними методами мікромеханіки. Успіхи матеріалознавства. – 2021. – №3. – С. 77-85. <https://doi.org/10.15407/materials2021.03.077>

Рецензент: Вдовиченко Олександр Васильович, с.н.с., д.т.н., завідувач лабораторії акустичних методів дослідження матеріалів Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України.

І.М. Дударєв¹, А.В. Хомич²Луцький національний технічний університет¹Відокремлений структурний підрозділ «Любешівський технічний фаховий коледж Луцького національного технічного університету»²**ПЕРСПЕКТИВИ ПЕРЕДЗБИРАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ ПОСІВІВ ЛЬОНУ З ВИКОРИСТАННЯМ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ**

Сучасні підходи до агромоніторингу потребують підвищення оперативності й точності оцінювання стану сільськогосподарських культур у передзбиральний період. Запропоновано алгоритм комплексного оцінювання стану стеблостою льону перед збиранням, що ґрунтується на поєднанні даних, отриманих з використанням безпілотних літальних апаратів, та результатів традиційних польових і лабораторних досліджень. Складено математичну модель комплексного показника стану стеблостою льону та розроблено підхід до формування карт полів, що дозволяють обґрунтовано визначати терміни й технології збирання льону та оптимізувати налаштування збиральної техніки.

Ключові слова: збирання льону, агромоніторинг, льон, безпілотні літальні апарати, дрони.

I.M. Dudarev, A.V. Khomych

PROSPECTS OF PRE-HARVEST MONITORING OF FLAX CROPS USING UNMANNED AERIAL VEHICLES

Modern agricultural monitoring approaches require increased efficiency and accuracy in assessing crop conditions during the pre-harvest period. This paper presents an algorithm for comprehensive assessment of the flax crop stand condition prior to harvesting, based on the integration of data obtained using unmanned aerial vehicles and results from traditional field and laboratory measurements. A mathematical model of an integrated indicator describing the flax crop stand condition is developed, incorporating key agronomic, technological, and biological parameters. Furthermore, an approach for generating digital field maps with mapped values of the integrated crop stand condition index is proposed, enabling visualization of the quality of the flax crop stand within fields. The resulting information enables well-founded decisions on optimal harvesting dates, selection of appropriate harvesting technologies, and optimization of harvesting machinery settings. The proposed methodology is applicable to both fiber flax and oilseed flax and contributes to improving harvesting efficiency and overall crop management.

Keywords: flax harvesting, agromonitoring, flax, unmanned aerial vehicles (UAVs), drones.

Постановка проблеми. Традиційно у сільському господарстві використовують наземні методи моніторингу стану сільськогосподарських культур, зокрема перед збиранням, що потребують значних затрат часу та людських ресурсів. Дослідження довели, що безпілотні літальні апарати можуть охоплювати під час агромоніторингу майже в 10–15 разів більшу площу, ніж традиційні наземні методи [1], що робить більш точним оцінювання стану сільськогосподарських культур на різних етапах вегетації.

На сьогодні у сільському господарстві дрони використовують для аналізування ґрунтів, планування полів, висівання насіння у підготовлений ґрунт, моніторингу та оцінювання стану посівів (ураження хворобами та шкідниками, забур'яненості тощо), обприскування посівів, відлякування птахів тощо [2]. Зображення високої роздільної здатності та дані, отримані дронами під час моніторингу сільськогосподарських угідь, агровиробники можуть аналізувати за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Використовуючи ці дані можна створити карти полів (за необхідними показниками) для подальшого їх оброблення сільськогосподарською технікою, що дозволяє, наприклад, скоригувати на різних ділянках, залежно від їхнього стану, кількість внесених добрив, пестицидів тощо [3]. Отже, отримана з використанням дронів інформація дозволяє краще оцінити стан ґрунту та рослин, прогнозувати урожайність. Причому за допомогою алгоритмів оброблення зображень можна проаналізувати окрему рослину [2]. Використовуючи результати аналізу, виробники сільськогосподарської продукції можуть вживати необхідних превентивних заходів, наприклад, щоб зупинити поширення хвороб на інші ділянки поля чи інші культури тощо. Перспективним також є використання безпілотних літальних апаратів для моніторингу посівів перед збиранням для прийняття обґрунтованого рішення щодо термінів та технології їх збирання, а також щодо визначення розмірів та розташування ділянок з пошкодженими посівами, наприклад полеглими, для вибирання комплексу необхідних технічних засобів та раціональних режимів роботи техніки. Водночас поєднання сучасних технологій моніторингу посівів з використанням традиційних методів оцінювання їхнього стану дозволить комплексно оцінити якісні та кількісні параметри урожаю та визначити напрями його використання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) здатні швидко та ефективно збирати величезні обсяги даних, надаючи агровиробникам інформацію, яку було б важко, а іноді і неможливо, отримати традиційними методами. БПЛА-технології мають потенціал не лише підвищувати продуктивність у сільському господарстві, а й підтримувати кліматично орієнтоване землеробство шляхом покращеного управління ресурсами з урахуванням змін клімату [4]. Внаслідок постійного розвитку та зменшення вартості БПЛА-технологій їх застосування у сільському господарстві щороку розширюється, що робить їх дедалі ціннішим інструментом для виробників сільськогосподарської продукції [4]. БПЛА здебільшого використовують як неінвазивний інструмент для збирання локально специфічної інформації за допомогою камер та сенсорів, встановлених на борту [5]. Зібрані ними спектральні дані можуть бути додатково опрацьовані та перетворені на карти, що слугують основою для точного землеробства.

Використання БПЛА у поєднанні з іншими інформаційно-комунікаційними технологіями відкриває новий етап у сфері сільського господарства, де формується цифрове землеробство, розумне землеробство, електронне сільське господарство (e-agriculture) та точне землеробство [6]. На базі Інтернету речей (IoT) з'явилася концепція Інтернету дронів (IoD), що забезпечує універсальні сервіси для різноманітних застосувань дронів [6]. Завдяки візуалізуванню стану сільськогосподарських культур, інтегрованому ГІС-картографуванню (ГІС – геоінформаційна система) та мінімізуванню необхідності фізичного переміщення полем, БПЛА можуть мати велике значення для процесу прийняття рішень та управління, сприяючи збільшенню урожайності та зменшенню витрат [7]. Отже, різноманітні БПЛА-орієнтованих застосувань у межах просторово-часових масштабів робить цю технологію перспективним рішенням для подолання загрози можливої продовольчої небезпеки [8].

Залежно від конструкції та режиму роботи БПЛА поділяють на кілька класів [9]: БПЛА з фіксованим крилом, що подібні до літаків (здатні охопити великі території, працюють на значних висотах, генерують зображення високої роздільної здатності); мультироторні БПЛА (маневрені, зависають над необхідною ділянкою, мають вертикальний зліт та посадку); гібридні БПЛА (можуть поєднувати конструкцію та функції двох попередніх класів); БПЛА зі складним крилом (зручні у транспортуванні та розгортанні в польових умовах).

БПЛА виготовляють з легких і міцних матеріалів та переважно оснащують електричними рушійними системами з різними типами літєвих акумуляторів, що забезпечує оптимальне співвідношення маси, продуктивності та енергоефективності [9]. Водночас активно розвивають гібридні рушійні системи, зокрема електро-бензинові, акумуляторно-водневі та сонячно-електричні системи, спрямовані на збільшення тривалості польоту та енергетичної автономності. Автономність польоту БПЛА залежно від умов використання та корисного навантаження може бути від 20 хв до кількох годин [9].

У сільському господарстві здебільшого використовують квадрокоптери для генерування кольорових інфрачервоних зображень полів [10]. Легкі камери дозволяють застосовувати квадрокоптери з невеликою вантажопідйомністю. Водночас маса об'єктива камери є важливим фактором та безпосередньо впливає на площу, що охоплює одне зображення. Тому використання легших камер часто потребує польотів на меншій висоті та отримання більшої кількості знімків для покриття всього поля [11]. Зрозуміло, що, наприклад, для обприскування полів необхідні БПЛА з більшою вантажопідйомністю (10–50 кг).

Точний моніторинг полів є досить складним завданням та потребує застосування БПЛА, що оснащені різними видами камер, зокрема мультиспектральними та тепловізійними [12]. Встановлені на БПЛА цифрові, мультиспектральні, гіперспектральні, флуоресцентні та тепловізійні датчики з високою роздільною здатністю в поєднанні з ефективними алгоритмами опрацювання даних дозволяють проводити ефективний моніторинг полів сільськогосподарських виробників [13].

Ще одним важливим аспектом БПЛА-технологій у різних сферах є необхідність на законодавчому рівні затвердження регуляторних норм її застосування. Хоча застосування БПЛА здебільшого проходить в сільській місцевості з низькою щільністю населення, однак залишається важливим забезпечення права приватності окремих осіб [14].

Постановка завдань. Розвиток БПЛА-технологій та їх застосування у сільському господарстві, зокрема для моніторингу стану посівів різних культур, потребує обґрунтування кількісних показників, що дозволять на основі даних такого моніторингу проводити аналіз посівів з урахуванням особливостей вегетації певної культури. Важливим є передзбиральний моніторинг такої культури як льон (льон-довгунець, льон олійний), оскільки достовірні дані про стан

стеблостою льону на окремих ділянках поля дозволять вибрати ефективну технологію його збирання та встановити раціональні режими роботи технічних засобів. Хоча існують дослідження, присвячені оцінюванню динаміки росту льону та його агрономічних показників з використанням карт нормалізованого різницевого вегетаційного індексу (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) [15], отриманих на основі мультиспектральних зображень з БПЛА, для обґрунтування раціональної технології та оптимальних термінів збирання льону потрібен більш комплексний підхід. Отже, важливим завданням є обґрунтування комплексного показника стану стеблостою льону перед збиранням на основі даних моніторингу з застосуванням БПЛА-технологій та результатів польових досліджень стану стеблостою.

Викладення основного матеріалу. Обґрунтуємо комплексний показник, що характеризує стан стеблостою льону перед збиранням, ураховуючи алгоритм обчислення середньозваженого арифметичного показника стану стеблостою [16]. Усі показники, що характеризують стан стеблостою льону (льону-довгунця та льотну олійного) об'єднаємо в дві групи за можливим методом їх визначення (рис. 1): показники стеблостою льону, що можуть бути визначені з використанням БПЛА; показники стеблостою льону, що визначають за традиційними методиками у польових чи лабораторних умовах. За допомогою БПЛА-технологій можуть бути визначені фаза стиглості льону, полеглисть та забур'яненість стеблостою, ураженість стеблостою хворобами чи шкідниками. Зокрема, БПЛА-технології дозволяють визначити розміри ділянок (площі поля), на яких стеблості має зазначені характеристики. За традиційними методиками визначають висоту стеблостою, технічну довжину та діаметр стебел, розгалуженість та вологість стебел, вміст волокна (довгого, короткого) у стеблах, вологість та масу 1000 насінин, урожайність насіння та соломи, а також ширину міжрядь (залежить від способу посіву) та кількість рослин на 1 м² площі поля. Ширину міжрядь та кількість рослин на 1 м² площі поля також можна визначити, використовуючи БПЛА-технології. Деякі з цих показників важливі для визначення напрямів подальшого перероблення лляної сировини, а деякі мають безпосередній вплив на процес збирання. Отже, проаналізуємо ці показники стану стеблостою льону, згрупувавши їх у шість груп: показники стебел льону, показники насіння льону, показник стиглості льону, агротехнічні показники стеблостою льону, фітосанітарні показники стеблостою льону, показники урожайності льону.

Висота стеблостою та технічна довжина льону – це важливі параметри для налаштування роботи збиральної техніки. Їх визначають за традиційними методиками шляхом відбирання проб з різних ділянок поля та вимірювання довжини стебел. Те саме стосується визначення діаметра стебел льону, від якого залежить товщина сформованої стрічки стебел (для льону-довгунця) та налаштування й ефективність роботи збиральної машини. Вміст волокна у стеблах важливий при визначенні якісних показників стеблової частини урожаю льону та напрямів його перероблення. Водночас, необхідно пам'ятати, що міцність волокна впливає на процеси брання та зрізування стебел льону, а також його обмолочування. Вологість стебел та їхня розгалуженість (сортові особливості) впливають на вибір технології збирання та режимів роботи збиральних машин, оскільки від цих параметрів залежить перебіг технологічних процесів збирання (брання/зрізування стебел, обмолочування льону тощо). Ці показники визначають за традиційними методиками, переважно в лабораторних умовах.

Важливим показником стеблостою льону є вологість насіння (або насіннєвих коробочок), оскільки від цього параметра залежить ефективність процесу обмолочування льону та втрати й пошкодження насіння. Маса 1000 насінин льону характеризує якість насіння, його добірність, крупність та виповненість. Ці показники можна визначити за традиційними методиками як в польових умовах, так і в лабораторних.

Рішення щодо початку збирання льону приймають, передусім, за результатами визначення фази стиглості рослин. Збирання товарних посівів льону-довгунця за роздільної технології збирання рекомендують проводити у фазі ранньої жовтої стиглості (60–75% рослин досягли цієї фази), а за комбайнової технології збирання – наприкінці фази ранньої жовтої стиглості й на початку фази жовтої стиглості (понад 75% рослин досягли цієї фази) [17]. У випадку льону олійного збирання за роздільною технологією розпочинають, якщо 50–75% рослин перебувають у фазі повної стиглості, а комбайнову технологію застосовують, коли у цій фазі стиглості перебувають понад 75% рослин. Визначення фази стиглості рослин за площею усього поля доцільно проводити з використанням БПЛА-технологій, що дозволить обчислити відсоток рослин у необхідній фазі стиглості.

Для характеристики стеблостою льону важливими є ширина міжрядь, кількість рослин льону на 1 м² поля та полеглисть стеблостою, оскільки вони впливають на налаштування збиральної

техніки та перебіг технологічних операцій. Ширина міжрядь залежить від способу посіву льону та налаштування посівної техніки. Кількість рослин на 1 м² площі залежить від способу посіву, умов вирощування та інших факторів. Полеглість стеблостою може виникати внаслідок несприятливих погодних умов, сортових особливостей, нераціонального удобрення, оброблення посівів або ж комбінації цих та інших факторів.

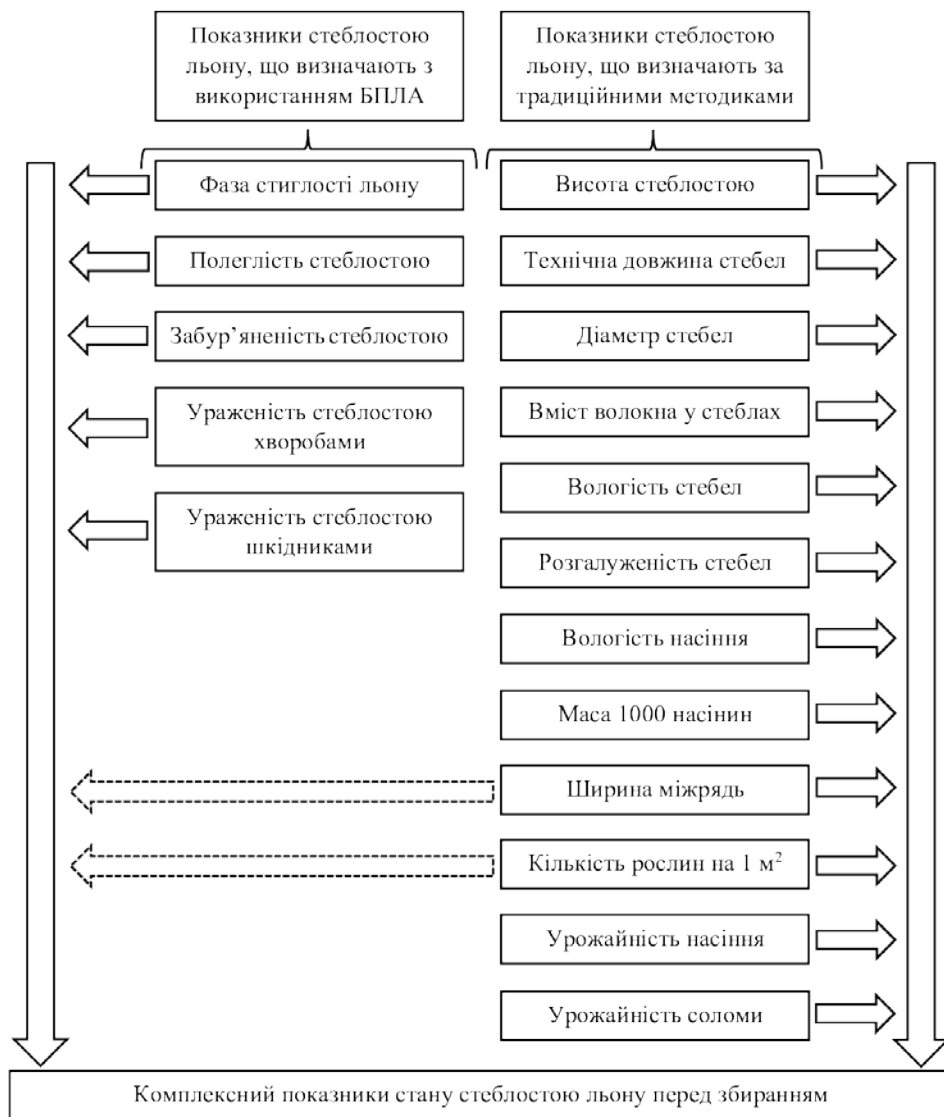


Рис. 1. Показники стану стеблостою льону, що визначають з використанням БПЛА та за традиційними методиками

Фітосанітарні показники стеблостою льону, зокрема забур'яненість, ураженість хворобами та шкідниками, важливі при виборі технології збирання та налаштування збиральної техніки. Ділянки, на яких такий фітосанітарний стан стеблостою, можуть бути виявлені за допомогою БПЛА-технологій.

Урожайність насіння та соломи льону характеризують ефективність вирощування цієї культури. Визначення цих показників можливе за традиційними методиками шляхом відбирання проб на полі (перед початком збирання).

Сформуємо «дерево» показників стеблостою льону, що характеризують його стан перед збиранням (рис. 2). Кожній групі показників присвоюємо ваговий коефіцієнт m_i , сума яких рівна 1. У кожній групі усім показникам також присвоюємо вагові коефіцієнти m_{ij} , сума яких в межах групи рівна 1. Усі вагові коефіцієнти визначають експертним методом [16]. На основі «дерева» показників складемо математичну модель для обчислення комплексного показника стану стеблостою льону перед збиранням:

$$Q = m_1 \left(m_{11} \frac{P_{11}}{P_{\delta 11}} + m_{12} \frac{P_{12}}{P_{\delta 12}} + m_{13} \frac{P_{13}}{P_{13}} + m_{14} \frac{P_{14}}{P_{\delta 14}} + m_{15} \frac{P_{15}}{P_{15}} + m_{16} \frac{P_{16}}{P_{\delta 16}} \right) +$$

$$+ m_2 \left(m_{21} \frac{P_{\delta 21}}{P_{21}} + m_{22} \frac{P_{22}}{P_{\delta 22}} \right) + m_3 \frac{P_3}{P_{\delta 3}} + m_4 \left(m_{41} \frac{P_{\delta 41}}{P_{41}} + m_{42} \frac{P_{42}}{P_{\delta 42}} + m_{43} \frac{P_{\delta 43}}{P_{43}} \right) +$$

$$+ m_5 \left(m_{51} \frac{P_{\delta 51}}{P_{51}} + m_{52} \frac{P_{\delta 52}}{P_{52}} + m_{53} \frac{P_{\delta 53}}{P_{53}} \right) + m_6 \left(m_{61} \frac{P_{61}}{P_{\delta 61}} + m_{62} \frac{P_{62}}{P_{\delta 62}} \right), \quad (1)$$

де Q – комплексний показник стану стеблостою льону перед збиранням; $m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6$ – вагові коефіцієнти груп показників (див. рис. 2); $m_{11}, m_{12}, m_{13}, m_{14}, m_{15}, m_{16}$ – вагові коефіцієнти групи показників стебел льону (див. рис. 2); m_{21}, m_{22} – вагові коефіцієнти групи показників насіння льону (див. рис. 2); m_{41}, m_{42}, m_{43} – вагові коефіцієнти групи агротехнічних показників стеблостою льону (див. рис. 2); m_{51}, m_{52}, m_{53} – вагові коефіцієнти групи фітосанітарних показників стеблостою льону (див. рис. 2); m_{61}, m_{62} – вагові коефіцієнти групи показників урожайності льону (див. рис. 2); P_{ij}, P_3 – значення показників стеблостою льону, визначені за допомогою БПЛА-технологій чи за традиційними методиками ($i \neq 3$); $P_{\delta ij}, P_{\delta 3}$ – базові значення показників стеблостою льону ($i \neq 3$).

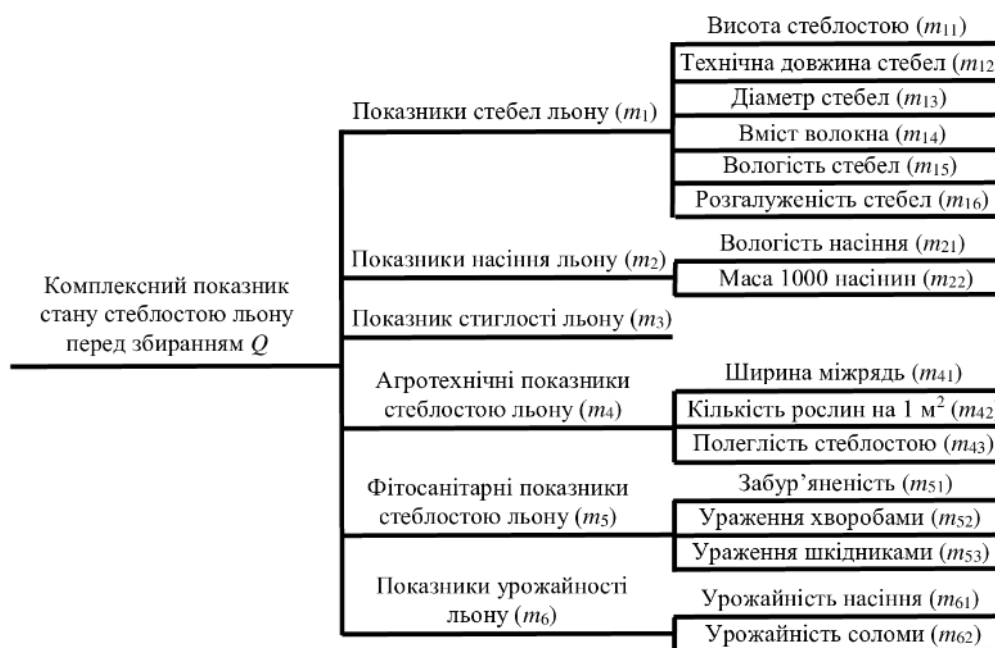


Рис. 2. «Дерево» показників стеблостою льону, що характеризують його стан перед збиранням

Крім комплексного показника, доцільно обчислювати окремо показники для кожної групи, що дозволить визначити проблемні характеристики стеблостою, які необхідно враховувати під час збирання. Базові значення показників приймають залежно від вимог нормативних документів (державних стандартів), методичних рекомендацій науково-дослідницьких установ, агротехнічних вимог тощо. Якщо чим більше значення показника, тим кращий стан стеблостою, тоді базовий показник у математичній моделі (1) розташовують в знаменнику. Якщо ж чим менше значення показника, тим кращий стан стеблостою, тоді базовий показник у рівнянні (1) розташовують в чисельнику. Набір показників у математичній моделі (1) може змінюватися залежно від виду льону та призначення посівів.

Приклад базових показників для льону-довгунця: висота стеблостою – $P_{\delta 11} = 0,6$ м; технічна довжина стебел – $P_{\delta 12} = 0,5$ м; діаметр стебел – $P_{\delta 13} = 1,5$ мм; вміст волокна – $P_{\delta 14} = 18\%$; вологість стебел – $P_{\delta 15} = 40\%$; розгалуженість стебел (відсоток рослин, що мають понад 1 стебло) – $P_{\delta 16} = 5\%$; вологість насіння – $P_{\delta 21} = 20\%$; маса 1000 насінин – $P_{\delta 22} = 6$ г; стиглість льону (для комбайнової технології збирання – відсоток рослин, що досягли фази жовтої стиглості) – $P_{\delta 3} = 75\%$; ширина міжрядь (допустиме відхилення від ширини міжрядь за модулем) – $P_{\delta 41} = 1$ см; кількість рослин на 1 м² площі поля – $P_{\delta 42} = 1800$ шт/м²; полеглість стеблостою (відсоток площі поля з полеглим стеблостоєм) – $P_{\delta 43} = 5\%$; забур'яненість стеблостою – $P_{\delta 51} = 5\%$; ураження стеблостою хворобами –

$P_{652} = 5\%$; ураження стеблостою шкідниками – $P_{653} = 5\%$; урожайність насіння – $P_{661} = 400$ кг/га; урожайність льоносоломи – $P_{662} = 5$ т/га.

За результатами передзбирального моніторингу льону та значеннями обчисленого комплексного показника стану стеблостою льону доцільно формувати карти полів з нанесенням на них отриманих значень комплексного показника (рис. 3). Доцільно проводити моніторинг стеблостою, поділивши поле на ділянки площею 10×10 м. Такі цифрові карти полів дозволяють візуалізувати якісний стан стеблостою льону в межах поля, що дозволить приймати обґрунтовані рішення щодо термінів і технології його збирання, а також щодо налаштування збиральної техніки.



Рис. 3. Приклад результатів моніторингу поля з обчисленням комплексного показника стану стеблостою льону перед збиранням

Висновки. Розроблено алгоритм комплексного моніторингу стану стеблостою льону перед збиранням, що поєднує визначення показників стеблостою як традиційними методами, так і з застосуванням БПЛА-технологій. Алгоритм може бути застосовано для льону-довгунця та льону олійного. Для реалізації алгоритму моніторингу стану стеблостою льону необхідно розробити відповідне програмне забезпечення, що дозволить збирати та аналізувати дані щодо стану стеблостою, опрацьовувати їх, обчислювати комплексний показник та формувати карту поля з нанесенням на ній результатів моніторингу.

Список використаних джерел

1. Dileep M. R., Navaneeth A. V., Ullagaddi S., Danti A. A study and analysis on various types of agricultural drones and its applications. 2020 Fifth International Conference on Research in Computational Intelligence and Communication Networks (ICRCICN). India: Bangalore, 2020. P. 181-185. <https://doi.org/10.1109/ICRCICN50933.2020.9296195>.
2. Pathak H., Kumar G., Mohapatra S. D., Gaikwad B. B., Rane J. Use of drones in agriculture: potentials, problems and policy needs. ICAR-National Institute of Abiotic Stress Management, 2020. № 300. P. 4-15.
3. Muraru S. L., Cardei P., Muraru V., Sfiru R., Condruz P. Researches regarding the use of drones in agriculture. International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM. Sofia, 2019. Vol. 19(6.2). <https://doi.org/10.5593/sgem2019/6.2>.
4. McCarthy C., Nyoni Y., Kachamba D. J., Banda L. B., Moyo B., Chisambi C., Banfill J., Hoshino B. Can drones help smallholder farmers improve agriculture efficiencies and reduce food insecurity in Sub-Saharan Africa? Local perceptions from Malawi. Agriculture. 2023. № 13(5), 1075. <https://doi.org/10.3390/agriculture13051075>.
5. Michels M., von Hobe C. F., Weller von Ahlefeldt P. J., Musshoff O. The adoption of drones in German agriculture: A structural equation model. Precision Agriculture. 2021. № 22. P. 1728-1748. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09809-8>.
6. Ayamga M., Akaba S., Nyaaba A. A. Multifaceted applicability of drones: A review. Technological Forecasting and Social Change. 2021. № 167, 120677. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120677>.
7. Ayamga M., Tekinerdogan B., Kassahun A. Exploring the challenges posed by regulations for the use of drones in agriculture in the African context. Land. 2021. № 10(2), 164. <https://doi.org/10.3390/land10020164>.

8. Kumar S. P., Subeesh A., Jyoti B., Mehta C. R. Applications of drones in smart agriculture. In: Pakeerathan, K. (eds). Smart Agriculture for Developing Nations. Advanced Technologies and Societal Change. Singapore: Springer, 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8738-0_3.
9. Guebsi R., Mami S., Chokmani K. Drones in precision agriculture: A comprehensive review of applications, technologies, and challenges. Drones. 2024. № 8(11), 686. <https://doi.org/10.3390/drones8110686>.
10. Chin R., Catal C. Kassahun A. Plant disease detection using drones in precision agriculture. Precision Agriculture. 2023. № 24. P. 1663-1682. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10014-y>.
11. del Cerro J., Cruz Ulloa C., Barrientos A., de León Rivas J. Unmanned aerial vehicles in agriculture: A survey. Agronomy. 2021. № 11(2), 203. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020203>.
12. Daponte P., De Vito L., Glielmo L., Iannelli L., Liuzza D., Picariello F., Silano G. A review on the use of drones for precision agriculture. In: IOP conference series: earth and environmental science (Vol. 275, № 1, 012022). IOP Publishing, 2019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/275/1/012022>.
13. Abbas A., Zhang Z., Zheng H., Alami M. M., Alrefaei A. F., Abbas Q., Naqvi S. A. H., Rao M. J., Mosa W. F. A., Abbas Q., Hussain A., Hassan M. Z., Zhou L. Drones in plant disease assessment, efficient monitoring, and detection: A way forward to smart agriculture. Agronomy. 2023. № 13(6), 1524. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061524>.
14. Arza-García M., Burgess A. J. Drones in the sky: Towards a more sustainable agriculture. Agriculture. 2023. № 13(1), 84. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010084>.
15. Papadopoulos G., Stavropoulos P., Roussis I., Mavroeidis A., Vatougios D., Kakabouki I. Integrating UAV multispectral indices (NDVI) with yield data for optimizing flax (*Linum usitatissimum* L.) cultivation. Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Horticulture. 2023. № 80(2). P. 71-75. <https://doi.org/10.15835/buasvmcn-hort:2023.0022>.
16. Дударев І. М. Алгоритм оцінювання придатності рослинної сировини для перероблення за певною технологією. Сільськогосподарські машини. 2022. № 48. С. 100-109. <https://doi.org/10.36910/acm.vi48.888>.
17. Дударев І. М. Розвиток наукових основ ресурсозберігаючої технології первинної обробки луб'яних культур: дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.02 / Дударев Ігор Миколайович; Луцький нац. техн. ун-т. Луцьк, 2016. 370 с.

Рецензент: Кірчук Руслан Васильович, к.т.н., професор, декан факультету аграрних технологій та екології Луцького національного технічного університету.

Е.Л. Селезньов, Д.Е. Селезньов, В.С. Матвійчук

Луцький національний технічний університет

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АКСІАЛЬНО-ПОРШНЕВОЇ ГІДРОМАШИНИ З ДЕФЕКТОМ В ПОРШНЕВІЙ ЧАСТИНІ*В роботі проведено дослідження математичної моделі аксіально-поршневої гідромашини з дефектом в поршневій частині з зазначеними розмірами дефектів.**Ключові слова:* математичка модель, аксіально-поршнева гідромашина, поршнева частина, шарнір, дефект, спектр, вібраційне прискорення, зазор, частота, пік, амплітуда..

E.L. Seleznov, D.E. Seleznov, V.S. Matviichuk

RESULTS OF RESEARCH ON THE MATHEMATICAL MODEL OF AN AXIAL-PISTON HYDRAULIC MACHINE WITH A DEFECT IN THE PISTON PART*The paper presents research on a mathematical model of an axial piston hydraulic machine with a defect in the piston part with specified defect dimensions.**Keywords:* mathematical model, axial-piston hydraulic machine, piston part, hinge, defect, spectrum, vibration acceleration, gap, frequency, peak, amplitude.

Introduction. The relevance of the topic is associated with the need for early diagnosis of defects in hydraulic drive elements. Today, there are many methods for diagnosing hydraulic drive elements, the most common in the modern world is static parametric analysis, based on measuring the parameters of a steady throttled flow of the working fluid [1, 2]. The value of the volumetric efficiency is used as a diagnostic parameter. However, this method is not able to detect a defect in the piston group of a hydraulic machine at an early stage, which entails the destruction of the piston group and the ingress of destroyed parts into the system, which contributes to the failure of all hydraulic drive elements. In this case, the vibration diagnostics method [3] surpasses existing methods and allows you to detect a defect in the piston part of a hydraulic machine at an early stage of its occurrence, preventing possible downtime of the hydraulic drive.

Presentation of the main material. The object of the study is a mathematical model of an axial-piston hydraulic machine with a defect in the piston part, developed in the Simulink software environment.

The mathematical model of the defect has the form of a gap, which is implemented as a conditional length determined by the length of the signal movement zone within which the detected defect is recorded.

The mathematical model of an axial-piston hydraulic machine with a gap in the piston part in the Simulink [4] software environment will look like this (Fig. 1).

The work investigated the change in vibration signals of a model of an axial-piston hydraulic machine without and with a defect in the form of a gap in the piston.

The study consists of conducting an experiment in the Simulink software environment (Table 1), which is implemented by simulating a gap of different sizes in the piston part of an axial-piston hydraulic machine, to identify emergency and permissible gap sizes in the device.

Table 1.

Experimental design

No.	Experimental site	Defects, mm	Bloc
1	Piston part	Gap 2×10^{-3}	"Dead Zone"
2		Gap 2×10^{-2}	
3		Gap 2×10^{-1}	

The results of the research of the mathematical model of an axial-piston hydraulic machine in the form of vibration acceleration spectra of an axial-piston hydraulic machine in the absence of a defect and with them are shown in Figure 2.

Figure 2a clearly shows three peaks: the drive frequency (45 Hz), the natural frequency of the shaft (25 Hz), and the inclined block (75 Hz). The absence of other spectra shows that the system is operating smoothly.

In Figure 2b, the spectra show that in addition to the existing natural frequencies of the shaft (25 Hz) and the inclined block (75 Hz), as well as the drive frequency (45 Hz), noise appears around the inclined

© Е.Л. Селезньов, Д.Е. Селезньов, В.С. Матвійчук

block frequency (75 Hz), which leads to an increase in its amplitude from 0.1 m to 0.22 m. Harmonics are also noticeable at frequencies of 115 Hz, 135 Hz, 155 Hz, and 175 Hz.

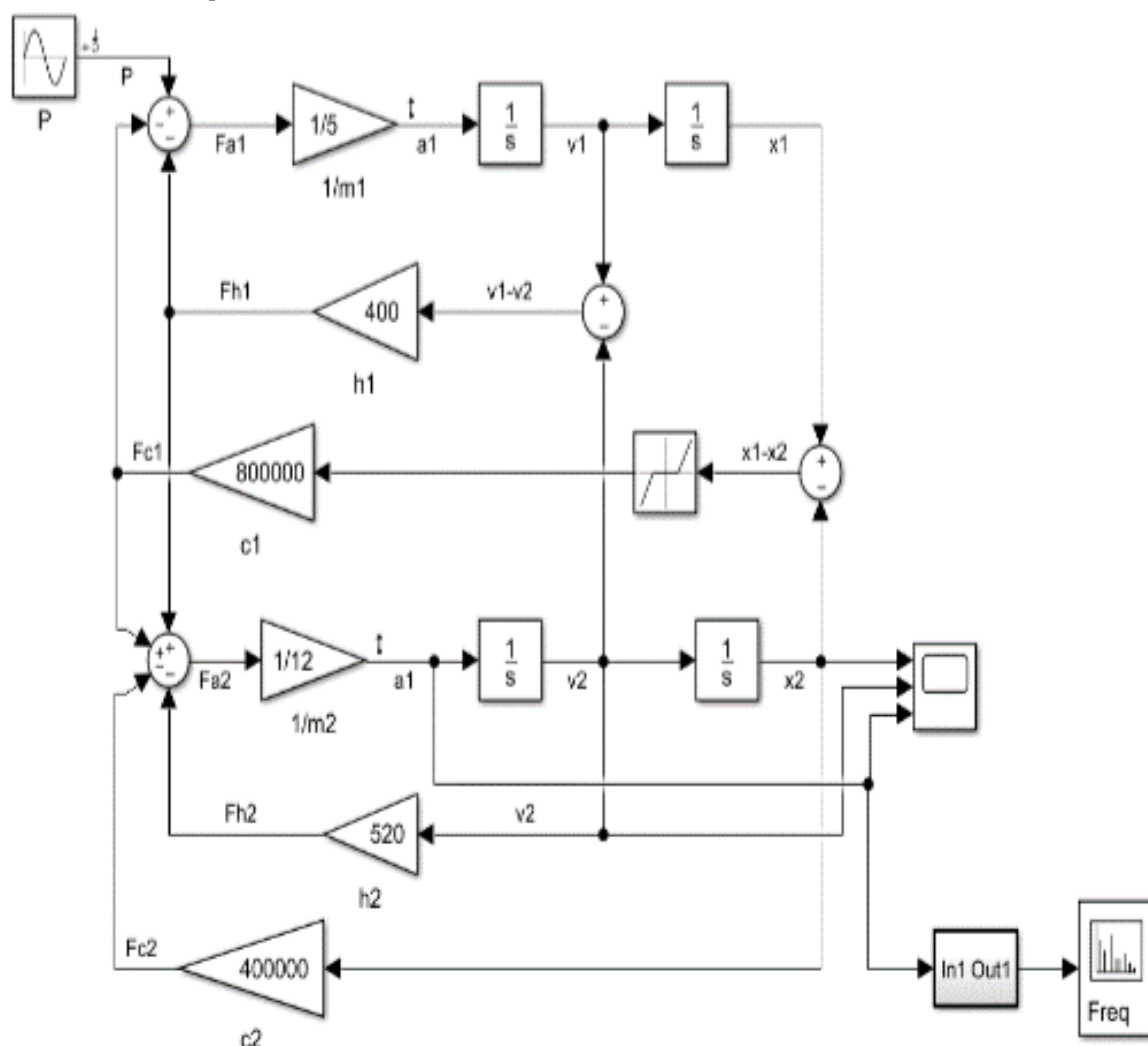


Fig. 1. Model of an axial-piston hydraulic machine with a gap in the piston part in the Simulink software environment

In Figure 2, the spectra show that the harmonics that appeared at a gap of $2 \cdot 10^{-3}$ mm increase to 0.07 m, and additional noise is generated around them.

In Figure 2d, the spectra show that the noise increases as the excitation frequency decreases to 0.55 μ m. If the gap size increases further, the system stops working.

Conclusion. The results of the study showed (Fig. 2) that the vibration acceleration parameter, which changes at the initial stages of defect occurrence, demonstrates high sensitivity, which confirms the theory of hypersensitivity of the vibration acceleration parameter to defects in the form of a gap.

It was determined that in the case of a defect in the form of a gap in the hinge of an axial-piston hydraulic machine, the vibration acceleration spectrum contains several harmonics with a fairly large amplitude. For this device, these are harmonics with frequencies of 115 Hz, 135 Hz, 155 Hz, and 175 Hz.

Figure 3 shows the limits of permissible frequency values for a defect in the hinge section of an axial-piston hydraulic machine, according to which, at a harmonic with an amplitude of up to 0.07 m, the device is in satisfactory condition, at a harmonic with an amplitude of 0.07 m to 0.1 m, the device is in danger, and at a harmonic with an amplitude of 0.1 m, the piston section is destroyed and the hydraulic machine is inoperable.

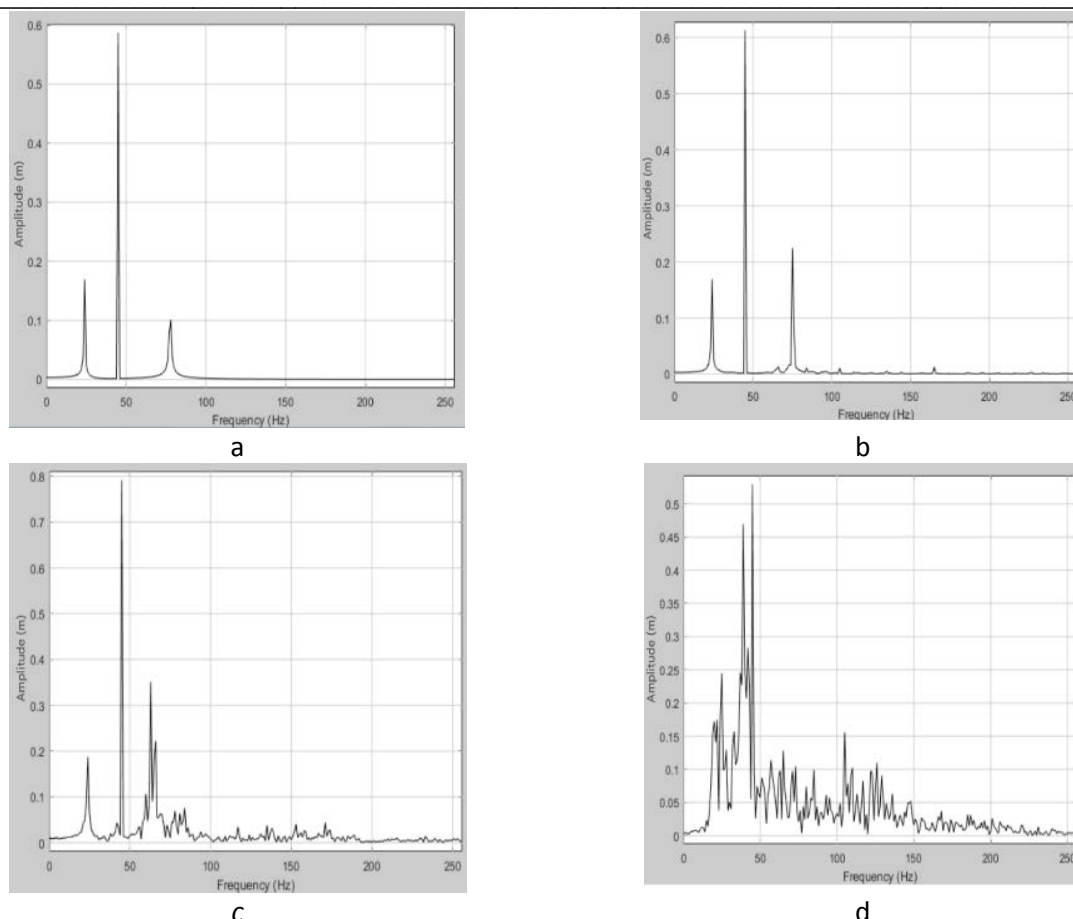


Fig. 2. Vibration acceleration spectra of an axial piston hydraulic machine:
a) in the absence of defects, b) with a gap of $2 \cdot 10^{-3}$ mm in the piston part of the hydraulic machine, c) with a gap of $2 \cdot 10^{-2}$ mm in the piston of the hydraulic machine, d) with a gap of $2 \cdot 10^{-1}$ mm in the piston of the hydraulic machine

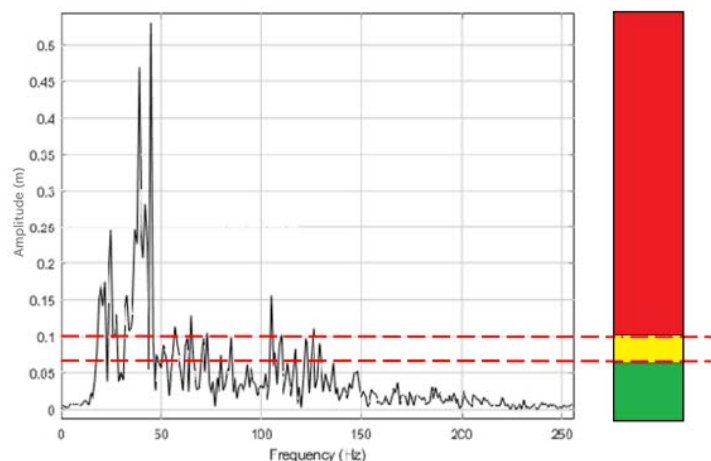


Fig. 3. Limits of permissible frequency values for a defect in the hinge part of an axial-piston hydraulic machine

References.

1. Baker R. C. Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2016. 784 p.
2. Esposito A. Fluid Power with Applications. 7th ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2013. 656 p.
3. Lees A. W. Vibration Problems in Machines: Diagnosis and Resolution. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. 348 p.
4. Klee H., Allen R. Simulation of Dynamic Systems with MATLAB and Simulink. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2018. 830 p.

Р.Є. Костюнік¹, О.О. Мікосянчик¹, С.П. Шимчук², О.Г. Ковальчук¹, О.В. Кушчев¹

¹Державний університет «Київський Авіаційний Інститут»

²Луцький національний технічний університет

РОЗРОБКА БАГАТОЕТАПНОЇ ІННОВАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КОМБІНОВАНОГО ОЧИЩЕННЯ МІНІАТЮРНИХ ТА ПРЕЦИЗІЙНИХ ШАРИКОПІДШИПНИКІВ

У статті подано розробку багатоетапної технології комбінованого очищення мініатюрних та прецизійних підшипників кочення, яку розроблено на основі результатів комплексних експериментальних досліджень мініатюрних та прецизійних шарикопідшипників зовнішнім діаметром до 30 мм (класів P4/P2). Такі підшипники є критичними елементами високотехнологічних механічних систем, що особливо актуально в авіаційній, космічній та спеціальній високоточній промисловості. Для мініатюрних підшипників кочення встановлено необхідність досягнення 12-го класу чистоти за ISO 16232, де залишок частинок забруднень розміром $\geq 5 \mu\text{m}$ не перевищує 60 шт., як критичної умови для забезпечення експлуатаційних характеристик. Експериментально встановлено, що при розробці технології очищення оптимальний кут очищення має становити $30^\circ\text{--}45^\circ$, а швидкість обертання бути 500 об/хв. В ході розробки було оптимізовано технологічні параметри, що включають: магнітну сепарацію (0,5 Тл), двочастотне ультразвукове очищення в турбулентному потоці розчиннику Д-60, фінальне промивання Гептаном з використанням вакуумного сушіння. Підтверджена ефективність очищення $\eta \approx 96,7\%$ забезпечує збереження віброакустичних параметрів та економічну доцільність через уникнення дорогих експлуатаційних відмов.

Ключові слова: технологія, комбіноване очищення, мініатюрні та прецизійні підшипники, вібродіагностика

R.E. Kostyunik, O.O. Mikosyanchyk, S.P. Shymchuk, O.G. Kovalchuk, O.V. Kushchev

DEVELOPMENT OF A MULTI-STAGE INNOVATIVE TECHNOLOGY FOR COMBINED CLEANING OF MINIATURE AND PRECISION BALL BEARINGS

The article presents the development of a multi-stage technology for combined cleaning of miniature and precision rolling bearings, which was developed based on the results of comprehensive experimental studies of miniature and precision ball bearings with an outer diameter of up to 30 mm (classes P4/P2). Such bearings are critical elements of high-tech mechanical systems, which is especially relevant in the aviation, space and special high-precision industries. For miniature rolling bearings, the need to achieve the 12th class of cleanliness according to ISO 16232, where the remaining particles of contaminants with a size of $\geq 5 \mu\text{m}$ do not exceed 60 pieces, has been established as a critical condition for ensuring operational characteristics. It has been experimentally established that when developing a cleaning technology, the optimal cleaning angle should be $30^\circ\text{--}45^\circ$, and the rotation speed should be 500 rpm. During the development, technological parameters were optimized, including: magnetic separation (0.5 T), dual-frequency ultrasonic cleaning in a turbulent flow of solvent D-60, final washing with Heptane using vacuum drying. The confirmed cleaning efficiency $\eta \approx 96.7\%$ ensures the preservation of vibroacoustic parameters and economic feasibility by avoiding expensive operational failures.

Keywords: technology, combined cleaning, miniature and precision bearings, vibration diagnostics

Постановка проблеми. Без підшипників кочення неможливо уявити складні механічні системи та високоточні пристрої, особливо ті, що використовуються в авіаційній та спеціальній техніці. Ці компоненти не просто реалізують просторову фіксацію обертових роторів, але й сприймають основну частину статичних і динамічних навантажень. Підвищення ефективності, надійності та ресурсу, а також забезпечення безвідмовної та безпечної експлуатації цих механізмів, критично залежить від оцінки їхнього технічного стану.

Основною причиною передчасної відмови та зниження середнього часу між відмовами (MTBF – Mean Time Between Failures) у таких прецизійних трибовузлах є мікрозабруднення – наявність абразивних частинок та металевих фрагментів (особливо розміром більше, ніж 5 мкм) на робочих поверхнях деталей, сепаратора та доріжках кочення. Ці частинки спричиняють швидкий абразивний знос, електричну ерозію і точкове пошкодження поверхонь, що різко підвищує рівень вібрації та скорочує експлуатаційний ресурс призводячи до відмов у критичних ситуаціях.

Незважаючи на високу критичність застосування, проблема високоефективного очищення прецизійних елементів мініатюрних шарикопідшипників залишається гостро-актуальною, особливо у військово-промисловому комплексі та авіабудуванні [1-3].

Це обумовлено унікальними конструктивними особливостями прецизійних підшипників, які ускладнюють повне видалення забруднень:

- мінімальний переріз щілин між елементами конструкції;
- наявність тонких каналів порожнин складного профілю;
- взаємне перекриття робочих поверхонь.

Ці особливості формують унікальний комплекс інженерних проблем, що полягають у складності забезпечення ретельного очищення прецизійних підшипників, оскільки завжди залишається ризик повторного мікроскопічного забруднення (частинки металу, оксиди, полімеризовані залишки мастил) чи недостатньо ефективного очищення. Тому, фінішні операції очищення є ключовим елементом технологічного процесу як виготовлення так і ремонту підшипників і підшипникових вузлів [3]. Крім того, підвищення ресурсу підшипників через ефективне очищення має економічне та екологічне обґрунтування, оскільки зменшує енерговитрати та опосередковано сприяє скороченню викидів CO₂ [3].

Актуальність завдання посилюється відсутністю ефективних інтегрованих методів, здатних вирішити проблему екранування у мініатюрних вузлах, що підтверджує необхідність глибоких досліджень для розробки особливого, інноваційного підходу [3 – 9].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз наукової літератури [4, 5] показує, що більшість досліджень зосереджено на вібраційній діагностиці (наприклад, [10 – 15]), що полягає у виявленні дефектів з використанням різного роду вібраційних ефектів. Існуючі методи очищення мають суттєві обмеження [10 – 24]. УЗ-методи ефективно відривають забруднення, але неефективні для їхнього виведення з глибоких щілин, особливо в затінених зонах. Турбулентні методи (без використання спеціального магнітного впливу) недостатньо повно руйнують адгезійні зв'язки [2].

Таким чином можна стверджувати, що жоден із наявних методів не поєднує ефективне руйнування та відрив мікрочастинок з подальшим гарантованим їх виведенням, що можна використовувати у промислових масштабах.

Постановка завдань. Основним завданням даної роботи є розробка та створення комплексної, багатоетапної технології очищення, здатної гарантовано вивести чистоту прецизійних підшипників на рівень, що відповідає найвищим галузевим стандартам. За результатами аналізу критичності застосування встановлено цільовий показник чистоти за ISO 16232: Клас 12, що обмежує залишкове забруднення до кількості, що не перевищує 60 частинок забруднень розміром ≤ 5 мкм на один шарикопідшипник.

Для досягнення цього надзвичайно високого стандарту необхідне поєднання різних фізичних та хімічних методів впливу. Розроблена технологія базується на послідовному застосуванні комбінованих методів дії, що включають імпульсне магнітно-турбулентне очищення (для видалення феромагнітних фрагментів), ультразвукове очищення у багаточастотному режимі (28 кГц / 40 кГц), використання високочистих розчинників (таких як Д-60 та Гептан) та вакуумне сушіння. Фінансова доцільність інвестицій у цю складну технологію обґрунтовується високою ефективністю (96,7%) та мінімізацією ризиків позапланових відмов (AOG – Aircraft on Ground), вартість яких значно перевищує витрати на очищення.

Викладення основного матеріалу. Технологічний процес комбінованого очищення мініатюрних та прецизійних шарикопідшипників є багатостадійним. Він розроблений для максимального видалення як крупних, так і мікроскопічних забруднень, та складається з наступних етапів:

1. Попередня обробка (магнітна сепарація становить 0,5 Тл та використовується для превентивного вилучення великих феромагнітних фрагментів забруднень й подальшої консервації);
2. Основне очищення (комбінований магнітно-турбулентний + УЗ-вплив у режимі 30° – 45° та при частоті 500 об/хв).
3. Фінальна обробка (промивання Гептаном та вакуумне сушіння);
4. Консервація та пакування (нанесення тимчасового антикорозійного покриття та захист від повторного забруднення, а також пакування у вакуумну або антистатичну плівку).

Розглянемо Етап 1 (Розконсервація та попередня розбірка). На цьому етапі підшипники, що надходять на ремонт, підлягають обов'язковій розконсервації та попередній обробці для видалення старих мастильних матеріалів та консерваційних паст. Може використовуватися грубе замочування у спеціальних миючих розчинах або керосині, що має високу жиророзчинну здатність.

На етапі 2, попереднє імпульсне магнітно-турбулентне очищення використовується для видалення крупних фрагментів забруднення різної природи. Цей етап є критично важливим для запобігання пошкодження обладнання та робочих поверхонь під час проведення подальшої ультразвукової обробки, коли видаляються великі феромагнітні металеві мікрочастинок забруднення (≥ 50 мкм). Підшипник піддається дії джерела змінного імпульсного магнітного поля високої напруженості, рекомендовано 0,5 Тл в середовищі рідини Д-60 (високоочищений

ізопарафіновий розчинник), яка забезпечує ефективне розчинення жирів при мінімальному нелеткому залишку (NVR). Це запобігає шуму та розвитку дефектів на доріжках кочення та інших робочих поверхнях.

На Етапі 3 (Фінальна обробка) виконується промивання Гептаном та вакуумне сушіння.

Етап 4, «Примусове сушіння та пакування», є критичним для запобігання миттєвій корозії та вторинному забрудненню. При реалізації етапу відбувається:

- сушіння (використовується метод вакуумного сушіння при контрольованій температурі. Вакуум забезпечує швидке випаровування розчинника при низькій температурі, запобігаючи окисленню та конденсації вологи);

- консервація та пакування (після сушіння, підшипники негайно обробляються високочистою консерваційною оливою або мастилом, що відповідає стандарту чистоти не менше ISO 14/12/10, і поміщаються у герметичне пакування для зберігання).

В основу технології покладено ряд оптимізованих параметрів та рішень, що стосуються обладнання, методу очищення та миючого середовища де інноваційна ефективність забезпечується одночасним використанням імпульсного магнітно-турбулентного (ІМТ) та двочастотного ультразвукового (УЗ) методів. В результаті чого:

- оптимальний кут нахилу підшипників, що піддаються очищенню має становити 30° – 45° (експериментально доведено, що цей діапазон, у поєднанні з бічними ультразвуковими випромінювачами, забезпечує найкращий компроміс між прямим та відбитим УЗ-впливом, гарантуючи рівномірне очищення робочих поверхонь та мінімізацію ефекту екранування);

- використовується миюче середовище Д-60 – для розчинення органіки та низького NVR і Гептан – для фінального промивання та запобігання окисленню перед вакуумним сушінням;

- фінальне промивання у Гептані (або іншому надчистому розчиннику), рекомендується з використанням системи проточної фільтрації (постійна циркуляція рідини через фільтри ≤ 1 мкм, що забезпечує швидке досягнення цільової чистоти.

Для оцінювання ефективності технології використовується валідація та контроль якості.

Використовуючи метод валідації виконується кількісна оцінка за ISO 16232. В цьому випадку, при контрольованого змиві та аналізі на SEM/оптичному мікроскопі, з використанням лічильника частинок або аналізу за допомогою фільтра використовуються для кількісного підтвердження чистоти (Класу 12). Програмне забезпечення мікроскопу дозволяє рахувати мікрочастинки забруднень, сортуючи їх за розміром (наприклад, 5–15 мкм, 15–25 мкм, >25 мкм). Так у нашому випадку розрахункова ефективність видалення критичної фракції є головним дослідницьким результатом та досягнення високої ефективності видалення критичної фракції (≥ 10 мкм), що підтверджує правильність вибору технологічних параметрів [5] становить:

$$\eta = \left(1 - \frac{N_{\text{after}}}{N_{\text{before}}} \right) \times 100\% \approx \mathbf{96,7\%}$$

де N_{before} та N_{after} – кількість частинок забруднень до та після очищення, виміряна згідно з ISO 16232.

Функціональні випробування на створеному колективом авторів даної статті дослідному зразку стенда видалення феромагнітних мікро-, субмікро-, та нанозабруднень із робочих поверхонь деталей мініатюрних шарикопідшипників підтвердили, що висока чистота забезпечує якість експлуатації. Апробація технології підтверджується функціональними випробуваннями проведеними в лабораторних умовах за розробленою методикою проведення досліджень [7]. В результаті проведення вібродіагностики підшипників, після використання технології очищення, фіксувалось значне зниження високочастотного шумового фону та стабілізації спектру. Це підтверджує, що усунення великої кількості абразивних частинок, гарантує покращення віброакустичних параметрів та запобігає прогресуючому зростанню дефектів прецизійних і мініатюрних шарикопідшипників, забезпечуючи їх довготривалу роботу на рівні нових [8].

Контроль якості полягає у визначенні ступеня чистоти. Для прецизійних підшипників, що працюють у критичних вузлах, ступінь чистоти має бути визначений за двома основними параметрами:

- залишкова маса забруднень (гравіметричний критерій). Цей критерій контролює загальну кількість залишків мастил, консерваційних матеріалів, мікропилу та інших твердих залишків;

- розмір та кількість частинок (критерій за класами розмірів). Цей критерій є найважливішим, оскільки він прямо пов'язаний із ризиком заклинювання та пінтінгу.

Розроблена технологія забезпечує дотримання вибраних критеріїв, де для прецизійних підшипників загальна маса твердих залишкових частинок не перевищує $G_{\text{заг}} \leq 0.5$ мг на підшипник, а максимальний допустимий розмір частинки $D_{\text{max}} \leq 25$ мкм (в абсолютному вираженні). Для визначення кількості частинок за класами (код чистоти) використовується внутрішній галузевий стандарт або адаптований стандарт ISO 16232.

Економічне обґрунтування технології, засноване на принципі уникнення витрат (Cost Avoidance). Обґрунтування підтверджує стратегічну доцільність впровадження у відповідні галузі промисловості розробленої та апробованої інноваційної технології видалення феромагнітних мікро-, субмікро-, та нанозабруднень із робочих поверхонь деталей мініатюрних шарикопідшипників, що є пріоритетом, зокрема, у військово-промисловому комплексі. Впровадження забезпечує стратегічну готовність та безпеку експлуатації авіаційної, наземної та спеціальної техніки.

Висновки. Розроблена інноваційна технологія комбінованого очищення, що поєднує оптимізовані параметри ІМТ методу очищення та двочастотного УЗ-впливу, є науково обґрунтованим рішенням для забезпечення чистоти прецизійних та мініатюрних шарикопідшипників. Експериментально доведена ефективність 96,7% та значне зниження рівня вібрації підтверджують, що розроблена та створена інноваційна технологія дозволяє гарантовано відновити компоненти до класу чистоти 12 (ISO 16232). Впровадження даного технологічного процесу є критичною умовою для забезпечення надійності, ресурсу та безпеки експлуатації в авіаційній та військово-промисловій сферах [7, 8].

Список використаних джерел:

1. О. Стельмах, Р. Костюнік, С. Шимчук, О. Кущев. Оцінка ефективності методів очищення авіаційних шарикопідшипників за їх віброакустичними характеристиками // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. – 2024. №2(23) – С. 208-217. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i23.1543>
2. Р.С. Костюнік, О.О. Мікосянчик, О.У. Стельмах, О.В. Кущев, О.Г. Ковальчук. Експериментальне визначення впливу розміру та складу частинок забруднень на віброакустичні характеристики мініатюрних шарикопідшипників у зборі // Problems of friction and wear. – 2024, 3 (104) – С. 101- 111. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.3\(104\).18995](https://doi.org/10.18372/0370-2197.3(104).18995)
3. О. Стельмах, Р. Костюнік, С. Шимчук, О. Кущев. Реновація віброхарактеристик мініатюрних шарикопідшипників прецизійних механічних систем авіакосмічної і військової техніки //Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. – 2024. №1(22) – С. 314-319. <https://doi.org/10.36910/automash.v1i22.1374>
4. Stelmakh A., Kostyunik R., Mikosianchuk O., Kushchev A., Ibraimov T., Sydorenko O., Zaichuk N., Shymchuk S. (2023). Improvement of operational parameters for precision rolling bearings by cleaning working surfaces from micro pollution of various nature. Journal of Engineering Sciences, Vol. 10(1), pp. A31-A40. [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(1\).a5](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(1).a5)
5. Umanskyi, O., Zaichuk, N., Shymchuk, S., Kostunik, R., Terentiev, O. Ensuring Heat Resistance of Aviation Materials Using Protective Coatings Based on ZrO₂. Lecture Notes in Mechanical Engineering Open source preview, 2025, pp. 478–488. https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_42
6. Стельмах О.У., Костюнік Р.С., Кущев О.В., Шимчук С.П. Аналіз шляхів підвищення якості очищення мініатюрних підшипників кочення для прецизійних механічних та авіакосмічних систем на ремонтному виробництві. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». 2024. № 77. С. 56-60. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2024.77.9>
7. Kostyunik R., Mikosianchuk O., Stelmakh A., Kushchev A., Shymchuk S., Zaichuk N. (2025). An innovative approach to non-contact cleaning of mini-ball bearings. Journal of Engineering Sciences (Ukraine), Vol. 12(2), pp. A10–A19. [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(2\).a2](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(2).a2)
8. Костюнік Р.С., Мікосянчик О.О., Кущев О.В., Шимчук С.П., Ковальчук О.Г., Бондар В.С. Розробка методу очищення авіаційних мініатюрних підшипників кочення. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». 2024. № 78. С. 26-36. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2024.78.4>
9. Костюнік Р.С., Стельмах О.У., Кущев О.В. Комплексне вирішення проблеми видалення забруднень з миючої рідини технологічних приладів, використовуваних для промислової очистки підшипників. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». 2025. № 83. С. 142-149.
10. ISO 16232:2007 (та оновлення). Road vehicles — Cleanliness of components of fluid circuits.
11. ISO 4406:2017. Hydraulic fluid power — Fluids — Method for coding the level of contamination by solid particles.

12. Gotsis, A., & Papadopoulos, C. (2018). *Vibration-Based Condition Monitoring of Rolling Element Bearings*. Springer.
13. Harris, T. A., & Kotzalas, M. N. (2007). *Essential Concepts of Bearing Technology*. CRC Press.
14. Tallian, T. E. (1969). The Theory of Rolling Contact Failure. *Wear*, 14(1), 21-43.
15. Li, H., et al. (2020). Research on Ultrasonic Cleaning of Precision Parts Based on Micro-Bubble Dynamics. *Journal of Applied Physics*, 128(15).
16. Soloshenko, S. D. (2021). Optimization of hydrodynamic flow during parts cleaning. *Journal of Engineering Sciences*, 8(3), 112-125.
17. Jones, R. P. (2019). *Precision Cleaning and Surface Technology*. CRC Press.
18. Chen, L., and Wang, G. (2018). Study on the effect of magnetic field on particle dispersion in liquid. *Advanced Materials Research*, 1245, 301-308.
19. Zuk, J., and Bodiak, J. (2022). Influence of liquid viscosity on the efficiency of ultrasonic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 85, 106001.
20. Mischenko, A. V. (2023). Electrostatic contamination and its role in bearing failure. *Tribology Transactions*, 66(2), 210-220.
21. ISO 14644-1:2015. *Cleanrooms and associated controlled environments — Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration*.
22. Khmelnytskyi, D.A. (2020). Modeling of turbulence effects in confined spaces. *Fluid Dynamics Research*, 52(5).
23. ASTM F313-05. *Standard Test Method for Nonvolatile Residue of Halogenated Solvent Extract from Aerospace Components*.
24. Mason, T. J., et al. (2016). *Ultrasonics in Cleaner Production: Limitations and Recent Advances*. Royal Society of Chemistry.

I.B. Самоненко

Луцький національний технічний університет

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ АРХІТЕКТУРНОГО ДИЗАЙНУ НА ПСИХОЛОГІЧНИЙ СТАН КОРИСТУВАЧІВ

У статті проведено статистичний аналіз впливу архітектурного дизайну на психологічний стан користувачів із застосуванням А/В-тестування, концептуально запропонованого автором дослідження. Методологія ґрунтується на синтетичних датасетах, змодельованих у Python на основі емпіричних закономірностей, описаних у сучасній літературі з А/В-тестування та психології середовища. Проаналізовано три ключові параметри архітектурного середовища — колір, тип освітлення та конфігурацію простору — та їхній вплив на стрес, емоційний комфорт і когнітивну продуктивність. Статистичний аналіз із використанням t-тестів, дисперсійного аналізу та регресійних моделей показав, що холодні кольори, природне освітлення й відкриті простори позитивно впливають на психологічний стан користувачів. Отримані результати підкреслюють необхідність інтеграції доказових статистичних підходів у архітектурне проектування.

Ключові слова: архітектурний дизайн, психологічний стан, А/В-тестування, емоційний комфорт, стрес, освітлення, колір середовища

I. V. Samonenko

STATISTICAL ANALYSIS OF THE IMPACT OF ARCHITECTURAL DESIGN ON USERS' PSYCHOLOGICAL STATE

This paper presents a statistical analysis of the impact of architectural design on users' psychological well-being using A/B testing, a methodological approach introduced by the author. The study relies on synthetic datasets generated in Python and informed by empirical patterns reported in contemporary literature on A/B testing and environmental psychology. Three architectural parameters—color schemes, lighting type, and spatial configuration—were examined to determine their influence on stress, emotional comfort, and cognitive performance. Statistical techniques including t-tests, ANOVA, and regression modelling were applied. The results show that cool colors, natural lighting, and open layouts positively affect psychological well-being. These findings demonstrate the importance of incorporating evidence-based statistical methods into architectural design practice.

Keywords: architectural design, psychological well-being, A/B testing, emotional comfort, stress, lighting, environmental color.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Сучасні наукові дослідження у сфері архітектури все частіше розглядають будівлю не лише як інженерний об'єкт, а як складну систему взаємодії фізичних, енергетичних і психологічних чинників. У роботах, присвячених енергоефективності будівель, акцент робиться на зниженні тепловтрат, оптимізації огорожувальних конструкцій та використанні інноваційних матеріалів, що дозволяє досягти істотної економії енергоресурсів. При цьому застосовуються статистичні методи аналізу, зокрема регресійні моделі та індексні показники, які дають змогу кількісно оцінювати ефективність архітектурних рішень у різних кліматичних умовах.

Аналіз літератури свідчить, що архітектурні характеристики середовища суттєво впливають на психологічний стан людини. Класичні роботи демонструють, що природні елементи та якість простору можуть знижувати стрес і покращувати емоційне відновлення [1; 3], тоді як недосконалий архітектурний дизайн здатен провокувати напругу, тривожність і зниження загального благополуччя [4]. Дослідження впливу освітлення та кольору підтверджують, що ці фактори безпосередньо впливають на настрій і психологічний комфорт користувачів [2; 5]. Попри наявність значної кількості досліджень, недостатньо вивченими залишаються кількісні порівняння впливу окремих архітектурних параметрів та їх комбінованої дії.

Водночас у літературі з середовищної психології доведено, що просторові характеристики, освітлення та кольорові рішення суттєво впливають на психоемоційний стан користувачів будівель. Природне світло, відкриті просторові структури та гармонійні колірні поєднання асоціюються зі зниженням рівня стресу, підвищенням когнітивної продуктивності та загального комфорту перебування в приміщенні. Однак ці дослідження здебільшого мають якісний характер або ґрунтуються на анкетуванні, що ускладнює безпосереднє порівняння різних архітектурних сценаріїв на кількісному рівні.

Проблема полягає у необхідності створення систематизованого статистичного підходу, який дозволить об'єктивно оцінити, які саме елементи архітектурного дизайну спричиняють найбільший

психологічний ефект. Це зумовлює потребу в експериментальних дослідженнях із використанням сучасних методів аналізу, таких як А/В-тестування [6]. Таким чином, актуальною залишається проблема інтеграції статистичних методів аналізу енергоефективності з оцінкою психологічного впливу архітектурного середовища. Відсутність єдиного кількісного підходу, який би поєднував ці два напрями, обмежує можливості обґрунтованого вибору архітектурних рішень на етапі проєктування, що зумовлює необхідність подальших досліджень у цьому напрямі.

Мета і завдання дослідження. У дослідженні застосовано комплексний підхід, що поєднує статистичний аналіз енергетичних показників будівель та оцінку психологічного комфорту користувачів. Для цього було використано синтетичні набори даних, згенеровані у середовищі Python на основі емпіричних закономірностей, описаних у сучасних наукових публікаціях. Такий підхід дозволяє моделювати різні архітектурні сценарії без необхідності проведення тривалих і ресурсомістких натурних експериментів, зберігаючи при цьому контроль над основними змінними.

Параметри енергетичної ефективності включали показники теплопередачі огорожувальних конструкцій, типи теплоізоляційних матеріалів, рівень природного та штучного освітлення, а також кліматичні умови експлуатації будівель. Для аналізу відносних показників енергозбереження використовувався бета-регресійний аналіз, що є доцільним при роботі з нормалізованими змінними, обмеженими інтервалом від нуля до одиниці. Це дало змогу коректно оцінити вплив різних архітектурних факторів на рівень економії енергії та комфорт внутрішнього середовища.

Окрему увагу приділено застосуванню А/В-тестування для порівняння альтернативних архітектурних рішень. Даний метод дозволяє здійснювати пряме статистичне порівняння двох варіантів проєктування за фіксованих умов, що підвищує надійність отриманих результатів. Додатково використовувалися елементи машинного навчання для прогнозування тепловтрат та виявлення найбільш значущих факторів, що впливають на загальну енергоефективність будівлі.

Матеріали та методи. Методологія дослідження базується на поєднанні положень середовищної психології та кількісних статистичних методів аналізу. Теоретичним підґрунтям роботи стали класичні та сучасні дослідження, які доводять суттєвий вплив архітектурного середовища на психоемоційний стан людини. Зокрема, у фундаментальних працях показано, що візуальний контакт із природними елементами та якісне архітектурне оточення сприяють зниженню рівня стресу та покращенню загального самопочуття користувачів [1; 3]. Аналогічно доведено, що несприятливі архітектурні умови можуть негативно впливати на психологічне здоров'я людини, підвищуючи рівень напруження та дискомфорту [4].

Для забезпечення контрольованості експериментальних умов та відтворюваності результатів у дослідженні було використано синтетичні набори даних, згенеровані у середовищі Python. Параметри статистичних розподілів формувалися на основі емпіричних закономірностей, описаних у попередніх дослідженнях впливу архітектурного середовища на психологічний стан користувачів [2; 5]. Зокрема, результати робіт, присвячених впливу світла та кольору на емоційний настрій, рівень збудження та психофізіологічні реакції, були використані для обґрунтування діапазонів значень відповідних змінних у процесі моделювання [2].

У межах моделювання було розглянуто три ключові параметри архітектурного дизайну: колірне рішення середовища, тип освітлення та просторову організацію. Вибір саме цих параметрів ґрунтується на результатах досліджень, які показують, що вони є одними з найбільш значущих чинників формування психологічного комфорту у закритих просторах [2; 5]. Просторові конфігурації з відкритими візуальними зв'язками та доступом до природного середовища моделювалися з урахуванням положень теорії відновлення уваги та відновлювального впливу природи [3].

Психологічний стан користувачів оцінювався за узагальненими кількісними показниками рівня стресу, емоційного комфорту та когнітивної продуктивності. Для аналізу отриманих даних застосовувалися методи описової статистики, що дозволило виявити загальні тенденції впливу архітектурних параметрів на психологічний стан. Перевірка статистичної значущості відмінностей між альтернативними умовами здійснювалася з використанням t-тестів для незалежних вибірок та дисперсійного аналізу, які широко застосовуються у міждисциплінарних дослідженнях архітектурного середовища [5].

Окремим етапом дослідження стало застосування А/В-тестування як інструменту експериментального порівняння архітектурних рішень. Даний підхід дозволяє здійснювати пряме статистичне зіставлення двох варіантів середовища за фіксованих умов і широко використовується

у прикладних дослідженнях для оцінки ефективності різних рішень [6]. У межах даної роботи А/В-тестування застосовувалося для оцінки впливу окремих параметрів архітектурного дизайну на психологічні показники, що забезпечило об'єктивність та надійність отриманих результатів.

Запропонований комплекс методів дозволив кількісно оцінити психологічний ефект архітектурного середовища та сформувавши доказову основу для подальшої інтеграції результатів середовищної психології у практику архітектурного проектування.

Результати та обговорення. Результати проведеного А/В-тестування засвідчили наявність статистично значущих відмінностей між експериментальними групами за всіма досліджуваними параметрами архітектурного дизайну. Аналіз впливу кольірних рішень показав, що користувачі, які перебували у середовищі з переважанням холодних кольорів, демонстрували нижчі середні значення рівня стресу порівняно з групою теплих кольорів. Ці відмінності були підтверджені результатами t-тесту для незалежних вибірок із рівнем статистичної значущості $p < 0.05$. На графіку середніх значень, представленою на Рис. 1, видно, що різниця між групами становить близько 12 %, що узгоджується з результатами попередніх досліджень, у яких доведено вплив кольору на емоційний стан та рівень психофізіологічного напруження людини [2; 4].

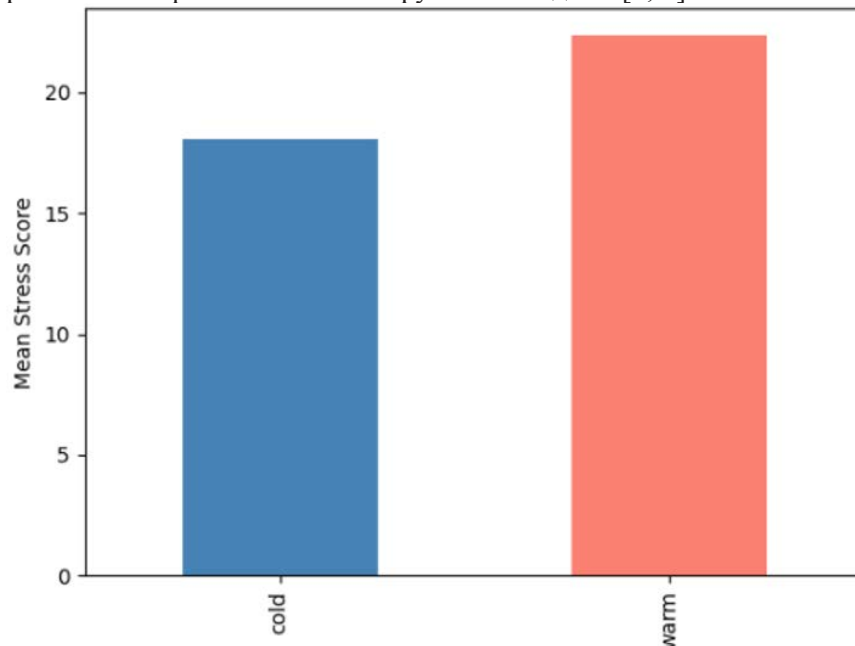


Рис. 1. Середній рівень стресу за кольірними умовами

Отримані результати щодо впливу освітлення свідчать про те, що природне освітлення має виражений позитивний ефект на емоційний комфорт та когнітивну продуктивність користувачів. У середньому показники емоційного комфорту та продуктивності за умов природного освітлення перевищували відповідні значення при штучному освітленні на 15–18 %. Середні значення та довірчі інтервали для обох умов наведено в Таблиці 1. Аналіз розподілів продуктивності, представлений на Рис. 2, демонструє зсув моди у бік вищих значень для групи природного освітлення, що вказує не лише на зростання середнього рівня продуктивності, але й на стабільніший характер її прояву. Ці результати узгоджуються з даними літератури, у яких підкреслюється роль світла як одного з ключових факторів формування психологічного комфорту в архітектурному середовищі [2; 5].

Аналіз просторових конфігурацій показав, що відкриті простори асоціюються зі зниженням рівня тривожності у користувачів порівняно з замкнутими приміщеннями. Функція щільності розподілу показника тривожності, наведена на Рис. 3, демонструє ширший розподіл зі зміщенням у бік нижчих значень для групи відкритого простору, що свідчить про загальне зменшення інтенсивності негативних емоційних реакцій. Отримані відмінності були додатково підтверджені результатами дисперсійного аналізу, який виявив статистично значущу різницю між групами. Такі результати відповідають положенням теорії відновлювального впливу середовища та попереднім емпіричним дослідженням, у яких доведено позитивний психологічний ефект відкритих і візуальнодоступних просторів [1; 3].

Побудована регресійна модель дозволила оцінити сумарний вплив архітектурних факторів на психологічний стан користувачів. Результати моделювання показали, що дія окремих параметрів

© І.В. Самоненко

дизайну має кумулятивний характер: поєднання холодних колірних рішень, природного освітлення та відкритої просторової організації формує найбільш сприятливі умови з точки зору зниження стресу, підвищення емоційного комфорту та продуктивності. Статистична значущість коефіцієнтів регресійної моделі підтверджує, що архітектурний дизайн може розглядатися як ефективний інструмент регуляції психологічного стану користувачів, а не лише як естетичний або функціональний чинник [4; 5].

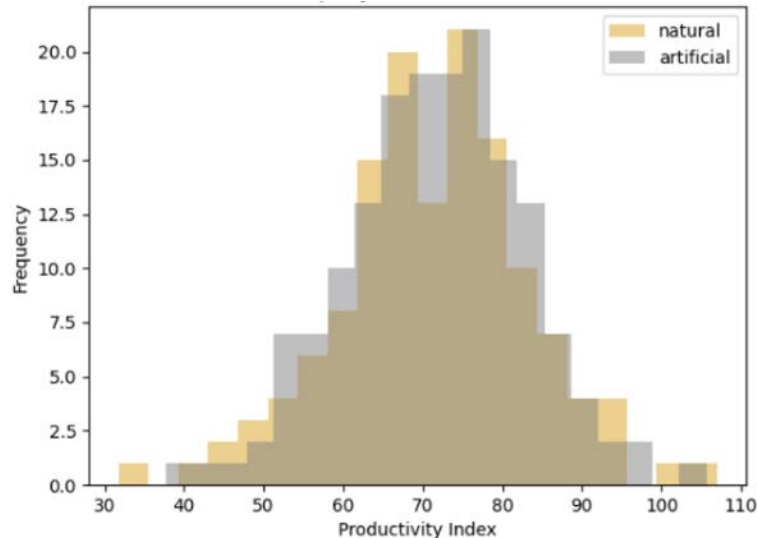


Рис. 2. Розподіл продуктивності за типом освітлення

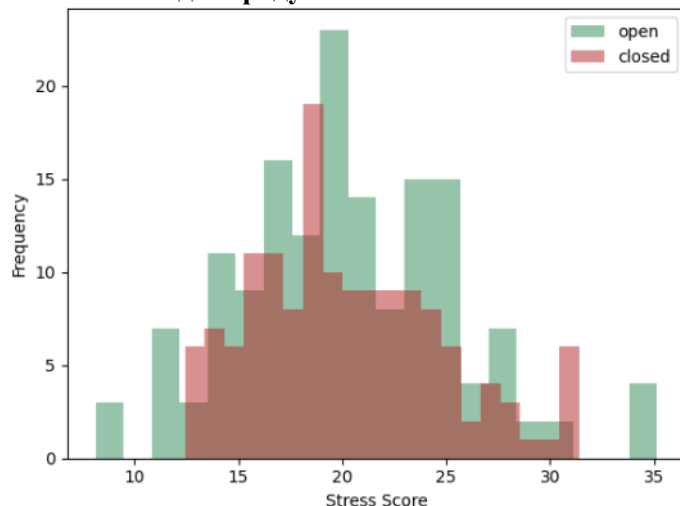


Рис. 3. Розподіл показників тривожності за типом простору

Загалом результати дослідження демонструють, що архітектурні параметри мають суттєвий вплив на психологічне благополуччя людини. Отримані кількісні оцінки підтверджують доцільність використання статистичних методів, зокрема А/В-тестування та регресійного аналізу, для обґрунтованого вибору архітектурних рішень. Поєднання сприятливих умов архітектурного середовища забезпечує найбільш виражений позитивний ефект, що створює передумови для впровадження доказових підходів у практику архітектурного проектування [6].

Висновки. Проведене дослідження підтвердило, що окремі параметри архітектурного дизайну мають статистично значущий вплив на психологічний стан користувачів, зокрема на рівень стресу, емоційний комфорт і когнітивну продуктивність. Отримані результати узгоджуються з висновками попередніх робіт у сфері середовищної психології, у яких підкреслюється важливість візуальних і просторових характеристик архітектурного середовища для психоемоційного благополуччя людини [1; 3; 4]. Кількісний аналіз показав, що архітектурні фактори не діють ізольовано, а формують комплексний психологічний ефект, який проявляється у зміні суб'єктивного сприйняття простору та функціонального стану користувачів.

Застосування А/В-тестування у поєднанні зі статистичними методами аналізу дозволило об'єктивно оцінити вплив альтернативних архітектурних рішень і кількісно визначити характер

виявлених відмінностей. Зокрема, встановлено, що комбінації холодних кольорних рішень, природного освітлення та відкритої просторової організації формують найбільш сприятливі психологічні умови, що відповідає результатам досліджень впливу світла, кольору та простору на емоційний стан людини [2; 5]. Це підтверджує доцільність використання експериментальних статистичних підходів для оцінки якості архітектурного середовища ще на етапі проєктування.

Отримані результати демонструють, що архітектурний дизайн може розглядатися не лише як естетичний або функціональний аспект будівель, але і як ефективний інструмент регуляції психологічного стану користувачів. Інтеграція методів середовищної психології та доказових статистичних підходів створює підґрунтя для формування людиноорієнтованого архітектурного проєктування, у якому рішення ґрунтуються на кількісно підтверджених ефектах впливу простору на людину [6].

Список літератури

1. 1.Ulrich, R. S. Вид з вікна може впливати на одужання після операції. *Science*, 1984, 224(4647), 420–421. <https://doi.org/10.1126/science.6143402>
2. 2.Küller, R., Ballal, S., Laike, T., Mikellides, B., & Tonello, G. Вплив світла та кольору на психологічний настрій. *Lighting Research & Technology*, 2006, 38(3), 267–276. <https://doi.org/10.1191/1365782806li1630a>
3. 3.Kaplan, R., & Kaplan, S. Досвід природи: психологічна перспектива. Cambridge University Press., 1989. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511571304>
4. 4.Evans, G. W., & McCoy, J. M. Коли будівлі не працюють: роль архітектури у здоров'ї людини. *Journal of Environmental Psychology*, 1998, 18(1), 85–94. <https://doi.org/10.1006/jevp.1998.0089>
5. 5.Frontczak, M., & Wargocki, P. Огляд літератури про вплив різних факторів на комфорт людини в закритих приміщеннях. *Building and Environment*, 2011, 46(4), 922–937. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.021>
6. 6.Udemy, 2024. А/В-тестування: від основ до розширених статистичних методів. Отримано з <https://www.udemy.com>

Ю. С. Крутій, М. Г. Сур'янінов, А. О. Перпері, В. В. Вакуленко, В. М. Мітінський

Одеська державна академія будівництва та архітектури

АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ НА ЗГИН БАЛОК ЗМІННОЇ ЖОРСТКОСТІ НА НЕОДНОРІДНІЙ ПРУЖНІЙ ОСНОВІ

Розроблено аналітичний метод розрахунку балок довільної неперервної змінної жорсткості, що опираються на неоднорідну суцільну пружну основу Вінклера. Неоднорідність основи характеризується змінним погонним коефіцієнтом постелі, який може являти собою будь-яку неперервну функцію. Метод ґрунтується на точному розв'язку відповідного диференціального рівняння зі змінними коефіцієнтами. В замкненій формі наведено розрахункові формули для параметрів напружено-деформованого стану балки. Наведено розрахунок на згин бетонної балки у вигляді зрізаного клину, що опирається на експоненціально-змінну пружну основу.

Ключові слова: балка, змінна жорсткість, неоднорідна основа, гіпотеза Вінклера, аналітичний метод.

Yu. S. Krutii, M. H. Surianinov, A. O. Perperi, V. V. Vakulenko, V. M. Mytynskyi

ANALYTICAL METHOD FOR CALCULATING BENDING OF BEAMS OF VARIABLE STIFFNESS ON A NON-UNIFORM ELASTIC FOUNDATION

An analytical method for calculating beams of arbitrary continuous variable stiffness supported on a non-uniform continuous elastic Winkler foundation has been developed. The classical problem of calculating the bending of beams of constant stiffness supported on a constant elastic Winkler foundation is well studied. However, the assumption of the homogeneity of the foundation is far from reality and for more qualitative studies it is necessary to take into account the heterogeneity (variability) of the foundation. In this case, the bed coefficient will be variable along the beam axis, which significantly complicates the solution of the corresponding differential equation. The problem becomes even more complicated when not only the bed coefficient, but also the stiffness of the beam is variable. This is the case that this article is devoted to. The heterogeneity of the foundation is characterized by a variable linear bed coefficient, which can be any continuous function. The method is based on the exact solution of the corresponding differential equation with variable coefficients. In closed form, calculation formulas for the parameters of the stress-strain state of the beam are given. The calculation for the bending of a concrete beam in the form of a truncated wedge resting on an exponentially varying elastic base is given.

Keywords: beam, variable stiffness, inhomogeneous foundation, Winkler hypothesis, analytical method.

Постановка проблеми. Конструкція, що являє собою балку на пружній основі, часто застосовується в інженерній практиці, в тому числі, в промисловому та цивільному будівництві, в залізничній галузі, гідротехніці, кораблебудуванні, аерокосмічній техніці та інших. З числа існуючих моделей основи широкого поширення набула так звана модель Вінклера. У цій моделі пружна основа, на яку опирається конструкція, представляється у вигляді набору вертикальних, близько розташованих, не пов'язаних між собою пружин. Таку ситуацію загалом можна описати єдиним параметром, який називають модулем пружності основи чи коефіцієнтом постелі. У найпростішому випадку, коли основа вважається однорідною, коефіцієнт постелі є сталим. Класична задача про розрахунок на згин балок сталої жорсткості, що опираються на сталу пружну основу Вінклера, загалом добре вивчена. Застосування відповідних розв'язків в інженерній практиці не викликає труднощів.

Однак припущення про однорідність основи далеке від реальності і для більш якісних досліджень необхідно враховувати неоднорідність (змінність) основи [1]. В такому випадку коефіцієнт постелі буде змінним уздовж осі балки, що суттєво ускладнює розв'язання відповідного диференціального рівняння. Такому випадку присвячені роботи авторів [2-5]. Задача стає ще більш складною, коли не тільки коефіцієнт постелі, а й жорсткість балки є змінною. Саме такому випадку присвячено дану публікацію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед публікацій, присвячених згину балки змінної жорсткості на пружній основі, відзначимо роботи [6-13]. У статті [6] розглядається напіваналітична процедура для помірно великих прогинів нескінченної неоднорідної статичної балки, що спирається на нелінійну пружну основу. Запропонований тут метод є функціонально-ітераційною процедурою, не тільки досить простою, але й легкою у застосуванні. У статті [7] пропонується новий функціонально-ітераційний метод для статичного аналізу балок як загальний підхід до змінного поперечного перерізу балки. Наведено ілюстративний приклад для перевірки достовірності запропонованого методу. У статті [8] представлено розв'язок граничного інтегрального рівняння для нелінійної задачі неоднорідних балок, що спираються на нелінійну трипараметричну пружну основу. Кілька балок аналізуються за різних граничних умов та розподілів

© Ю. С. Крутій, М. Г. Сур'янінов, А. О. Перпері, В. В. Вакуленко, В. М. Мітінський

навантаження. В роботі [9] розглядається балка змінного перерізу, що опирається на пружну основу, що характеризується двома коефіцієнтами постелі. Для розрахунку тут використовується метод апроксимації розв'язку степеневою функцією. Ефективність методу підтверджено тестовими прикладами. У роботі [10] розглядається робота залізобетонної балки, що лежить на пружному фундаменті, деформаційні характеристики якої описуються моделлю з двома коефіцієнтами постелі Власова-Пастернака. Для розв'язання диференціального рівняння тут застосовується варіаційний метод. Робота [11] присвячена дослідженню коливань балки Ейлера, що опирається на пружну основу. Припускається, що балка має змінну жорсткість уздовж довжини. Тут використовується метод гомотопічних збурень, який дозволяє створити в якості розв'язку наближений аналітичний вираз. Автори приходять до висновку, що вказаний підхід є перспективним методом дослідження коливань балок змінної жорсткості на пружній основі. У статті [12] досліджено згинальний стан залізобетонної балки зі змінною висотою поперечного перерізу по довжині, що спирається по всій довжині на цегляну основу. Жорсткість такої балки є неперервною змінною функцією. Балка знаходиться під впливом довільно розташованих зосереджених сил. Вихідне рівняння згину розв'язується методом скінченних різниць. В публікації [13] в якості методу дослідження також вибрано метод скінченних різниць. Тут наводяться практичні приклади розрахунку для балок змінної жорсткості.

Щодо публікацій, присвячених розрахунку балок сталої жорсткості на змінній пружній основі, то їх детальний огляд надано в роботах авторів [2-5]. В цих публікаціях розроблено відповідний аналітичний метод та розглянуто приклади його застосування. Зокрема, наведено розрахунки, коли змінний коефіцієнт постелі, який характеризує неоднорідність основи, задається степеневим, параболічним та експоненціальним законами.

Як показує аналіз публікацій, розробка нового аналітичного методу розрахунку на згин балок змінної жорсткості, що опираються на неоднорідну пружну основу, є актуальною.

Постановка завдань. Метою роботи є розробка аналітичного методу розрахунку балки на пружній основі, коли згинальна жорсткість та коефіцієнт постелі пружної основи являють собою будь-які неперервні функції.

Викладення основного матеріалу. Об'єктом дослідження є балка з довільною неперервною змінною згинальною жорсткістю $E(x)I(x)$, що опирається на суцільну неоднорідну пружну основу, для якої прийнято гіпотезу Вінклера. На рис. 1 представлено розрахункову схему балки, де $q(x)$ – задане розподілене змінне поперечне навантаження, $y(x)$ – прогин (просадка основи), $\varphi(x)$ – кут повороту. На рис. 2 показані внутрішні зусилля, які виникають у поперечних перерізах балки, а саме, згинальний момент $M(x)$ і поперечна сила $Q(x)$.

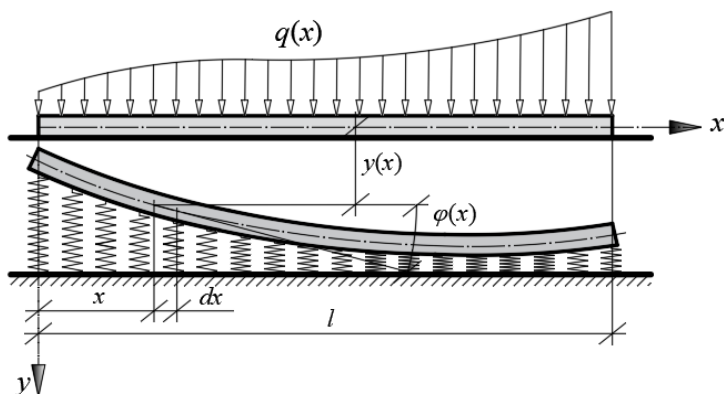


Рис. 1. Calculation diagram of the beam

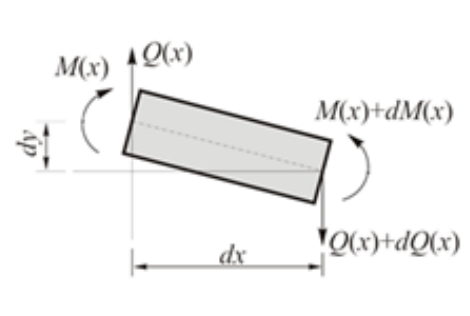


Рис. 2. Internal forces

Напружено-деформований стан балки характеризується переміщеннями $y(x)$, $\varphi(x)$ та зусиллями $M(x)$, $Q(x)$. В подальшому будемо називати їх параметрами стану балки.

Для згинальної жорсткості приймаємо форму запису: $E(x)I(x) = E_0 I_0 A(x)$, де $E_0 I_0$ – жорсткість в певній характерній точці балки (наприклад, в точці $x = 0$), $A(x)$ – безрозмірна неперервна функція, що виражає закон зміни жорсткості уздовж довжини балки. Аналогічне подання запишемо також для навантаження: $q(x) = q_0 C(x)$, де q_0 – інтенсивність навантаження в

деякій характерній точці балки; $C(x)$ – безрозмірна неперервна функція, яка визначає закон зміни інтенсивності навантаження від координати x .

При розрахунках балок, що опираються на пружну основу, оперують такими поняттями, як погонний коефіцієнт постелі $k(x)$ та коефіцієнт постелі пружної основи $k^*(x)$, які характеризують її жорсткість. Вказані коефіцієнти, які в загальному випадку вважаємо змінними, пов'язані між собою співвідношенням $k(x) = b(x)k^*(x)$, де $b(x)$ – ширина балки в точці x .

У відповідності з гіпотезою Вінклера, реакція основи на балку $R(x)$ в довільній точці x пропорційна прогину $y(x)$ з коефіцієнтом пропорційності $k(x)$, $k(x) \geq 0$, тобто $R(x) = -k(x)y(x)$. Знак мінус тут означає, що реакція протилежна напрямку просадки основи. Надалі будемо вважати $k(x)$ довільною неперервною функцією, для якої приймаємо подання: $k(x) = k_0 B(x)$, де k_0 – значення погонного коефіцієнту постелі у деякій характерній точці балки (наприклад, в точці $x = 0$); $B(x)$ – безрозмірна неперервна функція, що виражає закон зміни погонного коефіцієнту постелі уздовж довжини балки.

Диференціальне рівняння згину балки [14] у нашому випадку набуває вигляду

$$E_0 I_0 (A(x) y''(x))'' + k_0 B(x) y(x) = q_0 C(x). \quad (1)$$

Після знаходження з цього рівняння функції прогинів $y(x)$, решта параметрів стану знайдуться за допомогою диференціальних залежностей, відомих з теорії згину балок:

$$\varphi(x) = y'(x); M(x) = -E_0 I_0 A(x) y''(x); Q(x) = -E_0 I_0 (A(x) y''(x))'. \quad (2)$$

Рівняння (1) належить до класу звичайних диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами. Знаходження загальних інтегралів для таких рівнянь є складною математичною проблемою. Як зазначається в монографії [14, с. 203], отримати розв'язок рівняння (1) в замкнутій формі вдається тільки в деяких окремих випадках. Наша мета – виписати точний розв'язок рівняння (1) для довільних неперервних функцій жорсткості, погонного коефіцієнту постелі та навантаження.

Точний розв'язок диференціального рівняння згину та формули параметрів стану балки

Для розв'язання рівняння (1) застосуємо метод прямого інтегрування, який було розвинуто у низці робіт [15-18].

Окрім рівняння (1), також розглядатимемо рівносильну йому систему диференціальних рівнянь. В якості вектору невідомих системи приймемо вектор, компонентами якого будуть виступати параметри стану балки

$$\Phi(x) = \begin{pmatrix} y(x) \\ \varphi(x) \\ M(x) \\ Q(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y(x) \\ y'(x) \\ -E_0 I_0 A(x) y''(x) \\ -E_0 I_0 (A(x) y''(x))' \end{pmatrix}. \quad (3)$$

В такому разі, внаслідок (1), (2), система запишеться у вигляді

$$\frac{d\Phi(x)}{dx} = H(x)\Phi(x) - f(x), \quad (4)$$

де

$$H(x) = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/(E_0 I_0 A(x)) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ k_0 B(x) & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad f(x) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ q_0 C(x) \end{pmatrix}.$$

В подальшому, окрім неоднорідного рівняння (1), будемо оперувати відповідним йому однорідним рівнянням

$$E_0 I_0 (A(x) y''(x))'' + k_0 B(x) y(x) = 0, \quad (5)$$

а також рівносильною йому однорідною системою диференціальних рівнянь

$$\frac{d\Phi(x)}{dx} = H(x)\Phi(x). \quad (6)$$

Позначимо через $X_n(x)$ ($n=1,2,3,4$) шукані безрозмірні фундаментальні розв'язки однорідного рівняння (5), а через

$$X^*(x) = \frac{q_0 l^4}{E_0 I_0} X_5(x) \quad (7)$$

частинний розв'язок неоднорідного рівняння (1), де $X_5(x)$ – невідома безрозмірна функція. Функції $X_n(x)$ ($n=1,2,3,4,5$) будемо шукати у вигляді рядів по степеням безрозмірного параметру $-K$ з невідомими змінними коефіцієнтами

$$X_n(x) = \beta_{n,0}(x) - K\beta_{n,1}(x) + K^2\beta_{n,2}(x) - K^3\beta_{n,3}(x) + \dots \quad (n=1,2,3,4,5), \quad (8)$$

де $K = k_0 l^4 / (E_0 I_0)$. Згідно з термінологією, яка прийнята в [19], функції $\beta_{n,0}(x)$ називатимемо початковими, а $\beta_{n,k}(x)$ ($k=1,2,3,\dots$) – твірними.

Поки припускаємо, що ряди (8), а також аналогічні ряди, створені із перших чотирьох похідних функцій $\beta_{n,0}(x)$, $\beta_{n,k}(x)$ ($k=1,2,3,\dots$), рівномірно збігаються. В такому разі буде можливою операція диференціювання рядів.

Початкові та твірні функції будемо шукати із умов, що за визначенням $X_n(x)$ ($n=1,2,3,4$) повинні задовольняти однорідне рівняння (5), а $X^*(x)$ – неоднорідне рівняння (1). Зважаючи на (7), зазначені умови у вигляді рівностей запишуться так:

$$(A(x)X_n''(x))'' + \frac{K}{l^4} B(x)X_n(x) = 0 \quad (n=1,2,3,4); \quad (9)$$

$$(A(x)X_5''(x))'' + \frac{K}{l^4} B(x)X_5(x) = \frac{1}{l^4} C(x). \quad (10)$$

Підставляючи в (9), (10) замість $X_n(x)$ ($n=1,2,3,4,5$) їх значення (8), після перетворень, отримаємо:

$$(A(x)\beta_{n,0}''(x))'' + \sum_{k=1}^{\infty} (-K)^k \left((A(x)\beta_{n,k}''(x))'' - \frac{1}{l^4} B(x)\beta_{n,k-1}(x) \right) = 0 \quad (n=1,2,3,4);$$

$$(A(x)\beta_{5,0}''(x))'' - \frac{1}{l^4} C(x) + \sum_{k=1}^{\infty} (-K)^k \left((A(x)\beta_{5,k}''(x))'' - \frac{1}{l^4} B(x)\beta_{5,k-1}(x) \right) = 0.$$

Звідси, прирівнюючи до нуля всі коефіцієнти при степенях параметра $-K$, включно з нульовим степенем, приходимо до наступних диференціальних рівнянь відносно початкових та твірних функцій:

$$(A(x)\beta_{n,0}''(x))'' = 0 \quad (n=1,2,3,4); \quad (11)$$

$$(A(x)\beta_{5,0}''(x))'' = \frac{1}{l^4} C(x); \quad (12)$$

$$(A(x)\beta_{n,k}''(x))'' = \frac{1}{l^4} B(x)\beta_{n,k-1}(x) \quad (n=1,2,3,4,5) (k=1,2,3,\dots), \quad (13)$$

Долучимо до даних рівнянь такі граничні умови:

$$\begin{pmatrix} \beta_{1,0}(0) & \beta_{2,0}(0) & \beta_{3,0}(0) & \beta_{4,0}(0) \\ \beta'_{1,0}(0) & \beta'_{2,0}(0) & \beta'_{3,0}(0) & \beta'_{4,0}(0) \\ \beta''_{1,0}(0) & \beta''_{2,0}(0) & A(0)\beta''_{3,0}(0) & A(0)\beta''_{4,0}(0) \\ \beta'''_{1,0}(0) & \beta'''_{2,0}(0) & (A(0)\beta''_{3,0}(0))' & (A(0)\beta''_{4,0}(0))' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/l^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/l^3 \end{pmatrix}; \quad (14)$$

$$\beta_{5,0}(0) = \beta'_{5,0}(0) = A(0)\beta''_{5,0}(0) = (A(0)\beta''_{5,0}(0))' = 0; \quad (15)$$

$$\beta_{n,k}(0) = \beta'_{n,k}(0) = A(0)\beta''_{n,k}(0) = (A(0)\beta''_{n,k}(0))' = 0 \quad (n=1,2,3,4,5) (k=1,2,3,\dots). \quad (16)$$

В підсумку, після інтегрування рівнянь (11)-(13) з урахуванням заданих граничних умов, матимемо наступну сукупність формул:

$$\beta_{n,0}(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^{n-1} \quad (n=1, 2); \quad (17)$$

$$\beta_{n,0}(x) = \frac{1}{l^2} \int_0^x \int_0^x \frac{1}{A(x)} \left(\frac{x}{l}\right)^{n-3} dx dx \quad (n=3, 4); \quad (18)$$

$$\beta_{5,0}(x) = \frac{1}{l^4} \int_0^x \int_0^x \frac{1}{A(x)} \int_0^x \int_0^x C(x) dx dx dx dx; \quad (19)$$

$$\beta_{n,k}(x) = \frac{1}{l^4} \int_0^x \int_0^x \frac{1}{A(x)} \int_0^x \int_0^x B(x) \beta_{n,k-1}(x) dx dx dx dx \quad (n=1, 2, 3, 4, 5) (k=1, 2, 3, \dots). \quad (20)$$

Окрім рекурентної форми (20), твірні функції можна подати також в аналітичному вигляді

$$\beta_{n,k}(x) = \frac{1}{l^{4k}} \int_0^x \int_0^x \frac{1}{A(x)} \int_0^x \int_0^x B(x) \dots \int_0^x \int_0^x \frac{1}{A(x)} \int_0^x \int_0^x B(x) \beta_{n,0}(x) dx dx dx dx \dots dx dx \quad (n=1, 2, 3, 4, 5). \quad (21)$$

Права частина останньої формули містить всього $4k$ інтегралів, без урахування інтегралів, через які виражені початкові функції (18) та (19).

Таким чином, за допомогою рекурентної формули (20), для кожної з початкових функцій (17)-(19) знаходяться відповідні твірні функції. Очевидно, для таких функцій рівності (9), (10) задовольняються тотожно.

Тепер, коли початкові та твірні функції $\beta_{n,0}(x)$, $\beta_{n,k}(x)$ ($n=1, 2, 3, 4, 5$) ($k=1, 2, 3, \dots$) визначені, необхідно довести, що ряди (8) збігаються. Наведемо доказ збіжності, наприклад, для перших двох рядів, які визначені формулами (8). Позначивши

$$h = \max_{x \in [0, l]} \frac{1}{A(x)}, \quad g = \max_{x \in [0, l]} B(x),$$

та використовуючи формулу (20), отримаємо наступні оцінки для твірних функцій:

$$\beta_{n,k}(x) \leq \frac{(hg)^k}{(n+4k-1)!} \left(\frac{x}{l}\right)^{n+4k-1} \quad (n=1, 2) (k=1, 2, 3, \dots).$$

За допомогою даних оцінок, будемо мати

$$|X_n(x)| \leq \sum_{k=0}^{\infty} K^k \beta_{n,k}(x) \leq \left(\frac{x}{l}\right)^{n-1} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(hgK)^k}{(n+4k-1)!} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k} \leq \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(hgK)^k}{(n+4k-1)!} \quad (n=1, 2).$$

Звідси знаходимо:

$$|X_1(x)| \leq \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(hgK)^k}{(4k)!} = \frac{1}{2} (\cos \sqrt[4]{hgK} + \operatorname{ch} \sqrt[4]{hgK});$$

$$|X_2(x)| \leq \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(hgK)^k}{(4k+1)!} = \frac{1}{2\sqrt[4]{hgK}} (\sin \sqrt[4]{hgK} + \operatorname{sh} \sqrt[4]{hgK}).$$

Як видно, в ролі мажорант тут виступають константи, які виражаються через значення тригонометричних та гіперболічних функцій. Тим самим доведено, що ряди (8) для значень $n=1, 2$ збігаються абсолютно і рівномірно. Аналогічно доводиться збіжність для решти рядів.

Таким чином, формулами (7), (8), (17)-(21) повністю визначені чотири розв'язки $X_n(x)$ ($n=1, 2, 3, 4$) однорідного рівняння (5) та частинний розв'язок $X^*(x)$ неоднорідного рівняння (1).

Кожен з розв'язків $X_n(x)$ ($n=1, 2, 3, 4$) породжує по формулі (3) вектор

$$\Phi_n(x) = \begin{pmatrix} X_n(x) \\ X'_n(x) \\ -E_0 I_0 A(x) X''_n(x) \\ -(E_0 I_0 A(x) X'''_n(x))' \end{pmatrix} \quad (n=1, 2, 3, 4)$$

розв'язок однорідної системи диференціальних рівнянь (6), в чому легко переконатись підстановкою. Тоді матриця

$$\Omega(x) = \begin{pmatrix} X_1(x) & X_2(x) & X_3(x) & X_4(x) \\ X_1'(x) & X_2'(x) & X_3'(x) & X_4'(x) \\ -E_0 I_0 A(x) X_1''(x) & -E_0 I_0 A(x) X_2''(x) & -E_0 I_0 A(x) X_3''(x) & -E_0 I_0 A(x) X_4''(x) \\ -E_0 I_0 (A(x) X_1''(x))' & -E_0 I_0 (A(x) X_2''(x))' & -E_0 I_0 (A(x) X_3''(x))' & -E_0 I_0 (A(x) X_4''(x))' \end{pmatrix}, \quad (22)$$

яка утворена з даних векторів також задовольнятиме однорідній системі (6). При цьому, з урахуванням (14)-(16), знаходимо

$$\Omega(0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -E_0 I_0 / l^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -E_0 I_0 / l^3 \end{pmatrix}; \quad |\Omega(0)| = \frac{(E_0 I_0)^2}{l^6} \neq 0.$$

Отже, матриця (22) є фундаментальною матрицею [20] системи (6), а $X_n(x)$ ($n=1, 2, 3, 4$) – фундаментальні розв'язки однорідного рівняння (5).

Помноживши праворуч $\Omega(x)$ на сталу матрицю $\Omega^{-1}(0)$ отримаємо нову фундаментальну матрицю $\Lambda(x) = \Omega(x)\Omega^{-1}(0)$, яка в точці $x=0$ дорівнюватиме одиничній матриці

$$\Lambda(0) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (23)$$

Як відомо [20], фундаментальна матриця, яка задовольняє умові (23), визначається однозначно й називається матрицантом. Загальний розв'язок однорідної системи (6) за допомогою матрицанта запишеться у вигляді $\Phi(x) = \Lambda(x)\Phi(0)$.

Сформувавши за допомогою частинного розв'язку (7) вектор

$$\Phi^*(x) = \frac{q_0 l^4}{E_0 I_0} \begin{pmatrix} X_5(x) \\ X_5'(x) \\ -E_0 I_0 A(x) X_5''(x) \\ -E_0 I_0 (A(x) X_5''(x))' \end{pmatrix},$$

отримаємо частинний розв'язок неоднорідної системи (4), в чому можна переконатись підстановкою. Враховуючи (15), (16), для даного вектору також знаходимо

$$\Phi^*(0) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Отже, загальний розв'язок неоднорідної системи диференціальних рівнянь (4) запишеться наступним чином

$$\Phi(x) = \Lambda(x)\Phi(0) + \Phi^*(x). \quad (24)$$

Поставимо собі за мету виразити підсумкові формули для параметрів стану балки через безрозмірні функції. Такий підхід дасть можливість в подальшому при чисельних розрахунках оперувати безрозмірними величинами.

Аналізуючи формули (17)-(21), на підставі результатів роботи [19], заключаємо, що початкові та твірні функції $\beta_{n,0}(x)$, $\beta_{n,k}(x)$ ($n=1, 2, 3, 4, 5$) ($k=1, 2, 3, \dots$) є безрозмірними. Як наслідок, функції $X_n(x)$ ($n=1, 2, 3, 4, 5$) також будуть безрозмірними.

Перед тим, як записати формулу (24) у розгорнутому вигляді, введемо до розгляду наступні функції:

$$\tilde{X}_n(x) = l X_n'(x); \quad \hat{X}_n(x) = l^2 A(x) X_n''(x); \quad \hat{X}_n(x) = l^3 (A(x) X_n''(x))' \quad (n=1, 2, 3, 4, 5). \quad (25)$$

Безпосередньо з (8) та (25) випливає, що дані функції визначатимуться такими рядами:

$$\tilde{X}_n(x) = \tilde{\beta}_{n,0}(x) - K \tilde{\beta}_{n,1}(x) + K^2 \tilde{\beta}_{n,2}(x) - K^3 \tilde{\beta}_{n,3}(x) + \dots \quad (n=1, 2, 3, 4, 5); \quad (26)$$

$$\hat{X}_n(x) = \hat{\beta}_{n,0}(x) - K\hat{\beta}_{n,1}(x) + K^2\hat{\beta}_{n,2}(x) - K^3\hat{\beta}_{n,3}(x) + \dots \quad (n=1, 2, 3, 4, 5); \quad (27)$$

$$\hat{X}_n(x) = \hat{\beta}_{n,0}(x) - K\hat{\beta}_{n,1}(x) + K^2\hat{\beta}_{n,2}(x) - K^3\hat{\beta}_{n,3}(x) + \dots \quad (n=1, 2, 3, 4, 5), \quad (28)$$

де

$$\tilde{\beta}_{n,0}(x) = l\beta'_{n,0}(x), \quad \hat{\beta}_{n,0}(x) = l^2 A(x)\beta''_{n,0}(x), \quad \hat{\beta}_{n,0}(x) = l^3 (A(x)\beta''_{n,0}(x))', \quad (29)$$

$$\tilde{\beta}_{n,k}(x) = l\beta'_{n,k}(x), \quad \hat{\beta}_{n,k}(x) = l^2 A(x)\beta''_{n,k}(x), \quad \hat{\beta}_{n,k}(x) = l^3 (A(x)\beta''_{n,k}(x))' \quad (k=1, 2, 3, \dots). \quad (30)$$

Функції (29) тут виступають в ролі початкових, а функції (30) – в ролі твірних для відповідних рядів (26)-(28).

На відміну від похідних функцій $X_n(x)$ ($n=1, 2, 3, 4, 5$), функції (25) будуть безрозмірними [19]. Надалі $\tilde{X}_n(x)$, $\hat{X}_n(x)$, $\hat{X}_n(x)$ ($n=1, 2, 3, 4, 5$) будемо називати безрозмірними похідними.

Записуючи тепер матричну рівність (24) у розгорнутому вигляді та враховуючи (25), матимемо наступні формули для параметрів стану балки:

$$y(x) = y(0)X_1(x) + \varphi(0)lX_2(x) - M(0)\frac{l^2}{E_0I_0}X_3(x) - Q(0)\frac{l^3}{E_0I_0}X_4(x) + \frac{q_0l^4}{E_0I_0}X_5(x); \quad (31)$$

$$\varphi(x) = y(0)\frac{1}{l}\tilde{X}_1(x) + \varphi(0)\tilde{X}_2(x) - M(0)\frac{l}{E_0I_0}\tilde{X}_3(x) - Q(0)\frac{l^2}{E_0I_0}\tilde{X}_4(x) + \frac{q_0l^3}{E_0I_0}\tilde{X}_5(x); \quad (32)$$

$$M(x) = -y(0)\frac{E_0I_0}{l^2}\hat{X}_1(x) - \varphi(0)\frac{E_0I_0}{l}\hat{X}_2(x) + M(0)\hat{X}_3(x) + Q(0)l\hat{X}_4(x) - q_0l^2\hat{X}_5(x); \quad (33)$$

$$Q(x) = -y(0)\frac{E_0I_0}{l^3}\hat{X}_1(x) - \varphi(0)\frac{E_0I_0}{l^2}\hat{X}_2(x) + M(0)\frac{1}{l}\hat{X}_3(x) + Q(0)\hat{X}_4(x) - q_0l\hat{X}_5(x). \quad (34)$$

Отже, можемо констатувати, що для довільних неперервних функцій згинальної жорсткості, навантаження та погонного коефіцієнту постелі отримано формули для параметрів стану балки (31)-(34). Однак обчислення за цими формулами будуть можливі тільки після визначення невідомих початкових параметрів $y(0)$, $\varphi(0)$, $M(0)$, $Q(0)$. У кожному конкретному випадку ці невідомі визначаються з умов закріплення кінців балки.

Подання початкових та твірних функцій степеневими рядами

Слід зазначити, що при чисельній реалізації формул для параметрів стану балки на практиці можуть виникати труднощі, пов'язані з необхідністю обчислення інтегральних виразів (18)-(21), якими визначаються початкові та твірні функції. Отримати в явному вигляді формули для вказаних функцій порівняно просто можна тільки в деяких окремих випадках. Натомість у переважній більшості випадків обчислення інтегралів (18)-(21) буде являти собою досить складне завдання, навіть коли вони виражаються через елементарні функції. Окрім того, як відомо, інтеграли від деяких функцій взагалі можуть не виражатись через елементарні функції. Сказане може слугувати перешкодою на шляху широкого застосування отриманих формул в інженерній практиці. Тому постає актуальне питання щодо подання початкових та твірних функцій у вигляді формул, більш зручних для практичної реалізації.

Як відомо, один з класичних методів інтегрування ґрунтується на заміні підінтегральної функції відповідним їй рядом Маклорена. У нашому випадку такий підхід дозволяє обчислити інтеграли (18)-(21) в аналітичному вигляді.

Відтак, будемо вважати, що безрозмірні функції $f(x)=1/A(x)$, $B(x)$ та $C(x)$ подані у вигляді степеневих рядів:

$$f(x) = A_0 + A_1\left(\frac{x}{l}\right) + A_2\left(\frac{x}{l}\right)^2 + \dots + A_j\left(\frac{x}{l}\right)^j + \dots; \quad (35)$$

$$B(x) = B_0 + B_1\left(\frac{x}{l}\right) + B_2\left(\frac{x}{l}\right)^2 + \dots + B_j\left(\frac{x}{l}\right)^j + \dots; \quad (36)$$

$$C(x) = C_0 + C_1\left(\frac{x}{l}\right) + C_2\left(\frac{x}{l}\right)^2 + \dots + C_j\left(\frac{x}{l}\right)^j + \dots \quad (37)$$

У загальному випадку безрозмірні коефіцієнти даних рядів визначаються за формулами

$$A_0 = \frac{1}{A(0)}, A(0) \neq 0, A_j = \frac{l^j f^{(j)}(0)}{j!}, B_0 = B(0), B_j = \frac{l^j B^{(j)}(0)}{j!},$$

$$C_0 = C(0), C_j = \frac{l^j C^{(j)}(0)}{j!} \quad (j=1, 2, 3, \dots),$$
(38)

де індекс (j) означає порядок похідної. Однак, для визначення вказаних коефіцієнтів зручніше користуватись не загальними формулами (38), а виходячи з відомих рядів Маклорена для тих чи інших елементарних функцій. Також слід зауважити, що в сучасних публікаціях часто розглядаються випадки, коли функції $f(x)$, $B(x)$, $C(x)$ від самого початку задані поліномами. В таких випадках ряди (35)-(37) вироджуються до скінченних сум з відомими коефіцієнтами.

Враховуючи подання (35), (37), початкові функції (18) та (19) після інтегрування запишуться у вигляді таких степеневих рядів:

$$\beta_{n,0}(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^{n-1} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j}{(n+j-2)(n+j-1)} \left(\frac{x}{l}\right)^j \quad (n=3, 4);$$
(39)

$$\beta_{5,0}(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^4 \sum_{j=0}^{\infty} \frac{e_j}{(j+3)(j+4)} \left(\frac{x}{l}\right)^j,$$
(40)

де

$$e_j = \sum_{i=0}^j \frac{A_{j-i} C_i}{(i+1)(i+2)}.$$
(41)

Безпосередньо з формули (20) або (21), з урахуванням (17), (39), (40), заключаємо, що твірні функції $\beta_{n,k}(x)$ ($n=1, 2, 3, 4, 5$) ($k=1, 2, 3, \dots$) також будуть являти собою степеневі ряди. При цьому степінь першого доданку (тобто найменший степінь) у вказаних рядах буде дорівнювати $n+4k-1$.

Отже, твірні функції можна подати у вигляді

$$\beta_{n,k}(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^{n+4k-1} \sum_{j=0}^{\infty} c_{n,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^j \quad (n=1, 2, 3, 4, 5) (k=1, 2, 3, \dots),$$
(42)

де $c_{n,k,j}$ – коефіцієнти, що підлягають визначенню. В такому разі

$$\beta_{n,k-1}(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^{n+4k-5} \sum_{j=0}^{\infty} c_{n,k-1,j} \left(\frac{x}{l}\right)^j \quad (n=1, 2, 3, 4, 5) (k=1, 2, 3, \dots).$$
(43)

Тоді для добутку рядів (36) та (43), матимемо

$$B(x)\beta_{n,k-1}(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^{n+4k-5} \sum_{j=0}^{\infty} h_{n,k-1,j} \left(\frac{x}{l}\right)^j,$$
(44)

де

$$h_{n,k-1,j} = \sum_{s=0}^j B_{j-s} c_{n,k-1,s}.$$
(45)

Підставимо в (20) замість $\beta_{n,k}(x)$, $B(x)\beta_{n,k-1}(x)$, $f(x)=1/A(x)$ їх значення (42), (44), (35), після чого виконаємо операції інтегрування та множення рядів. В підсумку прийдемо до рівності

$$\sum_{j=0}^{\infty} c_{n,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^j = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{d_{n,k-1,j}}{(n+4k+j-2)(n+4k+j-1)} \left(\frac{x}{l}\right)^j \quad (n=1, 2, 3, 4, 5) (k=1, 2, 3, \dots),$$

де

$$d_{n,k-1,j} = \sum_{i=0}^j \frac{A_{j-i} h_{n,k-1,i}}{(n+4k+i-4)(n+4k+i-3)}.$$
(46)

Звідси знаходимо

$$c_{n,k,j} = \frac{d_{n,k-1,j}}{(n+4k+j-2)(n+4k+j-1)} \quad (n=1, 2, 3, 4, 5) (k=1, 2, 3, \dots) (j=0, 1, 2, \dots).$$

Враховуючи тут (45) та (46), остаточно матимемо формулу

© Ю. С. Крутий, М. Г. Сур'янінов, А. О. Перпері, В. В. Вакуленко, В. М. Мітінський

$$c_{n,k,j} = \frac{1}{(n+4k+j-2)(n+4k+j-1)} \sum_{i=0}^j \frac{A_{j-i} \sum_{s=0}^i B_{i-s} c_{n,k-1,s}}{(n+4k+i-4)(n+4k+i-3)} \quad (47)$$

$$(n=1, 2, 3, 4, 5) (k=1, 2, 3, \dots) (j=0, 1, 2, \dots).$$

Отримана формула (47) є рекурентною за індексом k , тобто кожні наступні значення $c_{n,k,j}$ тут обчислюються через попередні. Для повної визначеності таку формулу слід доповнити початковими значеннями $c_{n,0,j} (n=1, 2, 3, 4, 5) (j=0, 1, 2, \dots)$.

Вважаючи $k=1$ в формулі (43), матимемо

$$\beta_{n,0}(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^{n-1} \sum_{j=0}^{\infty} c_{n,0,j} \left(\frac{x}{l}\right)^j \quad (n=1, 2, 3, 4, 5).$$

Зіставляючи дану формулу для різних значень n по чергово з формулами (17), (39), (40), знаходимо:

$$c_{n,0,0} = 1; \quad c_{n,0,j} = 0 \quad (n=1, 2) (j=1, 2, 3, \dots); \quad (48)$$

$$c_{n,0,j} = \frac{A_j}{(n+j-2)(n+j-1)} \quad (n=3, 4) (j=0, 1, 2, \dots); \quad (49)$$

$$c_{5,0,j} = \frac{e_j}{(j+3)(j+4)} \quad (j=0, 1, 2, \dots). \quad (50)$$

Таким чином, рекурентною формулою (47), з урахуванням початкових значень (48)-(50), повністю визначені коефіцієнти рядів (42), тому надалі можемо вважати їх відомими.

Виходячи з формул (17)-(20), (29), (30) та скориставшись рівностями (36), (37), (39), (40), (42), запишемо в явному вигляді подання для решти початкових та твірних функцій $\tilde{\beta}_{n,0}(x)$, $\hat{\beta}_{n,0}(x)$, $\tilde{\beta}_{n,k}(x)$, $\hat{\beta}_{n,k}(x)$, $\tilde{\beta}_{n,k}(x)$, $\hat{\beta}_{n,k}(x)$ ($n=1, 2, 3, 4, 5$) ($k=1, 2, 3, \dots$).

Опускаючи нескладні викладки, наведемо нижче тільки готові результати.

У зведених табл. 1 представлені формули для всіх початкових функцій.

Табл. 1

Початкові функції			
	$n=1, 2$	$n=3, 4$	$n=5$
$\beta_{n,0}(x)$	$\left(\frac{x}{l}\right)^{n-1}$	$\left(\frac{x}{l}\right)^{n-1} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j}{(n+j-2)(n+j-1)} \left(\frac{x}{l}\right)^j$	$\left(\frac{x}{l}\right)^4 \sum_{j=0}^{\infty} \frac{e_j}{(j+3)(j+4)} \left(\frac{x}{l}\right)^j$
$\tilde{\beta}_{n,0}(x)$	$n-1$	$\left(\frac{x}{l}\right)^{n-2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{A_j}{n+j-2} \left(\frac{x}{l}\right)^j$	$\left(\frac{x}{l}\right)^3 \sum_{j=0}^{\infty} \frac{e_j}{j+3} \left(\frac{x}{l}\right)^j$
$\hat{\beta}_{n,0}(x)$	0	$\left(\frac{x}{l}\right)^{n-3}$	$\left(\frac{x}{l}\right)^2 \sum_{j=0}^{\infty} \frac{C_j}{(j+1)(j+2)} \left(\frac{x}{l}\right)^j$
$\hat{\beta}_{n,0}(x)$	0	$n-3$	$\left(\frac{x}{l}\right) \sum_{j=0}^{\infty} \frac{C_j}{j+1} \left(\frac{x}{l}\right)^j$

Щодо твірних функцій $\tilde{\beta}_{n,k}(x)$, $\hat{\beta}_{n,k}(x)$, $\hat{\beta}_{n,k}(x)$ ($n=1, 2, 3, 4, 5$) ($k=1, 2, 3, \dots$), то відповідні їм ряди запишуться у вигляді:

$$\tilde{\beta}_{n,k}(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^{n+4k-2} \sum_{j=0}^{\infty} \tilde{c}_{n,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^j \quad (n=1, 2, 3, 4, 5) (k=1, 2, 3, \dots); \quad (51)$$

$$\hat{\beta}_{n,k}(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^{n+4k-3} \sum_{j=0}^{\infty} \hat{c}_{n,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^j \quad (n=1, 2, 3, 4, 5) (k=1, 2, 3, \dots); \quad (52)$$

$$\hat{\beta}_{n,k}(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^{n+4k-4} \sum_{j=0}^{\infty} \hat{c}_{n,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^j \quad (n=1,2,3,4,5) (k=1,2,3,\dots), \quad (53)$$

де

$$\tilde{c}_{n,k,j} = c_{n,k,j} (n+4k+j-1), \quad (54)$$

$$\hat{c}_{n,k,j} = \frac{1}{(n+4k+j-4)(n+4k+j-3)} \sum_{s=0}^j B_{j-s} c_{n,k-1,s}, \quad (55)$$

$$\hat{c}_{n,k,j} = \hat{c}_{n,k,j} (n+4k+j-3). \quad (56)$$

Тут індекси приймають такі значення: $n=1,2,3,4,5$; $k=1,2,3,\dots$; $j=0,1,2,\dots$.

В підсумку всі початкові та твірні функції подані степеневими рядами.

Розрахункові формули для фундаментальних функцій та їх безрозмірних похідних

Чисельний розрахунок фактично зводиться до обчислення значень фундаментальних функцій $X_n(x)$ ($n=1,2,3,4$), функції $X_5(x)$, а також їх безрозмірних похідних $\tilde{X}_n(x)$, $\hat{X}_n(x)$, $\hat{X}_n(x)$ ($n=1,2,3,4,5$). Тому доцільно виписати для них кінцеві розрахункові формули, скориставшись знайденими вище поданнями початкових та твірних функцій у вигляді степеневих рядів.

Підставляючи у формули (8) замість початкових та твірних функцій їх значення (17), (39), (40), (42), для фундаментальних функцій $X_n(x)$ ($n=1,2,3,4$) та функції $X_5(x)$ одержимо подання у вигляді таких степеневих рядів:

$$X_n(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^{n-1} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k c_{n,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j} \quad (n=1,2,3,4,5).$$

Коефіцієнти даних рядів повністю визначаються формулами (41), (47)-(50). Виходячи з (26)-(28), (51)-(53) та використовуючи формули з табл. 1, для безрозмірних похідних отримаємо:

$$\tilde{X}_1(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k \tilde{c}_{1,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j-1}; \quad (57)$$

$$\tilde{X}_n(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^{n-2} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k \tilde{c}_{n,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j} \quad (n=2,3,4,5); \quad (58)$$

$$\hat{X}_1(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k \hat{c}_{1,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j-2}; \quad (59)$$

$$\hat{X}_2(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k \hat{c}_{2,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j-1}; \quad (60)$$

$$\hat{X}_n(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^{n-3} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k \hat{c}_{n,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j} \quad (n=3,4,5); \quad (61)$$

$$\hat{X}_1(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k \hat{c}_{1,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j-3}; \quad (62)$$

$$\hat{X}_2(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k \hat{c}_{2,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j-2}; \quad (63)$$

$$\hat{X}_3(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k \hat{c}_{3,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j-1}; \quad (64)$$

$$\hat{X}_n(x) = \left(\frac{x}{l}\right)^{n-4} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} (-K)^k \hat{c}_{n,k,j} \left(\frac{x}{l}\right)^{4k+j} \quad (n=4,5); \quad (65)$$

В рядах (57)–(65) всі коефіцієнти, окрім початкових $\tilde{c}_{n,0,j}$, $\hat{c}_{n,0,j}$, $\hat{c}_{n,0,j}$ ($n=1,2,3,4,5$) ($j=0,1,2,\dots$), визначаються за формулами (54)–(56). Згідно формулам з табл. 1, початкові коефіцієнти визначаються рівностями:

$$\begin{aligned}\tilde{c}_{n,0,0} &= n-1; \quad \tilde{c}_{n,0,j} = 0 \quad (n=1,2)(j=1,2,3,\dots); \\ \tilde{c}_{n,0,j} &= \frac{A_j}{n+j-2} \quad (n=3,4); \quad \tilde{c}_{5,0,j} = \frac{e_j}{j+3} \quad (j=0,1,2,\dots); \\ \hat{c}_{n,0,j} &= 0 \quad (n=1,2)(j=0,1,2,\dots); \\ \hat{c}_{n,0,0} &= 1; \quad \hat{c}_{n,0,j} = 0 \quad (n=3,4)(j=1,2,3,\dots); \\ \hat{c}_{5,0,j} &= \frac{C_j}{(j+1)(j+2)} \quad (j=0,1,2,\dots); \\ \hat{c}_{n,0,j} &= 0 \quad (n=1,2)(j=0,1,2,\dots); \\ \hat{c}_{n,0,0} &= n-3; \quad \hat{c}_{n,0,j} = 0 \quad (n=3,4)(j=1,2,3,\dots); \\ \hat{c}_{5,0,j} &= \frac{C_j}{j+1} \quad (j=0,1,2,\dots).\end{aligned}$$

Зауважимо, що доданки з нульовими початковими коефіцієнтами у наведених вище рядах відсутні. Зовнішня сума в таких рядах починається з $k=1$. Отже, можемо констатувати наявність кінцевих розрахункових формул у вигляді степеневих рядів для фундаментальних функцій $X_n(x)$ ($n=1,2,3,4$), функції $X_5(x)$, а також для їх безрозмірних похідних.

Приклад розрахунку

Розглянемо бетонну балку у вигляді зрізаного клину з затиснутими кінцями (рис. 3).

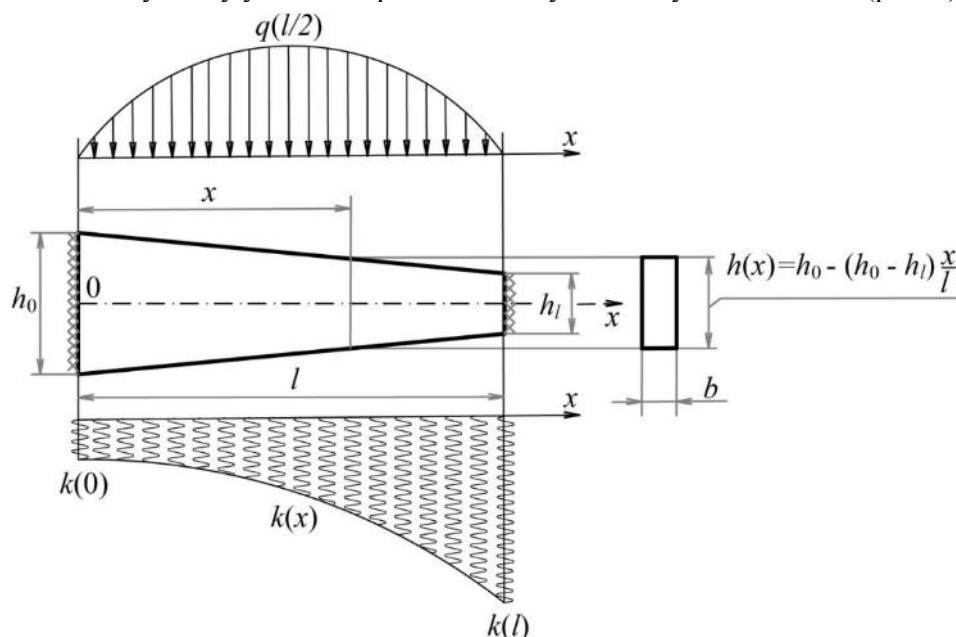


Рис. 3. Розрахункова схема балки у вигляді зрізаного клину

Балка опирається на експоненціально змінну пружну основу

$$k(x) = k(0) \exp\left(\gamma \frac{x}{l}\right), \quad \gamma = \ln \frac{k(l)}{k(0)}$$

та перебуває під впливом параболічного навантаження

$$q(x) = 4q(l/2) \frac{x}{l} \left(1 - \frac{x}{l}\right), \quad q(l/2) \neq 0.$$

Згідно з формулою для моменту інерції поперечного перерізу $I(x) = bh^3(x)/12$, для заданої балки знаходимо:

$$I(x) = \frac{bh_0^3}{12} \left(1 - (1-\delta) \frac{x}{l} \right)^3; \quad \delta = \frac{h_l}{h_0}; \quad h_0 \geq h_l \neq 0.$$

Отже, у даному випадку:

$$E_0 I_0 = \frac{Eb h_0^3}{12}; \quad k_0 = k(0); \quad q_0 = 4q(l/2); \quad A(x) = \left(1 - (1-\delta) \frac{x}{l} \right)^3;$$

$$f(x) = 1 + \frac{3}{1!} (1-\delta) \left(\frac{x}{l} \right) + \frac{3 \cdot 4}{2!} (1-\delta)^2 \left(\frac{x}{l} \right)^2 + \frac{3 \cdot 4 \cdot 5}{3!} (1-\delta)^3 \left(\frac{x}{l} \right)^3 + \dots;$$

$$B(x) = \exp \left(\gamma \frac{x}{l} \right) = 1 + \frac{\gamma}{1!} \frac{x}{l} + \frac{\gamma^2}{2!} \left(\frac{x}{l} \right)^2 + \frac{\gamma^3}{3!} \left(\frac{x}{l} \right)^3 + \dots; \quad C(x) = \frac{x}{l} - \left(\frac{x}{l} \right)^2.$$

Тут враховано, що $E(x) \equiv E = E_0 = \text{const}$.

Відповідно для коефіцієнтів рядів (35)-(37) матимемо:

$$A_0 = 1, \quad A_j = \frac{3 \cdot 4 \cdot \dots \cdot (j+2)}{j!} (1-\delta)^j; \quad B_0 = 1, \quad B_j = \frac{\gamma^j}{j!} \quad (j=1, 2, 3, \dots);$$

$$C_0 = 0, \quad C_1 = 1, \quad C_2 = -1, \quad C_j = 0 \quad (j=3, 4, 5, \dots).$$

Випадку затиснутих кінців балки відповідають граничні умови:

$$y(0) = 0; \quad \varphi(0) = 0; \quad y(l) = 0; \quad \varphi(l) = 0.$$

Отже, два початкові параметри $y(0), \varphi(0)$ відомі. Два інших $M(0), Q(0)$ знайдемо із системи рівнянь, яку отримаємо після реалізації граничних умов на кінці $x=l$, використовуючи (31), (32). У підсумку рівності (31)-(34) для заданих граничних умов запишуться у вигляді:

$$y(x) = \frac{48q(l/2)l^4}{Eb h_0^3} (\lambda_1 X_3(x) + \lambda_2 X_4(x) + X_5(x));$$

$$\varphi(x) = \frac{48q(l/2)l^3}{Eb h_0^3} (\lambda_1 \tilde{X}_3(x) + \lambda_2 \tilde{X}_4(x) + \tilde{X}_5(x));$$

$$M(x) = -4q(l/2)l^2 (\lambda_1 \hat{X}_3(x) + \lambda_2 \hat{X}_4(x) + \hat{X}_5(x));$$

$$Q(x) = -4q(l/2)l (\lambda_1 \hat{X}_3(x) + \lambda_2 \hat{X}_4(x) + \hat{X}_5(x)),$$

де

$$\lambda_1 = \frac{X_4(l)\tilde{X}_5(l) - \tilde{X}_4(l)X_5(l)}{X_3(l)\tilde{X}_4(l) - \tilde{X}_3(l)X_4(l)}; \quad \lambda_2 = -\frac{X_3(l)\tilde{X}_5(l) - \tilde{X}_3(l)X_5(l)}{X_3(l)\tilde{X}_4(l) - \tilde{X}_3(l)X_4(l)}.$$

Вихідні дані для розрахунку: довжина балки $l = 6\text{ м}$; ширина $b = 0,4\text{ м}$; висота лівого кінця $h_0 = 0,6\text{ м}$; висота правого кінця $h_l = 0,3\text{ м}$; $E = 1,5 \cdot 10^7 \text{ кПа}$; $k(0) = 2 \cdot 10^3 \text{ кН / м}^2$; $k(l) = 4 \cdot 10^3 \text{ кН / м}^2$; $q(l/2) = 50 \text{ кН / м}$.

Результати розрахунку авторським методом (АМ) представлено в табл. 2, 3 та на рис. 4. В табл. 2, 3 також надані результати розрахунку методом скінченних елементів у програмі LIRA.

Табл. 2

Значення кінематичних параметрів

x	y(x), [mm]		Відносна похибка, [%]	φ(x), [rad]		Відносна похибка, [%]
	АМ	FEM		АМ	FEM	
0,0	0,000000	0,000000	0,00	0,000000	0,000000	0,00
0,3	0,065941	0,067649	2,59	0,000429	0,000435	1,33
0,6	0,250933	0,255807	1,94	0,000792	0,000803	1,32
0,9	0,533689	0,542331	1,62	0,001080	0,001093	1,25
1,2	0,890494	0,903581	1,47	0,001285	0,001300	1,18
1,5	1,295620	1,313397	1,37	0,001401	0,001416	1,10
1,8	1,721828	1,744096	1,29	0,001425	0,001439	1,00

© Ю. С. Крутий, М. Г. Сур'янінов, А. О. Перпері, В. В. Вакуленко, В. М. Мітінський

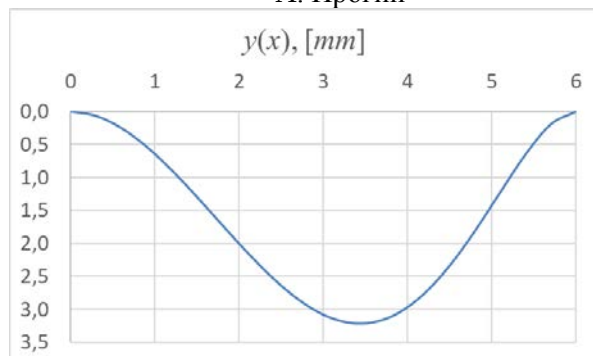
2,1	2,140975	2,167112	1,22	0,001354	0,001365	0,86
2,4	2,524752	2,553764	1,15	0,001189	0,001197	0,67
2,7	2,845582	2,876188	1,08	0,000935	0,000939	0,38
3,0	3,077709	3,108459	1,00	0,000600	0,000598	0,21
3,3	3,198540	3,227943	0,92	0,000196	0,000190	3,03
3,6	3,190269	3,216949	0,84	-0,000257	-0,000267	3,92
3,9	3,041876	3,064709	0,75	-0,000733	-0,000746	1,80
4,2	2,751569	2,769810	0,66	-0,001197	-0,001212	1,25
4,5	2,329769	2,343135	0,57	-0,001601	-0,001616	0,95
4,8	1,802752	1,811461	0,48	-0,001887	-0,001901	0,75
5,1	1,217104	1,221844	0,39	-0,001978	-0,001989	0,59
5,4	0,645104	0,646965	0,29	-0,001778	-0,001787	0,48
5,7	0,191245	0,191412	0,09	-0,001168	-0,001172	0,37
6,0	0,000000	0,000000	0,00	0,000000	0,000000	0,00

Табл. 3

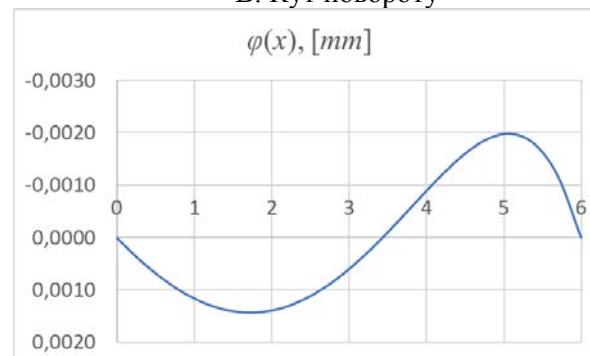
Значення силових параметрів

x	$M(x), [kNm]$		Відносна похибка, [%]	$Q(x), [kN]$		Відносна похибка, [%]
	AM	FEM		AM	FEM	
0,0	-	-167,487930	1,28	109,515957	111,132675	1,48
0,3	-	-134,290207	1,22	108,078956	109,713280	1,51
0,6	-	-101,926636	1,12	104,013733	105,626846	1,55
0,9	-70,488115	-71,147575	0,94	97,675187	99,204384	1,57
1,2	-42,382450	-42,604538	0,52	89,400381	90,773865	1,54
1,5	-17,009447	-16,851238	0,93	79,509442	80,658981	1,45
1,8	5,192084	5,654892	8,91	68,306706	69,177757	1,28
2,1	23,872435	24,550808	2,84	56,082122	56,641239	1,00
2,4	38,766929	39,565563	2,06	43,112897	43,352207	0,56
2,7	49,692374	50,517658	1,66	29,665393	29,604097	0,21
3,0	56,544124	57,312099	1,36	15,997273	15,680112	1,98
3,3	59,293827	59,937244	1,09	2,359927	1,852758	21,49
3,6	57,987942	58,461597	0,82	-10,998816	-11,616062	5,61
3,9	52,747120	53,030731	0,54	-23,831640	-24,474113	2,70
4,2	43,766550	43,864670	0,22	-35,888323	-36,476810	1,64
4,5	31,317400	31,256083	0,20	-46,911896	-47,383656	1,01
4,8	15,749475	15,569860	1,14	-56,634310	-56,952610	0,56
5,1	-2,504738	-2,755275	10,00	-64,771531	-64,931831	0,25
5,4	-22,924458	-23,202120	1,21	-71,017978	-71,047768	0,04
5,7	-44,893219	-45,166122	0,61	-75,040208	-74,988724	0,07
6,0	-67,689457	-67,940750	0,37	-76,469737	-76,382378	0,11

А. Прогин



В. Кут повороту



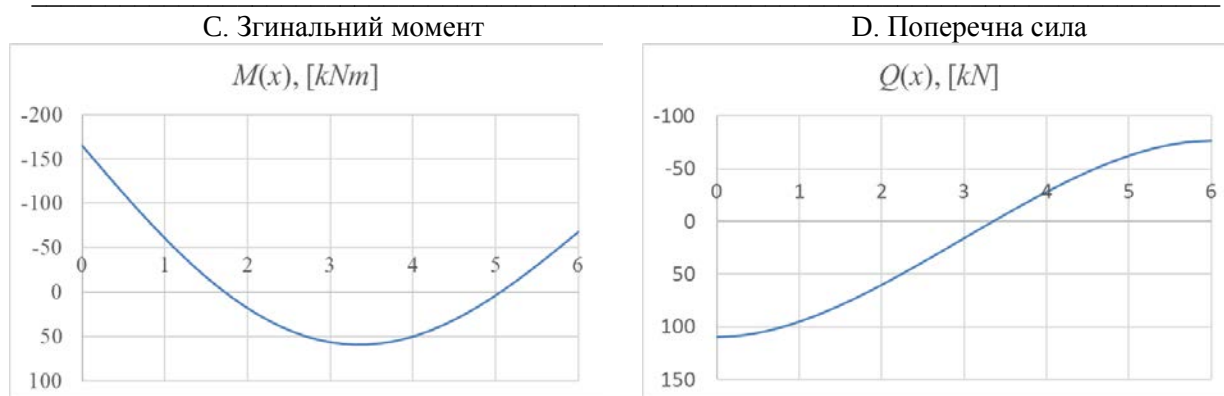


Рис. 4. Графіки параметрів стану балки

Слід зауважити, що найбільша відносна похибка досягається в околицях тих точок, де функції параметрів стану балки змінюють знак.

Висновки

1. Оскільки авторський метод ґрунтується на точному розв'язку диференціального рівняння, то відповідні чисельні розрахунки можна трактувати, як точні. Такі розв'язки є особливо цінними, оскільки вони можуть служити критеріями, по яким можна оцінювати точність різного роду наближених розв'язків.

2. Отримані результати дали можливість чисельно визначити похибку розрахунків методом скінченних елементів для розглянутого прикладу.

3. У цілому можна констатувати наявність нового аналітичного методу розрахунку на згин балок на неоднорідній пружній основі Вінклера, коли згинальна жорсткість балки, коефіцієнт постелі та навантаження задані будь-якими неперервними функціями.

Список використаних джерел

1. Foyouzat, M. A., Mofid, M., & Akin, J. E. (2015). On the dynamic response of beams on elastic foundations with variable modulus. *Acta Mechanica*, 227(2), 549–564. <https://doi.org/10.1007/s00707-015-1485-1>
2. Krutii, Y., Surianinov, M., Petrash, S., & Yezhov, M. (2021). Development of an analytical method for calculating beams on a variable elastic Winkler foundation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1162(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1162/1/012009>
3. Krutii, Y., Surianinov, M., Perperi, A., Vakulenko, V., & Teorlo, N. (2024). Analytical calculation of a beam based on an elastic Winkler foundation with range inhomogeneity. *Mechanics and Mathematical Methods*, 6(2), 47–57. <https://doi.org/10.31650/2618-0650-2024-6-2-47-57>
4. Krutii, Y., Surianinov, M., Vakulenko, V., Soroka, M., & Vasilieva, N. (2024). Analytical calculation of beams on Winkler's variable elastic foundation. *Advances in Science and Technology*, 156, 75–80. <https://doi.org/10.4028/p-pd9h3g>
5. Krutii, Yu., Surianinov, M., Perperi, A., Vakulenko, V., & Teorlo, N. (2024). Analitichnyi rozrakhunok balky, shcho opyraietsia na pruzhnu osnovu Vinklera z eksponentsialnoiu neodnorodnistiu. *Suchasne budivnytstvo ta arkhitektura* [In Ukrainian], (10), 27–36. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-10-27-36>
6. Jang, T. S. (2014). A general method for analyzing moderately large deflections of a non-uniform beam: An infinite Bernoulli–Euler–von Kármán beam on a nonlinear elastic foundation. *Acta Mechanica*, 225(7), 1967–1984. <https://doi.org/10.1007/s00707-013-1077-x>
7. Jang, T. S., & Sung, H. G. (2012). A new semi-analytical method for the non-linear static analysis of an infinite beam on a non-linear elastic foundation: A general approach to a variable beam cross-section. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 47(4), 132–139. <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2012.04.005>
8. Tsiatas, G. C. (2009). Nonlinear analysis of non-uniform beams on nonlinear elastic foundation. *Acta Mechanica*, 209(1-2), 141–152. <https://doi.org/10.1007/s00707-009-0174-3>
9. Poliakov, A. M., Shtanko, P. K., & Pakhaliuk, V. I. (2019). Calculation of a variable cross-section beam on an elastic foundation with two coefficients of compliance. *Journal of Physics: Conference Series*, 1353, 012110. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1353/1/012110>

© Ю. С. Крутий, М. Г. Сур'янінов, А. О. Перпері, В. В. Вакуленко, В. М. Мітінський

10. Deminov, P. (2023). The stiffness of a reinforced concrete beam with random parameters the cracks formation. E3S Web of Conferences, 410, 02025. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202341002025>
11. Mutman, U. (2013). Free vibration analysis of an Euler beam of variable width on the Winkler foundation using homotopy perturbation method. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2013/721294>
12. Akhmediev, S., Mikhailov, V., Tazhenova, G., Bakirov, M., Filippova, T., & Tokanov, D. (2022). Calculating a beam of variable section lying on an elastic foundation. Journal of Applied Engineering Science, 1–7. <https://doi.org/10.5937/jaes0-38800>
13. Nikodým, M., & Frydryšek, K. (2013). About central difference method applied for the beams on elastic foundation. Transactions of the VŠB - Technical University of Ostrava, Mechanical Series, 59(2), 133–146. <https://doi.org/10.22223/tr.2013-2/1967>
14. S.P. Timoshenko. A Course in Elasticity Theory [in Russian]. Naukova Dumka, Kiev, 1972.
15. Shvab'yuk, V. I., Krutii, Y. S., & Sur'yaninov, M. G. (2016). Investigation of the free vibrations of bar elements with variable parameters using the direct integration method. Strength of Materials, 48(3), 384–393. <https://doi.org/10.1007/s11223-016-9776-x>
16. Krutii, Y., Suriyaninov, M., & Vandynskyi, V. (2018). Analytic formulas for the natural frequencies of hinged structures with taking into account the dead weight. MATEC Web of Conferences, 230, 02016. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823002016>
17. Krutii, Y., & Vandynskyi, V. (2019). Exact solution of buckling problem of the column loaded by self-weight. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 708, 012062. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/708/1/012062>
18. Krutii, Y., Kovrov, A., Otrosh, Y., & Surianinov, M. (2020). Analysis of forced longitudinal vibrations of columns taking into account internal resistance in resonance zones. Materials Science Forum, 1006, 79–86. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.1006.79>
19. Krutii, Yu. S. (2016). Rozrobka metodu rozv'iazannia zadach stiikosti i kolyvan deformivnykh system zi zminnyimi neperervnymi parametramy [In Ukrainian] [Dys. d-ra tekhn. nauk, Luts'kyi natsionalnyi tekhnichnyi universytet]. Ukrainika naukova.
20. F.R. Gantmacher. The Theory of Matrices. Chelsea, New York, 1959....

С.П. Середюк, В.В. Чудов

Черкаський державний технологічний університет

ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ РІЖУЧОГО ТИСКУ НА ВІСІ СТРУМЕНЯ АСИСТУЮЧОГО ГАЗУ ПРИ ГАЗОЛАЗЕРНОМУ РІЗАННІ

Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень ріжучого тиску асистуючого газу, сформованого дозвуковими та надзвуковими струменями при їх гальмуванні на поверхні деталі при газолазерному різанні. Отримані закономірності впливу типу газу (повітря/кисень), тиску на вході в сопло, зазору між соплом та деталлю на структуру газового струменя, та ефективність видалення розплаву. Експериментально підтверджено високу точність запропонованої чисельної моделі. Показано високий рівень кореляції між якістю різку та характером коливань ріжучого тиску на вісі струменя.

Ключові слова: оптоволоконний лазер, чисельна модель, газолазерне різання, тиск асистуючого газу, сопло, газовий струмінь, ударно-хвильова структура

S.P. Seredyuk, V.V. Chudov

REGULARITIES OF FORMING CUTTING PRESSURE ON THE AXIS OF THE ASSISTING GAS JET DURING GAS LASER CUTTING

The results of theoretical and experimental studies of the cutting pressure of the assist gas formed by subsonic and supersonic jets when they are decelerated on the surface of a part during gas laser cutting are presented. The patterns of influence of the gas type (air/oxygen), pressure at the nozzle inlet, gap between the nozzle and the part on the gas jet structure, and the efficiency of melt removal have been established. The obtained accurate quantitative data are in good agreement with the basic features of gas dynamics of supersonic jets. The high accuracy of the proposed numerical model has been experimentally confirmed. A high level of correlation between the quality of the cut and the nature of the cutting pressure fluctuations on the jet axis has been demonstrated.

Keywords: fiber laser, numerical model, gas-assisted laser cutting, assist gas pressure, nozzle, gas jet, shock wave structure

Постановка проблеми.

Із ростом вимог до якості та продуктивності у промисловому лазерному різанні (металів, сплавів, тонколистової сталі тощо), роль асистуючого газу зокрема, його тиск, тип газу, конструкція сопла та відстань сопло–заготовка – стає критичною. Асистуючий газ не лише сприяє видаленню розплавленого металу з прорізу, а й значною мірою визначає такі параметри, як швидкість різання, якість кромки, рівень дефектів (задири, шорсткість, неповний проріз) та повторюваність процесу.

Однак, як показує огляд літератури, динаміка газового струменя – утворення ударних хвиль, розширення або “задушення” (choking), відхилення потоку, розшарування граничного шару – часто не враховується або досліджується в умовах, далеких від реальних технологічних режимів.

Крім того – це особливо важливо для тонкостінних або складних за конфігурацією заготовок – взаємодія газового струменя з розплавленим металом, зоною стінок прорізу, а також вплив конструкції сопла та вертикального зазору на стабільність струменя і тиск, який видаляє розплав, поки погано вивчена. Існуючі моделі часто ігнорують реальні геометрії сопла та нестабільності потоку під дією шоків та турбулентних структур. Така ситуація ускладнює надійне прогнозування ефективних режимів для досягнення високої якості різання (мікрогеометрія, відхилення від перпендикулярності, бездефектність різання). Виходячи з наведеного систематичне експериментальне та чисельне дослідження впливу ключових газових параметрів (тиск, тип газу, зазор сопло–заготовка, конструкція сопла) на формування газового струменя та поля ріжучого тиску в зоні обробки, який визначає розподіл тиску в прорізі й умови ефективного видалення розплаву, є важливим підґрунтям підвищення продуктивності, якості і стабільності процесу газолазерного різання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Газодинаміка надзвукового струменя в зоні лазерного різання є визначальним фактором ефективного видалення розплавленого металу та формування якісної поверхні різку. У промислових установках найчастіше застосовуються стиснене повітря, азот або кисень під підвищеним тиском, що забезпечує утворення нерозширеного або помірно розширеного надзвукового потоку. Правильний вибір режимів подачі газу безпосередньо впливає на стабільність процесу та кінцеві технологічні характеристики поверхні.

Експериментальні дослідження ролі тиску кисню під час різання сталей наведені в роботах Іварсона та співавт. [1], де було встановлено існування двох оптимальних діапазонів тиску, що забезпечують високу якість різання. Водночас О'Ніл і Стін [2] виконали чисельне моделювання

тривимірного турбулентного кисневого струменя та показали, що всередині різку утворюються зони захоплення домішок, які можуть негативно впливати на процес окиснення та, відповідно, на ефективність різання. Численні варіанти конструкцій сопел досліджувались у роботах Chrystolouris і Choi [3], Brandt і Settles [4], а також інших авторів [5–8], що свідчить про актуальність проблеми оптимізації потоків допоміжного газу. Узагальнений аналіз газодинамічних ефектів був представлений Fieret та ін. [9], де зазначено, що наявність диска Маха суттєво знижує ріжучий тиск на заготовці та може сприяти формуванню застійної зони. Водночас варто зазначити, що систематичних теоретичних досліджень, присвячених впливу положення сопла, його геометрії, внутрішньої конфігурації каналів і манометричного тиску газу на вході в сопло, поки що недостатньо. При виході з сопла надзвуковий струмінь формує складну систему ударно-хвильових структур, зокрема хвиль розширення Прандтля–Мейєра, косих та рефлектованих ударних хвиль. Їхня взаємодія визначає розподіл тиску вздовж осі струменя та формує характерну «алмазну» структуру потоку. Зміна відстані між соплом і поверхнею заготовки впливає на просторову конфігурацію хвильової системи, що, у свою чергу, змінює умови винесення розплаву з різку та ефективність процесу.

Необхідність встановлення оптимальних параметрів подачі газу пояснюється тим, що надмірні втрати повного тиску при взаємодії падаючої та нормальної ударної хвиль призводять до зменшення ріжучого тиску, зниження масової витрати через проріз та, відповідно, погіршення очищення канавки. Навпаки, режими, за яких косі хвилі відбиваються до зустрічі з нормальною ударною хвилею, зменшують втрати тиску і підвищують стабільність процесу.

Метою статті є встановлення закономірностей взаємодії надзвукових газових струменів з поверхнею заготовки за реальних технологічних умов газолазерного різання шляхом чисельного моделювання процесу, експериментальної верифікації результатів моделювання та використання отриманих закономірностей при проектуванні ефективних режимів газолазерного різання.

Обладнання та методи дослідження. Методика чисельного моделювання процесів газодинаміки. У даній роботі чисельне моделювання процесів газодинаміки асистуючого надзвукового потоку здійснювалося на основі рівнянь Нав'є–Стокса для стисливого середовища з урахуванням турбулентності шляхом розв'язання осереднених за Рейнольдсом рівнянь (RANS). Адже пряме моделювання турбулентності (DNS) в умовах задач газолазерного різання є практично недосяжним через необхідність застосування надзвичайно дрібних просторових сіток та малих часових кроків, що мають бути меншими характерного часу турбулентних пульсацій. Тому застосовується наближений підхід, у якому миттєві газодинамічні величини представляють у вигляді суми середнього значення та флуктуаційної компоненти.

Осереднене по Рейнольдсу рівняння руху має наступний вигляд:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j}, \quad (1)$$

$$\text{де } R_{ij} = -\rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu_t \frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - \text{тензор напружень Рейнольдса.}$$

Для замикання системи RANS-рівнянь застосовано двопараметричну k – ε модель турбулентності, яка добре зарекомендувала себе при моделюванні течій із великими перепадами тиску, ударними структурами та інтенсивним турбулентним змішуванням, характерним для процесу газолазерного різання.

Модель складається з рівняння для кінетичної енергії турбулентності k та рівняння для швидкості її дисипації ε .

Турбулентна в'язкість визначається залежністю:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2)$$

Вона дозволяє урахувати додатковий перенос імпульсу, обумовлений турбулентними пульсаціями. Молекулярна та турбулентна в'язкість сумуються, забезпечуючи коректний опис як ламінарних, так і турбулентних ділянок потоку. Для підвищеної точності біля стінок використано

стандартний набір пристінкових функцій (standard wall functions), рекомендований для великих значень числа Рейнольдса.

Математична модель доповнюється рівнянням енергії та рівняннями стану ідеального газу.

Рівняння збереження енергії:

$$\frac{\delta}{\delta t}(\rho h_{tot}) + \frac{\delta}{\delta x_j}(\rho h_{tot} u_j) = \frac{\delta P}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x_j} \left(u_i \tau_{ij} + \lambda \frac{\delta T}{\delta x_j} \right) \quad (3)$$

Рівняння стану ідеального газу:

$$p = \rho RT \quad (4)$$

У чисельному моделюванні асистуючого газу використано повітря та кисень як робочі середовища основні параметри яких наведені в таблиці 1. Обидва гази розглядаються як ідеальні, а їхні властивості визначаються стандартними термодинамічними залежностями.

Табл. 1

Основні параметри газів які були застосовані в розрахунках

Газ	Молярна маса, кг/моль	Газова стала, J/(кг·K)	В'язкість μ , кг/(м·с)
Повітря	0.02897	287	1.81e-5
Кисень	0.032	259.8	2.0e-5

Застосування моделі ідеального газу в даних режимах характеризується незначним відхиленням від реальної газової поведінки. Такий підхід є обґрунтованим, оскільки забезпечує істотне прискорення обчислювального процесу без відчутної втрати точності при аналізі газодинаміки струменя.

Дискретизація області розрахунку виконувалася з використанням структурованої або гібридної обчислювальної сітки з локальним її згущенням у зоні виходу сопла та формування ударно-хвильової структури. Відповідно до сучасних методик моделювання високошвидкісних потоків, було забезпечено необхідні умови для коректної роботи пристінкових функцій: значення параметра y^+ підтримувалося в межах 30–200. У зонах шоків хвиль та потенційного ядра потоку застосовувалися додаткові локальні згущення, що дозволило підвищити роздільну здатність сітки. Типовий розмір комірок у найбільш критичних областях становив 0,01–0,02 мм, що забезпечило достовірне відтворення дрібномасштабних градієнтів тиску та швидкості.

Запропонована методика дозволяє з достатньою точністю моделювати основні фізичні характеристики надзвукового струменя: процес його розширення, формування ударно-хвильових структур, турбулентне змішування, а також зміну параметрів уздовж осі. Це є важливим для аналізу взаємодії асистуючого газового потоку із зоною різання та подальшої валідації математичної моделі процесу газолазерного різання.

На рис. 1,а представлено розподіл тиску для робочого тиску 1 бар. Потік перебуває у трансзвуковому режимі зі швидкістю, близькою до числа Маха ≈ 1 ; формування дисків Маха на даному режимі не спостерігається. На рис. 1,б наведено розподіл тиску для тиску 3 бар, за якого потік набуває надзвукових властивостей і чітко простежується система ударних хвиль та сформовані диски Маха.

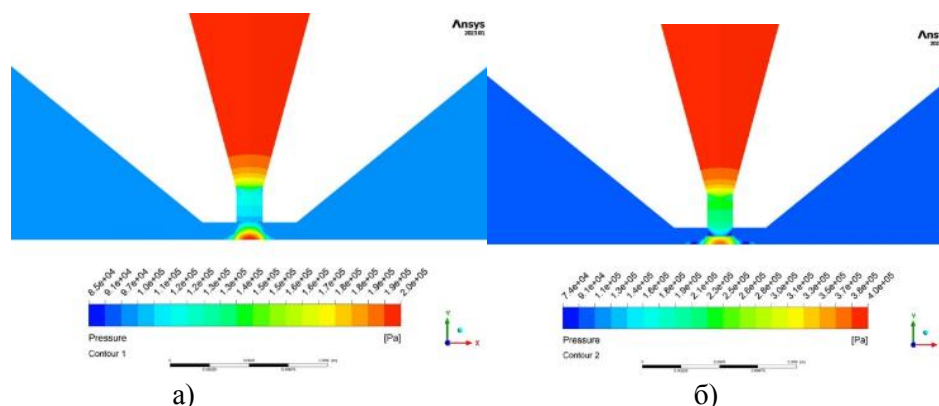


Рис. 1. Графічне зображення 2D моделі розрахункової карти тиску в перерізі сопла отриманого в ANSYS, тиск 1 Бар, приклад гальмування дозвукового струменя (а); тиск 3 Бар приклад гальмування надзвукового струменя (б)

Для експериментальної верифікації результатів чисельного моделювання було розроблено та реалізовано установку для реєстрації значень тиску в зоні гальмування асистуючого газового струменя [10]. Вона дозволяє з високою точністю локально реєструвати ріжучий тиск вимірювальним перетворювачем тиску в зоні отвору діаметром 0.3 мм в металічному диску, що моделює заготовку. Дослідження виконувалися на експериментальному верстаті компанії «Арамис», провідного виробника лазерних технологічних установок в Україні. В початковий момент співвісність вісей дискового зонду та сопла, вмонтованого в оптичну головку верстата, встановлювалася за допомогою юстувального лазера та відео-оптичної системи верстата (рис 2 а).

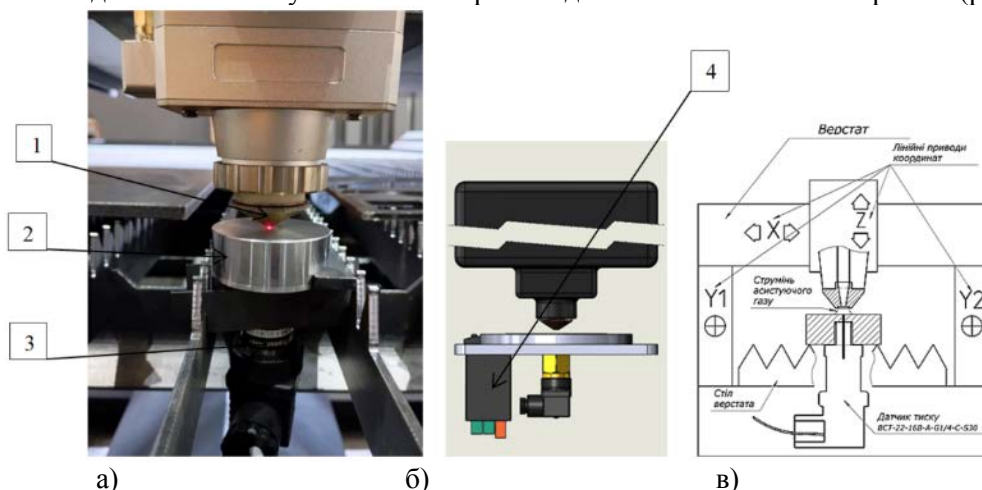


Рис. 2. Загальний вигляд дискового зонда з вимірювальним перетворювачем тиску (п'єзореzystивний датчик тиску моделі ВСТ110) при виставленні співвісності сопла оптичної головки верстата та приймального отвору дискового зонда (а); 3d модель дискового зонда (б); конструктивна схема установки для проведення досліджень (в) [10]

1 – сопло оптичної головки верстата; 2 – дисковий зонд; 3 – п'єзореzystивний датчик тиску моделі ВСТ110; 4 – контролер ЕРА100

На рис. 2, б наведена 3d модель дискового зонда. Конструктивна схема установки для проведення досліджень полів ріжучого тиску асистуючого газу в робочій зоні верстата наведена на рис. 1, в. Блок відслідковування зазору верстата визначає координату вісі Z при торканні торцем сопла 1 поверхні дискового зонда 2, приймаючи її за нульову координату відліку (рис. 1, а). Всі три лінійних приводи координат експериментального верстата забезпечували похибку позиціонування, що не перевищувала $\pm 0,005$ мм. В якості вимірювального перетворювача дискового зонда було використано п'єзореzystивний датчик тиску моделі ВСТ110. Технічні характеристики датчика наведено в таблиці 2.

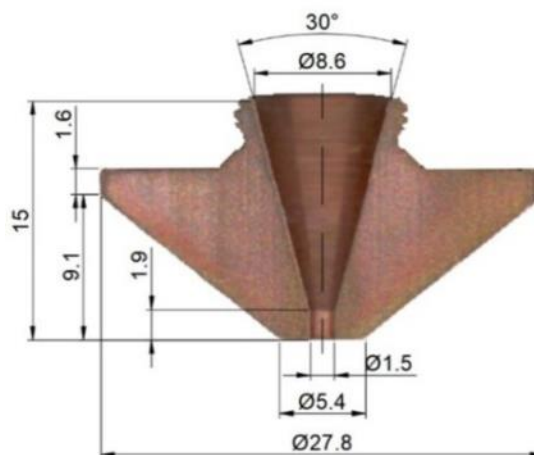


Рис. 3. Внутрішня структура та розміри одноканального сопла з вихідним діаметром 1,5 мм компанії Thermacut, використаного в експериментах

При проведенні досліджень використовувалося найбільш вживане по типу і характеристикам сопло у верстатах компанії «Арамис». Внутрішня структура та розміри сопла наведені на рис. 3. В

якості асистуючих газів використовувалися повітря та кисень. Повний манометричний тиск всередині сопла задавався та контролювався системою числового програмного керування верстатом і паралельно зовнішнім датчиком для підвищення достовірності вимірів.

Табл. 2

Технічні характеристики п'єзорезистивного датчика тиску моделі ВСТ110

Діапазон	Від 0 bar до 16 bar
Вихідний сигнал	4...20mA(2 провід), 0...10VDC(3 провід)
Підключення до процесу	G1,G1/2,G1/4
Живлення	+12...30VDC
Клас точності	%0.5
Ступінь захисту	IP65
Робоча температура	-20C...+85C

Як чисельне моделювання так і експериментальні дослідження виконано для повних манометричних тисків 0,5; 1,0; 1,5, 2,0, 2,5 та 3,0 бар та вертикальних зазорів між соплом і поверхнею деталі 0,5 мм; 1,0 мм; 1,5 мм; 2,0 мм; 2,5 мм; 3,0 мм з кроком 0,5 мм.

Результати досліджень. Результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень з використанням в якості асистуючого газу повітря представлені на рис. 4.

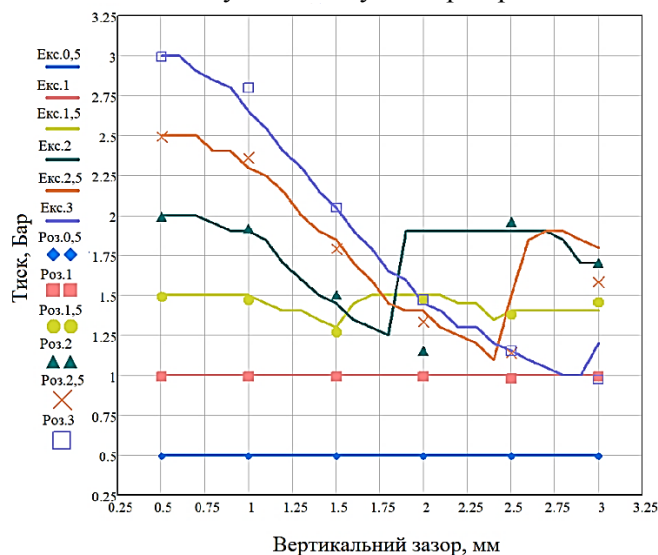


Рис. 4. Розрахункові та експериментальні графіки розподілу ріжучого тиску при зміні тиску на вході в сопло та вертикальних зазорів між соплом і поверхнею деталі для повітря

Аналіз отриманих результатів показує наступне. Для низьких вхідних тисків (0,5 і 1 бар, синя та рожева криві) осьовий тиск залишається практично постійним при зміні зазору – це видно як майже горизонтальні суцільні лінії. Точки (теорія) для цих випадків також лежать близько до експерименту. Для середніх і високих тисків (1,5–3 бар) при переході до надзвукових струменів спостерігається загальний спад осьового тиску зі збільшенням зазору: при малому зазорі осьовий тиск близький до тиску на вході, при більших – падає значно (до ~1–1,5 бар залежно від випадку). У деяких серіях (особливо для 2–3 бар) видно неоднорідну/нелінійну поведінку: локальне падіння, потім збільшення або плато при певних зазорах. Це типово для переходів між режимами (формування/руйнування ударних структур, віддалення/приближення потенційного ядра диску Маха). Теоретичні точки (маркери) загалом повторюють тренд експерименту, але часто спостерігаємо зсув вниз або інша крутизна кривих у залежності від діапазону зазору і тиску.

Порівняння розрахунку й експерименту наведено на рис. 5.

Аналіз графіків різниці (розрахунок – експеримент) показує, що найбільш точна відповідність спостерігається у діапазоні 1,5–2 бар, де відхилення не перевищують 0,1 бар. Для тисків 2,5–3 бар спостерігаються помітніші розходження, особливо при зазорах 1,5–2,5 мм, що очевидно пов'язано з нерівномірною ударною структурою надзвукового струменя та можливою недостатньою деталізацією моделі в цих режимах. Загальний характер зміни збережено, проте теорія переважно дещо знижує тиск у високобарних режимах.

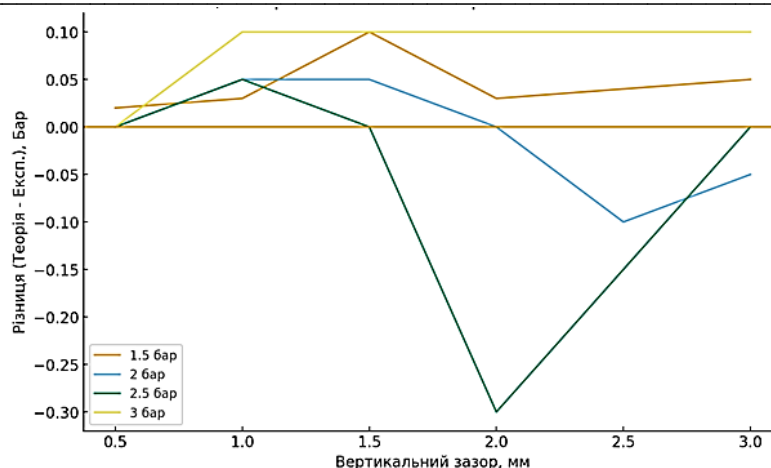


Рис. 5. Різниця розрахункових та експериментальних значень ріжучого тиску на вісі струменя для повітря

Результати чисельного моделювання та експериментальних досліджень з використанням в якості асистуючого газу кисню представлені на рис. 6.

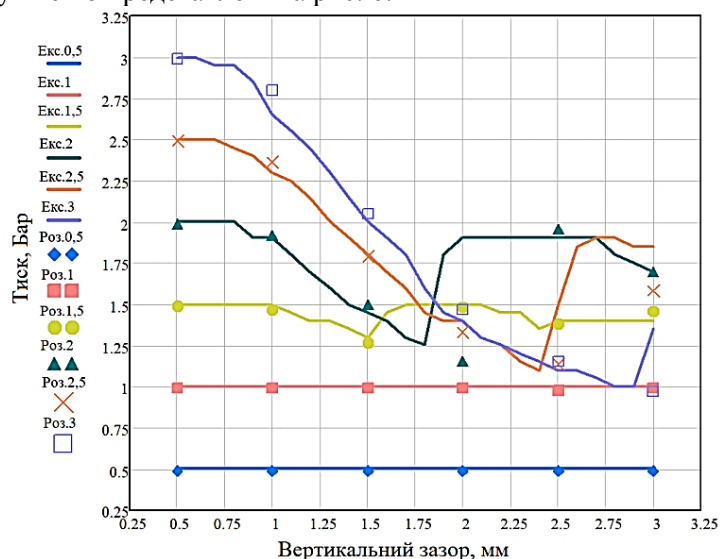


Рис. 6. Розрахункові та експериментальні графіки розподілу ріжучого тиску при зміні тиску на вході в сопло та вертикальних зазорів між соплом і поверхнею деталі для кисню

Аналіз розподілу тиску гальмування на осі газового струменя кисню показав відмінну збіжність між теоретичною моделлю та експериментом у діапазоні 0.5–2 бар, де відхилення не перевищують 0.04 бар (як і для повітря за низьких вхідних тисків (0.5 і 1 бар) осьовий тиск залишається практично постійним при зміні зазору). При вищих тисках (2.5–3 бар) спостерігається зростання розходження, пов'язане з інтенсивним формуванням ударно-хвильової структури та нерівномірною турбулентною взаємодією струменя із поверхнею. Як і у випадку повітря, теорія коректно відтворює загальну тенденцію спаду тиску зі збільшенням зазору, проте згладжує локальні піки, що присутні в реальному потоці. Модель системно знижує тиск для 2.5–3 бар, що може бути зумовлено спрощенням турбулентних і теплових механізмів у струмені кисню, який має вищу реакційну активність та теплову провідність порівняно з повітрям.

Кількісне порівняння розрахунку й експерименту наведено на рис. 7.

Основні висновки за графіками різниці (розрахунок – експеримент) полягають у наступному. Тиск 1.5 бар – майже ідеальна узгодженість, різниця не перевищує ± 0.06 бар. Теоретична модель добре описує поведінку струменя. Тиск 2 бар – збіжність добра при малих зазорах, але погіршується після ~ 2 мм. Модель занижує тиск у режимі розходження потоку ($-0.1 \dots -0.05$ бар). Тиск 2.5 бар – найбільші відхилення (~ -0.15 бар на $h=2-2.5$ мм). Саме тут активні ударні структури та турбулентне розширення, які модель дещо спрощує. Тиск 3 бар – за збільшення дистанції до першого диску Маха тренд майже нульовий, модель стабільно близька до експерименту. Режим стабільніший, хвильові перепади менш впливають на центральний тиск.

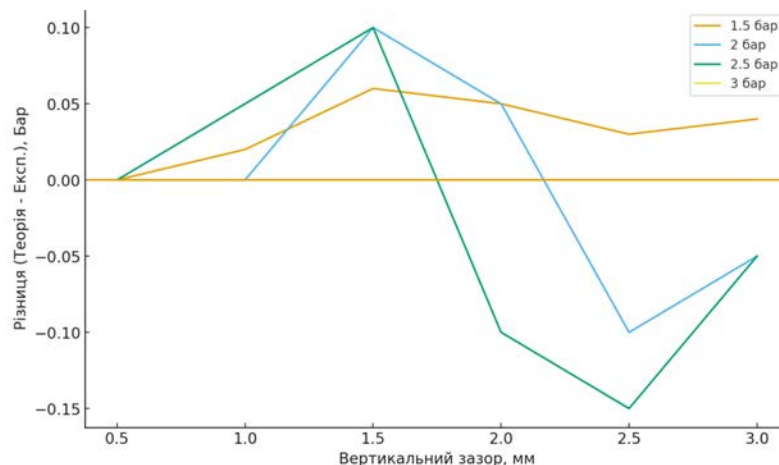


Рис. 7. Різниця розрахункових та експериментальних значень різжучого тиску на вісі струменя для кисню

Порівняння. В цілому отримані як розрахункові так і експериментальні результати для повітря і кисню мають відносно незначні відмінності. Кисень має вищу густину та нижчу теплоємність, що робить хвильову структуру більш різкою, експеримент показує більші піки, а теорія їх не завжди високоточно відтворює. Отримані точні кількісні дані добре корелюють з базовими особливості газодинаміки надзвукових струменів. Малий зазор завжди гарантує підвищений локальний різжучий тиск. Це зумовлено близьким розташуванням зони стагнації і прямою взаємодією хвиль стиснення з поверхнею деталі. Середній зазор – наявне різке падіння тиску. Причина – взаємодія косих хвиль з нормальною хвилею стояння, що створює значні втрати повного тиску. Перехід на відносно великі зазори в залежності від тиску на вході в сопло призводить до стабілізації різжучого тиску на дещо нижчому рівні. На таких відстанях ударні структури частково «розсмоктуються» і потік наближається до квазівільного надзвукового режиму.

Встановлені закономірності важливі при налаштуванні реального процесу лазерного різання, для забезпечення максимальної продуктивності процесу та відповідної якості отриманих деталей. На рис. 8 показано як зміна зазору і різжучого тиску, які відповідають експериментальним і розрахунковим даним, за постійної швидкості різання та тиску на вході в сопло суттєво змінюють якість поверхонь різі.

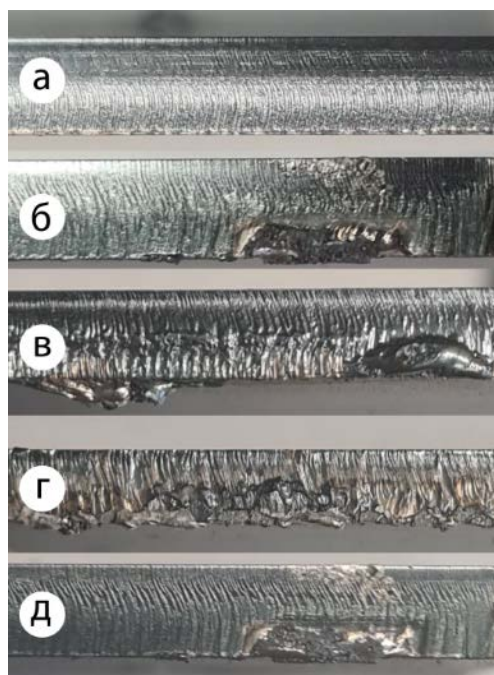


Рис. 8. Візуальна оцінка якості різі сталі Ст3 товщиною 5 мм при зміні вертикального зазору за постійної швидкості різання та тиску кисню 2 Бар: при зазорі 0,5 мм (а); при зазорі 1 мм (б); при зазорі 1,5 мм (в); при зазорі 1,8 мм (г); при зазорі 2,5 мм (д)

Нескладно побачити, що коливання якості різання відповідають характеру коливань ріжучого тиску на вісі струменя при його гальмуванні на поверхні деталі. Зазори зі стабільним тиском забезпечують більш якісні та бездефектні поверхні отриманих деталей.

Висновки.

1. Проведено комплексні системні теоретичні та експериментальні дослідження взаємодії дозвукового та надзвукового газових струменів (повітря та кисень), сформованих східним конічним соплом лазерної технологічної установки з поверхнею деталі для обраного ряду тисків на вході в сопло та величин вертикальних зазорів між соплом та деталлю. Чисельне моделювання виконувалося з використанням структурованої або гібридної обчислювальної сітки з локальним її згущенням у зоні виходу сопла та формування ударно-хвильової структури. Експериментальні дослідження проведені з використанням устаткування та методики для високоточної реєстрації величини ріжучого тиску утвореного гальмуванням струменя асистуючого газу.

2. Встановлені чисельні закономірності формування ріжучого тиску на вісі струменя для дозвукових та надзвукових струменів в залежності від тиску на вході в сопло та величини зазору між соплом та деталлю за використання в якості асистуючих газів повітря та кисню.

3. Співставлення розрахункових та експериментальних результатів підтвердило, що рівень точності запропонованої чисельної моделі достатній для ефективних розрахунків газодинамічних процесів взаємодії газових струменів з поверхнею деталі. Модель може успішно використовуватися при налаштуванні реального процесу газолазерного різання, для забезпечення максимальної продуктивності процесу та відповідної якості отриманих деталей.

4. Отримано експериментальне підтвердження високого рівня кореляції якості різку та характеру коливань ріжучого тиску на вісі струменя при його гальмуванні на поверхні деталі.

Список використаних джерел:

1. Ivarson, A., et al., 1996, "The Role of Oxygen Pressure in Laser Cutting Mild Steels," J. Laser Appl., 8, pp. 191–196.
2. O'Neill, W., and Steen, W. M., 1995, "A Three-Dimensional Analysis of Gas.
3. Entrainment Operating During the Laser-Cutting Process," J. Phys. D: Appl. Phys., 28, pp. 12–18.
4. Chryssolouris, G., and Choi, W. C., 1989, "Gas Jet Effects on Laser Cutting", CO2 Lasers and Applications, SPIE, 1042, pp. 86-96.
5. Brandt, A. D., and Settles, G. S., 1997, "Effect of Nozzle Orientation on the Gas Dynamics of Inert-Gas Laser Cutting of Mild Steel ", J. Laser Appl., 9, crop. 269-277.
6. LaRocca, A. V., et al., 1994, "Nozzle Design to Control Fluid-Dynamic Effects in Laser Cutting," SPIE, 2207, pp. 169–180.
7. O'Neill, W., et al., "The Dynamics Behavior of Gas Jets in Laser Cutting," Proc. ICALEO'92, pp. 449–458.
8. Man, H. C., et al., 1997, "Design of Supersonic Nozzle for Laser Cutting With Pressure Gas," Proc. ICALEO'97, Sec. B, pp. 118–127.
9. Masuda, W., et al., 1994, "Aerodynamic Characteristics of Underexpanded Coaxial Impinging Jets," JSME Int. J., 37, No. 4, pp. 769–775.
10. Riveiro, A., Quintero, F., Boutinguiza, M., Del Val, J., Comesaña, R., Lusquiños, F., & Pou, J. (2019). Laser Cutting: A Review on the Influence of Assist Gas. Materials, 12(1), 157.
11. В.І. Осипенко. М.Р. Прусс (2024). Вплив внутрішньої структури та розмірів типових сопел на поле ріжучого тиску асистуючого газу при газолазерному різанні. Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 79/2024 Ст 70-78. DOI 10.36910/775.24153966.2024.79.10

Н. Полівода, М. Мельничук, І. Шевчук, Я. Бабич, В. Рудь

Луцький національний технічний університет¹

ВПЛИВ СКЛАДУ МЕТАКАОЛІНІВ НА ВЛАСТИВОСТІ ГЕОПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ НА ТЕРМОПЕРЛІТНІЙ ОСНОВІ

Геополімери є перспективними сучасними будівельними матеріалами, як альтернатива бетонам на основі портландцементу. Оптимізація хімічного та гранулометричного складу компонентів геополімеру, зокрема метакеолину, дозволяє керувати швидкістю твердіння, підвищувати довговічність та механічні властивості, а також адаптувати геополімери до конкретних умов застосування. В даному дослідженні проаналізовано метакеолин МК 40 та високоактивний метакеолин ВКМ, їхній хімічний склад та розподіл частинок, а також вплив цих факторів на властивості геополімерів.

Ключові слова: метакеолин високоактивний ВКМ, метакеолин МК-40, геополімер, алюмосилікати, композити, полімеризація.

N. Polivoda, M. Melnychuk, I. Shevchuk, Y. Babych, V. Rud

THE INFLUENCE OF METAKAOLIN COMPOSITION ON THE PROPERTIES OF THERMOPEARLITE-BASED GEOPOLYMER COMPOSITES

Geopolymers are promising modern building materials, serving as an alternative to Portland cement-based concretes. Optimizing the chemical and granulometric composition of geopolymer components, particularly metakaolin, allows for controlling the hardening rate, increasing durability and mechanical properties, and adapting geopolymers to specific application conditions. This study analyzes metakaolin MK 40 and highly active metakaolin HAM, their chemical composition and particle distribution, as well as the influence of these factors on the properties of geopolymers.

Keywords: highly active metakaolin HAM, MK-40 metakaolin, geopolymer, aluminosilicates, composites, polymerization.

Introduction

The chemical and granulometric composition of components has a key influence on the properties of geopolymers, affecting their strength, resistance to aggressive environments, thermal conductivity, water absorption, and other properties. The study analyzed metakaolin MK 40 (TU.U 14.2-00191916-001:2005) and highly active metakaolin HAM (TU.U 14.2-36363275-001:2009) were analyzed, which can be used for the production of geopolymers.

Problem statement

Energy efficiency, environmental safety, and durability are important aspects for building materials. Geopolymers are a promising alternative to traditional cement composites. The properties of thermoperlite-based geopolymer composites depend on the composition of the raw materials, in particular on the type and activity of metakaolin, its chemical composition, and granulometric characteristics. The lack of data on the influence of different types of metakaolin (MK-40 and HAM) on the structure formation and operational properties of thermoperlite-based geopolymer composites complicates the process of optimizing the composition of such materials. The lack of a systematic analysis of the relationship between the initial parameters of the raw materials and the final properties of geopolymers does not allow their composition to be formulated to achieve the required characteristics.

Review of Modern Information Sources on the Subject of the Paper

Geopolymer composites are the result of alkaline activation of aluminosilicate materials, which produces a three-dimensional aluminosilicate gel (N-A-S-H) that determines the mechanical and physicochemical properties of the material [1, 4, 5]. One of the most common precursors for the creation of geopolymer composites is metakaolin, whose chemical composition is a key factor in the formation of the structure and properties of the geopolymer. The silicon dioxide (SiO_2) content contributes to the formation of the polymer matrix, increasing the gel density and mechanical strength of the material, as well as its thermal stability [1, 2, 4, 10].

Research results [3, 6] show that a $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ ratio of approximately 3-4 ensures a balance between the formation of a strong matrix and the reactivity of the precursor. Increasing the SiO_2 content to a certain level leads to a denser structure and reduced porosity, which has a positive effect on strength. However, an excess of silicon can reduce the reactivity of aluminosilicates and slow down polymerization, limiting further strength growth [4, 6, 9].

Aluminum oxide Al_2O_3 causes the formation of a three-dimensional polymer aluminosilicate network, which provides high thermal and acid resistance of the geopolymer [1, 2, 10]. Works [5, 7] show

that the presence of Al_2O_3 in a certain amount contributes to the formation of stable Si–O–Al bonds, as well as increases the density of the structure and reduces water absorption. The addition of CaO or calcium-containing slags promotes the formation of hybrid gels of the C–A–S–H and N–A–S–H type [2, 4, 11], which significantly increases early strength and accelerates the hardening of the material. However, excess CaO can reduce the chemical stability of geopolymers in an acidic environment, so its amount in the preparation of a geopolymer composite must be regulated [4, 5, 7].

In the geopolymer composition, iron oxide Fe_2O_3 in small concentrations can act as a catalyst for structure formation, increasing thermal stability and stability when heated. In high concentrations, Fe_2O_3 reduces strength due to the formation of less reactive phases and disruption of gel homogeneity [3, 5, 7].

In addition to chemical composition, granulometry and specific surface area of metakaolin particles play an important role [6, 8, 9]. The granulometric composition of raw materials is one of the key factors determining the kinetics of polymerization and the density of the geopolymer matrix structure. Studies show that reducing the particle size of metakaolin and other aluminosilicates leads to an increase in specific surface area, which increases the reactivity of the material during alkaline activation. As Duxson [5] notes, finely dispersed particles promote more intense dissolution of Si and Al in an alkaline environment, accelerating polymerization and the formation of a three-dimensional structure of the geopolymer gel. Similar results were obtained in [10], where it was noted that the use of finely dispersed metakaolin ensures the formation of a more homogeneous and dense structure, which reduces porosity and increases the mechanical strength of the final material. In addition, granulometry significantly affects the microstructure and defectiveness of the matrix.

Kohout et al. [6] experimentally proved that excessively large aluminosilicate particles slow down the polymerization process, causing the appearance of heterogeneous zones and microcracks in the structure, while a uniform distribution of particles smaller than 20 μm contributes to the formation of a dense and uniform matrix. Similarly, Tchakouté et al. [7] note that controlling the particle size distribution allows the degree of gelation to be regulated and the number of unreacted metakaolin grains to be reduced. Thus, granulometry directly determines the polymerization rate, homogeneity, and density of the geopolymer matrix, which is crucial for obtaining materials with high physical and mechanical characteristics.

The assessment of the structural and morphological characteristics of metakaolin, as one of the most effective aluminosilicate bases for the synthesis of geopolymers, allows not only to visualize the morphology of its particles, the degree of amorphousness after calcination and the process of gel formation during geopolymerization, but also the porosity and presence of defects in the formed matrix [5; 13].

According to studies [4; 17], the intensity of gel matrix formation and its porosity depend on the reactivity of metakaolin, i.e., the degree of its structural destruction during calcination. The temperature for obtaining metakaolin is approximately 650–750 $^{\circ}\text{C}$, resulting in high dispersibility and the largest surface area, which contributes to the effective formation of a three-dimensional aluminosilicate network.

Microstructural observations also show that when the reactivity of metakaolin in the geopolymer matrix is insufficient, unreacted particles remain, forming defects and reducing the density of the structure. SEM analysis in this case reveals characteristic pores and cracks, indicating incomplete polymerization [6, 12, 21]. Conversely, with the correct selection of the alkali solution composition and Si/Al ratio, the microstructure is more homogeneous, without microcracks, with a clearly defined gel background, confirming a high degree of geopolymerization [9; 15].

In addition, the use of SEM in combination with EDS energy dispersive analysis allows the elemental composition of local areas of the structure to be determined, which is important for identifying phases with different concentrations of silicon, aluminum, and alkali cations. This helps to trace the process of metakaolin transition to the N–A–S–H gel phase, characteristic of geopolymers [5, 13, 18, 20].

Assessment of the degree of microstructure compaction and the presence of residual voids, which determine the mechanical strength of geopolymers [19; 20]. Comparison of microstructural data with the results of mechanical tests demonstrates a clear correlation between morphological homogeneity and the strength of samples.

Geopolymers synthesized on the basis of metakaolin are characterized by high density and the presence of an amorphous gel matrix formed as a result of the polymerization of silicate and aluminate groups. According to research [15], when metakaolin is used as the main component, N–A–S–H-type gels are formed, which are responsible for the mechanical properties of the material. Additionally, in studies [15, 19], a microstructural analysis of metakaolin-based geopolymers was performed using SEM methods,

which allowed the identification of characteristic features of the structure and phase transformations in the material.

Objectives and Problems of Research

The aim of this study is to investigate the relationship between the elemental and granulometric composition of aluminosilicate raw materials, in particular metakaolin MK 40 and HAM, the nature of their influence on the course of polymerization, microstructure formation, and the final properties of geopolymer composites. In the search for environmentally sustainable and durable building materials, understanding the role of particle size and nature in structural and chemical processes is of particular importance. The reaction rate of alkali activation, the level of homogeneity of the mixture, and, consequently, the density and strength of the formed matrix depend on the particle size distribution. Therefore, the task is not only to describe the physicochemical patterns, but also to identify practical approaches to optimizing the composition in order to obtain stable, heat-resistant, and mechanically strong geopolymers.

An important task of the study is to gradually investigate the relationship between granulometry and structure formation in geopolymer systems, in particular, to determine the role of particle size in the formation of an aluminosilicate network and to determine the critical parameters that affect the polymerization rate [6, 11]. Therefore, the study aims to establish the limits of metakaolin dispersibility, at which the highest reactivity and maximum matrix density are achieved [4, 7]. By performing a comparative analysis of the microstructure of materials synthesized with different particle size distributions, it is possible to understand how changes in morphology affect the performance properties of the finished samples [10, 12].

Main Material Presentation

The elemental and oxide composition of VCM and MK-40 was measured using an X-ray fluorescence spectrometer (XRF) by two methods. In the first method, loosely packed metakaolin powder was used for measurements. In the second method, measurements were performed on compressed material. To prepare the sample for measurement, 6 g of metakaolin was weighed and 1.5 g of wax was added. The prepared mixture was pressed with a load of 15 T on a Hercules 25T press. The results of the second method are shown in Fig. 1. The increased content of Al in the form of oxide in HAM metakaolin is explained by the high content of the $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ phase. This phase is formed during the production of metakaolin in the calcination process, as a result of which, at temperatures of 500–700 °C, gibbsite is transformed into $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. This phase remains inert during geopolymerization, but contributes to the compaction of the structure, effectively acting as a filler that increases compressive strength [5,7].

The formation of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ is also accompanied by a decrease in the specific surface area of metakaolin, which can affect the reactivity of the raw material, but the formation of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ compensates for this effect by improving the mechanical properties of geopolymer materials and their thermal stability [4,8]. The strength of geopolymers also depends on the molar ratio of Si/Al. Studies show [3, 5] that at a Si/Al ratio of ≈ 1.95 , maximum compressive strength is achieved. From which it can be concluded that this ratio, i.e., an increase in the Al_2O_3 content, can lead to a decrease in strength due to the formation of less strong Al–O–Al bonds in the geopolymer structure.

The granulometric composition of geopolymer components has a direct impact on the reactivity of materials. This is because fine particles have a higher specific surface area, resulting in faster alkali activation of geopolymers and increased initial strength. Excessively fine metakaolin particles can reduce the mobility of the mixture and require a larger amount of activator, leading to microcracks and shrinkage. Coarse particles are less reactive but can serve as fillers [9, 10]. The granulometric analysis of the samples was performed using an Anton Paar GmbH (Graz, Austria) laser particle analyzer, which uses the light diffraction method. The measurements were performed in wet mode, which required the preparation of samples of BMC and MK40 metakaolin and their introduction into the device, where light scattering analysis was then performed. The study established statistical values for grain size based on six measurements (Fig.2).

In metakaolin MK 40, a more uniform distribution of particles is observed, which in turn contributes to the compaction of the structure of the geopolymer mixture. Thus, a decrease in the average particle size of metakaolin (to 3.9–10 μm) contributes to an increase in the specific surface area, which improves the dissolution of aluminosilicates during geopolymerization. This leads to the formation of a larger amount of amorphous (glass) phase, which provides a denser microstructure and increased strength of the material [7, 10], as well as a decrease in the porosity of the material, an increase in its strength, and improved frost resistance and water resistance.

Using scanning electron microscopy (SEM) analysis, the morphological features of HAM and MK 40 particles were studied at magnifications from 150 to 1500, and the elemental composition of metakaolins used as an aluminosilicate base for the synthesis of geopolymer binder was determined.

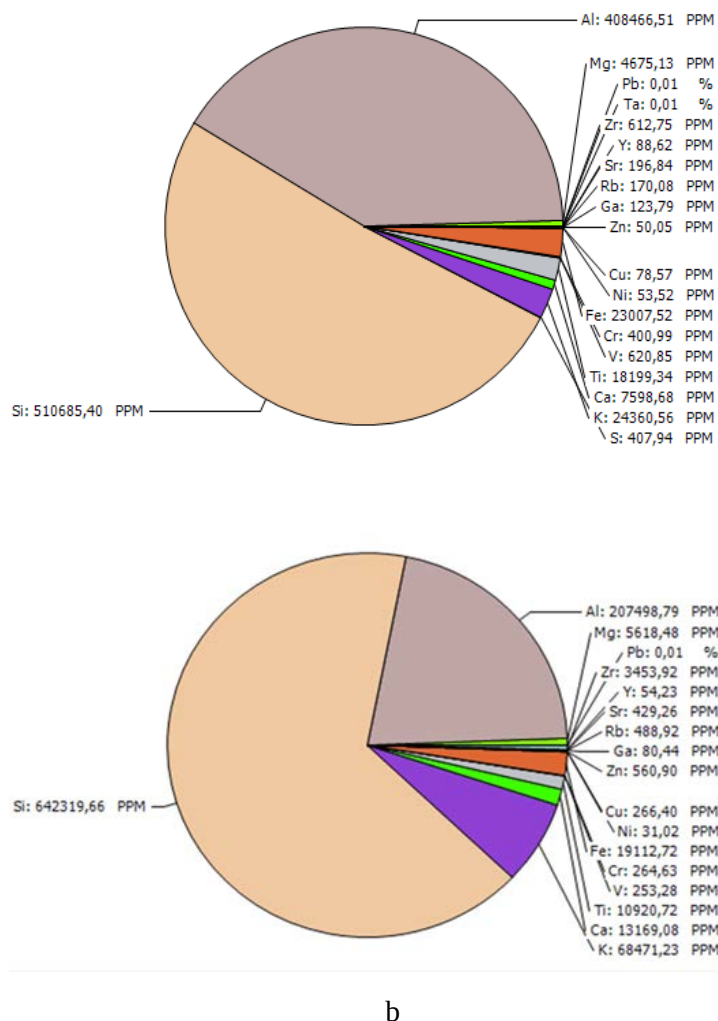


Fig. 1. Elemental composition of metakaolin HAM (a) and MK40 (b)

The obtained VCM images (Fig.3a) demonstrate the aggregated structure of particles with a pronounced leafy surface character, which corresponds to the morphology of kaolinite after thermal activation. The particles have an irregular shape, a size within the range of 1–10 μm , and are characterized by the presence of microcracks and porosity, which are formed as a result of dehydroxylation of kaolinite at a temperature of 650–800 $^{\circ}\text{C}$. The surface of the particles is partially loosened, with amorphous areas, indicating the destruction of the layered structure and the formation of reaction-active centers. Such morphological features indicate the effective conversion of kaolinite into metakaolin, an amorphous aluminosilicate characterized by high reactivity in alkaline activation processes. The appearance of amorphous areas confirms the loss of crystallinity necessary for the formation of an N–A–S–H-type gel, which is formed during the geopolymerization process [1, 3]. The results of EDS energy dispersive analysis of VCM indicate that the main elements of the sample are oxygen, silicon, aluminum, as well as a small amount of potassium and carbon (Table 1). The presence of gold within 10 wt.% is explained by the application of a metal coating prior to SEM analysis to ensure the electrical conductivity of the surface.

The calculated Si/Al ratio within the range of 1.1–2.3 is characteristic of highly active metakaolin used in N–A–S–H-type geopolymers. This range is consistent with the results of studies [15] and [16], where the optimal silicon-to-aluminum ratio ensured the formation of a homogeneous gel phase with high density. The presence of potassium indicates natural impurities of feldspars in the initial kaolinite, while the insignificant carbon content may be due to residual organic impurities or carbon contamination during sample preparation. The absence of iron and titanium indicates the high purity of metakaolin, which is an important prerequisite for the stable chemical composition of future geopolymers.

According to SEM data (Fig.3, b), the MK40 metakaolin sample is characterized by an agglomerated microstructure with a predominance of finely dispersed irregularly shaped particles connected in loose clusters. Local pores and breaks are observed on the surface, which are typical for partially amorphized metakaolin that has undergone dehydroxylation. Unlike the HAM sample, where lamellar fragments with remnants of a layered structure prevailed, the structure of MK40 is more porous and loose, indicating a higher degree of kaolinite thermal activation. Such surface destruction can contribute to increased reactivity during alkaline activation, but excessive porosity potentially reduces the density of the future geopolymer.

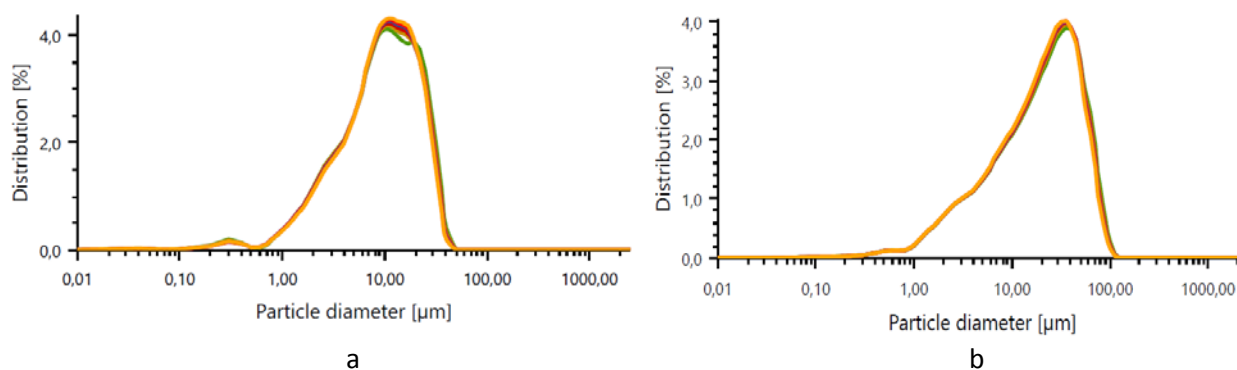


Fig. 2. Results of granulometric analysis of metakaolins HAM (a) and MK40 (b)

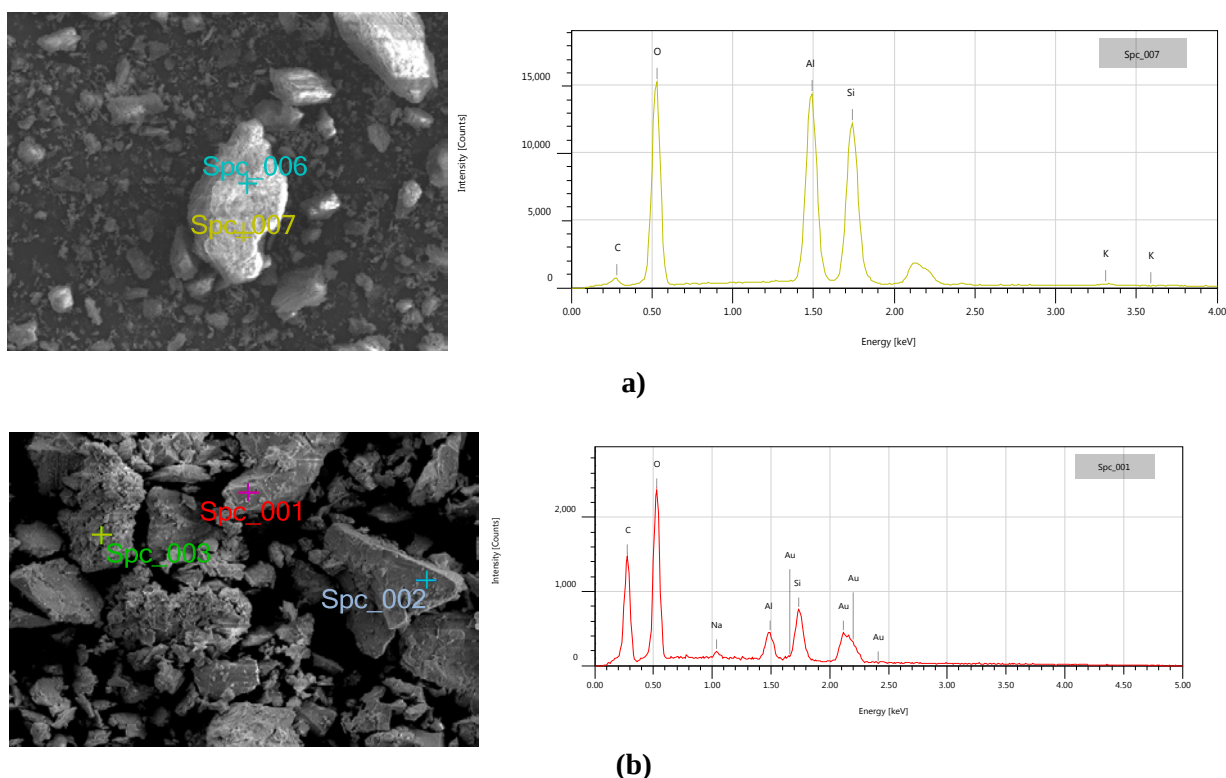


Fig. 3. Results of scanning electron microscopy (SEM) analysis of metakaolins HAM (a) and MK40 (b), x1500

Based on the EDS results of metakaolin MK40, its composition was determined (Table 2), with a Si/Al ratio in the range of 1.5–2.6, which is typical for reactive metakaolins suitable for forming N–A–S–H gel during geopolymerization. Compared to VCM, the MK40 sample has a slightly higher Si content and lower Al content, indicating a higher proportion of the amorphous phase. The presence of up to 2.2 wt% sodium may be the result of prior contact with alkaline environments or natural impurities of feldspars, which is sometimes observed in thermally activated kaolinites.

As can be seen from the SEM results, sample MK40 shows more intense destruction of the crystalline structure of kaolinite, indicating a higher degree of activation. This has a positive effect on reactivity, but excessive porosity may require correction of the alkali activator composition to ensure uniform formation of the N–A–S–H gel. The HAM sample has less developed porosity but a more stable morphology, which

ensures more controlled polymerization. It is likely that its structure will promote the formation of a denser geopolymer matrix with an optimal Si/Al ratio.

Table 1

Results of energy dispersion analysis of HAM

Element	Line	Mass%	Atom%
C	K	6.80±0.12	10.78±0.18
O	K	49.81±0.26	59.29±0.30
Al	K	20.43±0.13	14.42±0.09
Si	K	22.63±0.15	15.35±0.10
K	K	0.33±0.03	0.16±0.01
Total		100.00	100.00
Spc_007		Fitting ratio 0.0402	

For geopolymer synthesis, MK40 can be considered a more reactive metakaolin, suitable for rapid polymerization at low temperatures, while VCM is a structurally more stable material that provides better uniformity and less shrinkage during hardening. For geopolymer synthesis, it is advisable to combine both types of metakaolin in a ratio of 1:1 or 2:1 to achieve a balance between the reaction activity and structural density of the final material.

Table 2

Results of energy dispersive analysis of MK40

Element	Line	Mass%	Atom%
C	K	14.72±0.14	36.93±0.36
O	K	19.53±0.26	36.78±0.48
Na	K	0.69±0.07	0.90±0.09
Al	K	4.75±0.19	5.30±0.21
Si	K	11.80±0.34	12.66±0.36
Au	M	48.52±1.42	7.42±0.22
Total		100.00	100.00

The results obtained are consistent with the morphological characteristics of metakaolin given in [16], [17], [18], [19]. According to these studies, after thermal activation, metakaolin exhibits a heterogeneous microstructure with amorphous areas that promote alkaline activation and the formation of an aluminosilicate gel matrix. The high oxygen and silicon content with a relatively low aluminum content indicates a well-dehydroxylated phase capable of polymerization when interacting with alkaline activators. A similar correlation between the degree of amorphization, reactivity, and microstructure was also established in the works [19], [20], and [21].

Geopolymer components with an optimized SiO_2 and Al_2O_3 ratio and fine grains, such as MK40 metakaolin, are raw materials for producing high-quality geopolymers. Unlike fly ash, which has low reactivity and requires greater grinding or the use of activator additives, metakaolin MK40 requires less $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ for polymerization. The high Al_2O_3 content in BMK metakaolin can reduce the reactivity in the geopolymerization process and cause a decrease in the mechanical properties of the geopolymer due to the formation of weaker Al–O–Al bonds in the geopolymer structure.

Conclusions

The study found that the chemical and granulometric composition of metakaolin significantly affects the structure formation process, polymerization rate, and operational properties of thermoporelite-based geopolymer composites. The main factors determining the quality and homogeneity of the formed geopolymer matrix are the Si/Al ratio and the degree of amorphization of the initial aluminosilicate material.

A comparative analysis of two types of metakaolin — HAM and MK40 — showed that the MK40 sample has a higher degree of thermal activation, increased silicon content (approximately 35 wt.%) and a more developed porous microstructure, which determines its high reactivity in the alkali activation process.

© Н. Полівода, М. Мельничук, І. Шевчук, Я. Бабич, В. Рудь

At the same time, HAM metakaolin is characterized by a more stable, lamellar morphology, a Si/Al ratio in the range of 1.8–2.2, and lower porosity, which ensures controlled hardening and the formation of a dense matrix with minimal shrinkage. The calculated Si/Al ratios within the range of 1.1–2.6 for both types of metakaolin correspond to values sufficient for the formation of an N–A–S–H type aluminosilicate gel, which determines the strength and stability of geopolymers.

An effective Si/Al ratio of approximately 1.9–2.0 ensures the formation of a uniform three-dimensional network with increased density. It has been established that a decrease in the average particle size of metakaolin (to 3.9–10 μm) contributes to an increase in specific surface area, improved dissolution of aluminosilicates in an alkaline environment, intensification of the polymerization process, and the formation of a denser amorphous structure of the geopolymer matrix. This leads to an increase in the strength, frost resistance, and water resistance of the material. The results of SEM and EDS analyses confirm that MK40, having a more porous and amorphous structure, contributes to rapid initial hardening, but requires optimization of the activator composition to prevent the formation of defects. In contrast, HAM exhibits stable particle morphology and ensures uniform polymerization with the formation of a dense matrix, which contributes to the increase in the final strength of the composite.

High performance characteristics of thermoporelite-based geopolymers can be achieved by combining VCM and MK40 metakaolins in a ratio of 1:1 or 2:1, which allows for a balance between reaction activity and structural density. The results obtained indicate the possibility of targeted control of the properties of geopolymer composites by varying the composition, dispersibility, and ratio of metakaolin components, which opens up prospects for the creation of environmentally friendly, energy-efficient, and durable building materials of a new generation.

References

1. J. Davidovits, "Geopolymers and geopolymeric materials," *Journal of Thermal Analysis*, vol. 35, no. 2, pp. 429–441, 1989. DOI: 10.1007/bf01904446.
2. S. Sbähieh, G. McKay, and S. G. Al-Ghamdi, "Comprehensive analysis of geopolymer materials: Properties, environmental impacts, and applications," *Materials*, vol. 16, no. 23, p. 7363, 2023. DOI: 10.3390/ma16237363.
3. J. Davidovits, "High-alkali cements for 21st century concretes," *Special Publication*, vol. 144, pp. 383–398, 1994.
4. J. L. Provis and J. S. J. van Deventer, *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*, 1st ed. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2009, ch. 3, pp. 45–98. DOI: 10.1533/9781845696382.
5. P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, and J. S. J. van Deventer, "Geopolymer technology: The current state of the art," *Journal of Materials Science*, vol. 42, no. 9, pp. 2917–2933, 2007. DOI: 10.1007/s10853-006-0637-z.
6. J. Kohout, P. Koutník, P. Hájková, E. Kohoutová, A. Soukup, and M. Vakili, "Effect of aluminosilicates' particle size distribution on the microstructural and mechanical properties of metakaolin-based geopolymers," *Materials*, vol. 16, no. 14, p. 5008, 2023. DOI: 10.3390/ma16145008.
7. H. K. Tchakouté, E. Kamseu, C. Banenzoué, C. H. Rüschler, F. Andreola, C. C. L. Tchamo, and C. Leonelli, "Role of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ on the mechanical and microstructural properties of metakaolin-based geopolymer cements," *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 86, pp. 305–315, 2018. DOI: 10.1007/s10971-018-4643-8.
8. J. Davidovits, "Geopolymers: Inorganic polymeric new materials," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 37, pp. 1633–1656, 1991.
9. B. Kim and S. Lee, "Review on characteristics of metakaolin-based geopolymer and fast-setting," *Journal of the Korean Ceramic Society*, vol. 57, no. 4, pp. 368–377, 2020. DOI: 10.1007/s43207-020-00043-y.
10. E. Kamseu, A. Rizzuti, C. Leonelli, and D. Perera, "Enhanced thermal stability in K_2O metakaolin-based geopolymer concretes by Al_2O_3 and SiO_2 fillers addition," *Journal of Materials Science*, vol. 45, pp. 1715–1724, 2010.
11. F. Farooq, X. Jin, M. F. Javed, A. Akbar, M. I. Shah, F. Aslam, and R. Alyousef, "Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review," *Construction and Building Materials*, vol. 306, p. 124762, 2021.
12. P. Duxson, G. C. Lukey, F. Separovic, and J. S. J. van Deventer, "Effect of alkali cations on aluminum incorporation in geopolymeric gels," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 44, no. 4, pp. 832–839, 2005.

13. J. Davidovits, *Geopolymer Chemistry and Applications*, 5th ed. Saint-Quentin, France: Institut Géopolymère, 2020. 703 p.
14. Z. Zhang, J. L. Provis, A. Reid, and H. Wang, "Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction," *Cement and Concrete Composites*, vol. 56, pp. 113–127, 2014. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.01.014.
15. A. Fernández-Jiménez and A. Palomo, "Composition and microstructure of alkali-activated fly ash binder: Effect of the activator," *Cement and Concrete Research*, vol. 35, no. 10, pp. 1984–1992, 2005. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.03.003.
16. J. Zeng et al., "Mechanics and microstructure analysis of geopolymer composites," *Materials Today Communications*, vol. 29, p. 102837, 2024. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2022.102837.
17. L. Yuan et al., "Orthogonal analysis and mechanism of compressive strength of metakaolin–fly-ash-based geopolymer," *Materials Today Communications*, vol. 27, p. 102286, 2022. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.102286.
18. X. Shi et al., "Experimental study on the mechanical properties and microstructure of metakaolin-based geopolymer," *Materials*, vol. 15, no. 13, p. 4487, 2022. DOI: 10.3390/ma15134487.
19. J. Lizcano et al., "Reaction and microstructure of metakaolin-based geopolymer: An SEM study," *Journal of Materials Science*, vol. 60, no. 2, pp. 1245–1257, 2025. DOI: 10.1007/s10853-024-06822-4.
20. A. S. S. K. Mohammed et al., "Comparative study of metakaolin-based geopolymer: Effect of activator composition," *Materials Today Communications*, vol. 28, p. 102836, 2023. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2021.102836.
21. N. Polivoda, M. Melnychuk, B. Kozub, R. Ostapchuk, and Y. Babych, "Properties of perlite-based geopolymer as a thermal insulation material for building efficiency," in *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VIII (DSMIE 2025)*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, F. J. G. Silva et al., Eds. Cham, Switzerland: Springer, 2025, pp. 91–104. DOI: 10.1007/978-3-031-96413-8_8.
22. M. Nykiel, K. Korniejewski, K. Setlak, M. Melnychuk, N. Polivoda, B. Kozub, M. Hebdowska-Krupa, and M. Łach, "The influence of diatomite addition on the properties of geopolymers based on fly ash and metakaolin," *Materials*, vol. 17, p. 2399, 2024. DOI: 10.3390/ma17102399.
23. B. Kozub, J. Dudek, and M. Melnychuk, "The effect of oil additives on the properties of fly ash-based foamed geopolymers," *Materials*, vol. 17, no. 23, p. 5819, 2024. DOI: 10.3390/ma17235819.

О. Садова, В. Кашицький, Д. Гусачук, М. Вишинський, Є. Чернота

Луцький національний технічний університет

**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА СТРУКТУРИ
БІОКОМПОЗИТІВ, НАПОВНЕНИХ КАВОВОЮ ГУЩЕЮ**

В статті досліджено міцність на стиснення біокомпозитних матеріалів на основі глютинової матриці та кавової гущі залежно від вмісту наповнювача та ступеня підсушування композиції. Визначено міцність на стиснення біокомпозитів залежно від концентрації біополімерної матриці, вмісту композиції в прес-формі, температури основної термічної обробки та додаткової термічної обробки. Досліджено, що максимальну міцність на стиснення 79,6 МПа мають біокомпозитні матеріали із ступенем підсушування 20%. Також досліджено мікроструктуру біокомпозитів оптимального складу (вміст кавової гущі в кількості 200 мас. ч.) зі ступенем підсушування композиції 20%.

Ключові слова: розчин глютину, кавова гуща, міцність на стиснення, термічна обробка, ступінь підсушування, структура.

O. Sadova, V. Kashytskyi, D. Husachuk, M. Vyshynskiy, Ye. Chernota

**STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF BIOMPOSITS FILLED
WITH COFFEE GROUNDS**

The article investigates the compressive strength of biocomposite materials based on gluten matrix and coffee grounds depending on the filler content and the degree of drying of the composition. The compressive strength of biocomposites is determined depending on the concentration of the biopolymer matrix, the composition content in the mold, the temperature of the main heat treatment and additional heat treatment. It is investigated that biocomposite materials with a degree of drying of 20% have a maximum compressive strength of 79.6 MPa. The microstructure of the biocomposite sample of the optimal composition (coffee grounds content in the amount of 200 wt. parts) with a degree of drying of the composition of 20% is also investigated.

Key words: gluten solution, coffee grounds, compressive strength, heat treatment, degree of drying, structure.

Problem statement. Nowadays Today, plastic products based on synthetic binders are very common in the world due to their properties, in particular, the combination of low weight with high strength and corrosion resistance. However, the excessive accumulation of plastic waste creates a serious environmental problem due to the long-term decomposition during disposal and their toxicity. Millions of tons of plastic waste, which is difficult to recycle or utilise, are generated every year. Plastic waste decomposes for hundreds of years, polluting soils and water bodies. Toxic substances are released during the combustion of plastic waste. They harm the atmosphere, polluting the air [1]. This necessitates the development of new alternative materials that are safer for the environment. Biocomposite materials based on natural fibers and natural polymers can partially replace products made of traditional plastic. They decompose faster and have a smaller negative impact on the environment, reducing the carbon footprint. The relevance of the development of biocomposites is due to the strategic priorities of sustainable development, since such materials are environmentally friendly, are made from renewable sources and reduce energy costs [2].

Analysis of recent research and publications. Construction and automotive industries are currently the main areas of introduction of biocomposite materials. However, new promising markets and applications of biocomposite products are emerging as a result of improvements, innovative solutions and increased productivity [3]. The direction of wood composites is of significant economic importance. The direction is rapidly developing in the concept of creating new composites and more in the development of new types of binders for them. There is significant progress in the development of biobased adhesives, caused by external restrictions, in particular, strict conditions of regulatory documents on the reduction and even elimination of formaldehyde and other materials that are toxic. Consumer awareness is no less important, that is the desire of industry to give preference to environmentally friendly materials and reduce or even eliminate its dependence on exhaustible petrochemical products with a subsequent increase in the price of raw materials [4].

The properties of reinforced natural biocomposites are determined by both the characteristics of the filler and the polymer matrix. The properties of biocomposites depend on the type of natural fiber and its modification, the use of modifiers, the ratio of the mass of the filler to the polymer, the manufacturing and processing technology, as well as the efficiency of the interfacial connection between the reinforcing materials and the matrix [5].

Petinakis E et al. [6] investigated composites based on polylactic acid (PLA) and wood flour. They observed that the tensile strength was not significantly improved by increasing the number of wood flour

particles. With the addition of the modifier methylene diphenyl diisocyanate, the mechanical properties of the composites, in particular the tensile strength and Young's modulus, increased by 10% and 135% with increasing wood flour content.

The properties of epoxy composites [7] filled with crushed walnut shells, which are organic waste of agricultural production, were investigated. Composite samples containing 20, 30, 40 and 50 wt. % crushed walnut shells have increased stiffness and hardness compared to epoxy polymers. The introduction of this filler leads to a decrease in the tensile strength and Charpy impact resistance of the composite material. Thermogravimetric analysis has shown that the introduction of crushed walnut shells improves the thermal stability of composite materials.

The authors of [8] developed an environmentally friendly frame for glasses made of recycled coffee grounds, natural oils and a biopolymer based on vegetable oils, which are used as a binder. The glasses are waterproof due to a special type of hydrophobic coating. The biomaterial of the frames decomposes in about 10 years under natural conditions.

In [9], biocomposite samples without delaminations and structural defects were obtained by introducing the optimal content of filler (wood flour), formed by pressing. Biocomposite materials based on starch binder were modified with an aqueous solution of glutin. It was found that the most homogeneous and dense structure of biocomposites is formed at the optimal content of the modifier in the amount of 70 wt. parts, which ensures an increase in the hardness of biocomposite materials.

Compositions of biocomposite materials based on glutin and crushed straw have been developed. It was found that higher degrees of drying of the composition (25%) are advisable to use for biocomposites with lower filler content (140 wt. parts) and, conversely, lower degrees of drying of the composition (20%) are sufficient for biocomposites with higher filler content (150 wt. parts). This is economically advantageous, since the duration of the technological process is reduced, which will lead to a decrease in energy costs. The highest compressive strength of 82.8 MPa is possessed by biocomposites with a filling degree of 150 wt. parts of crushed cereal stalks and a drying degree of 20% of the composition with a glutin solution concentration of 50% [10].

Biocomposite materials with a filler content of 200 wt. parts have a higher compressive strength (75.8 MPa) compared to materials with a lower filler content of 190 wt. parts. The strength of biocomposites increases with a higher filler particle content (200 wt. parts), which is determined by the ability of coffee grounds particles to deform as a result of compression during molding. The optimal density (1.17 g/cm³) provides an additional increase in strength due to the physical and chemical bonds between coffee grounds particles and glutin macromolecules. Coffee bean particles have low mechanical characteristics and are less deformed during pressing under the influence of a specific load of 8 MPa compared to pressing under a pressure of 11 MPa. Therefore, biocomposite materials formed under a pressing pressure of 8 MPa have a higher impact strength of 3.55 kJ/m² [11].

Statement of tasks. The aim of the work is to study the mechanical properties and structure of biocomposite materials based on a glutin solution of various concentrations with coffee grounds.

Presentation of the main material. Coffee grounds in the amount of 180-210 wt. parts were used as a filler for biocomposites. An aqueous solution based on bone glue with a concentration of 43% was used as a polymer binder. The pre-dried filler was added to the glutin solution and mixed to obtain a homogeneous composition. The composition was pressed at a temperature of 50-60 °C to a mass loss of 5%, 10%, 15%, 20% and 25%. The composition was placed in a mold and pressed. Next, the samples in the mold were heat treated for 2 hours at a temperature of 150 °C. It is necessary to press the composition after 1 hour of holding time to ensure the density of the material. The biocomposite samples were cooled in the mold in still air at room temperature.

Biocomposite samples filled with coffee grounds in an amount of 180 wt. parts with a drying degree of 10% have a low compressive strength of 9.6 MPa (Fig. 1). This indicates insufficient removal of moisture from the composition during its drying, which prevents the complete structuring of the material. The compressive strength of a biocomposite of this composition increases with an increase in the degree of drying of the composition from 10% to 25%. The compressive strength of biocomposites with a degree of drying of the composition of 15% increases by 4.2 times (40.4 MPa). The compressive strength of biocomposites with a degree of drying of the composition of 20% increases by 5.2 times (50.3 MPa). The compressive strength of biocomposites with a degree of drying of the composition of 25% increases by 6.9 times (66.8 MPa). This indicates an increase in the structuring of biocomposite materials due to the removal of excess moisture that enters the material during its formation.

Biocomposite samples containing 180 wt. parts of coffee grounds contain a large number of small pores that are evenly distributed over the surface. Presumably, these pores are formed during heat treatment due to the removal of excess moisture from the volume of the material. The surface of samples with a degree of drying of the composition of 10% and 15% is uneven at the ends with brittle burrs. Biocomposite samples with a higher degree of drying of the composition contain a smaller number of pores on the surface. The surface of the ends and the side surface of biocomposite samples with a degree of drying of the composition of 20% are even, which indicates a high degree of structuring of the high-density biocomposite due to the removal of a larger amount of moisture from the material, which confirms the obtained high strength values. The degree of drying of the composition of 25% is too high, since the edges of the ends have burrs.

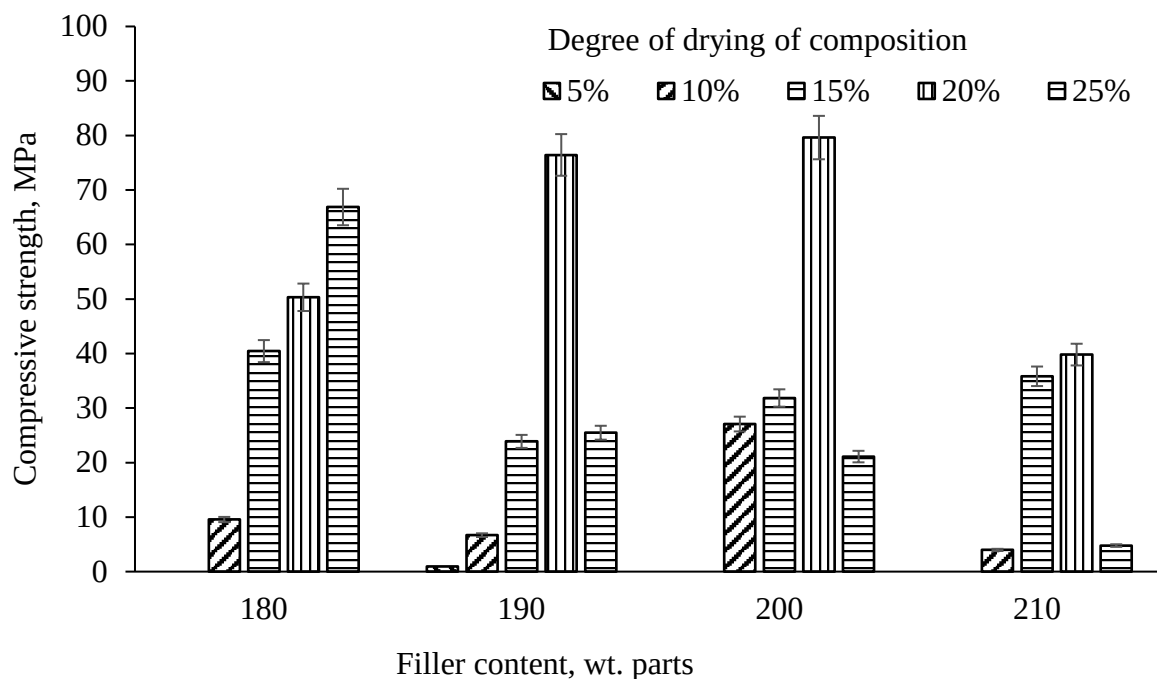


Fig. 1. Compressive strength of biocomposites filled with coffee grounds, depending on the filler content and the degree of drying of the composition

Biocomposites with a content of 190 wt. parts of coffee grounds and a degree of drying of the composition of 5% have the lowest compressive strength of about 1 MPa. These biocomposite samples contain a significant amount of moisture, which does not allow to obtain a material with high strength. The edges on the end of the sample are brittle and uneven, which confirms the low compressive strength of these biocomposites. The compressive strength of biocomposites with a higher degree of drying of the composition of 10% is 6.7 MPa. Higher degrees of drying of the composition up to 15% and 20% allow to increase the compressive strength of biocomposites by 3.5-11.4 times, which is 23.9 MPa and 76.4 MPa, respectively. The compressive strength of biocomposites increases due to the formation of an additional number of physical and chemical bonds in biocomposite materials because excess moisture is removed from the material. The surface of the samples becomes smoother and contains fewer pores as the degree of drying of the composition increases from 5% to 20%.

The biocomposite samples with a composition drying degree of 20% have the smoothest surface. This biocomposite has the highest compressive strength of 76.4 MPa among samples with a content of 190 wt. parts of coffee grounds. The biocomposite sample with a composition drying degree of 25% contains small pores on the side surface. The end surface is uneven. The light brown color of the sample indicates an insufficient content of the biopolymer matrix, as a result of which the biocomposites are brittle. The compressive strength of these biocomposites (25.5 MPa) is 3 times lower compared to the compressive strength of the biocomposite with a composition drying degree of 20% (76.4 MPa). Therefore, drying the composition to a degree of 25% with a high filler content is impractical.

The compressive strength of biocomposites filled with 200 wt. parts of coffee grounds with a degree of drying of the composition of 10% is 27.1 MPa. The compressive strength increases with an increase in the degree of drying of the composition from 10% to 20% and decreases with a degree of drying of the composition of 25%. The compressive strength of biocomposites with a degree of drying of 15% is higher by 15% compared to a degree of drying of 10% and is 31.8 MPa. Biocomposites with a degree of drying of

20% have a maximum compressive strength of 79.6 MPa. Increasing the degree of drying of a highly filled composition is not advisable, since the compressive strength of biocomposites decrease by 2 times (39.8 MPa).

Biocomposite samples with a higher filler content (200 wt. parts) have high strength (79.6 MPa). The surface of these samples with a higher degree of drying of the composition (20%) is smooth without visible structural defects in the form of pores. The degree of drying of the composition of 25% is too high and does not allow obtaining high-strength biocomposites. In this case, the binder content in the composition is insufficient, which causes the formation of microcracks and complicates the structuring of the biocomposite material.

The lowest compressive strength of 4.0 MPa is possessed by biocomposites filled with 210 wt. parts of coffee grounds with a low degree of drying of 10%. The lateral surface of the sample is uneven, since there is a burr on the end of the sample due to an excess of binder. The compressive strength of biocomposites increases by 9 times (35.8 MPa) with an increase in the degree of drying of the composition to 15%. Increasing the degree of drying of the composition to 20% allows obtaining biocomposites with a compressive strength of 39.8 MPa, which is 12% higher compared to the compressive strength of biocomposite materials with a degree of drying of the composition of 15%. The surfaces of biocomposite samples with degrees of drying of the composition of 15% and 20% are smooth, which indicates a high hardness of the material.

Biocomposites with a composition drying degree of 25% have a compressive strength lower by 8.3 times (4.8 MPa). These results of compressive strength at a given composition drying degree (25%) are significantly lower compared to the compressive strength of biocomposites filled with 190 wt. parts and 200 wt. parts. The side surface of the biocomposite sample is smooth, without macroscopic defects. A developed surface relief formed by coffee grounds particles was recorded on the end of the sample. This indicates an insufficient amount of binder for a given filler content in the composition and a lower degree of structuring.

Therefore, the next stage of optimizing the technology for forming biocomposites was to establish the optimal concentration of the glutin solution. Biocomposite samples were formed with different concentrations of the solution: 50%, 46%, 43%. The content of coffee grounds was chosen to be 200 wt. parts, since biocomposite materials with a given filler content have the highest values of compressive strength. The density of biocomposite materials was 1.17 g/cm³ and 1.38 g/cm³. It was found that the compressive strength of the developed biocomposites decreases with a decrease in the concentration of bone glue in the aqueous solution of the matrix (Fig. 2). Among biocomposites with a composition density in the mold of 1.17 g/cm³, biocomposites based on a glutin solution with a concentration of 50% have the highest compressive strength of 73.2 MPa. Compressive strength of biocomposites decreases by 9% with a decrease in glutin concentration to 46% (66.9 MPa). Reducing glutin concentration to 43% leads to an additional decrease in the compressive strength of biocomposites (58.9 MPa) by 24% and 14% compared to biocomposites based on glutin solution with a concentration of 50% and 46%, respectively. The decrease in compressive strength of biocomposites is associated with a decrease in the quantitative content of bone glue and an increase in the quantitative content of water, the excess of which in the material prevents the structuring of the material.

Among the developed biocomposites with a density of 1.38 g/cm³, the highest compressive strength of 74.8 MPa is possessed by biocomposite materials also with a glutin solution concentration of 50%. With a decrease in the glutin solution concentration to 46%, the compressive strength of biocomposites decreases by 17% (63.7 MPa). A further decrease in the glutin solution concentration to 43% leads to an additional decrease in the compressive strength (63.1 MPa) of biocomposites by 19% and 1% compared to biocomposites based on glutin solution with a concentration of 50% and 46%, respectively. Biocomposites filled with 200 wt. parts of coffee grounds with a glutin solution concentration of 50% and a composition density of 1.38 g/cm³ have a 2% higher compressive strength of 74.8 MPa compared to biocomposites with a glutin solution concentration of 50% and a composition density of 1.17 g/cm³.

It is proposed to reduce the temperature to 100 °C or 120 °C in order to optimize the heat treatment. It was found that the compressive strength of biocomposites increases with a decrease in the glutin concentration from 50% to 43%. Biocomposites with a glutin solution concentration of 50%, for which heat treatment was carried out at temperatures of 100 °C and 120 °C, have the lowest compressive strength values of 5.4 MPa and 9.6 MPa (Fig. 3), respectively.

Biocomposites with a glutin concentration of 46%, which were heat treated at temperatures of 100 °C and 120 °C, have 2.2 times higher values of compressive strength of 11.9 MPa and 20.7 MPa,

respectively. Biocomposites with a gluten concentration of 43%, which were heat treated at temperatures of 100 °C and 120 °C, have the highest values of compressive strength (2.3-3.6 times higher than the previous ones) of 42.9 MPa and 47.8 MPa, respectively. However, these values of compressive strength are 1.6-1.7 times lower compared to the maximum value of compressive strength (74.8 MPa) of biocomposites with a gluten concentration of 50% and a composition density of 1.38 g/m³, which were subjected to heat treatment at a temperature of 150 °C for 2 hours. Therefore, reducing the heat treatment temperature to 100 °C and 120 °C is not advisable, since at a higher temperature of 150 °C, a greater number of physical and chemical bonds are formed between the biopolymer matrix and the filler.

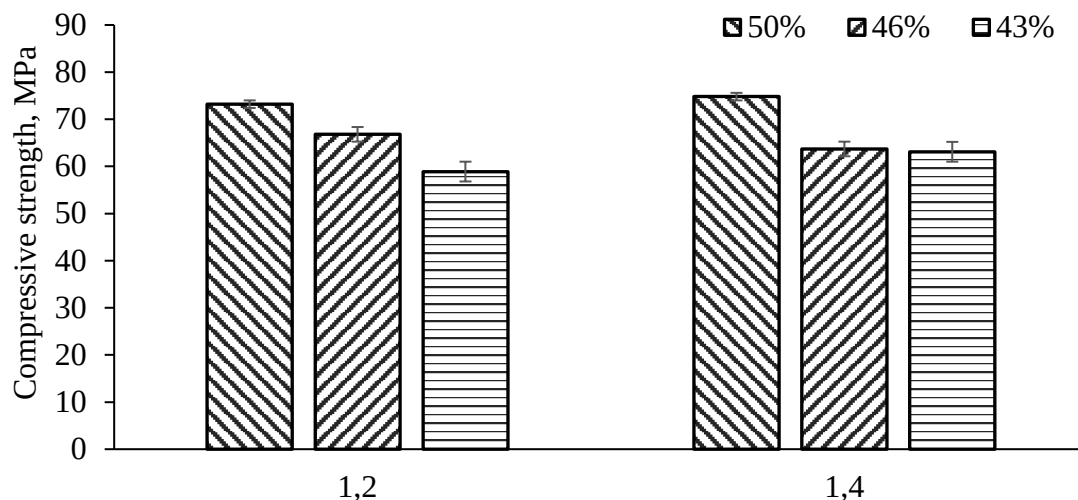


Fig. 2. Compressive strength of biocomposites depending on the concentration of gluten solution and the density of the composition (1.2 g/cm³ and 1.4 g/cm³)

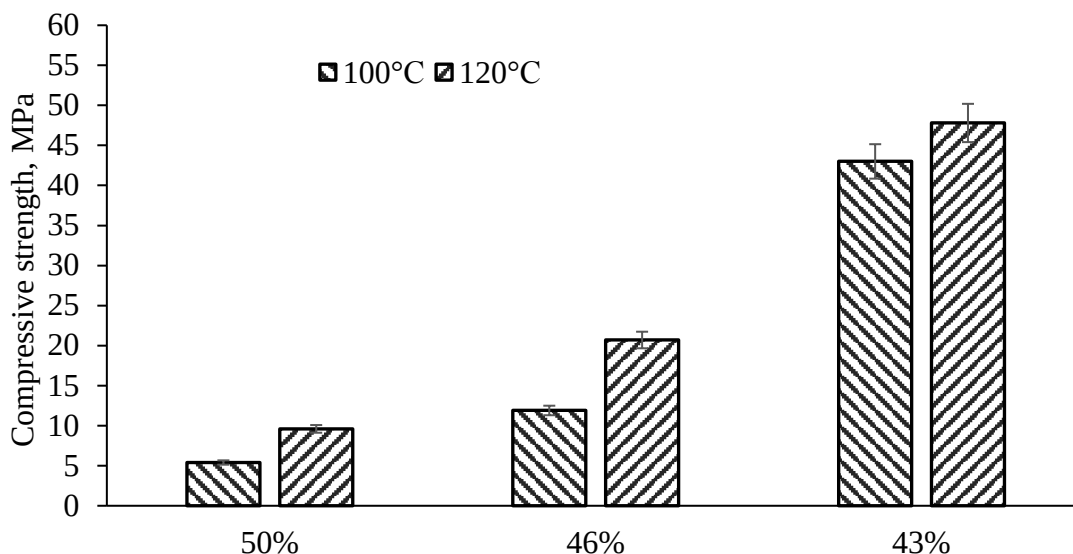


Fig. 3. Compressive strength of biocomposites depending on the concentration of gluten solution and the temperature of the main heat treatment

Structural defects in the form of small cracks are present on the side surfaces of the biocomposites (Fig. 4, a, b, d, e). These cracks are formed as a result of the elastic aftereffect after removing the samples from the molds. The presence of cracks facilitates the destruction of the materials and explains the obtained low values of the compressive strength of the biocomposites with a gluten concentration of 50% and 46%, which were subjected to heat treatment at temperatures of 120 °C and 150 °C with a holding time of 2 hours.

No cracks were detected on the surfaces of biocomposites with a gluten concentration of 43% (Fig. 4, c, f). This explains the higher values of compressive strength obtained for these biocomposites compared to biocomposite samples with a gluten concentration of 50% and 46%. The higher values of compressive strength of biocomposites with a lower gluten concentration of 43% can be explained by the better interaction of the components with each other during their mixing due to the lower viscosity of the

biopolymer binder. As a result, a greater number of bonds are formed between the components. Also, cracks are not formed due to the elastic aftereffect of the material.

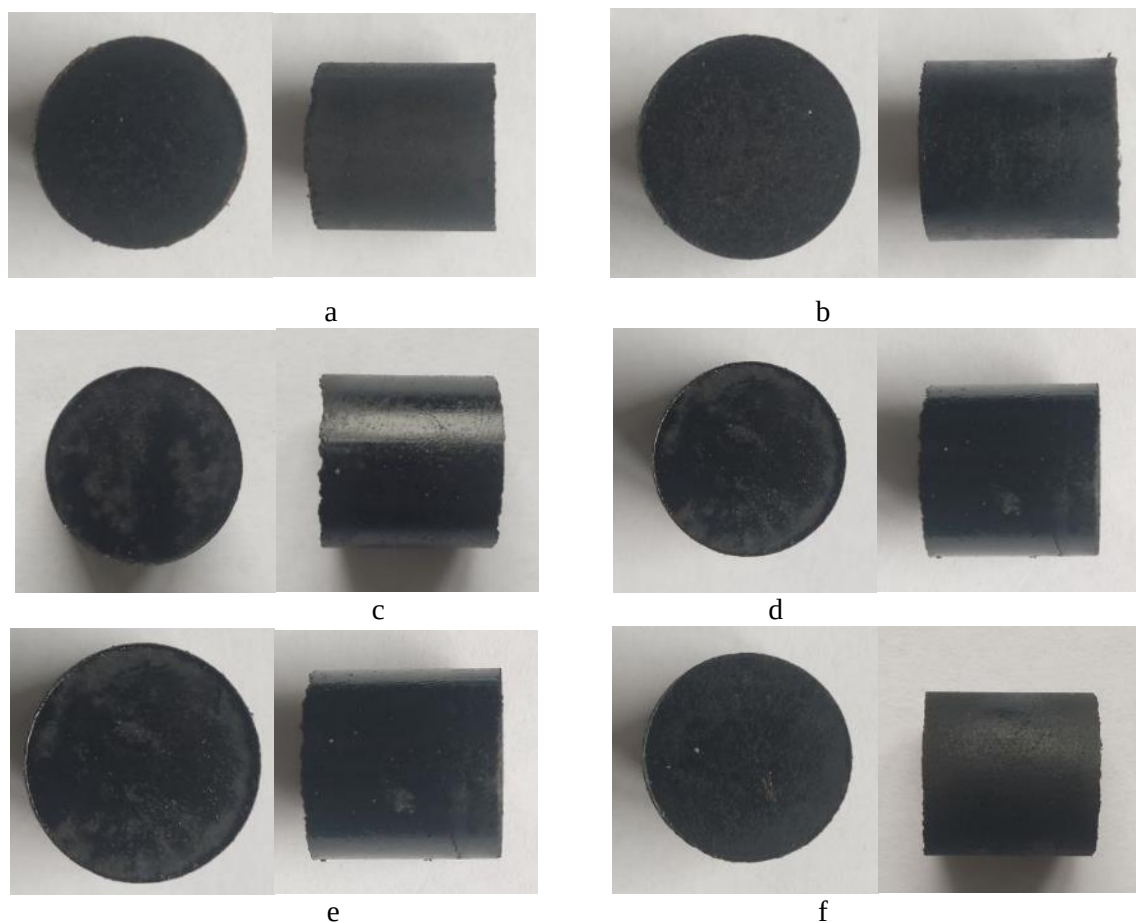


**Fig. 4. General appearance of biocomposite samples with a composition density of 1.17 g/m^3 (a-c) and 1.38 g/m^3 (d-f) and different gluten concentrations:
a, d – 50%; b, e – 46%; c, f – 43%**

The next stage was to determine the feasibility of additional heat treatment. Biocomposite materials with a composition density of 1.38 g/m^3 and a gluten solution concentration of 43% were formed. The content of coffee grounds in the biocomposites was 190 wt. parts and 200 wt. parts. The biocomposite samples were subjected to the main heat treatment at a temperature of 150°C with a holding time of 2 hours for biocomposites. The sample was cooled in a mold in still air at room temperature. Then the biocomposite samples were subjected to additional heat treatment at a temperature of 50°C .

It was found that the compressive strength of biocomposites with a coffee grounds content of 190 wt. parts and 200 wt. parts is 23.9 MPa and 62.1 MPa (Fig. 5), respectively. The compressive strength of biocomposites increases by 1.5-21% with an increase in the holding time of the samples from 1 hour to 2 hours. The compressive strength of biocomposites with a filler content of 190 wt. parts and 200 wt. parts is 30.3 MPa and 63.0 MPa, respectively. The subsequent increase in the holding time of biocomposites to 3 hours additionally increases the compressive strength of the side composites by 9-24%, which is 40.6 MPa (190 wt. parts) and 70.1 MPa (200 wt. parts).

The increase in the strength of biocomposites can be explained by the higher structuring of biocomposite materials due to the additional removal of excess moisture. Exposure in a thermal field for 4 hours is inappropriate, since it leads to a slight decrease of 1-5% in the compressive strength of biocomposites with a content of 190 wt. parts and 200 wt. parts (39.8 MPa and 66.9 MPa, respectively). The decrease in the compressive strength of biocomposites can be explained by too high removal of moisture from the materials, resulting in the formation of fewer physical and chemical bonds between the components of the biocomposite material. There are no visible structural defects in the form of pores or cracks on the surface of the biocomposites (Fig. 6). The surfaces are smooth, without pronounced relief.

The microstructure of the biocomposite material based on a 43% glutin solution with a content of 200 wt. parts of coffee grounds, a degree of drying of the composition of 20% and a density of the composition of 1.38 g/cm³ has a pronounced surface relief (Fig. 7, a).

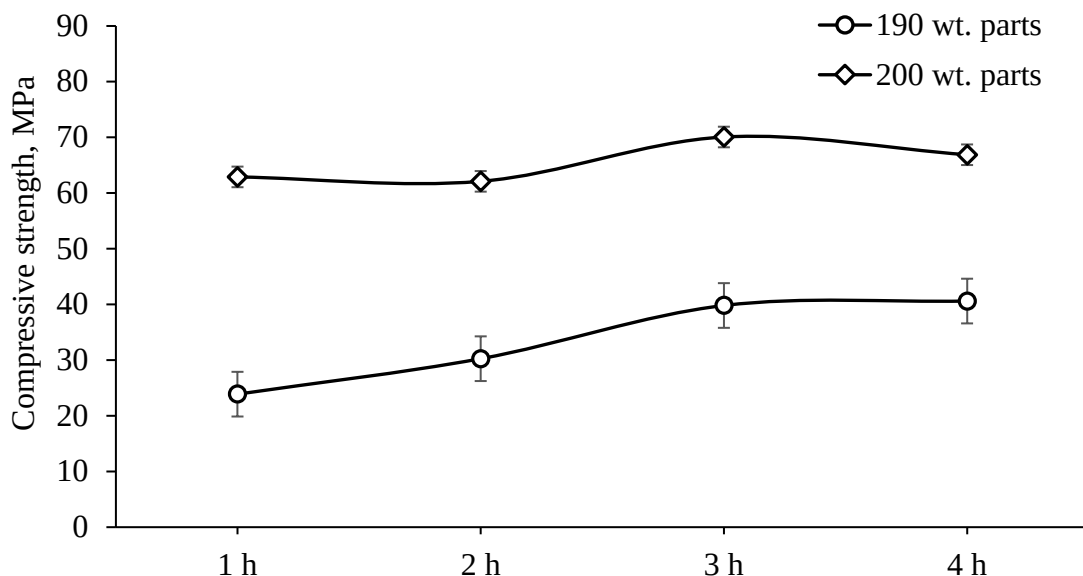


Fig. 5. The effect of additional heat treatment at a temperature of 50 °C on the compressive strength of biocomposites

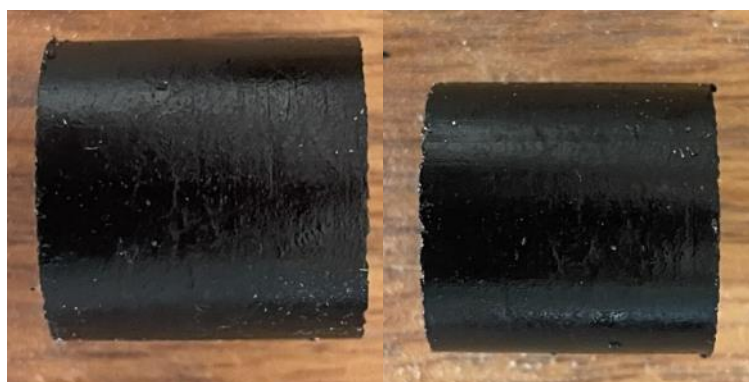


Fig. 6. General appearance of biocomposite samples with an additional heat treatment

The microstructure of the biocomposite material is homogeneous, which indicates high strength and hardness of the material. The coffee ground particles are covered with a biopolymer matrix (Fig. 7, b), which indicates about a high degree of structuring of the biocomposite. Open porosity is observed throughout the entire volume of the material.

Conclusions. It was found that the biocomposite material with a content of 200 wt. parts of coffee grounds and with a degree of drying of the composition of 20% has the highest compressive strength of 79.6 MPa. Biocomposites with a glutin solution concentration of 50% and a composition density of 1.17 g/cm³ and 1.38 g/cm³ have the highest values of compressive strength of 73.2 MPa and 74.8 MPa, respectively.

Among the biocomposites that were heat treated at lower temperatures of 100 °C and 120 °C, the highest values of compressive strength of 42.9 MPa and 47.8 MPa, respectively, are obtained for biocomposites with a glutin concentration of 43% compared to biocomposites with a glutin solution concentration of 46% and 43%. However, these values of compressive strength are 1.6-1.7 times lower compared to the maximum compressive strength (74.8 MPa) of biocomposites with a glutin concentration of 50%, which were subjected to heat treatment at 150 °C for 2 hours. Therefore, reducing the heat treatment temperature to 100 °C and 120 °C is not advisable, since a greater number of physicochemical bonds are formed between the biopolymer matrix and the filler at a higher temperature of 150 °C, which indicates a higher degree of structuring of these biocomposite materials. Carrying out additional heat treatment with holding the biocomposites in a thermal field for 3 hours additionally increases their compressive strength

by 9-24%, which is 40.6 MPa and 70.1 MPa for a coffee grounds content of 190 wt. parts and 200 wt. parts, respectively. The increase in the strength of biocomposites can be explained by the higher structuring of biocomposite materials due to additional removal of excess moisture. Increasing the holding time to 4 hours is not advisable, since it leads to a slight decrease in the compressive strength of biocomposites.

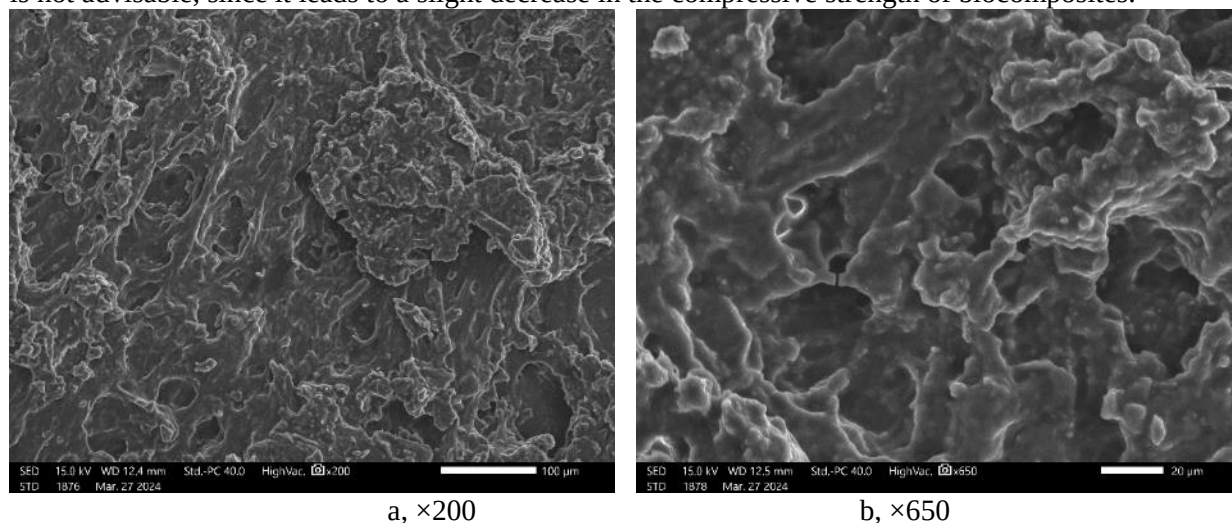


Fig. 7. Microstructure of a biocomposite material filled with coffee grounds in an amount of 200 wt. parts with a degree of drying of the composition of 20%

List of used sources

1. Castro-Dominguez, B., Gröls, J. R., Alkandari, S., Perge, L., Sierra-Avila, C., Zea Ramirez, H., de Lima Fontes, M., Yamada, C., Lazarini, S. C., Silva, J. M., Lustri, W. R., & Barud, H. S. (2025). Biopolymers and biocomposites: A comprehensive review of feedstocks, functionalities, and advanced manufacturing techniques for sustainable applications. *Biotechnology for Sustainable Materials*, 2(8). <https://doi.org/10.1186/s44316-025-00029-y>
2. Bălțatu, M. S., Vizureanu, P., Sandu, A. V., Achitei, D. C., Burduhos Nergis, D. D., Perju, M. C., & Nabiałek, M. (2025). Biocomposites: Materials, Properties, and Applications. In P. Vizureanu (Ed.), *Composite Materials – Science and Engineering*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1010197>
3. Bhat K. M., Rajagopalan J., Mallikarjunaiah R., Rao N. N., Sharma A. (2021). Eco-Friendly and Biodegradable Green Composites. [10.5772/intechopen.98687](https://doi.org/10.5772/intechopen.98687)
4. Pizzi A., Papadopoulos A. N., Policardi F. (2020). Wood Composites and Their Polymer Binders. *Polymers* (Basel), 12(5), 1115.
5. Mahmuda A., Uddin Md H., Tania I.S. (2022). Biocomposites based on natural fibers and polymers: A review on properties and potential applications, 41(17-18). <https://doi.org/10.1177/07316844211070609>
6. Petinakis E., Yu L., Edward G., et al. (2009). Effect of matrix–particle interfacial adhesion on the mechanical properties of poly(lactic acid)/wood-flour micro-composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 17, 83-94.
7. Salasinska K., Barczewski M., Górny R., et al. (2018). Evaluation of highly filled epoxy composites modified with walnut shell waste filler. *Polymer Bulletin*, 75, 2511-2528. <https://doi.org/10.1007/s00289-017-2163-3>
8. <https://jm.snau.edu.ua/2022/11/10/ochis-coffee-ekologichni-kavovi-okuljari-abo-jak-pobuduvati-biznes-na-resajklingu/>
9. Кашицький В.П., Садова О.Л., Савчук П.П., Малець В.М., Мазурок В.С., Мисковець С.В. (2021). Оптимізація складу та технології формування біокомпозитів на основі крохмального в'язучого. *Наукові нотатки*, 71, 353-359.
10. Sadova O., Vyshynskiy M. Study of mechanical properties and structure of biomposites filled with chopped stalks of cereals crops // *Наукові нотатки. – Випуск 79. – Луцьк, 2024. – С. 16-22.* DOI: <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2024.79.2>
11. Kashytskyi, V., Sadova, O., Vyshynskiy M., Shehynskiy O., Marchuk N. (2024). Development of glutinous biocomposite materials filled with coffee grounds. *Commodity Bulletin*, 17(2), 72-81. DOI: <https://doi.org/10.62763/cb/2.2024.72>

В.Л. Закревський, О.С. Приходько
Луцький національний технічний університет

РОЗРОБКА АДАПТИВНОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ БПЛА НА ОСНОВІ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ ТА ДОМЕННОЇ РАНДОМІЗАЦІЇ

У роботі розглядається проблема створення адаптивної системи керування безпілотним літальним апаратом (БПЛА) для роботи в умовах стохастичної невизначеності. Запропоновано підхід на основі алгоритму Proximal Policy Optimization (PPO) із застосуванням стратегії доменної рандомізації параметрів середовища. Розроблено структуру нейронної мережі та функцію винагороди, що забезпечують баланс між точністю навігації та енергоефективністю. Розроблений контролер продемонстрував здатність адаптуватися до змін маси корисного навантаження (до 20%) та зовнішніх вітрових збурень без необхідності ручного переналаштування коефіцієнтів. Результати порівняльного моделювання підтверджують перевагу запропонованого методу над класичним ПІД-регулятором: час стабілізації зменшено в 1.5 рази, а максимальне відхилення при збуреннях – на 40%.

Ключові слова: БПЛА, навчання з підкріпленням, PPO, адаптивний контролер, доменна рандомізація, динаміка польоту

V.L. Zakrevskiy, O.S. Prykhodko

DEVELOPMENT OF AN ADAPTIVE UAV CONTROL METHOD BASED ON DEEP REINFORCEMENT LEARNING AND DOMAIN RANDOMIZATION

The paper addresses the problem of creating an adaptive control system for an unmanned aerial vehicle (UAV) to operate under conditions of stochastic uncertainty. An approach based on the Proximal Policy Optimization (PPO) algorithm using a domain randomization strategy for environmental parameters is proposed. A neural network structure and a reward function have been developed to ensure a balance between navigation accuracy and energy efficiency. The developed controller demonstrated the ability to adapt to payload mass changes (up to 20%) and external wind disturbances without the need for manual coefficient retuning. Comparative simulation results confirm the advantage of the proposed method over a classical PID controller: stabilization time is reduced by 1.5 times, and maximum deviation during disturbances is reduced by 40%.

Keywords: UAV, reinforcement learning, PPO, adaptive control, domain randomization, flight dynamics

Introduction and problem statement. The rapid development of unmanned aircraft systems requires the improvement of control algorithms capable of ensuring reliable vehicle operation in complex conditions. Modern UAVs are used for cargo delivery, infrastructure monitoring, and rescue operations, where accuracy and reliability are critical. Classical automatic control methods, such as PID controllers or Linear Quadratic Regulators (LQR), demonstrate high effectiveness in deterministic environments with known and invariant model parameters. However, under real operating conditions, UAVs face unpredictable factors: sudden wind gusts, aerodynamic effects near obstacles, mass changes during cargo drop or lifting, and propulsion system degradation. Traditional linear regulators, tuned to a nominal operating point, often prove unable to compensate for such significant nonlinear disturbances without a complex adaptive overlay or real-time system identification, which requires significant computational resources. An urgent scientific task is the development of control methods that combine flight task execution accuracy with a high level of adaptability (robustness) by utilizing the potential of modern machine learning methods, particularly Reinforcement Learning (RL), which allows an agent to independently form an optimal control strategy based on experience interacting with the environment.

Analysis of the latest research and publications. The current state of research in the field of intelligent UAV control is characterized by a variety of Reinforcement Learning (RL) integration architectures, driven by high dynamics nonlinearity, the presence of external disturbances, and limited vehicle energy resources [1-3].

Paper [4] proposes a direct neural network control architecture, where the agent generates control signals for the motors, while stability against external influences, such as wind, is ensured by an additional state observer. Similar approaches are actively researched in the context of applying model-free RL algorithms for continuous state and action spaces, particularly PPO and SAC, which demonstrate high training stability [1]. A drawback of this class of methods remains the dependence on disturbance estimation accuracy and the complexity of transferring trained policies from simulation to the real environment.

An alternative approach, known as "residual control," is discussed in study [5]. The authors propose supplementing the classical control loop with an RL agent that compensates for unmodeled dynamics. Such integration allows combining RL adaptability with the guaranteed stability of classical control methods, which is relevant for tasks with strict constraints on power consumption and computational resources [2]. At the same time, the base controller may limit the system's maneuverability.

Study [6] focuses on universality by using a dynamics encoder based on deep neural networks. The application of scale-aware domain randomization allows a single policy to control UAVs of different configurations, which aligns with modern approaches to increasing the generalization capability of RL controllers and reducing the Sim-to-Real gap [7]. This method opens the way for creating controllers that are less dependent on a specific hardware platform.

Hybrid approaches described in work [8] propose a mechanism for mixing control signals from a classical regulator and an RL policy. Training with domain randomization ensures adaptability, while the classical component guarantees basic stability, combining the advantages of both paradigms, as confirmed by the successful application of RL in UAV energy efficiency optimization and safe navigation tasks [1, 7].

The aim of the study. The aim of the study is the development, software implementation, and experimental verification of an adaptive quadcopter attitude control algorithm based on the deep reinforcement learning method PPO. The main tasks include synthesizing the neural network architecture, developing a reward function for flight stabilization, and ensuring the controller's robustness to changes in the vehicle's inertial characteristics and external wind disturbances.

Experimental methodology. To achieve the set goal, the mathematical apparatus of Markov Decision Processes (MDP) was used. The control task is formalized as a tuple (S, A, P, R, γ) . The state space S is continuous and includes 15 components: position vector $p \in \mathbb{R}^3$, linear velocity vector $v \in \mathbb{R}^3$, Euler angles (roll, pitch, yaw) $\alpha \in \mathbb{R}^3$, angular velocities $\omega \in \mathbb{R}^3$, and the relative target position vector $p_{target} - p$. The action space A consists of four continuous values $u \in [0, 1]^4$ corresponding to the normalized thrust of each of the four quadcopter rotors.

Proximal Policy Optimization (PPO) was chosen as the main training algorithm. This algorithm belongs to the Actor-Critic family of methods and utilizes a policy update step constraint (clipping), which prevents training destabilization during sharp changes in neural network weights. Training was conducted in the PyBullet physical simulator, which ensures high-accuracy modeling of rigid body dynamics.

A key methodological element for ensuring adaptability is the domain randomization strategy. During training, simulation environment parameters were varied at the beginning of each episode according to a normal distribution:

- UAV mass (m): $m \sim \mathcal{N}(m_{nom}, 0.2m_{nom})$;
- Inertia tensor (I): $I \sim \mathcal{N}(I_{nom}, 0.1I_{nom})$;
- External disturbances: random wind force vectors F_{wind} with an intensity of up to 5 N.

Presentation of the main research material. The architecture of the developed system includes two neural networks: the Actor (policy) network and the Critic (value) network. Both networks are Multilayer Perceptrons (MLP) with two hidden layers of 256 neurons each. $Tanh$ was used as the activation function, providing nonlinearity and bounded output signals.

A critical development stage was the construction of the reward function, which defines the agent's behavior. It is designed as a weighted sum of components:

$$R_t = R_{pos} + R_{stab} + R_{act} + R_{term},$$

where:

$$R_{pos} = -w_d \|p_t - p_{target}\| - \text{penalty for deviation from the target};$$

$R_{stab} = -w_a (\|\omega_t\|^2 + \|\alpha_{roll, pitch}\|^2) - \text{penalty for instability (large tilt angles and angular velocities), which prevents oscillations};$

$R_{act} = -w_u \|u_{t-1} - u_t\|^2 - \text{penalty for sharp changes in control signals, promoting control smoothness and reducing motor wear};$

R_{term} – a large penalty for crashing or moving outside the operating zone.

Training was conducted over 2 million simulation steps. PPO algorithm hyperparameters: learning rate = $3 \cdot 10^{-4}$, $\gamma = 0.99$, clip range = 0.2. Three characteristic phases are observed in the learning curve graph (Fig. 1).

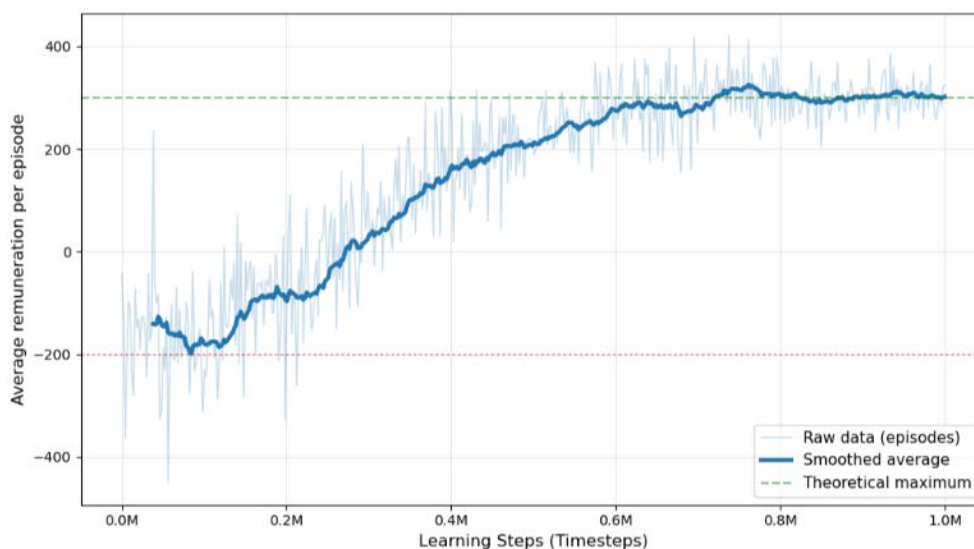


Fig. 1. RL model learning curve graph

The first phase (0 – 500k steps) is characterized by high reward variance, corresponding to the environment exploration stage. The second phase (500k – 1.5m steps) demonstrates rapid growth in average reward, indicating the formation of an effective stabilization policy. In the third phase, the curve plateaus, confirming the algorithm's convergence to an optimal strategy.

Results. Experimental verification of the developed RL controller was conducted through comparative analysis with a reference PID regulator tuned using the Ziegler-Nichols method for the nominal vehicle mass. A series of tests was conducted in three scenarios.

1. Target reaching scenario. This experiment evaluated the speed and accuracy of reaching a specified point located 10 meters from the starting position. The graph (Fig. 2) demonstrates how the UAV reaches the target under the control of the PID controller and the RL controller.

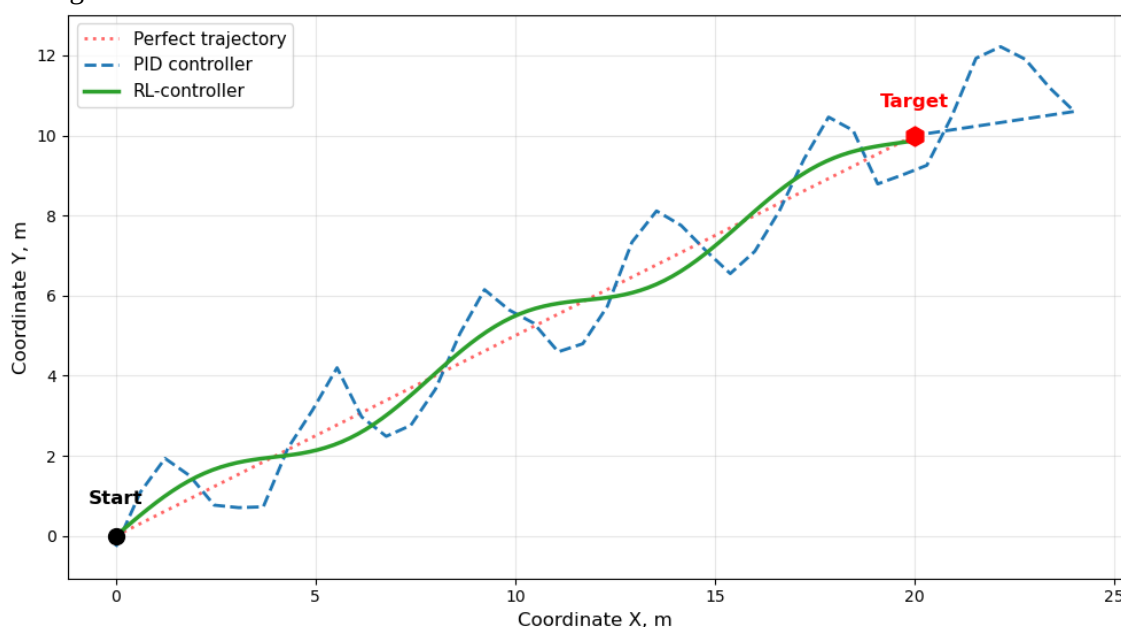


Fig2. Comparison of trajectories in the goal achievement scenario

The presented graphs imply that the RL controller provides better control quality indicators compared to the PID regulator. In particular, the average time to reach the target state decreases by approximately 14%, and the overshoot magnitude is smaller. This indicates the RL agent's formation of smoother and more optimal motion trajectories without pronounced oscillations in the target point vicinity. Additionally, the advantages of the RL controller are confirmed by a lower value of conditional energy consumption, defined as the integral of the sum of squared control signals. In contrast, the PID regulator,

even with correct tuning, is characterized by more aggressive control actions, leading to increased overshoot and higher energy costs.

2. Response to wind disturbance. In this experiment, a constant wind load with a speed of 3 m/s was applied to the UAV in hovering mode at time $t = 5$ s.

The transient process graph (Fig. 3) demonstrates the deviation of the vehicle's coordinates from the target point.

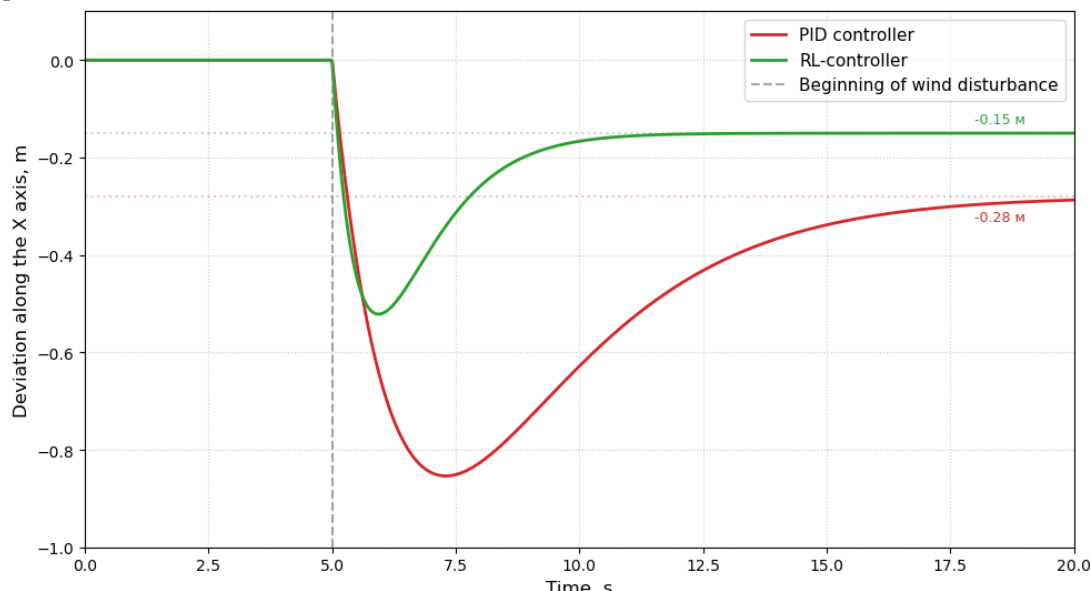


Fig. 3. Comparison of wind disturbance response

It is evident from the graphs that the PID regulator reacts with a delay, allowing a maximum deviation of 0.85 m. The process of returning to the point is accompanied by damped oscillations lasting about 3 s. The static error is 0.28 m. The RL controller demonstrates predictive behavior, minimizing deviation to 0.52 m (a 39% improvement). The transient process time is reduced to 2 s, and the static error is reduced to 0.15 m. This is explained by the neural network having learned to compensate for disturbances by changing the vehicle's angle of attack more aggressively yet precisely.

3. Adaptation to mass change (Fig. 4). The scenario simulates a sudden load change, resulting in an instantaneous mass variation of 20%. The height change graph (Fig. 4) shows the vehicle's subsidence.

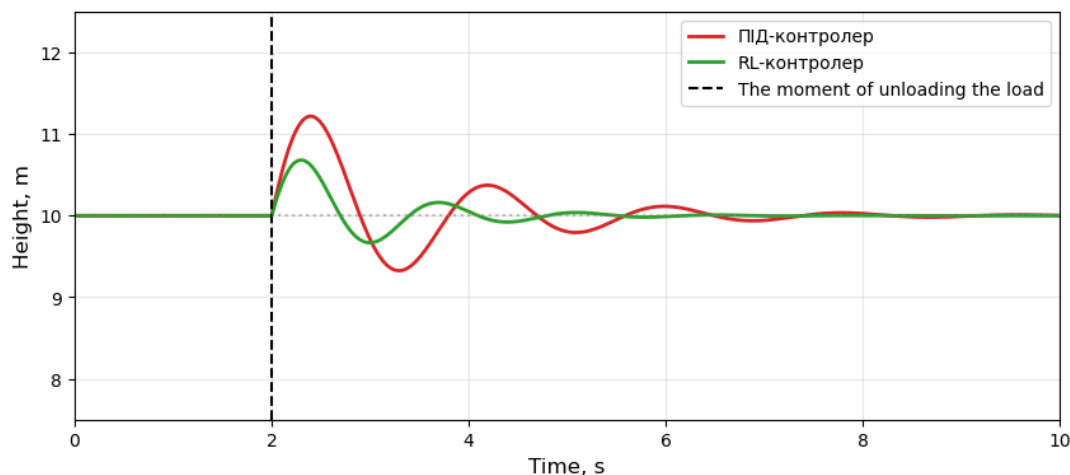


Fig. 4. Response to load drop (height change)

As seen from the figure, the PID regulator demonstrates a deep subsidence of 1.15 m. The regulator's integral component required 4.55 s to accumulate the error and increase thrust to the level necessary for weight compensation. The RL controller detects the discrepancy between the dynamics and the expected model within the first few steps after the mass change. Subsidence was only 0.68 m, and recovery of the set height took 2.91 s. This indicates a higher generalization capability of the trained policy.

Quantitative comparison results are presented in Table 1.

Discussion. The obtained results confirm the effectiveness of applying deep reinforcement learning for adaptive control tasks.

Analysis of transient processes reveals a fundamental difference in the operation of the investigated controllers. The PID regulator is a reactive system that begins to act effectively only after the occurrence of a significant control error. In contrast, the RL agent, trained in an environment with randomized parameters, forms a kind of "intuitive" model of dynamics. It is capable of generating control actions that preemptively prevent the development of significant deviations.

Table 1.

Comparison of controller performance metrics

Metric	PID Controller	RL (PPO) Controller	Improvement
Settling time (mass change), s	4.55 ± 0.31	2.91 ± 0.28	36%
Max deviation (wind), m	0.85 ± 0.11	0.52 ± 0.09	39%
Static error (wind), m	0.28 ± 0.05	0.15 ± 0.04	46%

Energy efficiency is an important aspect. Although the RL controller acts faster, analysis of control signals indicates that it avoids high-frequency thrust oscillations, which frequently occur in PID regulators with high gain coefficients (specifically the D-component). This is achieved by including a penalty for abrupt action changes (R_{act}) in the reward function.

A limitation of the proposed method is the sim-to-real gap. Although domain randomization significantly enhances robustness, deploying the model to a physical controller may require additional fine-tuning on real-world data to compensate for effects that are difficult to model (e.g., complex turbulent flows or communication channel delays). It is also worth noting the high computational cost of the training stage, which, however, is compensated by the high speed of the trained neural network during inference.

Conclusions. The paper presents and investigates an adaptive UAV control algorithm based on reinforcement learning. The use of the PPO algorithm combined with a domain randomization strategy allowed for the synthesis of a control law that surpasses traditional methods in terms of robustness and response speed.

It has been experimentally proven that the proposed approach reduces maximum trajectory deviation under wind loads by 39% and shortens the adaptation time to mass changes by 36% compared to the PID regulator. This makes the developed method promising for application in autonomous logistics and monitoring systems operating in variable weather conditions. Future research will focus on integrating Recurrent Neural Networks (LSTM) to improve the system's memory of past states and account for time delays.

List of references:

1. Wang, Hongpeng, Shangyuan Song, Qianghui Guo, Dian Xu, Xiaoyang Zhang, and Peizhao Wang. "Cooperative motion planning for persistent 3d visual coverage with multiple quadrotor uavs." *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 21, no. 3 (2023): 3374-3383.
2. Sun, Wendi, and Mingrui Hao. "A survey of cooperative path planning for multiple UAVs." In *International Conference on Autonomous Unmanned Systems*, pp. 189-196. Singapore: Springer Singapore, 2021.
3. Sutton R. S., Barto A. G. *Reinforcement Learning: An Introduction*. 2nd ed. URL: <http://incompleteideas.net/book/the-book-2nd.html> (date of access: 10.11.2025)
4. Pi C.-H., Ye W.-Y., Cheng S. Robust Quadrotor Control through Reinforcement Learning with Disturbance Compensation. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 7. P. 3257. URL: <https://doi.org/10.3390/app11073257> (date of access: 14.11.2025).
5. Zhang R., Zhang D., Mueller M. W. ProxFly: Robust Control for Close Proximity Quadcopter Flight via Residual Reinforcement Learning. *arXiv preprint arXiv:2409.13193*, 2024. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.13193>
6. Vaidya V., Keshavan J. Dynamics-Invariant Quadrotor Control using Scale-Aware Deep Reinforcement Learning. *arXiv preprint arXiv:2503.09622*, 2025. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.09622>

7. Omoniwa, Babatunji, Boris Galkin, and Ivana Dusparic. "Communication-enabled deep reinforcement learning to optimise energy-efficiency in UAVassisted networks." *Vehicular Communications* 43 (2023): 100640.
8. Nahrendra I.M.A., Tirtawardhana C., Yu B., Lee E.M., Myung H. Retro-RL: Reinforcing Nominal Controller With Deep Reinforcement Learning for Tilting-Rotor Drones. arXiv preprint arXiv:2207.03124, 2022. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.03124>

Reviewer: Pasternak Yaroslav, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Computer Science and Cybersecurity at Lesya Ukrainka Volyn National University.

В.О. Шейченко¹, Д.О. Петраченко², Д.В. Шейченко¹¹Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна.²Відокремлений структурний підрозділ Глухівський агротехнічний фаховий коледж Сумського національного аграрного університету. м. Глухів, Україна.**ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКЦІЇ ЗАКРИТОГО РОБОЧОГО КОЛЕСА НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОБРУШУВАННЯ НАСІННЯ ПРОМИСЛОВИХ КОНОПЕЛЬ**

У статті досліджено ефективність циклічного обрушування насіння промислових конопель без попереднього калібрування у відцентровому обрушувачі із закритим робочим колесом. За частоти обертання $6000 \pm 200 \text{ хв}^{-1}$ оцінено динаміку недорушу та вихід обрушеного ядра. Встановлено, що для повного обрушування партії насіння необхідно провести п'ять циклів. Для зниження витрат без втрати виходу обґрунтовано доцільність обмеження процесу трьома циклами, що сумарно забезпечує вихід ядра на рівні 29,88%.

Ключові слова: насіння конопель, ядро, відцентровий обрушувач, робоче колесо, ефективність обробки

V. Sheichenko, D. Petrachenko, D. Sheichenko

DETERMINATION OF THE IMPACT OF CLOSED-TYPE IMPELLER DESIGN ON THE EFFICIENCY OF INDUSTRIAL HEMP SEED SHELLING

The article presents the results of a study on the efficiency of the centrifugal dehulling method for industrial hemp seeds using a device equipped with a closed-sector impeller with four profiled radial channels.

At an impeller rotational speed of $6000 \pm 200 \text{ rpm}$, the kernel yield in the first three cycles was 9.27%, 12.75%, and 7.86%, respectively, whereas the fourth and fifth cycles produced only 3.54% and 1.39%. The decrease in yield at later stages is explained by the increased strength of the seed hulls remaining after the previous cycles. The share of unhulled seeds gradually decreased from 71.24% after the first cycle to 1.90% after the fifth.

The results indicate that limiting the number of dehulling cycles to three is advisable, as it significantly reduces operating costs without reducing kernel yield. The geometry of the radial channels ($20 \times 20 \text{ mm}$, 44 mm long), combined with a rotational speed of 6000 rpm, provided sufficient centrifugal acceleration for effective dehulling. Within the tested design, the configuration with four channels was recognized as a technically justified solution for the basic setup.

Keywords: hemp seeds, kernel, centrifugal dehuller, impeller, processing efficiency

Постановка проблеми. У сучасних умовах аграрного виробництва спостерігається зростаючий попит до технологій перероблення насіння промислових конопель як джерела високоякісних харчових та технічних продуктів. Завдяки багатому хімічному складу це насіння знаходить активне застосування у харчовій, фармацевтичній та косметичній промисловості. Водночас центральним етапом технологічного процесу залишається ефективне обрушування насіння, що забезпечує одержання якісних ядер із мінімальними втратами.

Якісне обрушування ускладняється високою варіативністю фізико-механічних властивостей насіння промислових конопель, що залежать від сорту, вологості, ступеня зрілості та морфологічної неоднорідності. Зазначене ускладнює розроблення універсальних технічних рішень. У зв'язку з цим актуальними є конструкції обрушувачів, що здатні ефективно працювати без попереднього калібрування сировини та в умовах змінної вологості.

Відцентровий метод визнано одним із найбільш перспективним технічним рішенням обрушування насіння. У зазначеному методі трансформують кінетичну енергію обертального руху робочого органу в ударне навантаження насіння, яке взаємодіє з відбивною поверхнею. Проте ефективність методу значною мірою залежить від конструкційних параметрів робочого органу (форми, кількості та профілю каналів колеса).

Незважаючи на поширення відцентрових пристроїв, у науковій літературі недостатньо досліджень щодо системного аналізу впливу конструкційних параметрів закритого робочого колеса на ефективність обрушування насіння промислових конопель. Ця обставина стримує створення адаптивних технічних рішень, які могли б ефективно використовуватися на підприємствах малого та середнього бізнесу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Промислове вирощування та переробка насіння конопель стають дедалі актуальнішими, що зумовлено його цінним біохімічним складом [1], який забезпечує високу харчову й функціональну цінність кінцевих продуктів [2]. У сучасній практиці насіння конопель використовують як у натуральному вигляді, так і в перероблених формах: очищених ядрах, олії, білкових та клітковинних концентратах, а також борошні [3]. Серед цих продуктів особливо популярними є очищені від оболонки ядра, що мають підвищену концентрацію поживних речовин та добру біологічну доступність [4].

Якість і вихід ядер значною мірою залежить від типу обладнання, що використовують для обробування насіння. За принципом дії робочих органів виділяють кілька типів лушильних машин з [5]: вальцові, дискові, молоткові, відцентрові та комбіновані. Кожен тип обладнання має специфічні технічні характеристики та по різному взаємодіє з оболонкою насіння. Успішність застосування обладнання залежить від фізико-механічних властивостей насіння, таких як міцність, розмір, вологість та товщина оболонки. Невідповідність параметрів машини властивостям насіння призводить до пошкодження ядер, зменшує вихід продукції та ефективність очищення.

У дослідженні [6] проаналізовано ефективність роторного ударного обробування насіння вівса різних генотипів за варіативних агроєкологічних умов. Автори вказують на суттєвий вплив швидкості обертання ротора на вихід цільного ядра та ступінь лущення. Відзначено оптимальний діапазон швидкостей, за якого досягають балансу між продуктивністю та мінімізацією втрат. Зазначені результати стосуються лише насіння вівса, яке суттєво відрізняється геометричними і механічними властивості від насіння конопель. Крім того, у роботі відсутній аналіз конструкції ударного елемента, що обмежує можливості узагальнення висновків для інших культур.

У роботі [7] досліджено особливості процесу ударного лущення насіння вівса за умов, наближених до виробничих. Автори детально описують залежність між швидкістю обертання ротора й показниками якості лущення: виходом цільних ядер, рівнем руйнування та кількістю недолущених зерен. Відзначено, що внаслідок специфічних фізико-механічних особливостей насіння вівса отримані результати важко безпосередньо застосовувати до обробування насіння промислових конопель.

У роботі [8] досліджено ефективність застосування різних типів лушильних машин для обробки рису та їх вплив на якість кінцевого продукту. Проаналізовано конструкційні параметри обладнання та режимні фактори, які визначають ступінь лущення, кількість битого зерна й фракційний склад готової продукції. У дослідженні розглянуто вальцові, дискові та ударні лушильники, що дозволило порівняти їхню ефективність залежно від конкретних технологічних умов. Результати дають змогу обґрунтувати вибір обладнання для рису, проте безпосередньо перенести ці рекомендації на насіння конопель неможливо внаслідок значних відмінностей в морфологічній структурі та фізико-механічних властивостях.

У роботі [9] наведено результати моделювання та експериментальних досліджень впливу схеми розміщення лопатей робочого колеса машини для лущення фісташок на ефективність процесу. Автори проаналізували вплив кута нахилу та кількості лопатей, а також розмірів горіхів на ступінь лущення та пошкодження ядер. Попри технічну інформативність, отримані висновки мають обмежене застосування до лущення дрібного насіння, зокрема конопель, через суттєві відмінності у формі, масі, щільності та міцності оболонки.

У роботі [10] наведено результати дослідження ефективності лушильної машини зі змінною декою, розробленої для лущення гречки. Конструкція пристрою включає робоче колесо з лопатями та обертову деку конічної форми, що уможливило варіювати параметри впливу на зерно. У процесі експериментів автори встановили залежність між швидкістю обертання ротора, деки та вологості зерна з одного боку, та коефіцієнтами лущення й цілісності ядер – з іншого. Дослідження має значення для вдосконалення лущення гречки, проте результати не можуть бути безпосередньо екстрапольовано на насіння промислових конопель внаслідок відмінностей в морфологічній будові та механічних характеристиках.

У роботі [11] оцінено продуктивність лушильної машини для рису, досліджено вплив сорту, вологості та попередньої підготовки сировини на показники лущення. Автори не навели чітких конструкційних характеристик машини, що обмежує можливість оцінки її адаптивності до насіння інших культур, зокрема конопель.

У роботі [12] досліджено вплив абразивного лущення на насіння зернобобових культур, зокрема сочевиці, нуту, квасолі та гороху. Наведено ефективність процесу залежно від попереднього кондиціонування, типу абразивної поверхні, тривалості обробки та вологості сировини. Представлено як вихід ядер, так і ступінь пошкодження. Відзначено, що за недостатньої вологості або тривалості лущення підвищується частка пошкодженого зерна. Результати дослідження фокусуються виключно на абразивному типі лущення, що передбачає механізм стирання оболонки, який є малоефективним або непридатним для насіння з високою олійністю, як у випадку з коноплями.

У роботі [13] наведено результати розроблення та експериментальних досліджень машини для лущення насіння моринги. Визначено вплив конструкційних та режимних чинників, таких як розмір отвору для подачі насіння, проміжок між ротором і стінкою корпусу, а також частота обертання

ротора, на продуктивність та ступінь лушення. Побудовано регресійні моделі, які дозволяють прогнозувати продуктивність машини. Специфічність культури з досить великим насінням унеможливорює застосовувати зазначені результати для обрушування насіння промислових конопель.

У роботі [14] проаналізовано ефективність різних типів лущильного обладнання для насіння соняшнику, зокрема молоткового, ударного та дискового. Наведено кількісні показники виходу ядер, ступень обрушування та втрати. Акцентовано увагу на важливості підтримання оптимальної швидкості обертання ротора з метою мінімізації втрат.

У роботі [15] наведено спроби створення універсального механізму для обрушування різних зернових культур, таких як спельта, еммер та інші. Проте запропоновані рішення не забезпечили стабільної якості, мали низьку продуктивність і вимагали частого ручного налаштування для кожного нового виду зерна. Такі установки не дозволяли досягти прийнятного ступеня очищення, що обмежувало їхнє застосування у промислових умовах. Відсутність адаптації до фізико-механічних властивостей конкретного насіння призводила до надмірного пошкодження зерна або неповного видалення оболонки.

Відзначено, що універсальні конструкції не здатні забезпечити високих показників ефективності за умов роботи з різними культурами. Для кожного виду зерна доцільним є розроблення спеціального механізму, який врахує його геометричні, структурні та механічні особливості. Саме тому створення ефективного обрушувача для насіння промислових конопель, яке має характерну варіативність розмірів, маси та міцності оболонки, є актуальним та науково обґрунтованим напрямом дослідження.

За результатами проведеного порівняльного аналізу до найбільш ефективних віднесено відцентровий спосіб обрушування насіння промислових конопель, що ґрунтується на принципі ударної взаємодії. Зазначений спосіб уможливорює стабільність роботи обладнання, високий вихід ядер за мінімального ступеня пошкодження за умов уникнення попереднього калібрування сировини. Відзначене підтверджує перспективність подальшого вдосконалення відцентрових конструкцій обрушувачів в напрямку уточнення конструкційних параметрів і режимів роботи для забезпечення оптимального балансу між продуктивністю та якістю продукту.

Постановка завдань. Метою роботи є підвищення ефективності виробництва насіння промислових конопель без попереднього калібрування чи унормування вологості шляхом циклічного обрушування партії робочим колесом закритого типу.

Задачі досліджень:

– встановити вплив циклічного обрушування партії насіння на ефективність руйнування оболонки;

– встановити вплив циклічного обрушування партії насіння на вихід ядра;

Викладення основного матеріалу. Відцентровий обрушувач, у якому реалізовано принцип однократного удару, позитивно зарекомендував себе за умов обрушування насіння промислових конопель [16]. Використання механізму дозволило проводити процес без попереднього калібрування, унормування вологості та одержати 28,0-38,0% готових ядер із засміченістю до 1,0% [17].

Дослідження проведено з метою встановлення ефективності обрушування насіння промислових конопель відцентровим пристроєм із закритим робочим колесом, що має чотири профільні отвори. Кількісно оцінено вихід готових ядер на кожному етапі циклічного обрушування однієї партії насіння, а також визначено доцільну кількість повторних циклів. Науковою гіпотезою відзначено доцільність повторного обрушування недообробленої фракції, проте кількість ефективних циклів потребує встановлення економічно обґрунтованої межі.

У межах дослідження конструкційною основою визначено відцентровий механізм із закритим робочим колесом з чотирма профільними отворами. Визначення впливу циклічної обробки за незмінних параметрах подачі, частоти обертання та геометрії каналів уможливило об'єктивно оцінити ефективність базової конфігурації обрушувача.

Обрушування насіння конопель проводили з використанням розробленого відцентрового пристрою. Пристрій для обрушування (рис. 1-а) містить корпус 1, робоче колесо 2 з каналами, що закріплено на валу електродвигуна 3, закриту робочу камеру 4, відбійну деку 5 з гладкою внутрішньою поверхнею, вивантажувальний лоток 6.

Робоче колесо закритого секторального типу з чотирма профільними отворами (рис. 1-б) містить два диска. Нижній диск глухий, із жорстким з'єднанням на валу. Верхній диск з

центральним завантажувальним отвором діаметром 74 мм. Між дисками формують чотири радіальні отвори квадратного перерізу розміром 20×20 мм і довжиною 44 мм, утворені гіперболічними боковими поверхнями секторів.

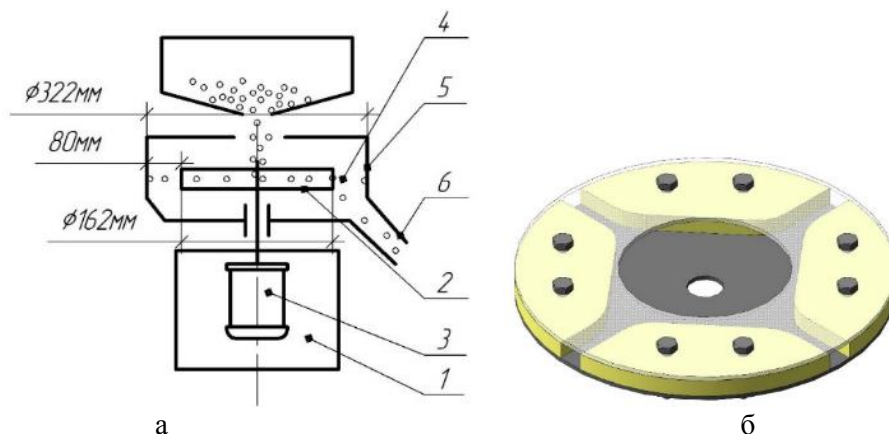


Рис. 1. Схема механізму (а) та робочого колеса (б)

Геометрію робочого колеса прийняли визначальною для забезпечення ефективного прискорення насіння до контактної швидкості. Профільовані отвори з гіперболічною формою бокових поверхонь створювали рівномірне розподілення зусиль на насінини за умов проходження через канал, що сприяло стабільному розгону без завихрень. Квадратна форма поперечного перерізу дозволила уникнути фіксації або обертання насінин під час проходження, що підвищило ймовірність руйнування оболонки при ударі. Довжина отвору та діаметр колеса узгоджені таким чином, щоб максимізувати відцентрове прискорення без перевищення межі руйнівної сили, здатної привести до пошкодження ядра. Завантажувальний отвір забезпечив стабільну подачу насіння у робочий простір, мінімізуючи ймовірність закупорювання каналів.

Частота обертання колеса в досліді становила $6000 \pm 200 \text{ хв}^{-1}$. Насіння подавали зверху через конструкційний отвір у вільному сипучому стані в завантажувальний отвір робочого колеса. Там воно прискорювалося у профільованих каналах і спрямовувалося на внутрішню поверхню відбійної деки, що забезпечувало руйнування оболонки насіння. Ударну взаємодію реалізовували завдяки перетворенню кінетичної енергії насіння, що набувало швидкості під дією відцентрового прискорення, у імпульс контакту з жорсткою поверхнею деки. Унаслідок цього в оболонці виникали локальні напруження, що перевищували межу її міцності, спричиняючи відокремлення ядра.

Для досліджень використовували насіння промислових конопель сорту «Глесія», вирощене у виробничих посівах Інституту луб'яних культур НААН України. Насіння мало наступні показники: вологість 8,4%, засміченість органічними домішками 1,2%, маса 1000 насінин 17,46 г. Зазначені показники відповідали середнім для даного сорту.

Вологість насіння визначали відповідно до стандартної методики (ДСТУ 4138-2002) із використанням лабораторної сушильної шафи. Масу насіння та фракцій рушанки встановлювали зважуванням на електронних вагах з точністю до 0,01 г. Для кожного варіанта обрушування формували наважку масою 1000 г. Кожен експериментальний варіант повторювали п'ять разів з метою забезпечення достовірності результатів.

Обрушування проводили без попереднього калібрування насіння. Початкову пробу масою 1000 г завантажували в пристрій і піддавали обрушуванню (перший цикл). У результаті отримували рушанку: суміш ядер, залишків оболонок і недообрушеного насіння.

Для подальшого розділення фракцій використовували повітряно-решітний сепаратор, який забезпечував відокремлення компонентів рушанки. Після очищення виділяли три основні фракції: 1 – недоручене та пошкоджене насіння; 2 – готові ядра; 3 – відходи.

Недообрушену фракцію повертали на повторне обрушування (другий цикл). Циклічність повторювали доти, поки кількість залишків у вигляді недообрушеного насіння не зменшувалася до 2-4% від початкової маси.

Після завершення кожного циклу обрушування окремо визначали масову частку отриманих ядер, що дозволяло оцінити ефективність кожного окремого етапу. Після виконання всіх циклів результати підсумовували, визначали загальний вихід ядер відносно початкової маси проби.

Зазначений методичний підхід уможливив як кількісно охарактеризувати ефективність кожного циклу, так і встановити сумарну продуктивність обрушування.

Статистичне оброблення результатів здійснювали у програмному середовищі Microsoft Excel з вбудованим модулем «Аналіз даних». Застосовували однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA) для перевірки наявності статистично значущих відмінностей між циклами обрушування. Порівнювали не лише вихід готових ядер, але й частку недорученого насіння. Аналіз здійснювали за рівнем значущості $\alpha = 0,05$. Також перевіряли відповідність вибірових даних нормальному розподілу за критеріями асиметрії та ексцесу. Стандартне відхилення не перевищувало 4% для основних показників.

Контроль точності вимірювань здійснювали за допомогою електронних аналітичних ваг з похибкою не більше $\pm 0,01$ г. Повторюваність дослідів забезпечували шляхом дотримання однакових умов обрушування для кожної серії: постійна маса початкової наважки, стабільна частота обертання робочого колеса, стабільна подача оброблюваної сировини, стабільна вологість насіння, незмінна конфігурація робочого органу. Кожен варіант досліду повторювали п'ять разів, результати фіксували та опрацьовували статистично. Температуру повітря в лабораторному приміщенні підтримували на рівні 25 ± 1 °C.

Змінення кількості недорученого насіння після кожного циклу обрушування наведено на рис. 2.

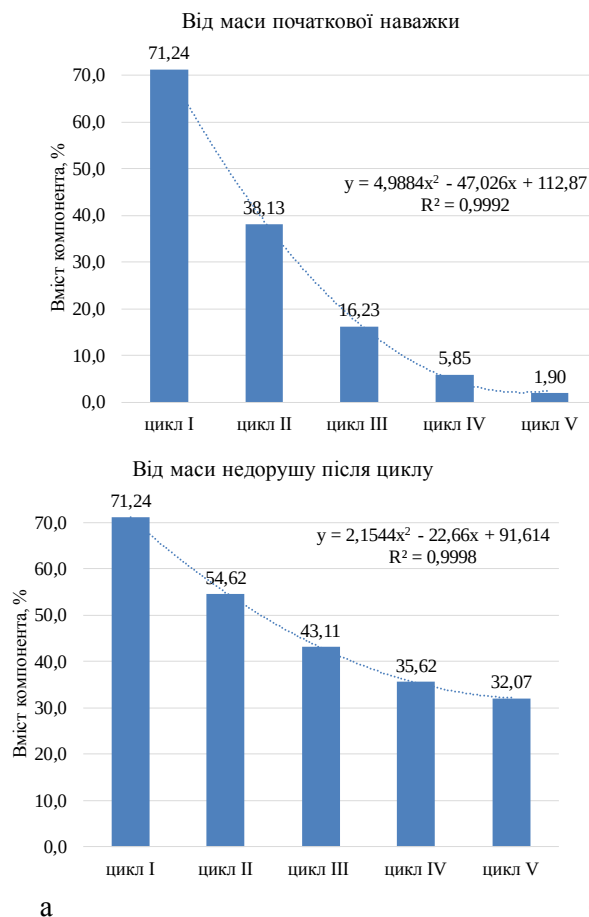


Рис. 2. Змінення кількості недорученого насіння в залежності від маси початкової наважки (а) та від маси недорученого насіння після циклу (б)

У табл. 1 наведено результати статистичного оброблення отриманих даних з визначення кількості недорученого насіння після кожного циклу обрушування.

Наведені у (табл. 1) результати свідчать, що варіація між групами є значно більшою, ніж варіація всередині груп. Це підтверджує наявність суттєвого впливу фактору, що розрізняє групи, на досліджувану змінну. Результати обробки вказують на високу статистичну значущість цих відмінностей.

На рис. 2 наведено залежність змінення кількості недорущеного насіння під час обрешування за п'ять циклів. На рис.2-а – від маси початкової наважки, на рис.2-б – від маси недорущу після кожного циклу. Відповідно до рис.2-а спостерігається значне зменшення залишків недорущу після кожного циклу. Після першого циклу недорущене насіння становило 71,24%. Після другого циклу цей показник зменшився до 38,13%, після третього – до 16,23%, після четвертого – до 5,85%. А після п'ятого циклу залишилося лише 1,90% необробленого насіння від загальної маси партії. Зазначені результати засвідчують загальну тенденцію процесу, – основну частину насіння обрешуено на перших трьох циклах. На пізніх етапах залишалися більш стійкі до механічного впливу та руйнування зерна, що ймовірно зумовлено їх специфічною структурою.

Табл. 1

Статистично оброблені результати досліджень з визначення кількості недорущеного насіння після кожного циклу обрешування

Джерело варіації	SS	df	MS	F	P-значення	F критичне
Між групами	16368,76	4	4092,19	205,2306	6,23E-16	2,866081
В середині груп	398,7896	20	19,93948	-	-	-

Відповідно до рис.2-б, що відображає кількість недорущеного насіння у відсотках від маси недорущу після кожного циклу, відзначено змінення ефективності з урахуванням кожного наступного етапу обробітку. Після першого циклу недорущене насіння становило 71,24% (від початкової маси 100%). Після другого циклу залишилося 54,62% від недорущу (від початкової маси 71,24%). Тобто обробітку не піддалося половина зерен, що не обрешулися на першому етапі. Після третього циклу недорущеними залишилося 43,11% (від початкової маси 54,62%), що відповідає приблизно чвертині від попередньої маси. Після четвертого циклу залишилося 35,62%, що становить близько третини недорущу після третього циклу, а після п'ятого циклу – 32,07%.

Відзначено, що на початкових циклах обрешуванню піддавалися переважно зерна зі слабкою структурою оболонки. На заключних етапах залишалися більш стійкі фракції. Зменшення кількості недорущеного насіння на кожному наступному циклі свідчить про зменшення доступної для обрешування маси, що обмежує ефективність процесу на пізніх етапах.

Змінення кількості обрешуених ядер після кожного циклу наведено на рис. 3.

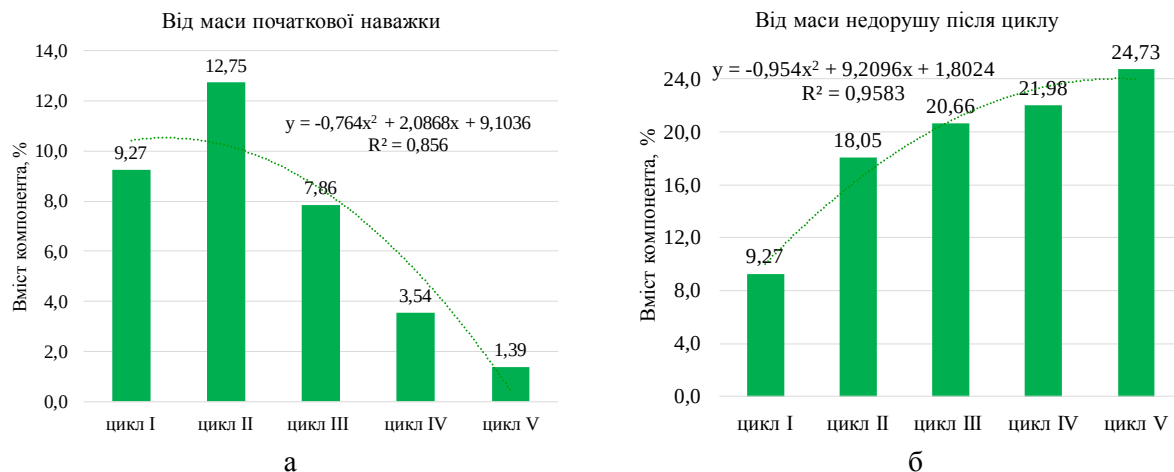


Рис. 3. Змінення кількості ядер за циклами обрешування в залежності від маси початкової наважки (а) та від маси недорущеного насіння після циклу (б)

У табл. 2 наведено результати статистичного оброблення отриманих даних з визначення кількості ядер після кожного циклу обрешування.

Аналізом результатів дослідження (табл. 2) встановлено наявність статистично значущих відмінностей між групами. Отримане значення F-критерію суттєво перевищує критичне, а рівень значущості є набагато меншим за 0,05, що підтверджує достовірність впливу досліджуваного фактора. Варіація між групами істотно перевищує варіацію всередині груп, що свідчить про реальний ефект факторної ознаки.

На рис.3-а наведено результати досліджень з визначення виходу ядер у відсотках від початкової маси. Відзначено поступове зменшення ефективності виділення ядер у кожному наступному циклі. Після першого циклу отримано 9,27% ядер. Після другого циклу – 12,75%, після третього – 7,86%, після четвертого – 3,54%, а після п'ятого циклу – 1,39%, відповідно. Загальний вихід ядер за всі п'ять циклів становив 34,81% від початкової маси.

Табл. 2

Статистично оброблені результати досліджень з визначення кількості недорученого насіння після кожного циклу обрушування

Джерело варіації	SS	df	MS	F	P-значення	F критичне
Між групами	412,0004	4	103,00011	104,2291805	4,2584E ⁻¹³	2,866081
В середині груп	19,76416	20	0,988208	-	-	-

На рис. 3-б наведено вихід ядер у відсотках від маси недоручу після кожного циклу. У першому циклі отримали 9,27% ядер від початкової маси недоручу. На другому циклі цей показник збільшився до 18,05%, на третьому – до 20,66%, на четвертому – до 21,98%, а на п'ятому – до 24,73%, відповідно. Збільшення частки ядер відносно залишків недоручу після кожного циклу свідчить про те, що обрушування стосується все меншої кількості, яка більш доступна для руйнування насіння.

Порівнюючи результати досліджень (рис. 2 та рис. 3) відмітимо взаємозв'язок між ефективністю обрушування та виходом готового продукту. Значна кількість недоручу (71,24%) після першого циклу свідчить про те, що обрушуванню піддається насіння зі слабкою структурою оболонки. Решта насіння залишається недостатньо обробленим внаслідок природньо існуючого нерівномірного механічного впливу, а також значним діапазом коливань механіко-технологічних властивостей насінин. У другому циклі помітне зменшення недорученого матеріалу (38,13%) свідчить про те, що більша частина залишків піддається руйнуванню, оскільки кінетична енергія в цьому випадку більш ефективно спрямована на насіння, яке залишилося. Третій цикл характеризувався зменшенням загальної ефективності обрушування, оскільки залишилося переважно насіння зі стійкою структурою оболонки, яке важко руйнувати за встановлених параметрів процесу. Не зважаючи на те, що частка ядер ще залишалася значною, темпи його приросту поступово зменшувалися. На четвертому та п'ятому циклах обрушуванню піддається мінімальна кількість насіння, а його залишки стають дедалі менш доступними для руйнування внаслідок їхньої підвищеної міцності.

Аналізуючи наведені результати досліджень відмітимо, що основний обсяг ядер виділяли на перших трьох циклах. Застосування встановлених параметрів і режимів роботи обрушувача на подальших циклах характеризувалося низькою продуктивністю. Зазначене вказує на актуальність подальших досліджень направлених на підвищення ефективності технологічного процесу обрушування насіння конопель.

У подальшому перспективним виглядає дослідження змінення кількості каналів або параметрів траєкторії насіння з метою зменшення кількості циклів до двох або трьох без зменшення обсягів загального виходу ядер. Запропоновану методику доцільно адаптувати до інших сортів конопель, за умови уточнення фізико-механічних властивостей насіння.

Висновки. Наведено результати дослідження ефективності відцентрового методу обрушування насіння промислових конопель за допомогою пристрою із робочим колесом закритого секторального типу з чотирма профільними отворами. Встановлено, що обрушування без попереднього калібрування забезпечує загальний вихід ядер на рівні 34,81% із засміченістю не більше 1%.

За частоти обертання робочого колеса $6000 \pm 200 \text{ хв}^{-1}$ вихід ядер на перших трьох циклах становив 9,27%, 12,75% та 7,86% відповідно, тоді як на четвертому та п'ятому циклах – лише 3,54% і 1,39%. Зменшення виходу пов'язане з підвищеною міцністю оболонок залишкових насінин. Частка недообрушеного насіння поступово зменшувалася від 71,24% після першого циклу до 1,90% після п'ятого.

Отримані результати засвідчили доцільність обмеження кількості циклів обрушування до трьох, що в сукупності зменшило експлуатаційні витрати без втрати виходу ядер. Геометрія каналів (20×20 мм, довжина 44 мм) у поєднанні з частотою обертання 6000 об/хв. забезпечили достатній

рівень відцентрового прискорення для ефективного обрешування. У межах досліджуваної конструкції встановлено, що чотири отвори є обґрунтованим технічним рішенням для базового варіанту.

Література

1. Farinon B., Molinari R., Costantini L., Merendino N. (2020), The seed of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.): Nutritional quality and potential functionality for human health and nutrition, *Nutrients*, 12(7), 1935, <https://doi.org/10.3390/nu12071935>
2. José Ignacio Alonso-Esteban, José Pinela, Ana Ćirić, Ricardo C. Calhelha, Marina Soković, Isabel C.F.R. Ferreira, Lillian Barros, Esperanza Torija-Isasa, María de Cortes Sánchez-Mata. (2022). Chemical composition and biological activities of whole and dehulled hemp (*Cannabis sativa* L.) seeds. *Food Chemistry*, Volume 374, 2022, 131754. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131754>.
3. Oseyko M., Sova N., Yefimov V., Petrachenko D. (2024), Chemical composition of seeds of industrial Ukrainian hemp varieties, *Ukrainian Food Journal*, 13(3), pp. 542–556, <https://doi.org/10.24263/2304-974X-2024-13-3-8>
4. Montero Lidia, Ballesteros-Vivas Diego, Gonzalez-Barrios Andrés Fernando, Sánchez-Camargo Andrea del Pilar. (2023). Hemp seeds: Nutritional value, associated bioactivities and the potential food applications in the Colombian context. *Frontiers in Nutrition*, V. 9. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.1039180>
5. Kabir, A. A., and Fedele, O. K. (2018). A Review of Shelling, Threshing, De-Hulling and Decorticating Machines. *Journal of Agricultural Research*, 3(1), pp. 1–10, <https://doi.org/10.23880/oajar-16000148>.
6. Baker, A., Dwyer-Joyce, R. S., Briggs, C., and Brockfeld, M. (2012). Effect of different rubber materials on husking dynamics of paddy rice. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 226(6), pp. 516–528, <https://doi.org/10.1177/1350650111435601>
7. Doehlert, D. C., Wiesenborn, D. P., McMullen, M. S., Ohm, J.-B., and Riveland, N. R. (2009). Effects of impact dehuller rotor speed on dehulling characteristics of diverse oat genotypes grown in different environments. *Cereal Chemistry*, 86(6), 653–660, <https://doi.org/10.1094/CCEM-86-6-0653>.
8. Yehia, M. E., and Katab, A. R. (2018). Effect of hulling machines on hulling characteristics and quality of rice grains. *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 35(1), 259–274, <https://doi.org/10.21608/mjae.2018.95604>.
9. Khodabakhshian, R., and Bayati, M. R. (2011). Investigation into the effects of impeller vane patterns and pistachio nut size on hulling efficiency of pistachio nuts using a centrifugal huller. *Journal of Food Processing & Technology*, 2, 115, <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000115>.
10. Dmitriev, A., Ziganshin, B., Khaliullin, D., and Aleshkin, A. (2020). Study of efficiency of peeling machine with variable deck. *Engineering for Rural Development*, 19, Jelgava, Latvia, pp. 1053–1058, <https://doi.org/10.22616/ERDev.2020.19.TF249>.
11. Dauda, S. M., Adeoye, P. A., Bello, K., and Agboola, A. A. (2012). Performance evaluation of a locally developed rice dehulling machine. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research*, 2(1), 15–21.
12. Dave Oomah B. (2006). Factors Affecting the Efficiency of Abrasive Type Dehulling of Grain Legumes Investigated with a New Intermediate-Sized, Batch Dehuller. *Journal of Food Science*, 49(1), 267–272. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1984.tb13723>.
13. Fakayode, O. A., and Akpan, J. F. (2020). Development, Testing and Optimization of a Moringa (*Moringa oleifera*) Seed Dehuller. *Agricultural Research*, 9(2), pp. 249–261, <https://doi.org/10.1007/s40003-019-00426-6>.
14. Romanic R. S., and Luzaic, T. Z. (2022). Dehulling Effectiveness of High-Oleic and Linoleic Sunflower Oilseeds Using Air-Jet Impact Dehuller: A Comparative Study. *Food Science and Technology (Campinas)*, 42, e58620, <https://doi.org/10.1590/fst.58620>.
15. Baker, B. (2015). Dehulling ancient grains: economic considerations and equipment. Retrieved January 08, 2025, from <https://eorganic.org/node/13028>
16. Sheichenko, V., Petrachenko, D., Koropchenko, S., Rogovskii, I., Gorbenko, O., Volianskyi, M., Sheichenko, D. (2024). Substantiating the rational parameters and operation modes for the hemp seed centrifugal dehuller. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (1 (128)), 34–48. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300174>
17. Sheichenko, V., Petrachenko, D., Rogovskii, I., Dudnikov, I., Shevchuk, V., Sheichenko, D., Derkach, O., Shatrov, R. (2024-2). Determining patterns in the separation of hemp seed hulls. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (1 (130)), 54–68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309869>

Н.Р. Печончик, О.С. Приходько

Луцький національний технічний університет

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ БЕТОНУ

У роботі розглянуто задачу прогнозування міцності бетону на стиск за його складом із використанням методів машинного навчання. На основі відкритого набору даних Concrete Compressive Strength виконано порівняльний аналіз лінійної, поліноміальної регресії, штучних нейронних мереж та ансамблевих методів. Показано, що прості лінійні моделі не здатні адекватно описати складні нелінійні процеси гідратації цементу, тоді як ансамблеві методи забезпечують оптимальне співвідношення точності та стійкості. Найкращий стабільний результат отримано за допомогою алгоритму Random Forest із середньою абсолютною похибкою 3.73 МПа. Окрім цього, шляхом лінеаризації мультиплікативної моделі виведено емпіричну степеневу формулу, придатну для експрес-оцінок міцності без використання обчислювальних засобів. Отримані результати підтверджують доцільність застосування ансамблевих і гібридних підходів для інженерних задач прогнозування властивостей будівельних матеріалів.

Ключові слова: міцність бетону, машинне навчання, регресійний аналіз, Random Forest, нейронні мережі

N.R. Pechonchyk, O.S. Prykhodko

COMPARATIVE ANALYSIS OF MACHINE LEARNING MODELS FOR PREDICTING CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH

This paper addresses the problem of predicting concrete compressive strength based on mixture composition using machine learning methods. A comparative analysis of linear regression, polynomial regression, artificial neural networks, and ensemble learning techniques was conducted using the publicly available Concrete Compressive Strength dataset. The results show that simple linear models are unable to adequately capture the complex non-linear physicochemical processes of cement hydration, while ensemble-based approaches provide a superior balance between accuracy and robustness. The best stable performance was achieved by the Random Forest algorithm, with a mean absolute error of 3.73 MPa. In addition, an empirical power-law formula was derived through linearization of a multiplicative model, enabling approximate strength estimation without computational resources. The findings confirm the effectiveness of ensemble and hybrid modeling approaches for practical engineering applications in construction materials science.

Keywords: concrete compressive strength, machine learning, regression analysis, Random Forest, neural networks

Introduction and problem statement. Concrete is the most widely used construction material worldwide, and its compressive strength is a key parameter governing the quality, reliability, and safety of building structures. Traditionally, compressive strength is determined through destructive laboratory testing of standard specimens, typically performed after 28 days of curing. This inherent time lag poses significant challenges for real-time quality control in concrete production and slows down construction processes.

Moreover, concrete compressive strength is a complex, non-linear function of mixture composition—including cement, water, aggregates, and chemical or mineral admixtures—as well as curing age. Classical empirical relationships, such as Abrams' law or Bolomey's formula, often fail to provide sufficient accuracy for modern multi-component concretes incorporating superplasticizers and supplementary cementitious materials. In this context, the application of machine learning (ML) techniques for *in silico* prediction of concrete properties has emerged as a relevant and promising research direction, offering the potential to replace time-consuming experimental testing with rapid computational estimates.

Analysis of the latest research and publications. The task of predicting concrete compressive strength from mixture proportions is a canonical benchmark problem in regression analysis within construction materials science and machine learning. Contemporary research efforts emphasize not only minimizing prediction error but also improving model interpretability and practical applicability for engineering practice.

In foundational works [1–4], the Concrete Compressive Strength dataset has been extensively used to demonstrate advanced modeling techniques. For example, study [1] proposes an ensemble of predictive intervals to assess reliability of predictions, while [2] introduces the SelectiveNet architecture, which can abstain from predictions in cases of low model confidence, addressing safety-critical decision contexts. Research [3] integrates boosting-based ensemble methods into the optimization of mixture compositions, and [4] explores symbolic regression for automatic derivation of analytical formulas.

Despite these advances, the choice of an optimal model that achieves high accuracy, robustness to overfitting, and interpretability remains an open research question.

Recent contributions in the literature extend these themes in several directions. Wang et al. [5] developed an interpretable machine learning framework based on boosted tree models, demonstrating that the XGBoost algorithm achieves high predictive accuracy on experimental concrete datasets and employing SHAP analysis to elucidate feature contributions consistent with material science principles (e.g., age and mix ratios). Similarly, Zhang et al. [6] applied interpretable ML models including Random Forest, AdaBoost, XGBoost, and LightGBM to high-performance concrete, combining Bayesian optimization with SHAP to both optimize prediction and analyze feature influence.

Other studies have explored interpretable and optimized regression frameworks for concrete strength prediction. An interpretable machine learning model for self-compacting concrete incorporating recycled aggregates and supplementary cementitious materials achieved high accuracy and identified key mix variables, demonstrating the utility of hyperparameter-tuned ensemble methods with feature attribution analysis [7]. Research focused on comparative evaluations of diverse ML techniques, including Random Forest, SVM, neural networks, and rule-based models, further confirms the superior performance of ensemble frameworks over basic linear approaches in concrete strength forecasting [8].

Collectively, these studies highlight ongoing efforts to balance accuracy, robustness, and interpretability in machine learning models for concrete compressive strength prediction. The literature indicates a continued trend toward ensemble and explainable models that provide not only strong predictive performance but also engineering insights into the influence of mix components on material properties.

The aim of the study. The aim of the paper is to conduct a comparative analysis of the effectiveness of machine learning models of different architectural complexity (from linear regression to deep neural networks) for the task of predicting concrete strength, as well as to construct an interpreted empirical dependence for express strength assessment.

Experimental methodology. To achieve the objectives of this study, the publicly available Concrete Compressive Strength dataset from the UCI Machine Learning Repository [9] was used. The dataset consists of 1030 observations describing concrete mixtures with varying compositions and curing ages.

Each sample is characterized by eight input variables, including the contents of cement, blast furnace slag, fly ash, water, superplasticizer, coarse aggregate, and fine aggregate (all measured in kg/m³), as well as the age of the concrete in days. The target variable is the compressive strength of concrete, expressed in megapascals (MPa).

Prior to model training, an exploratory data analysis (EDA) was conducted to assess data quality, variable distributions, and potential modeling challenges. Histograms of all input features and the target variable are shown in Figure 1.

The target variable exhibits an approximately normal distribution with a slight right skew and a concentration around 35–40 MPa, indicating a well-balanced range of concrete strengths suitable for regression modeling. In contrast, the input features demonstrate pronounced heterogeneity. Admixture-related variables (blast furnace slag, fly ash, and superplasticizer) are strongly right-skewed and zero-inflated, reflecting the prevalence of conventional concrete mixtures without additives. Cement content spans a wide range (approximately 100–550 kg/m³) with a multimodal structure, while the age variable is discrete, with peaks corresponding to standard curing periods (7, 28, and 90 days).

Overall, the dataset combines continuous, discrete, and sparse variables, forming a complex non-linear feature space. This characteristic motivates the use of non-linear and tree-based ensemble methods, such as Random Forest regression, which are better suited to capturing feature interactions and handling data sparsity than classical linear models.

The modeling workflow included checking the dataset for missing values (none were found), applying standard feature scaling where required particularly for neural networks and splitting the data into training and test sets using an 80/20 ratio with a fixed random seed to ensure reproducibility.

Three classes of regression models were investigated. As baseline approaches, linear regression and second-degree polynomial regression were employed to establish reference performance levels. For deep learning methods, fully connected multilayer perceptron (MLP) networks with varying architectures were explored, ranging from two to seven hidden layers and containing between 128 and 256 neurons per layer. In addition, an ensemble learning approach based on decision trees, namely the Random Forest Regressor, was evaluated due to its robustness to non-linear relationships and heterogeneous feature distributions.

Model performance was assessed using the mean absolute error (MAE), which provides an intuitive measure of prediction accuracy in physical units (MPa) and is therefore well suited for engineering interpretation. Finally, a linearization approach for a multiplicative regression model was applied to derive an empirical power-law relationship between the input variables and concrete compressive strength.

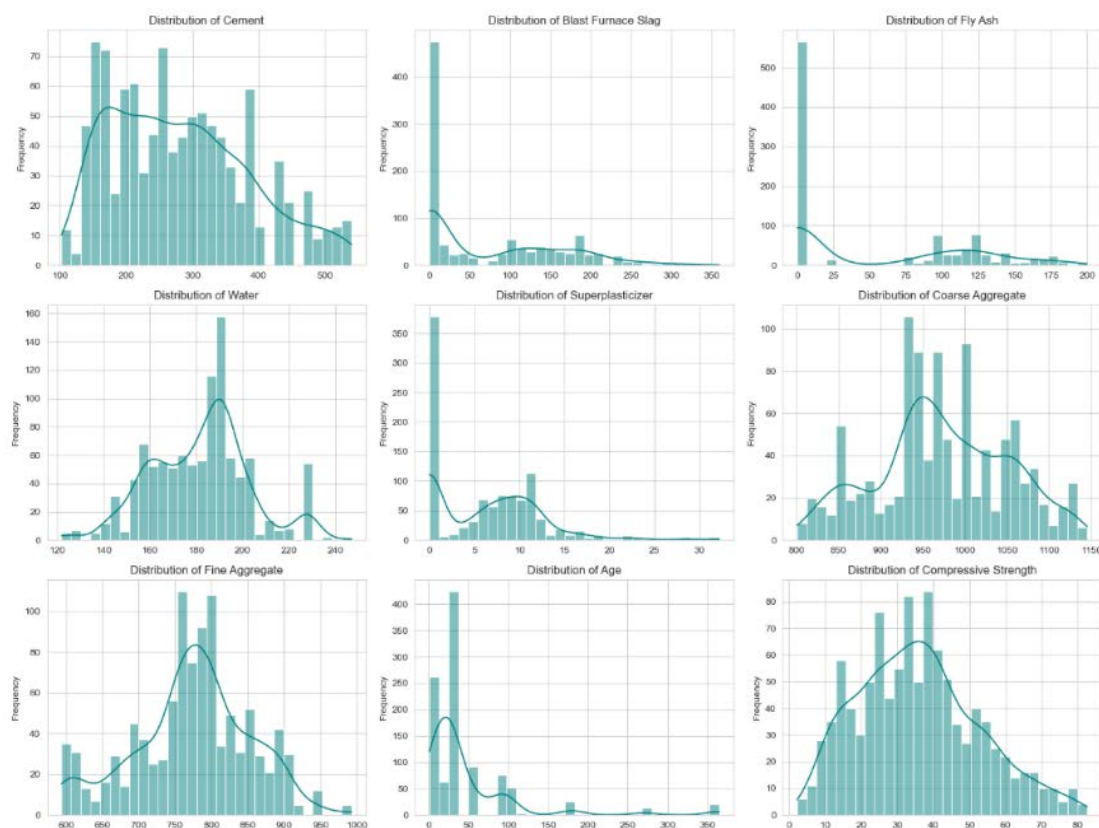


Fig 1. Exploratory data analysis

Presentation of the main research material. During the study, multiple regression models were trained and evaluated on a held-out test dataset in order to assess their predictive accuracy and practical applicability.

Linear regression exhibited the poorest performance, which can be attributed to its inability to represent the complex non-linear physicochemical processes governing cement hydration and strength development. Polynomial regression partially addressed this limitation by capturing non-linear interactions between mixture components—most notably the interaction between water and cement content—resulting in a noticeable improvement in prediction accuracy.

Artificial neural networks demonstrated a high modeling potential. Increasing the network depth from two to seven hidden layers led to a systematic improvement in prediction accuracy, with the best results obtained for the most complex architecture. However, the training process proved sensitive to weight initialization and hyperparameter settings, and the resulting models exhibit limited interpretability, effectively functioning as “black boxes” from an engineering perspective.

The most favorable balance between accuracy, robustness, and interpretability was achieved by the Random Forest model. This approach does not require feature scaling, is resilient to outliers, and is capable of capturing non-linear dependencies and feature interactions without explicitly introducing polynomial terms. A visual comparison between the predictions of linear regression and the Random Forest model is presented in Figure 2.

For practical applications where computational resources are unavailable, an empirical formula for estimating compressive strength was derived by logarithmic transformation of the input variables followed by linear regression. The resulting multiplicative power-law model for compressive strength σ_c is expressed as.

$$\sigma_M = 257,2635(1 + w^{-0.9702})(1 + c^{0.774})(1 + a^{0.3109})(1 + bf^{0.0659}) \times (1 + f^{0.0217})(1 + sp^{0.0715})(1 + fa^{-0.3776})(1 + ca^{-0.0272}).$$

where a denotes the curing age of concrete in days, and w , c , bf , f , sp , fa , and ca represent the masses (kg per 1 m³ of concrete) of water, cement, blast furnace slag, fly ash, superplasticizer, fine aggregate, and coarse aggregate, respectively.

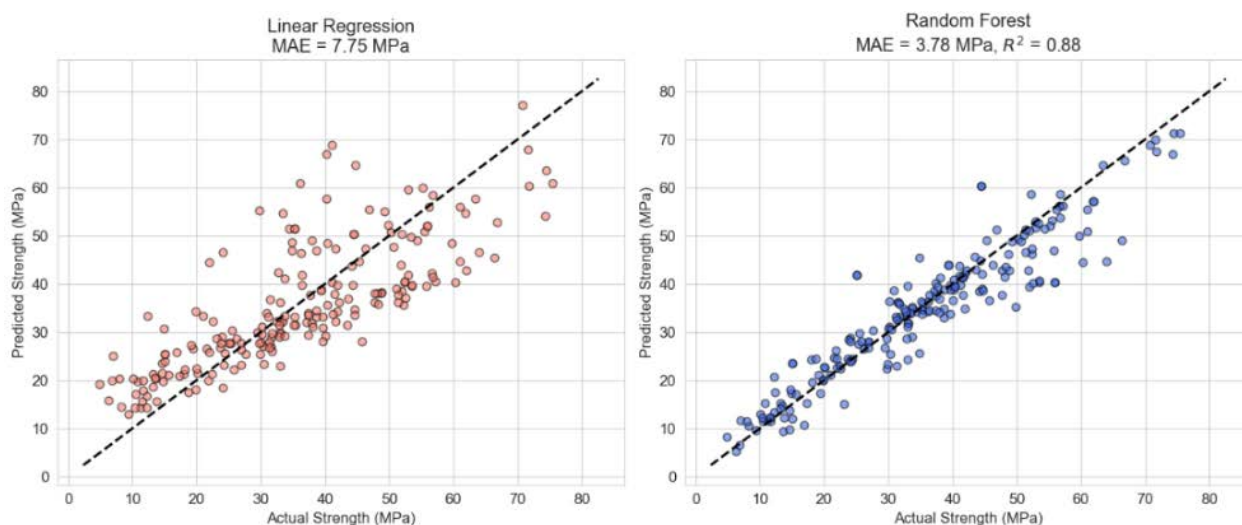


Fig 2. Comparison of prediction accuracy between linear regression and Random Forest models

Results. The aggregated performance metrics of the investigated models are summarized in Table 1.

Table 1.

Accuracy metrics of the studied models

Machine learning model	MAE, MPa
Linear regression	7.46
Empirical power-law formula	6.38
Polynomial regression	5,97
Neural network (2 × 128)	4,3
Neural network (7 × 256)	3,3
RandomForest	3,73

The Random Forest model achieved an MAE of 3.73 MPa, representing the best stable performance among the evaluated methods. Although the deep neural network with seven hidden layers achieved a slightly lower MAE of 3.3 MPa, this improvement came at the cost of significantly increased model complexity, computational demands, and reduced interpretability. The empirical power-law formula yielded an MAE of approximately 6.38 MPa, which is acceptable for rapid preliminary assessments.

Figure 2 illustrates a scatter plot comparing predicted and experimental compressive strength values for linear regression and the Random Forest model. The Random Forest predictions cluster more tightly around the ideal prediction line, particularly in the low-to-medium strength range, indicating higher accuracy and reduced systematic bias. In contrast, the linear regression model exhibits a clear trend of underestimating compressive strength, which visually confirms its limited capability to model non-linear material behavior.

Discussion. Feature importance analysis, conducted using the Random Forest model, enabled interpretation of the physical consistency of the learned relationships. Figure 3 presents the distribution of input feature contributions to the prediction of concrete compressive strength.

As shown in the figure, the most influential variables are concrete age and cement content, which fully aligns with established principles of concrete technology and cement hydration theory. This result indicates that the model does not merely memorize the training data but instead captures fundamental mechanisms governing strength development.

Compared to artificial neural networks, which typically operate as black-box models, the Random Forest approach offers a higher degree of transparency by allowing direct assessment of the relative contribution of each input variable. This interpretability is particularly valuable for engineering

applications, where trust in model predictions and consistency with physical knowledge are essential for practical adoption.

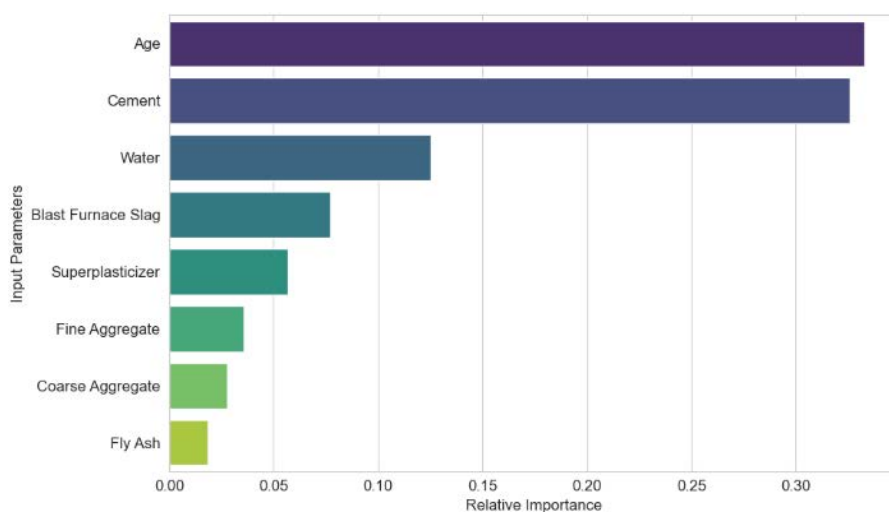


Fig 3. Feature importance analysis obtained from the Random Forest model

Conclusions. This study demonstrates that simple linear regression models are insufficient for accurate prediction of concrete compressive strength, yielding mean absolute errors exceeding 7 MPa. Such performance limitations confirm that linear assumptions fail to capture the complex and non-linear relationships inherent in concrete mixture composition and curing processes.

Among the evaluated approaches, ensemble learning methods exhibited the most favorable balance between predictive accuracy and model robustness, achieving an MAE of 3.73 MPa. The Random Forest model consistently outperformed baseline linear and polynomial regressions and approached the predictive performance of deeper neural network architectures, while offering improved stability and reduced sensitivity to hyperparameter selection. In addition to data-driven prediction, an empirical power-law model was derived through linearization of a multiplicative regression formulation. Despite its simplicity, the resulting formula enables approximate manual estimation of compressive strength with an average error of approximately 15%. This level of accuracy may be sufficient for preliminary assessments and rapid decision-making in construction site conditions where computational tools are unavailable.

Feature importance analysis further confirmed the physical plausibility of the learned models. Concrete age and total binder content were identified as the dominant factors influencing compressive strength, in agreement with established material science principles. This alignment between model behavior and domain knowledge supports the interpretability and practical relevance of the proposed approach.

Future Research Directions. While the proposed models demonstrate high predictive accuracy on standardized benchmark data, their industrial application requires adaptation to regional variability in raw materials and production conditions. Future research will focus on incorporating aggregate morphology descriptors (e.g., washed versus unwashed fine aggregates and particle shape characteristics) to improve sensitivity to local material properties. In addition, transfer learning strategies will be investigated to recalibrate the base model using limited historical production data from individual concrete plants, enabling practical deployment without extensive additional laboratory testing.

List of references:

1. Spjuth O., Carrión Brännström R., Carlsson L., Gauraha N. Combining Prediction Intervals on Multi-Source Non-Disclosed Regression Datasets. PMLR. Conference contribution. 2019. Vol. 105. P. 164–177. URL: <https://proceedings.mlr.press/v105/spjuth19a.html>
2. Geifman Y., El-Yaniv R. SelectiveNet: A Deep Neural Network with an Integrated Reject Option. PMLR. Conference contribution. 2019. Vol. 97. P. 2151–2160. URL: <https://proceedings.mlr.press/v97/geifman19a.html>
3. Mistry M., Letsios D., Krennrich G., Lee R. M., Misener R. Mixed-Integer Convex Nonlinear Optimization with Gradient-Boosted Trees Embedded. INFORMS Journal on Computing. Journal contribution. 2021. Vol. 33(3). P. 1103–1119. doi:10.48550/arXiv.1803.00952
4. Žegklitz J., Pošík P. Learning Linear Feature Space Transformations in Symbolic Regression. arXiv. Preprint. 2017. URL: <https://arxiv.org/abs/1704.05134>

© Н.Р. Печончик, О.С. Приходько

5. Wang W., Zhong Y., Liao G., Ding Q., Zhang T., Li X. Prediction of Compressive Strength of Concrete Specimens Based on Interpretable Machine Learning. Materials. Journal contribution. 2024. Vol. 17(15). Article 3661. doi:10.3390/ma17153661
6. Zhang Y., Ren W., Chen Y. et al. Predicting the Compressive Strength of High-Performance Concrete Using an Interpretable Machine Learning Model. Scientific Reports. Journal contribution. 2024. Vol. 14. Article 28346. doi:10.1038/s41598-024-79502-z
7. Miao Q., Gao Z., Zhu K., Guo Z., Sun Q., Zhou L. Interpretable Machine Learning Model for Compressive Strength Prediction of Self-Compacting Concrete with Recycled Concrete Aggregates and SCMs. Journal of Building Engineering. Journal contribution. 2025. Vol. 108. Article 112965. doi:10.1016/j.jobbe.2025.112965
8. More S., Kambekar A. Performance Evaluation of Compressive Strength of Concrete Using Different Machine Learning Algorithms. Challenge Journal of Concrete Research Letters. Journal contribution. 2025. Vol. 16(2). P. 60–68. doi:10.20528/cjcr.2025.02.002
9. Yeh I.-C. Concrete Compressive Strength. UCI Machine Learning Repository. Dataset. 1998. doi:10.24432/C5PK67.

Reviewer: Pasternak Yaroslav, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Computer Science and Cybersecurity at Lesya Ukrainka Volyn National University.

Ю.Ю. Жигуц¹, В.Д. Рудь², І.М. Шкирта³, Стащук М.Г.³ДВНЗ «Ужгородський національний університет»¹Луцький національний технічний університет²Мукачівський державний університет³**ФОРМУВАННЯ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНЬ В МЕТАЛЕВИХ
КОНСТРУКЦІЯХ ПІД ВПЛИВОМ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВОДНЮ**

У сучасних умовах промислової діяльності особливої гостроти набуває питання точного прогнозування експлуатаційних ресурсів металевих систем, зокрема їхньої витривалості та безвідмовності. Це зумовлено складним поєднанням корозійної деградації матеріалу та постійного механічного навантаження. На сьогодні механізми взаємозв'язку між водневим насиченням і перерозподілом напружень у металах досліджено фрагментарно. Процес абсорбції водню спричиняє деформацію структури тіла, що проявляється у зміні його лінійних параметрів та загального об'єму. Такі об'ємні трансформації за відповідних умов стають джерелом виникнення внутрішніх зусиль. У цій роботі розглядається модель, де взаємний вплив атомів водню вважається нехтовно малим. Ключовим завданням дослідження є визначення параметрів напружено-деформованого стану об'єкта, що виникає внаслідок дифузії та накопичення водню в його структур

Ключові слова: конструкції, деформації, напруження, концентрація водню, метод скінченних елементів, суцільний циліндр.

Stashchuk M. G.

Yu.Yu. Zhiguts, V.D. Rudj, I.M. Shkirta, Stashchuk M.G.

**FORMATION OF A MODEL FOR DETERMINING STRESSES IN METAL
STRUCTURES UNDER THE INFLUENCE OF HYDROGEN CONCENTRATION**

In modern industrial conditions, the issue of accurately predicting the operational resources of metal systems, in particular their durability and reliability, is becoming particularly acute. This is due to the complex combination of material corrosion degradation and constant mechanical stress. To date, the mechanisms of the relationship between hydrogen saturation and stress redistribution in metals have been studied fragmentarily. The process of hydrogen absorption causes deformation of the body structure, which manifests itself in a change in its linear parameters and total volume. Under appropriate conditions, such volumetric transformations become a source of internal forces. This paper considers a model in which the mutual influence of hydrogen atoms is considered negligible. The key objective of the study is to determine the parameters of the stress-strain state of an object resulting from the diffusion and accumulation of hydrogen in its structure.

Keywords: structures, deformations, stress, hydrogen concentration, finite element method, solid cylinder, cylindrical.

Introduction. When using materials, residual stresses play a significant role, which is associated with a significant temperature gradient in the creation of the alloy, high cooling rates, etc. This, in turn, can cause residual stresses, which have not yet been sufficiently studied in materials.

Among the existing experimental methods for determining residual stresses, the most widely used are the method of N.V. Kalakutsky for disc-type parts, the method of N.N. Davidenkov's method for ring-type parts and prismatic bars, L.A. Glikman and D.I. Gregon's method for I-beam bars, D.M. Shur's method, i.e., the force method for determining residual stresses, which does not require measurements of part deformation based on approximate relationships between stresses and deformations, but it can only be applied to parts with a regular geometric shape, the Gunnert method, which requires drilling conical holes, milling ring grooves, and high-precision deformation measurements, which greatly complicates the measurement process, and the Zaks method for solid and hollow cylinder-type parts [1-3].

The authors set themselves the task of simulating the stress state of a cylindrical sample and studying the effect of hydrogen on the stress characteristics of the material using this model.

The presence of hydrogen in the structure of metallic materials significantly affects their mechanical properties, in particular, their resistance to destruction and service life. The key factor here is the ability of hydrogen atoms to freely migrate through the crystal lattice, causing its deformation expansion [4]. The results of the analysis of sorption and desorption processes confirm the formation of local inhomogeneities in hydrogen content [5]. These areas of uneven concentration become sources of internal forces known as concentration stresses. That is why the identification and calculation of such factors are critically important for modern engineering design of objects that come into contact with aggressive hydrogen-saturated parts.

It should be emphasized that previous scientific studies have mainly focused on how external mechanical stress affects hydrogen diffusion processes [6-10]. However, for the qualitative development of the theoretical basis, it is necessary to study in more detail the reverse feedback – the formation of a stress-strain state under the direct influence of a change in gas concentration. For example, study [11] analyses the stresses in a solid cylinder caused by hydrogen diffusion, but the algorithm proposed there is only

© Ю.Ю. Жигуц, В.Д. Рудь, І.М. Шкирта, Стащук М.С.

effective for bodies of infinite size. This article presents the author's methodology, which allows for the proper assessment of stress indicators in bodies of finite geometric configuration.

Theoretical position and solution algorithm. The process of hydrogen saturation of metal is accompanied by a transformation of its geometric characteristics – both the linear parameters of individual elements and the overall volume of the structure. When free deformation is restricted, such volumetric changes become the root cause of internal stresses. Within the proposed approach, we base ourselves on the hypothesis of a negligible energy connection between individual hydrogen atoms. The key task is to calculate the parameters of the stress-strain state of a metal object formed under the direct influence of variations in hydrogen concentration.

The total deformation of the material resulting from a variation in hydrogen content by a value of C_H . Macroscopic deformation of the material resulting from a variation in hydrogen content by a value is accompanied by a change in the linear parameters of its structure. Thus, the edge of an elementary parallelepiped ds after transformation takes the form $(1 + \alpha_{C_H} C_H) ds$, where α_{C_H} is the concentration expansion index [2]. In the case of an isotropic and homogeneous medium, this coefficient does not depend on the spatial orientation of the segment ds . If we assume that α_{C_H} is invariant with respect to the saturation level, this parameter can be considered a constant. Under these circumstances, the differential rectangular element retains its initial orthogonal configuration, since the elongation indices are identical in all directions. Thus, a change in hydrogen concentration C_H over a time interval Δt initiates the following increase in deformation components of a hydrogen nature:

$$\Delta \varepsilon_{ij}^H = \alpha_{C_H} C_H = \alpha_{C_H} [C(t + \Delta t) - C(t)], i, j = 1, 2, 3; \varepsilon_{ij}^H = 0 \text{ при } i \neq j. \quad (1)$$

According to the principle of superposition, the total increase in material deformation is determined as the additive sum of two components: the increase resulting from fluctuations in hydrogen concentration and the deformation changes caused by external force factors.

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \Delta \varepsilon_{ij}^P + \Delta \varepsilon_{ij}^H. \quad (2)$$

To determine the hydrogen distribution profile in the material structure, the solution of Fick's diffusion equation will be used. This model takes into account an additional factor – the influence of the mechanical stress gradient on the migration processes of hydrogen atoms [11-13].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla(D \nabla C) + \nabla \left(\frac{DV_H}{RT} \nabla \sigma_h \right), \quad (3)$$

The following symbols are used in the expression above: $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$ – Hamilton operator, represented by components $(\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$; D is responsible for the intensity of diffusion processes (diffusion coefficient); R and T denote the universal gas constant and the absolute temperature, respectively. The parameter V_H reflects the partial molar volume occupied by hydrogen in the metal matrix, while σ_h characterizes the hydrostatic component of the internal stress tensor; the time coordinate is defined by the variable t .

The solution to mathematical model (3) is sought taking into account the following initial parameters:

$$C(x, y, z, t)|_{t=0} = C_0, \quad (4)$$

The boundary state of the system is described as follows: for the outer boundary section S_C , a fixed hydrogen content C_0 is regulated, while on the segment S_N , the hydrogen flow intensity ϕ is determined. In this case, the total surface area of the object is the result of combining both of the specified zones $S_C \cup S_N = S$.

For one surface area, boundary conditions of the first kind (hydrogen content) are set, while for the other, the intensity of the hydrogen flow is determined.

Cylindrical samples were selected as objects of study for testing the developed algorithm for calculating the stress state caused by fluctuations in hydrogen concentration. The first model is represented by a solid body with a radius $r_1 = b$ and a length of $2h$.

The analysis is performed for two types of mechanical fastening: in the absence of external constraints (free bodies) and in the case of rigid fixation of one end. For free samples, given their symmetry, the calculation scheme is limited to half of them. When modelling, the assumption of zero hydrogen flow intensity is made. The formulation of boundary and initial conditions for each scenario is given below:

$$\begin{aligned} C(r, z, 0) &= C_0, \text{ при } r, z \in S_1, \\ C(r, z, t) &= C_0, \text{ при } r, z \in L_1 \end{aligned} \quad (20)$$

In the above expressions, S_1 denotes the area of the meridian cross-section of the corresponding cylindrical bodies, and S_2 denotes the contours formed by the intersection of the plane of symmetry with the free lateral surface and the unfixed end face.

The calculations were performed for two boundary conditions: hydrogen saturation ($C_0 = 0, C_c = 5 \text{ mol/m}^3$) and dehydration ($C_0 = 5 \text{ mol/m}^3, C_c = 0$) of the samples. All calculations were performed using the following parameters: Young's modulus $E = 2.1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$, Poisson's ratio $\nu=0.3$, $D = 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, $R=8.31 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$, $V_H=1,96 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}$, $T=295 \text{ K}$, $a=5 \text{ mm}$, $b=10 \text{ mm}$, $R_1=2.5 \text{ mm}$, $h=40 \text{ mm}$, $h_1=9 \text{ mm}$.

The analysed areas were discretized using linear four-node finite elements. For the numerical implementation of mathematical models (14) and (17) in FORTRAN, software was developed that allows tracking the dynamics of hydrogen content and the corresponding increase in stresses at any time interval. The accuracy of the computational algorithm was verified by comparing the obtained data with the analytical solution [7] for hydrogen absorption and desorption processes in an infinite cylinder. The graphical analysis presented in Figs. 1 and 2 demonstrates a high degree of correlation between the results of the author's program and the theoretical data [7] with acceptable errors.

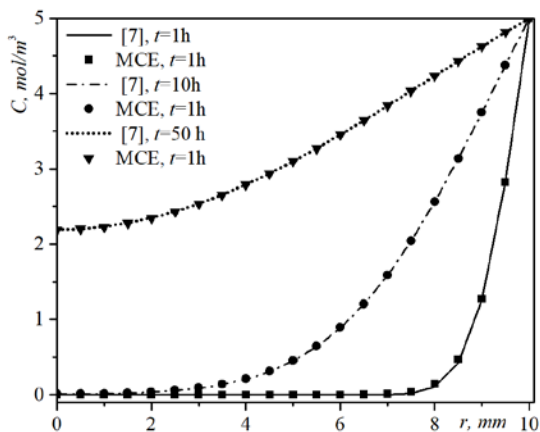


Fig. 1. Comparison of data obtained by numerical method and by analytical solution of equation (14) for the case of hydrogen absorption by a long cylindrical body

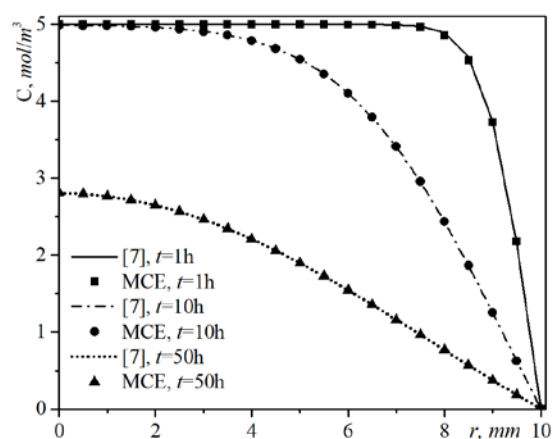


Fig. 2. Assessment of the convergence of numerical results with the exact solution of equation (14) for modelling the process of hydrogen desorption from an elongated cylinder

Modelling of the stress-strain state of a monolithic cylinder was performed using two calculation schemes. In the first approach, the boundary L_1 is identified with the contour that arises at the intersection of the end and side surfaces; at the same time, a restriction on axial displacements in the form of $u_z(r, 0, t) = 0$ is assumed. The second scheme is based on the assumption of rigid fixation of the object from the end face $z=-h$. This same section is considered isolated from diffusion exchange, which makes it impossible for hydrogen sorption or desorption processes to occur through it. For this case, the boundary conditions are formulated as $u_r(r, 0, t) = u_z(r, 0, t) = 0$.

Experimental results. Mathematical implementation of dependencies (14) and (17) was performed using an iterative step in time $\Delta t=1$ minutes. The finite element approximation of the unclamped cylinder model was based on the use of 900 four-node fragments (corresponding to 966 nodal points), while for the clamped configuration, the mesh density was increased to 1800 elements (1911 nodes). The calculation period for hydrogen saturation and desorption processes was 100 hours. Fig. 3 and 4 shows the spatial profiles of radial stresses σ_{rr} in the cross section $z=0$ for a free object at times $t=10$ and $t=100$ hours. The data obtained indicate that the amplitude values σ_{rr} during sorption and dehydration are mirror images: they coincide in absolute value but have opposite directions (different signs). Since a similar symmetry is inherent in all other components of the stress-strain state throughout the cycle, further interpretation of the results in the work is given only for the gas desorption scenario.

The graphical interpretation in Fig. 4 illustrates the distribution of radial stresses σ_{rr} for different cutting planes of clamped and free cylindrical objects. Evaluation of the obtained data confirms that the amplitude and nature of these forces demonstrate invariance with respect to the spatial coordinate of the cross section, remaining identical for both rigidly fixed and unfastened models.

Similar patterns have been established for the tangential components $\sigma_{\varphi\varphi}$. However, it should be noted that such a correlation is not typical for axial stresses σ_{zz} : in this case, there are significant differences in distribution caused by the influence of boundary conditions and cross-section localization.

The construction of graphical dependencies and the execution of computational procedures are implemented using the author's software complex [14]. The development is based on the adaptation of classical theoretical models for an infinite solid cylinder [3, 7, 8, 11-13] to the specifics of analysing real experimental objects of cylindrical configuration.

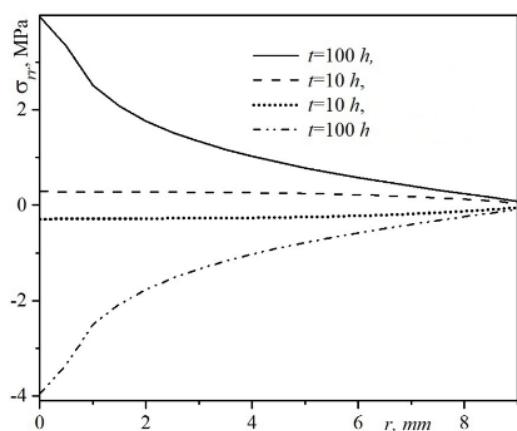


Fig. 3. Nature of stress state change σ_{rr} in the plane $z=0$ of a monolithic cylinder during its hydrogen saturation and dehydration, recorded 10 and 100 hours after the start of diffusion

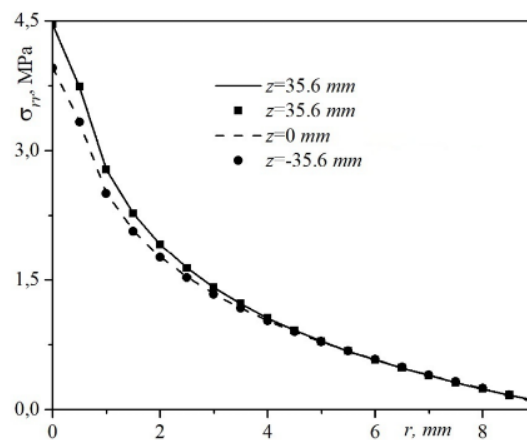


Fig. 4. Comparative characteristics of stress fields σ_{rr} in different planes of clamped and unclamped cylindrical specimens after $t=100$ hours of exposure

Conclusions. During the study, analytical patterns were derived and systematized, allowing the deformation components and stress vectors in metal media to be determined depending on the level of hydrogen saturation. This made it possible to conduct a series of numerical experiments to study the spatial distribution of hydrogen concentration and the corresponding force factors inside a cylinder of finite dimensions, taking into account the temporal dynamics of sorption and desorption processes. It was found that during hydrogen removal (dehydration), a compression zone forms in the central part of the sample, while the peripheral layers are subjected to tensile forces. During saturation (flooding), the opposite effect is observed: the inner zones are characterized by uniform stretching, while an increase in the intensity of compressive stresses is recorded near the outer surface.

Список використаних джерел:

1. Жигуц Ю.Ю., Лазар В.Ф., Чулевич М.М. Встановлення залишкових напружень у термітній сталі 40Л за експериментальним методом Закса // Aktualne problem nowoczesnych nauk: 7 miedzynarodowej naukow-praktycznej konf., 7-15 czerwca 2011 r.: materialy konf. – Przemysł: Nauka i studia, 2011. – V. 27. – S. 20 - 23.
2. Жигуц Ю.Ю., Лазар В.Ф. Встановлення залишкових напружень у термітній сталі 40Л за експериментальним методом Закса // Науковий вісник Мукачівського державного університету. – 2011. – № 10 (5). – С. 11 - 15.
3. Zhiguts Yu., Kudlotiak C.H., Patai Z.C. The research of residual stresses at steel by using Zaks methods // Fundamental and applied science - 2017: 11 international research and practice konf., 30 october – 07 novemder 2017 r.: materials conf. – Sheffield UK: “Science and Education” LTD, 2017. – V. 18. – P. 16 - 19.
4. Panasyuk V.V., Ivanyts’kyi Ya.L., Hembara O.V., Boiko V.M. Influence of the stress-strain state on the distribution of hydrogen concentration in the process zone system //Material Science. -2014. -**50**, №3. -P.315-323.
5. Тимчик Г.С., Філіппова М.В., Демченко М.О. Діагностика напружено-деформованого стану металевих конструкцій [монографія] / Г.С. Тимчик, М.В. Філіппова, М.О. Демченко // Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2023. – 168 с.
6. Zhiguts Yu., Stashchuk M.G., Lazar V.F. To calculation of hydrogen stresses in metal structures // International periodic scientific journal : Modern engineering and innovative technologies. – 2022. – № 20. – Part 1. Published Sergeieva and Co Karlsruhe, Germany. – P. 32 - 36.
7. Stashchuk M.G., Nitrebych Z.M., Zhiguts Yu.Yu., Lazar V.F., Stashchuk N.M. Methods of calculating singular integrals for engineering problems (матеріали конф.) // The 7th International scientific

and practical conference “International scientific innovations in human life” (January 19-21, 2022) Cognum Publishing House, Manchester, United Kingdom. 2022. – P. 164-171.

8. Stashchuk M.G., Zhiguts Y.Y., Lazar V.F. Features of calculation of stresses caused by hydrogen in metal structures // The IV International Scientific and Practical Conference «Actual problems of practice and science and methods of their solution», January 31 – February 02, 2022. Milan, Italy. – 598-602.

9. Zhiguts Yu., Stashchuk M Lazar V. Technique of calculation of stresses in metal structures // Proceedings of the XXI International Scientific and Practical Conference «Actual priorities of modern science, education and practice», Paris, France. May 31 – 03 June, 2022. – P. 779-782.

10. Krom A.H.-M., Koers R. W. J., Bakker A. Hydrogen transport near a blunting crack tip // J. Mech. Phys. Solids. – 1999. – №4. – P. 971-992.

11. Numerical analysis of hydrogen diffusion problems using the finite element method / H. Kanayama, T. Shingoh, S. Ndong-Mefane et al. // J. Theoretical and Applied Mechanics Japan. – 2008. – № 56. – P. 389-400.

12. Hutton D. W. Fundamentals of finite element analysis. New York: McGraw-Hill, 2004. – 494 p.

13. Filho O.J. Creep-rupture behaviour of a cruciform specimen under equal triaxial tension // Int. J. Mech. Sci. –1992. – №10. –P. 769-783.

14. Комп'ютерна програма «Програма розрахунку напружено-деформованого стану матеріалів, які знаходяться у воденьвмісному середовищі під дією температури» (STRES_HYDRO_TEMP)/ В.М. Бойко, Я.Л. Іваницький, М.Г. Стащук // Свідectво про реєстрацію авторського права на твір № 95246 видане Міністерством розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України 10.01.2020 р.

Рецензент: Рубіш Василь Михайлович, проф., док. фіз.-мат. наук, завідувач Ужгородської лабораторії матеріалів оптоелектроніки та фотоніки Інституту проблем реєстрації інформації НАН України

А. П. Павлюк¹, Зятюк Ю.Ю.¹, Супрунюк В.В.¹, Скрипник М.М.¹, Р.В. Пасічник², С.В. Ротко²*Національний університет водного господарства та природокористування¹
Луцький національний технічний університет²***ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕФЕКТІВ І ПОШКОДЖЕНЬ ДЕРЕВ'ЯНИХ ФЕРМ**

Ідентифікація дефектів і вчасна їх ліквідація на експлуатованих конструкціях є важливою складовою забезпечення довговічності будівель і споруд. Наведені результати досліджень дерев'яних ферм, які знаходяться тривалий час в експлуатації. Розглянуті найбільш поширені дефекти і пошкодження елементів ферм, які виникають в процесі їх експлуатації. В рамках дослідження було проведено аналіз 10 різних об'єктів із різними геометричними схемами ферм. Виконаний статистичний аналіз частоти виникнення зафіксованих дефектів і пошкоджень. Проведене порівняння виявлених дефектів із їх видами, які наведені в нормативних документах.

Ключові слова: Деревина, напружено-деформований стан, несуча здатність, деформативність, дерев'яні конструкції, дерев'яні ферми, дефекти дерев'яних конструкцій.

A. P. Pavluk, Y.Y. Zatiuk, V.V. Supruniuk, M.M. Skrypnik, R.V. Pasichnyk, S.V. Rotko

INVESTIGATION OF DEFECTS AND DAMAGE IN TIMBER TRUSSES

The identification of defects and their timely remediation in structures in service constitute a key factor in ensuring the durability and reliability of buildings and civil engineering structures. This study presents the results of investigations of timber trusses that have been in long-term service. The most common defects and damage affecting truss members during operation are analysed. The research is based on the examination of ten different structures incorporating timber trusses with various geometric configurations. A statistical analysis of the frequency of occurrence of the identified defects and damage was carried out. The detected defects were compared with the defect classifications specified in relevant regulatory documents. The results indicate that almost all defect types listed in the regulatory literature are observed in structures employing timber trusses. In addition to the defects identified in the standards, additional types of damage were detected, including contamination of timber structural elements with bird droppings. Furthermore, a significant deficiency of timber trusses in service is the lack of documentation and the absence of systematic application of protective treatments.

Of the defects identified, prolonged and repeated moisture exposure was found to have the most adverse impact on timber truss members, promoting fungal activity and subsequent wood decay. Decay of timber, especially in joint regions, results in a substantial reduction in the service life of timber trusses.

The results of the study indicate that the most prevalent defects in timber truss members are longitudinal cracking due to wood shrinkage and corrosion of metal components in joint connections. The next most prevalent defect observed in timber trusses is the lack of information regarding treatment with protective agents (antiseptics and fire retardants). Given the frequent occurrence of timber infestation by wood-boring insects, as well as the necessity to comply with fire safety requirements, maintaining systematic and documented treatment of timber elements with protective substances is of critical importance.

Key words: Wood, stress-strain state, caring capacity, deformation, wooden structures, wooden trusses, defects of wooden structures.

Постановка проблеми. Деревина – природний будівельний матеріал [1-3], який найчастіше на території України використовується як несучі конструкції покрівлі [4-7]. Одним із видів несучих конструкцій покрівель є дерев'яні ферми.

Термін експлуатації будівель і споруд залежить від довговічності елементів конструкцій, з яких вони складаються. В свою чергу довговічність будь яких конструкцій залежить від правильності та коректності їх використання (температурно-вологісного режиму, навантажень і впливів, умов експлуатації тощо), а також вчасного виявлення, фіксування та усунення дефектів і пошкоджень. Дерев'яні конструкції не є виключенням. Досвід їх використання показує, що при дотриманні коректних температурно-вологісних режимів їх довговічність значно перевищує проектні прогнозовані дані, наведені в нормативній документації [8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В процесі експлуатації дерев'яних конструкцій виникають дефекти і пошкодження. Кожен із них несе певний вплив на довговічність та несучу здатність. Існуючі дослідження дефектів дерев'яних ферм говорять, що важливим є вчасна ідентифікація пошкодження, визначення причини їх виникнення та ліквідація наслідків [9].

Дослідженням причин виникнення дефектів і пошкоджень дерев'яних конструкцій та їх впливи на експлуатаційну придатність займалися ряд вчених [10,11]. Так, автори [12] досліджували технічний стан дерев'яних ферм, термін експлуатації яких близько ста років. Серед основних дефектів, які були виявлені на елементах ферм, були замокання і розвиток грибків.

В дослідженнях [13] проведено аналіз дефектів і пошкоджень згинальних елементів із деревини. В результаті встановлено, що основним видом пошкоджень, які впливають на цілісність поперечних перерізів, є тріщиноутворення вздовж волокон. Причини таких пошкоджень пов'язані з

© А. П. Павлюк, Зятюк Ю.Ю., Супрунюк В.В., Скрипник М.М., Р.В. Пасічник,
С.В. Ротко

перевантаженням, частими змінами вологості деревини та напруженнями розтягу перпендикулярно до волокон. Серед основних дефектів виявлених у історичних будівлях, є поздовжні тріщини різного походження, що також наведено в працях [14-18].

Дослідження [14] проводились на прикладі виявлених дефектів та руйнувань 127 різних об'єктів, які були зведені із використанням дерев'яних конструкцій. Результати показали, що найпоширенішою причиною відмов конструктивних елементів є недоліки або відсутність належного розрахунку на міцність. Їх частка у відсотковому відношенні становить 41,5%. Наступною причиною руйнувань дерев'яних конструкцій є помилки при монтажу, частка яких складає 14,1%. Далі йдуть пошкодження та зміни дерев'яних конструкцій безпосередньо на будівельному майданчику (їх частка становить 12,5%), та недостатнє або відсутнє проектування з урахуванням впливів навколишнього середовища (11,4%). Загалом близько половини відмов спричинені проектувальниками, а приблизно чверть — персоналом, який працює на будівельному майданчику. Якість деревини, методи та принципи виробництва зумовлюють лише незначну частину відмов (разом близько 11%).

Постановка завдання. Метою роботи є встановлення дефектів і пошкоджень в дерев'яних фермах, які знаходяться тривалий час в експлуатації та проведення статистичного аналізу щодо частоти їх виникнення.

Виклад основного матеріалу. В процесі дослідження було проведено обстеження десяти різних об'єктів, які перебували тривалий час в експлуатації. Дерев'яні ферми на даних об'єктах виконували функцію несучих кроквяних конструкцій. В загальному можна виділити чотири типи конструкцій ферм:

1) прямокутні дерев'яні – верхній, нижній пояс та решітка виконані із дерев'яних елементів (рис.1);



Рис.1. Загальний вигляд прямокутних дерев'яних ферм типу 1

2) трикутні металоделерев'яні – верхній та нижній пояс виконані із деревини, елементи решітки – із деревини та металу (рис.2);



Рис.2. Загальний вигляд трикутних ферм типу 2

3) трикутні металоделерев'яні – верхній пояс виконаний із деревини, нижній пояс із прокатних металевих елементів, елементи решітки із деревини та металу (рис.3);



Рис.3. Загальний вигляд трикутних ферм типу 3

4) трикутні дерев'яні ферми – верхній, нижній пояс та решітка виконані із дерев'яних елементів (рис.4).



Рис.4. Загальний вигляд трикутних ферм типу 4

Згідно діючих будівельних норм України [19,20], найбільш поширеними дефектами дерев'яних конструкцій є:

- вологий стан (або періодичне зволоження) деревини;
- зміна природнього забарвлення деревини;
- недопустимі деформації конструкцій та їх елементів;
- ураження деревини біошкідниками жуками-деревоточцями;
- технологічні дефекти (наявність нерівностей перерізів, залишків кори, не щільні примикання дерев'яних елементів у вузлах тощо);
- тріщини від усушки деревини;
- ураження деревини гниллю;
- корозія металевих елементів вузлових з'єднань;
- відсутність обробки захисними речовинами;
- обвуглення (при виникненні пожежі).

Враховуючи будівельні норми в частині пожежної безпеки [21], варто відмітити також важливість обробки дерев'яних несучих конструкцій вогнезахисними засобами. Тому при аналізі стану дерев'яних ферм також зверталась увага на наявність або відсутність обробки деревини антипіренами. Досвід обстеження будівель і споруд із дерев'яними несучими конструкціями вказує на недостатню культуру в частині забезпечення необхідної частоти обробки деревини захисними речовинами, в тому числі і антисептиками. Дуже часто власники або утримувачі будівель і споруд нехтують необхідною частотою обробки. Наявність інформації щодо обробки деревини антипіренами була лише на одному із 10 об'єктів дослідження. Проте і там вона була застаріла і потребувала оновлення.

Кожен із наведених вище дефектів і пошкоджень було виявлено на фермах. Проте причини їх виникнення і характер розвитку мали певні особливості. Найбільш поширеним дефектом є поздовжні тріщини від усушки деревини (рис.5). Причини виникнення даних тріщин є зміна

температурно-вологісних режимів протягом експлуатації, порушення вимог щодо вологості дерев'яних елементів, які використовувались при будівництві. Варто відмітити, що величини тріщин на дерев'яних конструкціях із більшим терміном експлуатації були більшими в порівнянні із більш «молодшими» аналогічними елементами.



Рис.5. Тріщини від усушки деревини на елементах ферм

Одним із найбільш поширених дефектів також була корозія металевих елементів вузлових з'єднань (рис.6). Із збільшення віку елементів корозія мала більшу площу і глибину відповідно.



Рис.6. Корозія металевих елементів з'єднань

На двох із десяти об'єктів були зафіксовані локальні ділянки із протіканням покрівлі. В даних місцях фіксувались зміна забарвлення деревини, розвиток грибків та розпочинались процеси гниття (рис.7). Варто відмітити, що в порівнянні із іншими виявленими дефектами, систематичне зволоження дерев'яних елементів у випадках відсутності ремонтів протікань нестиме найбільш негативний вплив на технічний стан ферм і значно знижуватиме термін експлуатаційної придатності



Рис.7. Сліди від систематичного зволоження деревини

Ще одним із найбільш поширених дефектів, який траплявся на кожній другій фермі, був враження деревини жуками-деревоточцями (рис.8). Проте сліди від уражень мали застарілий характер. Ознак продовження враження жуками деревини не було. Об'єми враження буди невеликі. За рахунок масивних елементів ферм локальні враження жуками-деревоточцями мають невеликий вплив на подальшу експлуатацію та несучі здатність ферм. Сприятливим середовищем для даних шкідників є залишки кори на дерев'яних елементах. Імовірно, враховуючи розташування виявлених уражень саме на кутах дерев'яних елементів, в даних місцях раніше знаходились рештки кори.



Рис.8. Ураження деревини жуками-деревооточцями

Додатково можна виділити пошкодження, які виникають внаслідок контакту елементів ферм із пташиним послідом (рис.9). На покрівлях часто трапляються випадки із пошкодженими слуховими вікнами, через які птахи мають доступ до горищного простору. Пташиний послід негативно діє на металеві елементи ферм і пришвидшує їх корозію.



Рис.9. Загальний вигляд трикутних ферм типу 4

Практично всі наведені вище дефекти траплялись в процесі дослідження. Проте їх об'єми та частота були різними. На рис.10 наведена стовпчаста діаграма, на якій вказана частота кожного із виявлених дефектів на 10 різних покрівлях у відсотках.

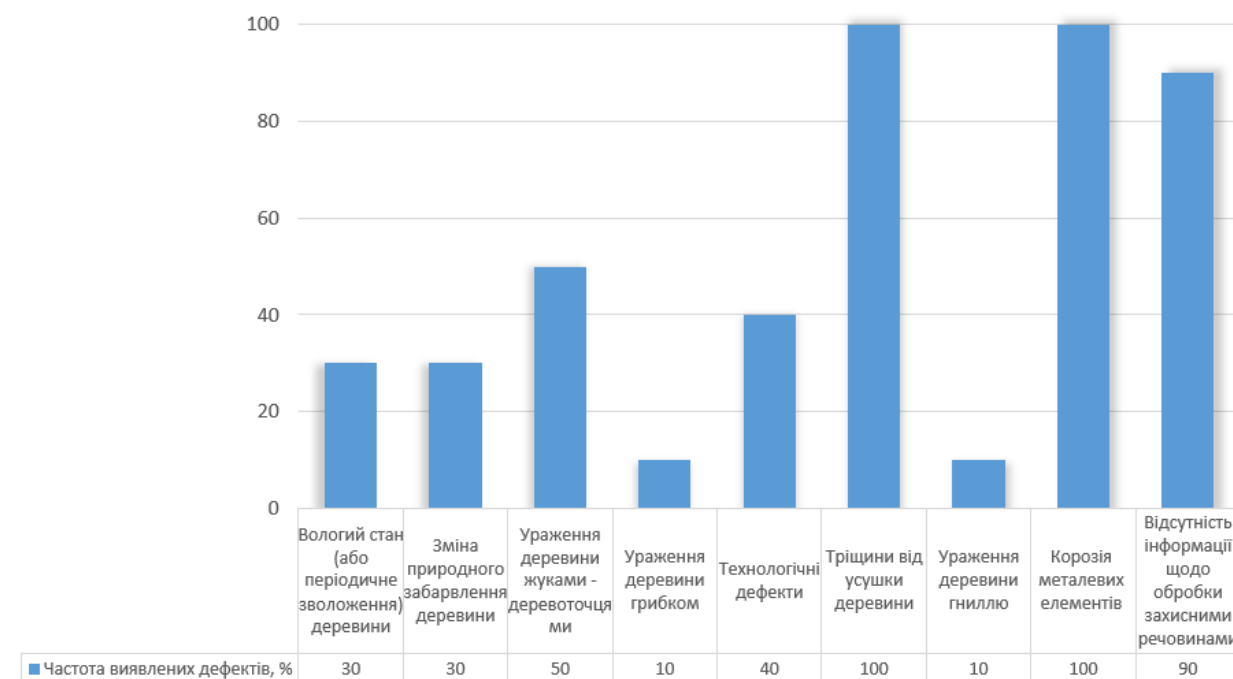


Рис.10. Частота виявлених дефектів і пошкоджень

Такі дефекти, як тріщина від усушки та корозія металевих елементів траплялись на всіх фермах. Відсутність інформації про обробку захисними речовинами була на 90% об'єктів. Ураження

деревини жуками-деревооточцями спостерігалось у 50 % ферм. У 40 % виявлені технологічні дефекти у вигляді нерівностей перерізів, залишків кори, не щільні примикання дерев'яних елементів у вузлах. У 30% об'єктів спостерігались наслідки від систематичного зволоження деревини (зміна забарвлення, гниття).

Висновки.

1. Найбільш поширеним дефектом дерев'яних елементів ферм є тріщини від усушки деревини та корозія металевих елементів вузлових з'єднань.

2. Наступним за поширенням дефект в дерев'яних фермах є відсутність інформації щодо обробки захисними речовинами (антисептиками та антипіренами). Враховуючи частоту зустрічання враження деревини жуками-деревооточцями, а також необхідність дотримання правил пожежної безпеки дуже важливо слідкувати за систематичністю обробки дерев'яних елементів захисними речовинами.

3. Найбільший негативний вплив із виявлених дефектів на дерев'яні елементи ферм несе систематичне зволоження, яке з часом призводить до розвитку грибків та гниття. В свою чергу гниття деревини, особливо на ділянках влаштування вузлів, значно знижує термін експлуатації дерев'яних ферм.

4. Вчасний ремонт і обслуговування дерев'яних ферм значно підвищує їх термін служби.

Список використаних джерел

1. Sobczak-Piastka, J., Pavluk, A., Gomon, S.S., Gomon, P., Homon, S., Lynnyk, I. (2023). Changing the position of the neutral line of beams made of glued wood in conditions of oblique bending. *AIP Conference Proceedings* 2928, 080007.

2. Roshchuk M., Homon S., Pavluk A., Gomon S., Drobyshynets S., Romaniuk M., Smal M., Dziubynska O., 2024. Effect of long-term moisture on the mechanical properties of wood: an experimental study. *Procedia Structural Integrity* 59, 718-723.

3. Homon S., Gomon P., Gomon S., Pavluk A., Karavan B., Petrenko O., Homon O., Chapiuk O., 2025. Determination of main strength and deformation parameters of complete diagrams of glue-laminated wood deformation. *Procedia Structural Integrity* 72, 301-307.

4. Gomon P., Gomon S., Pavluk A., Homon S., Chapiuk O., Melnyk Yu. (2023). Innovative method for calculating deflections of wooden beams based on the moment-curvature graph. *Procedia Structural Integrity* 48, Pp. 195-200.

5. Pavluk A., Gomon S., Ziatyuk Y., Gomon P., Homon S., Kulakovskiy L., Iasnii V., Yasniy O., Imbirovych N. (2023). Stiffness of solid wood beams under direct and oblique bending conditions. *Acta Facultatis Xylogologiae Zvolen*, 65(2), 109-121.

6. Pavluk A., Gomon S., Khoruzhyi M., Homon S., Dejneka O., Smal M., Dziubynska O., 2024. Peculiarities of calculation of wooden beams for oblique bending using the deformation model. *Procedia Structural Integrity* 59, 566-574.

7. Pavluk A., Gomon S., Gomon P., Homon S., Drobyshynets S., Sunak P., Uzhehov S., Protsiuk V., 2025. Experimental and theoretical studies of the rigidity of glulam beams under direct and oblique bending. *Procedia Structural Integrity* 72, 330-337.

8. ДБН В.1.2-14:2018 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. К.: Мінрегіон України, 2018. 36 с.

9. Frese M., Blas H.J., 2011. Statistics of damages to timber structures in Germany. *Engineering Structures* Volume 33, Issue 11, P. 2969-2977.

10. Brol J., Nowak T., 2017. Problems related to renovation of timber roof trusses of an industrial hall dating back to the first half of the 20th century. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW Forestry and Wood Technology* № 100, P. 121-127.

11. Csilla V. Damage problems in glued laminated timber., 2012. *Drewno* 55(188), P. 115-128.

12. Leandro D. Domenech, Gonzalo P. Cetrangolo, Vanesa Baño., 2010. Inspection, characterization and structural analysis of timber roof trusses: a case study in Uruguay. *Structural Health Assessment of Timber Structures*, P. 1-10.

13. Glišović I., 2024. Structural failures in timber structures: analysis of typical failure modes and their possible causes. Condition assessment, maintenance and rehabilitation of civil engineering facilities Vrnjačka Banja 19-21, P. 25 -40.

14. Eva Frühwald Hansson, 2011. Analysis of structural failures in timber structures: Typical causes

for failure and failure modes. *Engineering Structures* 33, 2978–2982.

15. A. Giuseppe Landi, E. Zamperini, 2022. Technique at the service of a new liturgical model: the timber roof of the church of Saints Marcellino and Pietro in Cremona, *Rivista Tema* 08.

16. Jan Kubica, Janusz Brol, Bernard Kotala, Marek Węglorz, 2025. Influence of damage to a timber truss roof structure on the stress distribution in a 17th century brick masonry vault. *Engineering Failure Analysis* 178, 109740.

17. N. Macchioni, M. Mannucci, 2018. The assessment of Italian trusses: survey methodology and typical pathologies. *International Journal of Architectural Heritage* 12, 533–544.

18. Hasníková H, Kuklík P. 2014. Various non-destructive methods for investigation of timber members from a historical structure. *Wood Res* 59(3), 411–420.

19. ДБН В.2.6-161:2017. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення. К.: Мінрегіон України, 2017. 111 с.

20. ДСТУ 9273:2024. Настанова щодо обстеження будівель і споруд для визначення та оцінювання їхнього технічного стану. Механічний опір та стійкість. К.: ДП “УкрНДНЦ”, 2024. 74 с.

21. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. К.: Мінрегіон України, 2017. 41 с.

Н.Ю. Імбірович¹, Ю.В. Шишко², В.В. Ткачук¹, І.В. Боярська¹

Луцький національний технічний університет¹

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»²

РЕЖИМИ СИНТЕЗУ КОНВЕРСІЙНИХ ПЛАЗМОЕЛЕКТРОЛІТНИХ ПОКРИТТІВ НА ЦИРКОНІЄВІЙ ОСНОВІ ТА ЇХ КОРОЗІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ

Метою роботи було проведення спектрального аналізу електролітичної плазми. Було встановлено, що температура плазми, в якій утворюється високотемпературний оксид, становить 8000-500 К. Досліджено вплив складу електроліту та співвідношення густин струму на електрофізичні параметри плазмоелектролітного окислення.

Під час дослідження було досліджено корозійну стійкість в такому агресивному середовищі, як 10% HCl. В результаті експериментів було встановлено, що отримані оксидокерамічні покриття характеризуються високою мікротвердістю та корозійною стійкістю.

Ключові слова: плазмоелектролітне окиснення, оксидокерамічні покриття, захисні покриття, мікроструктура, корозійні властивості, обробка поверхні.

N.Yu. Imbirovych, Yu. V. Shyshko, V.V. Tkachuk, I. V. Boiarska

SYNTHESIS MODES OF CONVERSION PLASMA-ELECTROLYTIC COATINGS ON ZIRCONIUM BASIS AND THEIR CORROSION PROPERTIES

The aim of the work was to conduct a spectral analysis of electrolytic plasma. It was established that the plasma temperature in which the high-temperature oxide is formed is 8000 500 K. The influence of the electrolyte composition and the ratio of current densities on the electrophysical parameters of plasma-electrolytic oxidation was investigated.

During the research, a study of corrosion resistance in such an aggressive environment as 10% HCl was conducted. As a result of the experiments, it was found that the obtained oxide-ceramic coatings are characterized by high microhardness and corrosion resistance.

Key words: plasma electrolytic oxidation, oxide ceramic coatings, protective coatings, microstructure, corrosion properties, surface treatment.

Statement of the problem. Due to its properties, zirconium and alloys based on it are widely used in various industries. For example, zirconium alloys have found their application in nuclear power engineering for the manufacture of shells of heat-generating elements with an increased operating temperature, channel pipes, etc. Such use is due to the ability of zirconium to have a low thermal neutron capture and high corrosion resistance [1]. Of course, the use of zirconium is not limited to the nuclear power industry. Alloys based on it are also attractive for chemical engineering, as a structural material with high anti-corrosion properties in acids and aqueous environments. Zirconium is an inert material in biological environments, and therefore promising in the medical industry. Due to this property, implants in dentistry and traumatology, as well as surgical instruments, are made from zirconium alloys [2, 3].

Protective coatings on alloy products, as is known, must meet many requirements, the most important of which are: sufficient adhesion of coatings to the substrate (base), uniformity in thickness, low porosity and, accordingly, high corrosion resistance, satisfactory mechanical properties (hardness, wear resistance). These and other characteristics depend on the method of coating application, the technological conditions of its formation, the nature and composition of the alloy.

In modern mechanical engineering, metals with low specific gravity and high corrosion resistance are widely used, for example, aluminum and titanium alloys, but their characteristics are often limited by low wear resistance and strength, the thickness of the protective film to various types of damage.

Most methods for protecting metal from corrosion are aimed at weakening or preventing the appearance of corrosion. Plasma electrolytic oxidation (PEO) has recently been considered a promising method for surface protection of light alloys against corrosion and mechanical damage [4].

The PEO method makes it possible to obtain coatings on metal surfaces that are identical in physicochemical properties (hardness, heat, wear, and corrosion resistance) to refractory ceramic materials [5]. The combination of functional properties with the decorative appearance of products obtained by this method makes it possible to use them in rocketry, shipbuilding, aviation, as well as in building decoration, etc.

Analysis of recent research and publications. Plasma-electrolytic oxidation (other names: microplasma, anodic spark, microarc) is one of the most promising methods of surface treatment of materials. The essence of the method is that when a high-density current passes through the metal-

electrolyte interface, conditions are created when the tension at the interface becomes higher than its dielectric strength and micro-plasma discharges with high local temperatures and pressures appear on the electrode surface. The result of the action of micro-plasma discharges is the formation of a coating layer consisting of oxidized forms of the elements of the base metal and components of the electrolyte. Depending on the modes of plasma-electrolytic oxidation (PEO) and the composition of the electrolyte, ceramic coatings with unique characteristics and a very wide range of applications can be obtained [6].

The advantages of the method are the ability to create ultra-strong coatings with unique characteristics, obtaining several protective characteristics in a complex, practically infinite service life of the electrolyte, the ability to process complex profile parts, high dispersion ability of the electrolyte (the coating is applied into holes and planes without difficulties), there is no need for special surface preparation before applying the coating and mechanical treatment after applying the coating, obtaining different coatings on the same material.

Setting tasks. The aim of the study was to investigate the corrosion resistance of oxide-ceramic coatings synthesized on a zirconium alloy Zr-2,5%Nb in an alkaline electrolyte of the composition 10 g/l KOH + 15 g/l liquid glass (the electrolyte base is distilled water).

Presentation of the main material. In general, the production line for PEO coatings consists of: power equipment (specialized power supplies); baths in which surface preparation, processing and washing are carried out; a manipulator for moving the suspension with parts (in the case of serial production); metal structures for placing baths and a manipulator; auxiliary equipment - a distiller, a pump-filter for cleaning and pumping solutions; reserve tanks, devices for controlling the quality of the coating and the state of the electrolyte.

The process of coating formation takes place in an electric field, which is a source of energy for plasma-chemical reactions on the working electrode. At a certain voltage, a sharp heating of the thin channel in the oxide layer occurs, and the current there is interrupted due to the formation of a vapor-gas bubble, due to the evaporation and electrolysis of the electrolyte. With a further increase in voltage, an electric spark breakdown of this bubble occurs, which is accompanied by a sharp thermal increase in its volume, and, accordingly, the interelectrode distance in the discharge channel - the voltage to maintain it begins to be insufficient, and the spark discharge is extinguished. After the discharge is extinguished, the bubble cools sharply and contracts, which is accompanied by a crackling characteristic of anodizing in a spark discharge. Galvanoluminescence, the valve effect, spark discharge at the anode, and electric breakdown of oxide films continue to be studied today [7]. In the breakdown channel, the temperature increases sharply, dissociation and ionization of the electrolyte occur, and a plasma clot is formed, in which plasma-chemical reactions of oxide synthesis take place.

In this work, the zirconium alloy Zr-2.5%Nb was investigated. The experiments were carried out in alkaline electrolytes based on distilled water of the following composition: 3 g/l KOH + 2 g/l liquid glass, 10 g/l KOH + 15 g/l liquid glass, 10 g/l KOH + 15 g/l liquid glass + 0,1 g/l GrO_3 , 10 g/l KOH + 15 g/l liquid glass + 0,1 g/l GrO_3 + 10 g/l glycerin, 10 g/l KOH + 15 g/l liquid glass + 0.1 g/l GrO_3 + 10 g/l glycerin + 10 g/l H_2O_2 , 10 g/l KOH + 15 g/l liquid glass + 0.1 g/l GrO_3 + 18 g/l glycerin + 10 g/l H_2O_2 . To achieve homogeneity of the electrolyte concentration throughout the volume, it was constantly stirred with air. Chromium oxide GrO_3 (VI), which is a strong oxidizer, is obtained by the action of excess concentrated H_2SO_4 on a saturated aqueous solution of potassium dichromate. Acidic chromium oxide, reacting with alkalis, forms chromates CrO_4^{2-} . The synthesis of oxide ceramics was carried out at different ratios of the anode current to the cathode current (I_a / I_c): 20/20 A / dm^2 , 10/15 A / dm^2 , 10/10 A / dm^2 , 20/30 A / dm^2 . Synthesis time from 20 to 60 min.

To solve this problem, the dependences of voltage change over time at a constant current density in the process of synthesis of a coating on titanium and zirconium alloys were constructed. The Faraday region is an integral part of the process at the pre-spark stage, and its duration depends on the method of implementing the process and the rate of voltage growth to the sparking potential.

Electrical parameters for the synthesis of oxide-ceramic coating (OCC) are selected mainly experimentally, without proper theoretical justification. However, it is the ratio of the anodic current to the cathodic current (I_a/I_c) and the voltage that determine the nature and intensity of the discharges, and also affect the temperature conditions on the alloy surface. These parameters also affect the functional characteristics of the formed coating, such as hardness, wear resistance, and corrosion resistance. When synthesizing OCC, the stage of spark discharge formation on the sample surface is important. Studies of voltage changes during the synthesis of oxide-ceramic coating on zirconium alloy Zr-2.5%Nb have shown that with the growth of the coating, the voltage on the anode smoothly decreases. An increase in the anodic

potential outside the Faraday region leads to a breakdown of the dielectric or semiconductor film of the anode, which is formed when passing the Faraday region (Fig. 1a). The breakdown occurs due to the injection of electrons from the valence band to the conduction band.

The formation of the OCP on the zirconium alloy occurs in two stages: in the first seconds, the anode voltage U_a increases by about 5...10 V (Fig. 1a, stage I), here the formation of the primary oxide film occurs by the electrochemical mechanism. The only reaction on the anode at a voltage of up to 100 V is the anodic growth of the oxide. In this case, the overvoltage of oxide formation is less than the voltage of electrolyte decomposition. At the second stage of the formation of the spark discharge channel in the “metal – oxide – electrolyte” system, with a further increase in voltage during the synthesis of the coating, a breakdown of this channel by electrons occurs.

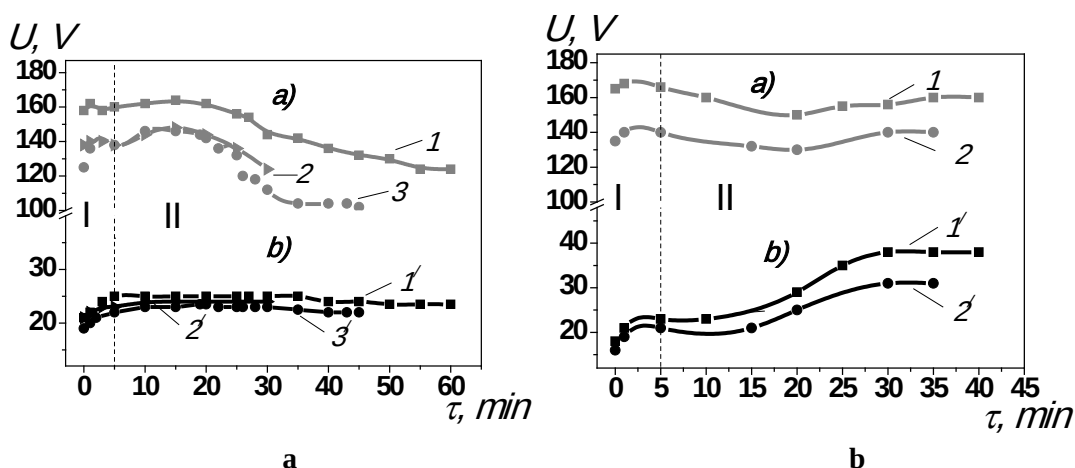


Fig. 1. Dependence of the anodic a) and cathodic b) voltages on the time of synthesis on zirconium alloy electrodes in electrolyte (a): 3 g/l KOH+2 g/l liquid glass with different current densities I_a/I_c : 1, 1/ - 20/20 A/dm², 2, 2/ - 10/15 A/dm², 3, 3/ - 10/10 A/dm²; (b): 10 g/l KOH+15 g/l liquid glass with different current densities I_a/I_c : 1.1/ - 20/20 A/dm², 2, 2/ - 10/10 A/dm²

During the synthesis of the anodic spark coating on the zirconium alloy, a slight increase in the anodic U_a and cathodic U_c voltages is observed with an increase in the concentration of KOH and liquid glass in the electrolyte (Fig. 1a, b). With an increase in the concentration of KOH and liquid glass (Fig. 1b, stage II) the process of coating formation stabilizes and occurs uniformly. Only with the addition of 10 g/l H_2O_2 at the stage of coating formation does the voltage begin to gradually decrease (Fig. 2, field II).

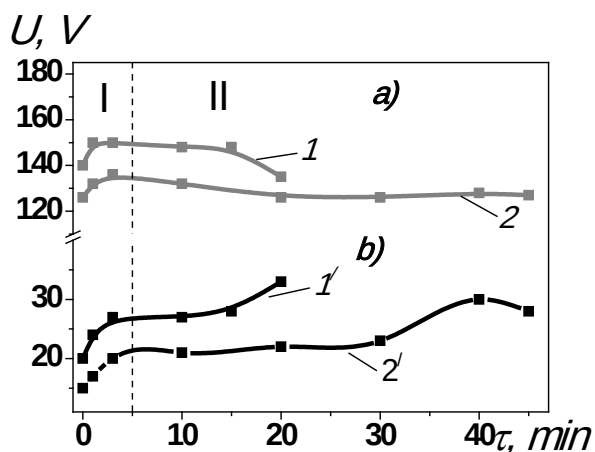


Fig. 2. Dependence of anodic (a) and cathodic (b) voltage on the synthesis time on zirconium alloy electrodes in an electrolyte 10 g/l KOH + 15 g/l liquid glass + 0.1 g/l GrO_3 + 18 g/l glycerol + 10 H_2O_2 with different current densities: 1, 1/ - 20/30 A/dm², 2, 2/ - 10/15 A/dm².

A single reaction on the anode at a voltage of up to 100 V results in anode growth of the oxide. In this case, the overvoltage is created by the mensch oxide due to the voltage of the electrolyte.

Thus, the electrophysical parameters of the process of synthesis of OKP on zirconium alloy depend on the composition of the electrolyte and the ratio of the density of the anodic current to the cathodic current.

© Н.Ю. Імбирович, Ю.В. Шишко, В.В. Ткачук, І.В. Боярська

Thus, in the least concentrated electrolyte, which contains alkali and liquid glass, the synthesis is uneven, which affects the quality of the coating. Such a coating does not completely cover the surface of the metal, forming islands of synthesized oxide on the surface (Fig. 3) and, therefore, is not of high quality.



Fig. 3. Oxide-ceramic coatings on zirconium alloy (processing modes are given in Table 1)

Table 1

Processing modes of oxide-ceramic coatings on zirconium alloy

№	electrolyte composition, g/l			I_a/I_c , A/dm ²	τ , min	H_μ , GPa	thickness, m
	KOH	liquid glass	GrO ₃				
1	5	5	—	14/20	30	9	70...100
2	10	15	—	20/20	40	16	70...130
3	10	15	0,1	20/20	30	10	90...160
4	3	2	—	20/20	30	14	20...50

Plasma electrolyte coating is inert. One of the explanations in them is that there are various options for compounds that can lead to the destruction of metal or alloy. All this reduces the functionality of the power and will soon end the use of the alloy. Due to the fact that the corrosion chemistry of plasma-electrochemical coatings on zircon and titanium alloys in various corrosive-aggressive environments is revealed and it is important for their corrosion jets, for these they judged the speed of corrosion alloys.

After the formation of the OCC, corrosion processes are essentially galvanized. In hydrochloric acid environments, corrosion flows, which are reduced in a curve against the matrix in the order.

It is seen that high corrosion power of zirconium is allowed into a thin-walled acidified liquid of oxides partially ZrO₂ (Table 2). However, respected minds, engaged and declaring personally aggressive middle peasants (including in the case of robots) chickens, within the limits of small thickness and low rigidity, do not exclude high anti-corrosion powers.

Corrosion jets covered this, which judged the speed of corrosion of the material, reducing all the systems used.

The corrosion potential of the corrosion-German zirconium alloy when diluted with 10% HCl has a negative value of -370 mV (Fig. 4 a), the corrosion jet is 80 mA / m².

When forming this alloy, OCC produces softening by 1...2 serial places in the electrolyte warehouse, where the tires were synthesized. Since it is synthesized in a low-concentration electrolyte, which is the case with alkali and glass, it is possible to find lower corrosion activity because of this, which were synthesized in more concentrated electrolytes and have a value of $1,2 \cdot 10^{-3}$ A/m² (Fig. 4 a, curve 4). With an additional increase in the concentration of electrolyte on the streams of corrosion and cor OCC are reduced.

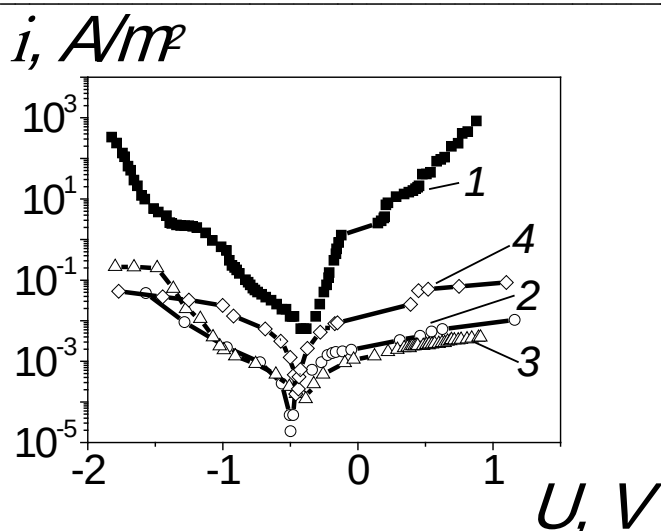


Fig. 4. Polarization curves: a – zirconium alloy (1) and its OCC (2, 3, 4) in a 10% HCl solution (modes are presents in Table 1)

Table 2

Corrosion potential and current of Zr - 2,5%Nb alloy and coating on it under different oxidation regimes

№	Corrosive environment	electrolyte composition, g/l				I_a/I_c A/dm ²	τ , min	U_{cor} , B	i_{cor} , A/m ²
		KOH	l.g.	CrO ₃	H ₂ O ₂				
1	10%HCl	—	—	—	—	—	—	0,37	$8,07 \cdot 10^{-2}$
2		10	15	—	10	20/20	30	0,41	$0,21 \cdot 10^{-4}$
3		10	15	—	—	20/20	30	0,50	$1,39 \cdot 10^{-4}$
4		3	2	—	—	20/20	20	0,45	$12,07 \cdot 10^{-4}$

The coating obtained in an electrolyte of 10 g/l KOH + 15 g/l rs has a corrosion current value of $1,39 \cdot 10^{-4}$ A/m², and when 10 g/l H₂O₂ is introduced into the electrolyte, the i_{cor} decreases to a value of $1,21 \cdot 10^{-4}$ A/m².

This result is obviously associated with the combination of high hardness and thickness of the coating.

Conclusions. Plasma is formed within 3...5 min (initial section of the curve), the voltage in this section increases. Further increase in the electrolyte concentration by increasing the content of the main composition of KOH and liquid glass and by introducing additional chromium stabilizes the synthesis process. The current ratio does not change the nature of the voltage dependences on time, i.e. does not affect the stability of the synthesis process. A decrease in currents reduces the anodic and cathodic components of voltage, and this in turn affects the properties of the coatings. The most favorable conditions for the formation of oxide are formed at a current density ratio of $I_a/I_c=1,5$ and at a relatively low electrolyte concentration of 10 g/l KOH+15 g/l liquid glass. Studies of the corrosion properties of plasma-electrolytic coatings showed that the corrosion currents of the OCC for all studied systems are reduced by 2...3 orders of magnitude.

List of sources used.

1. Linlin Wang, Xin Hu, X. Nie. Deposition and properties of zirconia coatings on a zirconium alloy produced by pulsed DC plasma electrolytic oxidation. Surface and Coatings Technology, Vol. 221, 2013, P. 150-157. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.01.040>.
2. Sandhyarani M, Prasadrao T, Rameshbabu N. Role of electrolyte composition on structural, morphological and in-vitro biological properties of plasma electrolytic oxidation films formed on zirconium. Applied Surface Science, Vol. 317, 2014, P. 198-209, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.08.081>.
3. Shalabi MM, Gortemaker A, Hof MAV, Jansen JA, Creugers NHJ. Implant Surface Roughness and Bone Healing: a Systematic Review. Journal of Dental Research. 2006;85(6):496-500. doi:10.1177/154405910608500603

© Н.Ю. Імбіроч, Ю.В. Шишко, В.В. Ткачук, І.В. Боярська

4. Kazem Babaei, Arash Fattah-alhosseini, Razieh Chaharmahali, A review on plasma electrolytic oxidation (PEO) of niobium: Mechanism, properties and applications, *Surfaces and Interfaces*, Vol. 21, 2020, 100719, <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100719>
5. Polo, T.O.B., Silva, W.P.P., Momesso, G.A.C. *et al.* Plasma Electrolytic Oxidation as a Feasible Surface Treatment for Biomedical Applications: an *in vivo* study. *Sci Rep* **10**, 10000 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65289-2>
6. Tabares Ocampo J, Marín Valencia V, Robledo SM, Upegui Zapata YA, Restrepo Múnera LM, Echeverría F, Echeverry-Rendón M. Biological response of degradation products of PEO-modified magnesium on vascular tissue cells, hemocompatibility and its influence on the inflammatory response. *Biomater Adv.* 2023 Nov;154:213645. doi: 10.1016/j.biomadv.2023.213645. Epub 2023 Sep 30. PMID: 37806213.
7. Li, L.; Yang, E.; Yan, Z.; Xie, X.; Wei, W.; Li, W. Effect of Pre-Anodized Film on Micro-Arc Oxidation Process of 6063 Aluminum Alloy. *Materials* 2022, 15, 5221. <https://doi.org/10.3390/ma15155221>

А. В. Букетов¹, В. Ю. Стрельченко¹, О. В. Тотосько², В. В. Соценко¹,
Д. В. Житник¹, О. М. Безбах¹, Е. С. Аппазов¹

Херсонська державна морська академія¹

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя²

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ І ТЕПЛОСТІЙКОСТІ ПЛАСТИФІКОВАНИХ ЕПОКСИКОМПОЗИТІВ З МІКРОДОБАВКАМИ

У статті досліджено вплив мікронаповнювачів на механічні і теплофізичні властивості епоксидних композитів на основі пластифікованої смоли DER 331. Як мікронаповнювачі використано порошки оксиду хрому Cr_2O_3 (20 мкм) та карбиду кремнію SiC (40 мкм) за вмісту від 5 до 20 мас.%. Досліджено механічні властивості: руйнівні напруження і модуль пружності при згині, ударна в'язкість. Додатково проводили випробування теплостійкості розроблених матеріалів.

Порівняльний аналіз впливу мікронаповнювачів підтверджує перевагу застосування оксиду хрому порівняно з карбідом кремнію для покращення властивостей епоксидних композитів. При концентрації 10 мас.% оксид хрому забезпечує на 6,4 % вищу міцність матеріалів (85,2 МПа проти 80,1 МПа) та на 17,6 % вищий модуль пружності (4 ГПа проти 3,4 ГПа) порівняно з композитами, наповненими карбідом кремнію. Ця перевага зумовлена кращою адгезією до матриці та здатністю до утворення фізичних, ковалентних та іонних зв'язків на межі поділу фаз.

Найкращі результати характерні для матеріалу з оксидом хрому, який за вмісту 15 мас.% забезпечує формування КМ зі значеннями міцності на розрив (88,3 МПа), модуля пружності (4,2 ГПа) та теплостійкості (364 К). Механізм покращення властивостей полягає у тому, що мікродисперсні частки формують структурний каркас, який створює бар'єри при поширенні тріщин (тобто, відбувається когезійне зміцнення матеріалу). Для композитів з Cr_2O_3 ключовим є також утворення додаткових фізикохімічних зв'язків з матрицею, що забезпечує термостабільність нових матеріалів.

Ключові слова: епоксидний композит, механічні і теплофізичні властивості, наповнювачі, полімер, покриття, пластифікатор.

A. V. Buketov, V. Yu. Strelchenko, O. V. Totosko, V. V. Sotsenko,
D. V. Zhytnyk, O. M. Bezbakh, E. S. Appazov

RESEARCH ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND HEAT RESISTANCE OF PLASTICIZED EPOXY COMPOSITES WITH MICROADDITIONALS

The article investigates the influence of microfillers on the mechanical and thermophysical properties of epoxy composites based on plasticized resin DER 331. As microfillers, chromium oxide Cr_2O_3 powders (20 μm) and silicon carbide SiC (40 μm) were used with a content of 5 to 20 wt%. Mechanical properties were investigated: fracture stress and modulus of elasticity during bending, impact strength. Additionally, heat resistance tests of the developed materials were conducted.

Comparative analysis of the effect of microfillers confirms the advantage of using chromium oxide compared to silicon carbide for improving the properties of epoxy composites. At a concentration of 10 wt.% chromium oxide provides 6.4% higher strength of materials (85.2 MPa vs. 80.1 MPa) and 17.6% higher modulus of elasticity (4 GPa vs. 3.4 GPa) compared to composites filled with silicon carbide. This advantage is due to better adhesion to the matrix and the ability to form physical, covalent and ionic bonds at the interface.

The best results are characteristic of the material with chromium oxide, which at a content of 15 wt.% provides the formation of CM with values of tensile strength (88.3 MPa), elastic modulus (4.2 GPa) and heat resistance (364 K). The mechanism of improving the properties is that microdispersed particles form a structural framework that creates barriers to crack propagation (i.e., cohesive strengthening of the material occurs). For composites with Cr_2O_3 , the formation of additional physicochemical bonds with the matrix is also key, which ensures the thermal stability of new materials.

Keywords: epoxy composite, mechanical and thermophysical properties, fillers, polymer, coating, plasticizer.

Problem statement. Modern technologies require the development of materials with high mechanical properties and resistance to thermal loads [1-12]. Epoxy composites remain one of the most promising polymer systems due to their improved adhesion, strength and chemical resistance. However, their brittleness and limited thermal resistance necessitate modification [1-4].

Analysis of recent studies and publications. For plasticization of epoxy matrices, phthalic acid ethers, dibutyl phthalate, and also diethylene glycol DEG-1 are widely used [8]. We previously established the optimal content of DEG-1 in an epoxy binder based on the oligomer DER 331 and substantiated that from the point of view of rheological, mechanical properties and heat resistance in the resin (100 wt.%) it is advisable to introduce 12 wt.% of the plasticizer. As a hardener, polyethylenepolyamine (PEPA) was used in an amount of 12 wt.%, which provides an optimal polymerization rate at room temperature [5, 7].

To further strengthen the structure and improve the properties of CM, it is advisable to introduce fillers of various nature and sizes. These include microparticles, in particular chromium oxide (Cr_2O_3) and silicon carbide (SiC). They are added to increase impact resistance and thermal stability.

The purpose of the work is to investigate the mechanical properties and heat resistance of plasticized epoxy composites with microadditives in the form of chromium oxide and silicon carbide.

Materials and research methods. During the formation of polymer compositions, the epoxy resin DER 331 (ISO 9001) was chosen as the basis, which is the reaction product of epichlorohydrin and bisphenol A. The epoxy oligomer was plasticized with aliphatic resin DEG-1 in an amount of 12 wt.% per 100 wt.% DER 331. Polyethylene polyamine (TU 2413-357-00203447-99) was used to cure epoxy compositions. As microdispersed additives, the work used powders of chromium oxide (Cr_2O_3) (ISO 4621:1986) and silicon carbide (SiC) (ISO 8486-2:2007) with particle sizes of 20 μm and 40 μm , respectively.

The values of the ultimate stress and the modulus of elasticity in bending were determined using a four-point loading scheme according to ASTM D 790-03. The impact toughness was tested by the Charpy impact without notch (ISO 179-1). The heat resistance of the isotropic polymer composites was tested using Martens according to ISO 75-2.

Discussion of the results. The study of the influence of chromium oxide microadditions revealed a significant improvement in the performance characteristics of the epoxy composite in the content range of 10...15 wt.% (Fig. 1). The destructive stresses demonstrate an intensive increase to 85.2 MPa at 10 wt.% and 88.3 MPa at 15 wt.%, which is explained by the formation of a volumetric dispersed-filled structure. Cr_2O_3 particles, having a high surface energy, create an effective barrier system for the propagation of microcracks.

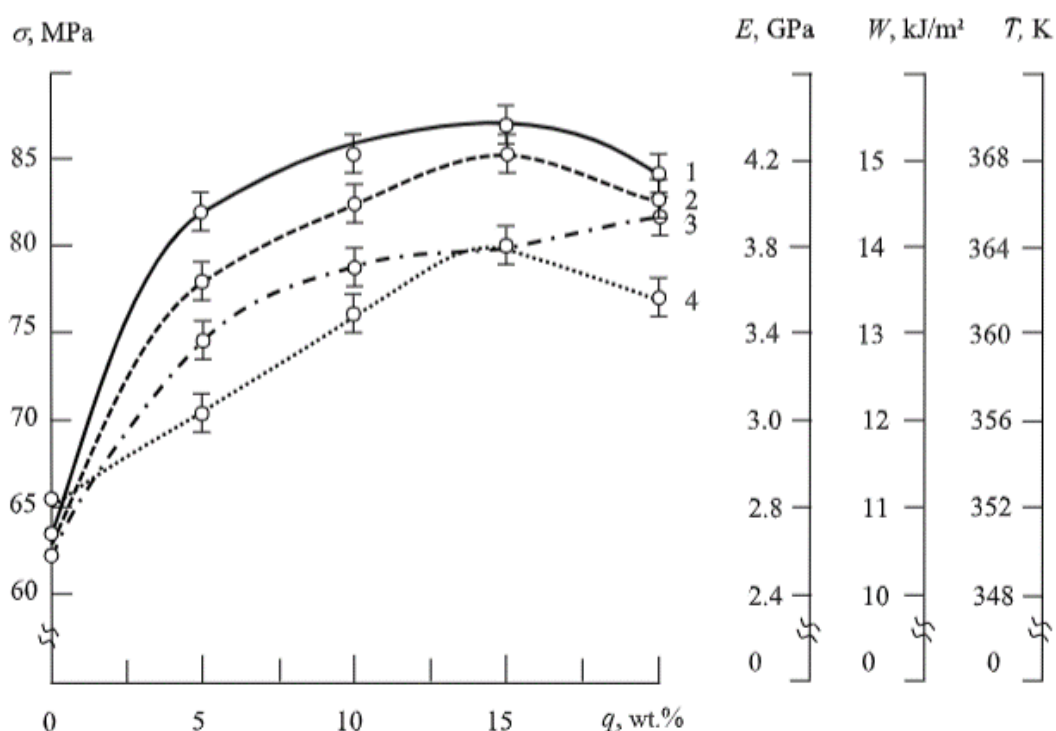


Fig. 1. Dependence of the cohesive properties of CM on the content of chromium oxide microfiller: 1 – failure stress (σ); 2 – modulus of elasticity (E); 3 – impact strength (W); 4 – heat resistance (T).

The elastic modulus increases from 2.6 GPa to 4 GPa at 10 wt.% and reaches 4.2 GPa at 15 wt.%, reflecting the ability of microadditives to create a structural framework of increased rigidity.

The impact strength shows a stable increase from 10.4 kJ/m² to 13.5 kJ/m² at 10 wt.% and 13.8 kJ/m² at 15 wt.%, which indicates the activation of energy dissipation mechanisms. The filler particles are centers of multiple deflection and branching of cracks, increasing their propagation path.

The heat resistance of the composites increases from 352 K to 360 K at 10 wt.% and to 364 K at 15 wt.%, demonstrating the ability of chromium oxide to create a thermostabilizing effect. This is due to an

increase in the thermal conductivity of the system and a decrease in the molecular mobility of polymer chains.

The strengthening mechanism is based on the principle of composite synergism, where microdispersed particles form a spatial reinforcing system. At a content of 10...15 wt.%, a critical level of filling is achieved, which provides optimal density of reinforcing elements without their agglomeration. This creates conditions for effective redistribution of stresses across the volume of the material.

A feature of Cr_2O_3 is the ability to form chemical bonds with the epoxy matrix through surface hydroxyl groups. This provides strong adhesion at the phase interface and prevents defects under load. Functional groups on the surface of chromium oxide contribute to the formation of coordination bonds with functional groups of the polymer.

The optimal content range of 10...15 wt.% corresponds to the maximum efficiency of the additive. At these values, an optimal ratio between volumetric filling and effective transfer of the polymer to the state of the outer surface layers was observed [5]. Further increase in filler content leads to further improvement of CM properties.

Thermal stabilization occurs by creating thermal barriers and increasing the heat resistance of composites. Cr_2O_3 particles, having high thermal conductivity, form heat-conducting paths that contribute to uniform temperature distribution.

The increase in impact strength is due to the activation of multiple energy dissipation mechanisms: crack deflection, their branching, and plastic deformation of the matrix around the particles. This leads to the conversion of kinetic energy into surface energy of newly formed surfaces.

Microstructural studies show that Cr_2O_3 particles are distributed mainly in the intercluster spaces of the polymer, creating additional reinforcement in areas of stress concentration. Such morphology contributes to increased resistance to various types of loads.

Therefore, the introduction of micro-additions of chromium oxide in the amount of 10...15 wt.% allows achieving a comprehensive improvement in properties: increasing strength by 33...38%, modulus of elasticity by 54...62%, impact strength by 30...33%, and heat resistance by 8...12 K. The results obtained demonstrate the high efficiency of Cr_2O_3 for creating adhesives and composites with increased performance characteristics.

The results of tests of the influence of silicon carbide microadditives on the properties of CM revealed their monotonic improvement compared to the original matrix (Fig. 2). An increase from 64.2 MPa to 80.1 MPa of destructive stresses was established at the optimal concentration of the additive (10 wt.%), which is associated with the ability of SiC particles to partially screen the trajectories of crack propagation. The elastic modulus increases to 3.4 GPa (at 10 wt.%), reflecting the formation of a rigid structural framework of the introduced particles. The impact strength reaches a maximum of 14 kJ/m² at 10 wt.%, which is explained by the ability of dispersion-filled CM to resist impact loads and branch cracks. At the same time, this CM is characterized by heat resistance, which is 360 K. This is evidence of the formation of a composite that is characterized by a thermostabilizing effect.

A comparative analysis of the effectiveness of the influence of Cr_2O_3 and SiC particles on the properties of CM (Fig. 1 and Fig. 2) demonstrates a significant advantage of chromium oxide as a microfiller. At the optimal content of Cr_2O_3 (10 wt.%), CM is formed with higher values of destructive stresses (85.2 MPa versus 80.1 MPa in CM with SiC) and elastic modulus (4 GPa versus 3.4 GPa in CM with SiC). This difference is 6.4% for strength and 17.6% for elastic modulus in favor of CM filled with Cr_2O_3 particles.

The advantage of CM with Cr_2O_3 is especially noticeable when comparing heat resistance indicators: at 10 wt.% it provides an increase in heat resistance to 360 K, but at 15 wt.% the value of 364 K was obtained, while CM with SiC demonstrates maximum heat resistance only up to 362 K at 15 wt.%. The difference in mechanisms is due to the better adhesion of Cr_2O_3 to the epoxy matrix due to its surface chemical properties.

Cr_2O_3 particles form a greater number of physicochemical bonds with the functional groups of the polymer, which provides a more effective counteraction to the influence of external stresses. In addition, Cr_2O_3 demonstrates better thermostabilizing properties due to higher heat resistance and the ability to create more effective thermal barriers.

Economic analysis also indicates in favor of Cr_2O_3 , since its effectiveness at lower concentrations allows to reduce the costs of composite production. Thus, despite similar strengthening mechanisms, chromium oxide demonstrates higher efficiency as a microfiller for epoxy composites compared to silicon

carbide. This advantage is manifested in a more significant increase in mechanical characteristics and heat resistance, which makes Cr_2O_3 a more promising material for creating high-performance structural composites.

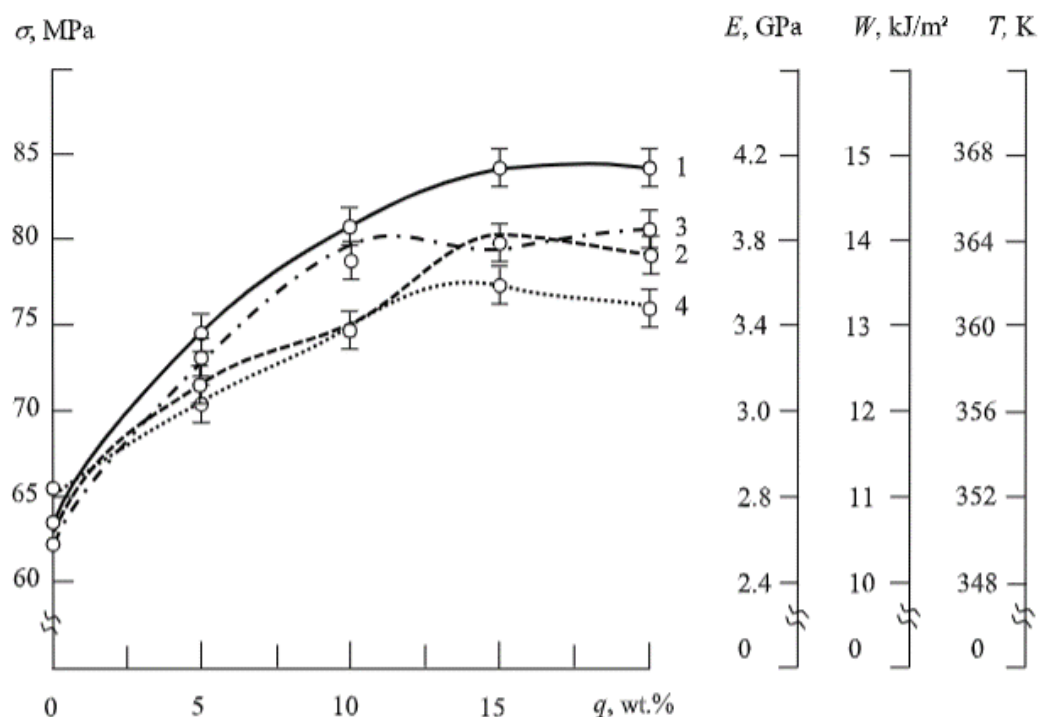


Fig. 2. Dependence of the cohesive properties of CM on the content of silicon carbide microfiller: 1 – fracture stress (σ); 2 – modulus of elasticity (E); 3 – impact strength (W); 4 – heat resistance (T).

Conclusions.

1. Microfillers (Cr_2O_3 and SiC) demonstrate high efficiency at a significantly higher (compared to nanoadditives) content in composites (10...15 wt.%). The best results are characteristic of the material with chromium oxide, which at a content of 15 wt.% ensures the formation of CM with values of tensile strength (88.3 MPa), elastic modulus (4.2 GPa) and heat resistance (364 K). The mechanism of improving properties is that microdispersed particles form a structural framework that creates barriers to crack propagation (i.e., cohesive strengthening of the material occurs). For composites with Cr_2O_3 , the formation of additional physicochemical bonds with the matrix is also key, which ensures the thermal stability of new materials.

2. Comparative analysis of microfillers confirms the advantage of using chromium oxide compared to silicon carbide to improve the properties of epoxy composites. At a concentration of 10 wt.% chromium oxide provides 6.4% higher strength of materials (85.2 MPa vs. 80.1 MPa) and 17.6% higher modulus of elasticity (4 GPa vs. 3.4 GPa) compared to composites filled with silicon carbide. This advantage is due to better adhesion to the matrix and the ability to form physical, covalent and ionic bonds at the interface.

3. The synergistic effect of combining the plasticizer DEG-1 (12 wt.%) with fillers of different size classes allows for a controlled modification of the composite structure: microparticles (Cr_2O_3) form a volumetric reinforcing framework, which increases the stiffness and heat resistance of the composites. This opens up prospects for the creation of new hybrid composites with predicted properties.

List of sources used

1. Shaffer, E.O., McGarry, F.J., Hoang, Lan: Designing reliable polymer coatings. Polymer Engineering & Science. 36 (18), 2375-2381 (1996).
2. Yan, L., Chouw, N., Jayaraman, K.: Flax fibre and its composites – A review. Composites Part B: Engineering. 56, 296–317 (2014).
3. La Mantia, F.P., Morreale, M.: Green composites: A brief review. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 42(6), 579-588 (2011).

4. Chandrasekaran, S., Seidel, C., Schulte, K.: Preparation and characterization of graphite nano-platelet (GNP)/epoxy nano-composite: Mechanical, electrical and thermal properties. *European Polymer Journal*. 49 (12), 3878–3888 (2013).
5. Stukhlyak, P.D., Buketov, A.V., Panin, S.V., Maruschak, P.O., Moroz, K.M., Poltaranin, M.A., Vukherer, T., Kornienko, L.A., Lyukshin, B.A.: Structural fracture scales in shock-loaded epoxy composites. *Physical Mesomechanics*. 18 (1), 58-74 (2015).
6. Rubino, F., Nisticò, A., Tucci, F., Carlone, P.: Marine Application of Fiber Reinforced Composites: A Review. *Journal of Marine Science and Engineering*. 8 (1): 26 (2020).
7. Brailo, M.V., Buketov, A.V., Yakushchenko, S.V., Sapronov, O.O., Dmytriiev, D.O., Buketova, N.M.: Development of epoxy-polyester nanocomposite materials with improved physical and mechanical properties for increasing transport vehicle reliability. *Journal of nano- and electronic physics*. 13 (1), 01003-1–01003-5 (2021).
8. Friedrich, K., Almajid, A.A.: Manufacturing Aspects of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications. *Applied Composite Materials*. 20(2), 107-128 (2012).
9. Mallick, P.K.: *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*. 3rd ed. CRC Press (2007).
10. Greene, E.: Marine composites and IMO fire safety requirements. In: *Marine Composites* (2nd ed.), pp. 437-458. Butterworth-Heinemann (2019).
11. Hoffman, R.L.: Explanations for the cause of shear thickening in concentrated colloidal suspensions. *Journal of Rheology*, 42 (1), 111–123 (1998). Pascault, J.-P., Williams, R.J.J.: *Epoxy Polymers: New Materials and Innovations*. Wiley-VCH (2010).
12. Mewis, J., Wagner, N.J.: *Colloidal Suspension Rheology*. Cambridge University Press (2012).

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАННЯ СТАТЕЙ

Стаття надсилається до редакції збірника у паперовому варіанті з підписами авторів на адресу: 43018, м. Луцьк, вул. Львівська 75, Луцький НТУ; в електронному вигляді у форматі MS WORD– на електронну адресу: naukovi-notatki@lutsk-ntu.com.ua. Обидва варіанти повинні бути ідентичними.

Наукова стаття обов'язково повинна мати наступні необхідні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті; виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень у даному напрямку.

1. **Статтю можна подавати українською або англійською мовою.** Стаття повинна бути набрана у текстовому редакторі не нижче MS WORD 97/03 і надрукована тільки на лазерному або струйному принтері на білих листах формату А4 (297x210 мм). Нумерацію сторінок не виконувати. Обсяг статті від 4-9 сторінок.
2. Параметри сторінки: верхнє, нижнє та ліве поле – 2 см, праве поле 2,5 см. Від краю до колонтитула верхнього – 1,25 см, нижнього – 1,25 см.
3. Шапка статті: індекс УДК, ініціали та прізвища авторів розміщується на один абзац нижче шрифтом 11 пт, назва організації – набираються з нового рядка шрифтом Time New Roman Суг розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по центру. Назва статті розміщується на один абзац нижче назви організації, набирається шрифтом Time New Roman Суг розміром 11 пт з напівжирним виділенням і вирівнюється по центру.
4. **Анотації** українською та англійською мовами набираються з абзацного відступу шрифтом Time New Roman Суг розміром 9, курсив, напівжирний 300-500 друкованих знаків з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по ширині; англійською мовами розширена анотація 700-1000 друкованих знаків.
5. Нижче анотацій обов'язково вказуються ключові слова шрифтом Time New Roman Суг, курсив, напівжирний 9 пт.
6. Основний текст розміщується на 1 см нижче анотацій, набирається з абзацного відступу 1 см шрифтом Time New Roman Суг розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюється по ширині.
7. Для набирання формул застосовувати редактор формул MS WORD (використовувати шрифти: Symbol, Time New Roman Суг; розміри шрифтів: звичайний 12 пт, крупний індекс 7 пт, дрібний індекс 5 пт, крупний символ 18 пт, дрібний символ 12 пт). Формула вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка.
8. Якщо в статті присутні ілюстрації, необхідно розташовувати їх по тексту, вирівнюючи підписи (*Рис. 1. Схема ...*) по ширині з абзацного відступу 1 см. Другий екземпляр ілюстрації необхідно подати на окремому листі. Ілюстрації повинні бути чіткими та контрастними.
9. Таблиці розташовувати по тексту, причому їх ширина повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею поставити її порядковий номер (*Табл. 1*) вирівнюючи по правому краю, під яким розмістити назву таблиці вирівнюючи по центру.
10. Література подається загальним списком в кінці рукопису згідно з вимогами державного стандарту через 1 см від останнього рядка.

11. **Обов'язково** подати статтю. на лазерному диску. Статті можна також пересилати електронною поштою за такою адресою: **naukovi-notatki@lutsk-ntu.com.ua**
12. До статті **обов'язково** додається **рецензія від** провідного вченого за науковим спрямуванням статті та **авторська довідка** у письмовому та електронному вигляді за вказаною формою:

Прізвище, Ім'я, По-батькові

Місце роботи, посада, науковий ступінь, вчене звання

Наукові інтереси, ORCID

Назва статті та особисті підписи усіх авторів

Адреса для листування, телефон, e-mail, контактну особу

14. В кінці статті обов'язково вказуються ПІБ, посаду, науковий ступінь, вчене звання рецензента статті.
15. Рукописи, що не відповідають вище вказаним вимогам, не розглядаються і до друку не приймаються.

ЗРАЗОК ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

УДК: 620.179.16

І.І. Іванов¹, П.П. Петров²

*Луцький національний технічний університет¹
Тернопільський національний технічний університет²*

НАБЛИЖЕНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОСІ КОНОЇДА, ПРЕДСТАВЛЕНОГО ДИСКРЕТНИМ КАРКАСОМ ТВІРНИХ

*Розроблено алгоритм наближеного визначення осі коноїда, представленого дискретним каркасом
спільних твірних.*

Ключові слова: вісь коноїда, дискретний каркас, твірна.

I. Ivanov, P. Petrov

AXIS APPROXIMATE DEFINITION OF CONOID DESCRIBED BY THE SET OF STRAIGHT LINES

*The algorithm of axis approximate definition of conoid described by the set of straight lines is made. The approximate
conoid axis is a line. Conoid is created by straight lines.*

Keywords: conoid axis, discretely carcass of straight lines.

Постановка проблеми. На коноїді, представленому дискретним каркасом....

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наскільки відомо автору з.....

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – розробити алгоритм....

Викладення основного матеріалу. Для наближеного визначення осі використовувалася така
властивість коноїдів: усі твірні поверхні перетинають її вісь [1].

формула (1)

Рисунок

Рис. 1. Назва рисунка

Назва таблиці

Табл. 1.

Висновки. В статті розроблено алгоритм наближеного....

Список використаних джерел:

ПБ, посада, науковий ступінь, вчене звання рецензентів статті.

Ціна договірна

Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки».

Комп'ютерний набір та верстка: О.Д. Клименко

Наклад 300 прим.

Веб-сайт збірника:

<http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi-notatky>

Довідки за e-mail: naukovi-notatki@lutsk-ntu.com.ua

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 7 від 26 грудня 2025 р.

Свідоцтво Державної реєстраційної служби України серія КВ, № 15901-4373ПР від 13.11.2019 р.

ISSN: 24-15-39-66