

Міністерство освіти та науки України

Луцький національний технічний
університет

НАУКОВІ НОТАТКИ

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

Випуск 79-80

Луцьк 2024

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; 132 Матеріалознавство; 133 Галузеве машинобудування – 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);

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);

Луньов 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
Г.М. Губаль Оптимальна побудова математичних таблиць і визначників матриць у системі LaTeX.....	9
О.Л. Садова, М.І. Вишинський Дослідження механічних властивостей та структури біокомпозитів, наповнених подрібненими стеблами зернових культур.....	16
Ю. В. Максим'юк, О. М. Федчук, О. В. Строк Дослідження технологій доповненої реальності і технічних наук: практичне застосування.....	23
Т.В. Приймак, Д. М. Червінко, І. М. Гасюк, О. Г. Попадинець Розробка методу очищення авіаційних мініатюрних підшипників кочення.....	31
О.В. Гаврильченко, В.С. Шенбор Обґрунтування параметрів вібраційного конвеєра для завантаження автоматизованого обладнання сипкими продуктами	40
К.С. Шевчук, В.Ю. Науменко, О.В. Дерев'янка, О.Б. Згала-Лозинський Виготовлення філаментів для 3D-друку з ABS пластику зміцненого базальтовими волокнами.....	45
О.В. Гаврильченко, В.С. Шенбор Обґрунтування параметрів вібраційного конвеєра з незалежними коливаннями для транспортування виробів та матеріалів.....	50
Л.І. Никируй, І.П. Яремій, С.А. Федосов Наноккомпозити на основі TiO_2 для фотокаталітичної деградації органічних барвників.....	56
В. І. Шеремет, М. Я. Втерковський, С. Ю. Тесля, Т. О. Соловйова Оптимізація процесу холодного ізосатичного пресування порошків магнію та його сплавів.....	65
В.І. Осипенко, М.Р. Прусс Вплив внутрішньої структури та розмірів типових сопел на поле ріжучого тиску асистуючого газу при газолазерному різанні	70
В.І. Осипенко, Л.М. Мізнік, Л. Д. Мисник Пошук раціонального профілю різального краю ножа подрібнювача пластично в'язких матеріалів.....	79
В. В. Яковець Розробка методів виявлення аномалій у веб-додатках із використанням інтелектуального аналізу даних.....	86
В.М. Франчук, Л.М. Самчук Управління та контроль якості на виробництві при виготовленні деталей типу корпус.....	93
В.В. Герасимов, О.О. Молнар, В.Д. Рудь, М.В. Полажинець, Ю.Ю. Жигуц Розробка сучасних індивідуальних систем безпеки при роботі з розкрійним обладнанням в швейній галузі.....	100
Ю. В. Муравинець Оцінка впливу параметрів притискного транспортера на надійність притискання пасм.....	105
В. І. Заваринський, Р. В. Павлюк, Ю. І. Озимок Напрямки вдосконалення конструкцій рейсмусових верстатів.....	108
Р.В. Росул, О.В. Максютова, Ю.Б. Жигуц Порівняння ресурсозбережних показників мікропроцесорної магнітно-імпульсної установки та існуючого електрогідравлічного пресового обладнання при вирубанні деталей з текстильних матеріалів.....	113
О.В. Талько, А.М. Колесников, А.М. Висоцький, Н.Д. Ткачук, М.О. Пінчук, О.В. Вдовиченко, М.П. Гадзира Вплив характеристик вихідних порошків на швидкості поширення пружних хвиль в реакційно спечених композитах $SiC-Cr_3C_2$	119
В.М. Франчук, Л.М. Самчук Порівняльний аналіз систем управління якістю та вибір найбільш ефективної системи для механообробного виробництва.....	123
З.С. Сірко, Г.В. Сушкова, М.М. Толстушко, Н.О. Толстушко, Ю.Р. Бродович Взаємозв'язок жорсткості зуба та подачі на зуб рамної пили.....	129
О.В. Вдовиченко, М.П. Гадзира, А.М. Колесников, Н.Д. Ткачук, І.Д. Гнилиця Динамічна пружність та електричний опір реакційно спеченої нанорозмірної кераміки $SiC-TiC$	132
З.С. Сірко, В.В. Ващенко, М.Є. Носов, М.М. Толстушко, Н.О. Толстушко Система впровадження енергетичного менеджменту на підприємстві.....	137
Т. Г. Войтік Рівняння споріднене із задачею Рімана з раціональним коефіцієнтом, оборотним в одному з підкілець факторизаційної пари.....	141
З.С. Сірко, В.М. Грицун, М.М. Толстушко, Н.О. Толстушко, А.В. Хомич Спосіб отримання електроенергії з дерев та сонячного випромінювання.....	146
З.С. Сірко, В.К. Д'яконов, Є.А. Стариш, М.М. Толстушко, Н.О. Толстушко Формування рейтингу пил за якістю та точністю виготовлення на основі статистичних характеристик.....	149
С.В. Мисковець, Д.А. Гусачук, В.П. Кашицький, І.О. Парфентьєва Корекції САД моделей для оптимізації процесів 3D друку.....	153
І.Н. Бурчак Віртуальна реконструкція історичних споруд з використанням 3D комп'ютерної графіки.....	157
С.В. Мисковець, Ю.П. Фещук, М.Ю. Фещук, Ю.А. Півоварчук Оптимізація цифрових двійників модульних виробничих станцій FESTO.....	164
В.П. Кашицький, В.С. Рибальченко Оптимізація режиму контактного зварювання листових конструкцій методом багатфакторного планування експерименту.....	169

CONTENTS

Contents	8
H.M. Hubal Optimal construction of mathematical tables and determinants of matrices in the LaTeX system.....	9
O. Sadova, M. Vyshynskiy Study of mechanical properties and structure of biocomposites filled with chopped stalks of cereals crops.....	16
Y. Maksymiuk, O. Fedchuk, O. Strok Research on augmented reality technologies in technical sciences: practical application.....	23
T.V. Pryjmak, D.M. Chervinko, I.M. Hasiuk, O.H. Popadynets Transformation of frequency dispersion in electrical parameters of liver tissue during measurement with invasive electrodes based on distance between electrodes	31
O.V. Gavrylchenko, V.S. Shenbor Justification of the parameters of a vibrating conveyor for loading automated equipment with bulk products.....	40
K.S. Shevchuk, V.Yu. Naumenko, O.V. Derevyanko, O.B. Zgalat-Lozinsky Manufacture of filaments for 3D printing from ABS plastic reinforced with basalt fibers.....	45
O.V. Gavrylchenko, V.S. Shenbor Justification of the parameters of a vibrating conveyor with independent oscillations for the transportation of products and materials.....	50
L.I. Nykyruy, I.P. Yaremiy, S.A. Fedosov TiO ₂ -based nanocomposites for photocatalytic degradation of organic dyes.....	56
V. Sheremet, M. Vterkovskiy, S. Teslia, T. Soloviova Optimization of the cold isostatic pressing process of magnesium powders and its alloys	65
V.I. Osypenko, M.R. Pruss Influence of the internal structure and dimensions of typical nozzles on the cutting pressure field of the assistant gas in gas laser cutting	70
V.I. Osypenko, L.M. Miznyk, L. D. Mysnyk Search of the rational profile of the cutting edge of the knife of the cutter of plastic viscous materials.....	79
V. Yakovets Friction effect during hot reverse extrusion of hollow semi-finished products from round and square blanks.....	86
V.M. Franchuk, L.M. Samchuk Management and quality control in production in the manufacture of housing type parts	93
V.V. Gerasimov, O.O. Molnar, V.D. Rudj, M.V. Polazhynets, Yu.Yu. Zhiguts Development of modern individual safety systems when working with cutting equipment in the garment industry	100
Y. V. Muravynets Evaluation of the influence of the parameters of the clamping conveyor of the reability of strand clamping.....	105
V. Zavarynskyi, R. Pavliuk, Yu. Ozymok Directions for improving the designs of planer machines.....	108
R. Rosul, O. Maksyutova, Y. Zhiguts Comparison of resource-saving indicators of the microprocessor based magnetic- pulse unit and existing electrohydraulic press equipment when cutting parts from textile materials.....	113
O.V. Talko, A.M. Kolesnykov, A.M. Vysotskyi, N.D. Tkachuk, M.O. Pinchuk, O.V. Vdovychenko, M.Ph. Gadzyra Effect of characteristics of initial powders on velocities of elastic waves propagation in reaction-sintered SiC-Cr ₃ C ₂ composites.....	119
V.M. Franchuk, L.M. Samchuk Comparative analysis of quality management systems and selection of the most effective system for machining production.....	123
Z. Sirko, H. Sushkova, M. Tolstushko, N. Tolstushko, Y. Brodovych Interrelation between tooth stiffness and feed rate of a frame saw tooth.....	129
O.V. Vdovychenko, M.Ph. Gadzyra, A.M. Kolesnykov, N.D. Tkachuk, I.D. Hnylytsia Dynamic elasticity and electrical resistivity of reaction-sintered nanosized ceramics SiC-TiC.....	132
Z. Sirko, V. Vashchenko, M. Nosov, M. Tolstushko, N. Tolstushko Energy management implementation system at the enterprise.....	137
T.G. Voytik An equation related to the Riemann problem with a rational coefficient that is invertible in one of the subrings of a factorization pair.....	141
Z. Sirko, V. Hrytsun, M. Tolstushko, N. Tolstushko, A. Khomych Way to generate electricity from trees and solar radiation.....	146
Z. Sirko, V. Diakonov, Y. Starysh, M. Tolstushko, N. Tolstushko Rating of saws by quality and manufacturing accuracy based on statistical characteristics.....	149
S. Myskovets, D. Husachuk, V. Kashytskyi, I. Parfentyeva CAD model corrections to optimize 3D printing processes.....	153
I. Burchak Virtual reconstruction of historical buildings using 3D computer graphics.....	157
S. Myskovets, Yu. Feshchuk, M. Feshchuk, Yu. Pivovarchuk Optimization of digital twins of FESTO modular production stations.....	164
V. Kashytskyi, V. Rybalchenko Optimization of the regime of contact welding of sheet structures by the method of multifactor experiment planning.....	173

Г.М. Губаль

Луцький національний технічний університет

ОПТИМАЛЬНА ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНИХ ТАБЛИЦЬ І ВИЗНАЧНИКІВ
МАТРИЦЬ У СИСТЕМІ LATEX

У статті здійснено оптимальну побудову математичних таблиць і визначників матриць у системі LaTeX. Створено нові команди (макриси), які будують математичні таблиці, в яких значення першого рядка автоматично заповнюються і здійснюється умовний друк значень другого рядка; записують введені матриці в пам'ять та виводять записані матриці; генерують визначники матриць шляхом виключення заданого рядка і заданого стовпця.

Ключові слова: LaTeX, оптимальна побудова, макриси, визначник, матриця.

H.M. Hubal

OPTIMAL CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL TABLES AND DETERMINANTS
OF MATRICES IN THE LATEX SYSTEM

In this article, optimal construction of mathematical tables and determinants of matrices in the LaTeX system is carried out. New macros are created that construct mathematical tables in which the values of the first row are automatically filled and conditional printing of the values of the second row is carried out; write the inputted matrices into memory and output the written matrices; generate matrix determinants by excluding a given row and a given column.

Keywords: LaTeX, optimal construction, macros, determinant, matrix.

Постановка проблеми. У системі LaTeX пакети `\ifthen`, `\etoolbox`, `\pgffor`, `\nicematrix` надають колекцію засобів програмування для створення класів документів і пакетів системи LaTeX. Пакети `\ifthen`, `\etoolbox`, `\pgffor`, `\nicematrix` створюють інтерфейси системи LaTeX для деяких основних команд, вбудованих у програмне забезпечення, пов'язаних з e-TeX та іншими системами [1-5]. Пакет `\nicematrix` створює pgf вузли під комірками таблиць, які використовуються для розробки нових функцій. Координати цих вузлів записуються в `\aux` файл і використовуються в наступній компіляції. Пакет `\pgffor` використовує команди, які виконуються з повтореннями і команди, які зупиняють ці повторення. Це особливо важливо для реалізації матриць, таблиць, обчислень та графіки [5-8].

Автоматизація повторюваних завдань з налаштовуваною функціональністю досягається створенням нових команд (макросів) з використанням засобів програмування пакетів системи LaTeX [9-11].

У цій статті створимо нові команди (макриси), які:

- будують математичні таблиці на прикладі таблиць для геометричного розподілу дискретної випадкової величини, заповнюючи рядки;
- записують введені матриці в пам'ять та виводять записані матриці;
- генерують визначники матриць шляхом виключення заданого рядка і заданого стовпця.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Малі програми, які заощаджують час при створенні кодів і їх компіляції реалізовано у роботах [10-16]. Ці програми використовують реальні дані з LaTeX механізму. Щоб підвищити ефективність розробки тренувальних матеріалів для науки і освіти [17, 18] створено команди (макриси) для тестів [19]. Команди (макриси) спрощують наукові дослідження і створення математичних текстів [20-31]. LaTeX команди, які потребують змінної кількості аргументів також ефективні для реалізації обчислень.

Виклад основного матеріалу. Покажемо, як у LaTeX документі `\article` автоматично створювати таблиці, в яких значення першого рядка автоматично заповнюються і здійснюється умовний друк значень другого рядка.

Створимо таблицю, наприклад, для геометричного розподілу дискретної випадкової величини X . У LaTeX документі `\article` підключимо пакет `\ifthen`. Для автоматизації і спрощення створення такої таблиці створимо нову команду `\dtabl`, яка автоматично заповнить перший рядок таблиці, а значення другого рядка автоматично заповнить, якщо задана умова вірна. Якщо ця умова нерівна, то значення другого рядка можна ввести.

Нехай таблиця для геометричного розподілу дискретної випадкової величини X складається з двох рядків і восьми стовпців. Нова команда `\dtabl` містить сім аргументів. У цій команді створимо таблицю з заголовком `Geometric distribution of a discrete random variable` (Геометричний розподіл дискретної випадкової величини).

У таблиці задамо розгалуження `\ifthenelse` з перевіркою введення першого числового значення ймовірності дискретної випадкової величини X . У першій вітці розгалуження створимо нову глобальну команду `\valrow` за допомогою команди `\gdef`, яка містить позначення ймовірностей p , аргумент `#1` і значення ймовірностей `0.1 0.09 0.081 0.0729 ... 0.1 \cdot 0.9^{k-1} ...`. У другій вітці розгалуження створимо нову глобальну команду `\valrow` за допомогою команди `\gdef`, яка містить позначення ймовірностей p і приймає аргументи `#1 #2 #3 #4 #5 #6 #7`, які необхідно ввести. Після проходження перевірки в розгалуженні `\ifthenelse` викличемо створену команду `\valrow`, яка заповнить другий рядок таблиці значеннями ймовірностей.

Якщо умова в розгалуженні `\ifthenelse` вірна, то другий рядок таблиці автоматично заповниться значеннями ймовірностей `0.1 0.09 0.081 0.0729 ... 0.1 \cdot 0.9^{k-1} ...`. Якщо умова в розгалуженні `\ifthenelse` невірна, то другий рядок таблиці заповниться значеннями ймовірностей, які ми введемо, наприклад, значеннями `0.2 0.18 0.162 0.1458 ... 0.2 \cdot 0.9^{k-1} ...`.

Наведемо програмний код для створення таблиці для геометричного розподілу дискретної випадкової величини X за допомогою нової команди `\dtabl` (рис. 1).

```
\documentclass{article}

\usepackage{ifthen}

\newcommand{\dtabl}[7]{%
\centering
\begin{table}
\centering
\caption{Geometric distribution of a discrete random
variable}
\hspace{4cm}
\begin{tabular}{|c|*{9}{c|}}
\hline
\((X)\&1\&2\&3\&4\&\ldots\&(k)\&\ldots\&
\hline
\hline
\hline
\end{tabular}
\end{table}
}
```

Рис. 1. Команда для створення таблиці для геометричного розподілу дискретної випадкової величини

У тілі LaTeX документа викличемо створену команду `\dtabl` двічі: перший раз ввівши аргумент `0.1`, а другий раз – аргументи `0.2 0.18 0.162 0.1458 ... 0.2 \cdot 0.9^{k-1} ...` (рис. 2).

```
\begin{document}

\dtabl{0.1}

\phantom{text}

\hspace{1mm}

\dtabl{0.2}{0.18}{0.162}{0.1458}{\ldots}{(0.2\cdot
0.9^{k-1})}{\ldots}

\end{document}
```

Рис. 2. Звертання до створеної команди у тілі LaTeX документа

Наведений програмний код (рис. 1 і рис. 2) генерує результат, представлений на рис. 3.

Table 1: Geometric distribution of a discrete random variable

X	1	2	3	4	...	k	...
p	0.1	0.09	0.081	0.0729	...	$0.1 \cdot 0.9^{k-1}$	...

Table 2: Geometric distribution of a discrete random variable

X	1	2	3	4	...	k	...
p	0.2	0.18	0.162	0.14580	...	$0.2 \cdot 0.9^{k-1}$	...

Рис. 3. Результат, згенерований програмним кодом

Таким чином, у LaTeX документі 'article' можна використовувати створену команду '\dtabl' для автоматичного створення таблиць, в яких значення першого рядка автоматично заповнюються, а значення другого рядка автоматично заповнюються, якщо задана умова вірна. Якщо ця умова невірна, то значення другого рядка можна ввести.

У команді '\dtabl' можна змінити число рядків і стовпців таблиці.

Умовний друк другого рядка або введення другого рядка з клавіатури і його друк можна застосувати, наприклад, для оптимізації задачі розрахунку цін при деякій кількості комбінацій різних продуктів (інгредієнтів), які можуть бути задані (можуть бути вказані в угоді). Для кожної комбінації розраховується окрема специфікація (робоча таблиця ціноутворення).

Зауважимо, що під комбінацією розуміється суміш заданих різних продуктів у певних вагових частках в кілограмі готової кінцевої продукції. При зміні вагових часток змінюється комбінація.

Маючи можливість умовного друку якої-небудь комбінації в другому рядку таблиці залежно від якої-небудь умови, наприклад, ціни, можемо для вибраної ціни (з робочої таблиці ціноутворення) отримати роздрукованим другий рядок таблиці.

При цьому в першому рядку таблиці будуть роздруковані назви продуктів, а під назвами в другому рядку будуть роздруковані вагові вмісти відповідних продуктів.

Якщо для даної комбінації необхідно поставити іншу ціну, ніж та, що є в робочій таблиці ціноутворення, то тоді треба вводити з клавіатури цю комбінацію з новою ціною в другий рядок таблиці. Після цього виконається друк першого і другого рядків таблиці.

Роздруківка першого і другого рядків таблиці потрібна, щоб споживач (покупець) побачив назву і кількісний склад різних продуктів (інгредієнтів) в готовому кінцевому продукті і його ціну.

Згенеруємо матриці, ввівши їх в пам'ять і вивівши їх. Згенеруємо визначники матриць шляхом виключення заданого рядка і заданого стовпця (номери рядка і стовпця, які виключаємо, вводим з клавіатури).

Для цього у LaTeX документі 'article' підключимо пакети 'etoolbox', 'pgffor', 'nicematrix'.

Оголосимо змінну '\pamem' для збереження імені матриці. Тоді оголосимо лічильники 'icol' та 'igow' для роботи з елементами матриці.

Створимо нову команду '\entrsn', яка запише кожен елемент матриці, введений з клавіатури в комірку пам'яті. Ця команда має один аргумент, який необхідно ввести. Цей аргумент очікує елемент матриці.

Створимо нову команду '\rowsm', яка запише рядок матриці в пам'ять за допомогою створеної нової команди '\entrsn'. Один аргумент цієї команди, який необхідно ввести, очікує рядок матриці.

Створимо нову команду '\inputm', яка запише введену матрицю в пам'ять. Два аргументи, які очікує ця команда – це ім'я і рядки матриці. У цій команді оголошуємо ім'я матриці і встановлюємо лічильник рядків в нуль. Вводимо елементи матриці по рядках. Тоді зберігаємо в пам'яті ширину і висоту матриці.

Наведемо програмний код нових команд для введення матриці (рис. 4).

Створимо нові команди '\getheightm' і '\getwidthm', які повертають висоту і ширину матриці за допомогою команди '\csuse'. Ці команди мають один аргумент — ім'я матриці, яке треба ввести.

Створимо нову команду '\getm', яка виводить матрицю. Аргумент цієї команди необхідно ввести, і він представляє ім'я матриці. У цій команді ініціалізуємо порожній рядок, який буде містити елементи матриці.

Для цього оголосимо нову команду '\cntm'. Тоді обчислення максимального номера рядка і стовпця матриці запишемо у змінні '\irowmax' та '\icolmax' відповідно. Два цикли заповнюють

елементи матриці `'#1-i-j'` у `'\cntm'`. В рядку між елементами матриці додаємо знак `'&'`, а в кінці кожного рядка додаємо знак `'\\'`.

```
\documentclass{article}

\usepackage{etoolbox}
\usepackage{pgffor}
\usepackage{nicematrix}

\def\namem{}
\newcounter{icol}
\newcounter{irow}

\newcommand{\entrm}[1]{%
  \csdef{\namem-\theirow-\theicol}{#1}%
  \stepcounter{icol}%
}%

\newcommand{\rowsm}[1]{%
  \setcounter{icol}{0}
  \forcsvlist{\entrm}{#1}
  \stepcounter{irow}
}%

\newcommand{\inputm}[2]{%
  \xdef\namem{#1}%
  \setcounter{irow}{0}%
  \forcsvlist{\rowsm}{#2}%
  \csxdef{\namem-w}{\theicol}%
  \csxdef{\namem-h}{\theirow}%
}%
```

Рис. 4. Команди для введення матриці

Масив `'NiceArray'` елементів з динамічною кількістю стовпців (залежною від ширини матриці) вставляє введені значення в матрицю за допомогою створеної нової команди `'\cntm'`.

Наведемо програмний код нових команд для виведення матриці (рис. 5).

```
\newcommand{\getheightm}[1]{%
  \csuse{#1-h}%
}%

\newcommand{\getwidthm}[1]{%
  \csuse{#1-w}%
}%

\newcommand{\getm}[1]{%
  \def\cntm{}
  \def\irowmax{\the\numexpr\getheightm{#1}-1\relax}
  \def\icolmax{\the\numexpr\getwidthm{#1}-1\relax}
  \foreach \i in {0, ..., \irowmax} {%
    \foreach \j in {0, ..., \icolmax} {%
      \xappto\cntm{\csuse{#1-i-j}}%
      \ifnumless{\j}{\icolmax}{%
        \xappto\cntm{&}%
      }{}%
    }%
    \xappto\cntm{\\}%
  }%
  $$ \left(
  \begin{NiceArray}{*\the\numexpr\icolmax-0+1\relax}{c}
  %
  \cntm
  \end{NiceArray}
  \right)$$
}%
```

Рис. 5. Команди для виведення матриці

Створимо нову команду `'\getdwithoutrc'` з трьома аргументами, які необхідно ввести. Ця команда генерує визначник матриці шляхом виключення заданого рядка і заданого стовпця.

Перший аргумент цієї команди — це ім'я визначника матриці, другий аргумент — це номер рядка, який треба виключити, а третій аргумент — номер стовпця, який треба виключити.

Спочатку ініціалізуємо порожній рядок, який буде заповнюватись елементами визначника. Обчислення максимального номера рядка і стовпця визначника запишемо у змінні `\irowmax` та `\icolmax` відповідно. Два цикли заповнюють елементи визначника. Якщо номер поточного рядка при проходженні зовнішнього циклу по рядках не дорівнює номеру рядка, який виключаємо, то виконується внутрішній цикл по стовпцях. Якщо номер поточного стовпця не дорівнює номеру стовпця, який виключаємо, то записуємо елемент визначника `#1-i-j` у `\cntm`. В рядку між елементами визначника додаємо знак `&`, а в кінці кожного рядка додаємо знак `\\`.

Масив `NiceArray` елементів з динамічною кількістю стовпців (залежною від ширини визначника) вставляє введені значення у визначник за допомогою створеної нової команди `\cntm`.

Наведемо програмний код нової команди для виведення визначника матриці, утвореного шляхом виключення заданого рядка і заданого стовпця (рис. 6).

```
\newcommand{\getdwithoutrc}[3]{%
  \def\cntm{%
    \def\irowmax{\the\numexpr\getheightm{#1}-1\relax}%
    \def\icolmax{\the\numexpr\getwidthm{#1}-1\relax}%
    \foreach \i in {0, ..., \irowmax}{%
      \ifnumequal{\i}{#2}{}{%
        \foreach \j in {0, ..., \icolmax}{%
          \ifnumequal{\j}{#3}{}{%
            \xappto\cntm{\csuse{#1-\i-\j}}%
            \ifnumless{\j}{\icolmax}{%
              \xappto\cntm{&}%
            }{}%
          }{}%
        }{}%
      }{}%
    }{}%
    \xappto\cntm{\\}%
  }%
  $$ \left|
  \begin{NiceArray}{*\getwidthm{#1}{c}}
  \cntm
  \end{NiceArray}
  \right|$$
}%
```

Рис. 6. Команда для виведення визначника матриці, утвореного шляхом виключення заданого рядка і заданого стовпця

У тілі LaTeX документа введемо матрицю A третього порядку і матрицю B четвертого порядку, викликавши створену команду `\inputm` двічі. Тоді введемо матрицю A , викликавши створену команду `\getm`. Введемо визначник матриці A , утворений шляхом виключення другого рядка і другого стовпця, викликавши створену команду `\getdwithoutrc`. Введемо матрицю B , викликавши створену команду `\getm`. Введемо визначник матриці B , утворений шляхом виключення першого рядка і третього стовпця, викликавши створену команду `\getdwithoutrc` (рис. 7).

Наведений програмний код (рис. 4 – рис. 7) генерує результат, представлений на рис. 8.

Таким чином, у LaTeX документі `article` можна використовувати створені команди `\entrm`, `\rowsm`, `\inputm`, `\getheightm`, `\getwidthm`, `\getm` для побудови матриць, введенням їх в пам'ять і виведенням цих матриць. У цьому документі можна використовувати створену команду `\getdwithoutrc` для побудови визначників матриць шляхом виключення заданого рядка і заданого стовпця.

Висновки. У статті здійснено оптимальну побудову математичних таблиць і визначників матриць у системі LaTeX. Створено нові команди (макроси), які

- будують математичні таблиці на прикладі таблиць для геометричного розподілу дискретної випадкової величини, автоматично заповнюючи перший рядок. Якщо задана умова вірна, то автоматично заповнюється і другий рядок. Якщо задана умова невірна, то значення другого рядка можна ввести;

- записують введені матриці в пам'ять та виводять ці матриці;

- генерують визначники матриць шляхом виключення заданого рядка і заданого стовпця.

```

\begin{document}

\inputm{A}{{1, 2, 3}, {4, 5, 6}, {7, 8, 9}}
\inputm{B}{{4, -1, 5, 6}, {0, -7, 12, 1}, {1, 1, 11, 5}, {6, 7, 8, 10}}

Matrix  $SAS$  of order 3:
\getm{A}

Determinant of matrix  $SAS$  obtained by excluding row 2 and
column 2:
\getdwithoutrc{A}{1}{1}

Matrix  $SBS$  of order 4:
\getm{B}

Determinant of matrix  $SBS$  obtained by excluding row 1 and
column 3:
\getdwithoutrc{B}{0}{2}

\end{document}

```

Рис. 7. Звертання до створених команди у тілі LaTeX документа

Matrix A of order 3:

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \\ 7 & 8 & 9 \end{pmatrix}$$

Determinant of matrix A obtained by excluding row 2 and column 2:

$$\begin{vmatrix} 1 & 3 \\ 7 & 9 \end{vmatrix}$$

Matrix B of order 4:

$$\begin{pmatrix} 4 & -1 & 5 & 6 \\ 0 & -7 & 12 & 1 \\ 1 & 1 & 11 & 5 \\ 6 & 7 & 8 & 10 \end{pmatrix}$$

Determinant of matrix B obtained by excluding row 1 and column 3:

$$\begin{vmatrix} 0 & -7 & 1 \\ 1 & 1 & 5 \\ 6 & 7 & 10 \end{vmatrix}$$

Рис. 8. Результат, згенерований програмним кодом

Список використаних джерел:

1. Lamport, L. (1994). LaTeX: a document preparation system. 2nd ed. Boston: Addison-Wesley. (272 p.).
2. Губаль, Г. М. (2013). LATEX як видавничча система для створення математичних текстів і для програмування. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, (12), 23-26.
3. Губаль, Г. М. (2013). Стратегії для створення математичної статті у видавниччій системі LATEX. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, (13), 10-13.
4. Kottwitz, S. (2021). LaTeX beginner's guide. Packt Publishing, USA, (354 p.).
5. Kottwitz, S. (2023). LaTeX graphics with TikZ. Packt Publishing, USA, (304 p.).
6. Lode, C. (2019). Better books with LaTeX the agile way. Clements Lode Verlag E.K. (254 p.).
7. De Marco, A. (2019). Graphics for LATEX users. ArsTEXnica, 65.
8. Губаль, Г. М. (2013). Анімація в математичних текстах на мові LATEX. Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво, 11, 11-15.
9. Van Dongen, M.R.C. (2012). LaTeX and friends. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K. (300 p.).

10. Hubal, H.M. (2023) Improvement of references and footnotes in mathematical and other texts by creating macros in the LaTeX programming language. *International Journal on Information Technologies & Security*, (15(3)), 15–22.
11. Губаль, Г. М. (2024). Вдосконалення створення таблиць і деяких обчислень на мові програмування latex для математичних досліджень. *Наукові нотатки*, (77), 78-84.
12. Nakashima, H., & Saito, Y. (2007). How to Typeset Your Papers in LATEX (Version 6). IPSJ Journal.
13. Leifeld, P. (2013). texreg: Conversion of Statistical Model Output in R to LATEX and HTML Tables. *Journal of Statistical Software*, 55(8), 1-24.
14. Grätzer, G. (2014). Practical LaTeX. Springer.
15. Griffiths, D. F., & Higham, D. J. (2016). Learning LaTeX. Society for Industrial and Applied Mathematics.
16. Hubal, H. (2024). Analysis of Approaches to the Study of Limits of Sequences and Functions and the Use of Information Technologies. *Grail of Science*, (35), 226-231.
17. Verdaguer-Codina, J. (2022). Linux, LaTeX, and Python in secondary and baccalaureate. *Proceedings of IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, Tunisia, 763–768.
18. Romansky, R. (2023). Empirical evaluation of the transfer of information resources in active learning. *International Journal on Information Technologies & Security*, 15(1), 39–48.
19. Губаль, Г. М. (2014). Особливості створення інтерактивних математичних тестів у видавничій системі LATEX. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, (15), 9-13.
20. Goossens, M., Rahtz, S. P., & Rahtz, S. (1999). The Latex Web Companion: Integrating TEX, HTML, and XML (Vol. 4). Addison-Wesley Professional.
21. Gubal', G. N., & Stashenko, M. A. (2005). Improvement of an estimate of the global existence theorem for solutions of the Bogoliubov equations. *Theoretical and mathematical physics*, 145, 1736-1740.
22. Stashenko, M. A., & Gubal', G. N. (2006). Existence theorems for the initial value problem for the Bogolyubov chain of equations in the space of sequences of bounded functions. *Siberian Mathematical Journal*, 47, 152-168.
23. Hubal, H. M. (2012). The generalized kinetic equation for symmetric particle systems. *Mathematica Scandinavica*, 140-160.
24. Gubal', G. N. (2014). On the existence of weak local in time solutions in the form of a cumulant expansion for a chain of Bogolyubov's equations of a one-dimensional symmetric particle system. *Journal of Mathematical Sciences*, 199, 654-666.
25. Gryshchenko, T.V., Deineko, Zh.V. & Nikitenko, O.M. (2019). Using the LaTeX system during the preparation of scientific publications. *IV International Scientific and Technical Conference "Print, Multimedia & Web"*, 96–98.
26. Hubal, H.M. (2016) The convergence of the series of the solution of the cauchy problem for the bbgky hierarchy of equations in many-kind particle systems. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 108(4), 957–965.
27. Hubal, H.M. (2019) Mathematical description of the non-equilibrium state of symmetric particle systems. *International Journal of Applied Mathematics*, 32(5), 767–774.
28. Hubal, H. (2019). Construction and study of the system of differential equations that describes oscillatory chemical reactions based on diffusion. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*, (34), 32-36.
29. Hubal, H. (2021). Mathematical modeling of biochemical processes rates in biological systems. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*, (42), 43-49.
30. Hubal, H. (2023). LATEX system in distance learning of the probability theory. *Grail of Science*, (33), 244-248.
31. Губаль, Г. М. (2022). Математичне дослідження стійкості особливих точок систем диференціальних рівнянь, які описують швидкості біохімічних процесів. *Наукові нотатки*, (73), 29-39.

О.Л. Садова, М.І. Вишинський

Луцький національний технічний університет

**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА СТРУКТУРИ
БІОКОМПОЗИТІВ, НАПОВНЕНИХ ПОДРІБНЕНИМИ СТЕБЛАМИ ЗЕРНОВИХ
КУЛЬТУР**

В статті досліджено міцність на стискання біокомпозитних матеріалів на основі глютинової матриці, яку готували за різного співвідношення компонентів. Як наповнювач для біокомпозитних матеріалів використано подрібнені стебла зернових культур. Досліджено міцність на стискання біокомпозитів залежно від ступеня підсушування композицій. Проведення додаткової термічної обробки забезпечило підвищення механічних характеристик біокомпозитів. Ударну в'язкість матеріалу визначено залежно від вмісту наповнювача, ступеня підсушування та тиску пресування композиції, а також проведення додаткової термічної обробки біокомпозитів. Структуру біокомпозитів досліджено методом ІЧ-спектроскопії на основі аналізу функціональних груп.

Ключові слова: розчин глютину, подрібнені стебла зернових культур, міцність на стискання, ударна в'язкість, ступінь підсушування, ІЧ спектроскопія.

O. Sadova, M. Vyshynskyi

**STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF BIOMPOSITS
FILLED WITH CHOPPED STALKS OF CEREALS CROPS**

The article examines the compressive strength of biocomposite materials based on a glutinous matrix, which was prepared with different ratios of components. Chopped stalks of grain crops are used as a filler for biocomposite materials. The compressive strength of biocomposites was studied depending on the degree of drying of the composition. Additional heat treatment of biocomposites was carried out in order to increase the mechanical properties of biocomposites. The impact strength of biocomposites is determined depending on the content of the filler, the degree of drying of the composition, the pressing pressure of the composition and the additional heat treatment of biocomposites. Analysis of the structure with the detection of functional groups of biocomposites was investigated by IR spectroscopy.

Key words: gluten solution, chopped stalks of cereal crops, compressive strength, impact strength, degree of drying IR spectroscopy.

Formulation of the problem. In modern industry, synthetic discrete fibers are mainly used to reinforce composite materials. However, recently, the development of green materials and technologies encourages scientists and industry to use natural fibers and matrices for the formation of composite materials [1]. The use of fibers of natural origin as a filler in a thermoplastic matrix is an alternative for the production of inexpensive and ecological composites using them as a commodity plastic or packaging material [2]. Currently, many different natural fibers of plant origin have been investigated. Their unique properties have been revealed. The use of natural fibers for reinforcing plastics allows to improve their mechanical properties, in particular strength. Composite materials have been developed based on synthetic thermoplastic matrices [1] containing hemp, jute straw, paper mulberry, empty oil palm fruits, wood, wheat, barley, kenaf, rye, rice husk, bamboo, flax, reed, oats, sisal, grass, coconut coir, ramie, pineapple leaf fiber, banana fiber and papyrus. However, there is a need to develop and conduct research on biocomposite materials based on matrices of natural origin, which ensures a high degree of biodegradability and simplifies the disposal of biocomposite products at the final stage of the life cycle.

Analysis of recent studies and publications. Fibers add to composite materials in order to increase the thermal stability of the matrix, which ensures the ability to operate biocomposite products at higher temperatures. It has been proven that the addition of long fibers reduces the kinetics of water absorption and the formation of biocomposites with a low moisture content. It was revealed by the IR-spectroscopy method that the addition of cellulose fibers leads to a change in the structure of the thermoplastic matrix. The absorption peaks corresponding to hydroxyl groups are shifted to lower wavenumbers. This indicates the existence of hydrogen interaction between the components. The prepared samples are completely biodegradable. The components formed during the decomposition are harmless if they get into the environment [2].

The authors of the work [3] developed highly filled composites based on starch, which are reinforced with natural fibers (flax, bagasse, banana, date palm). The composites were prepared by pressing under a pressure of 5 to 20 MPa and a temperature of 130 to 160°C. It was established that composites with a fiber content of 50-70% have the highest tensile strength and modulus of elasticity. It was established that the mechanical properties of the composites significantly deteriorated when the fiber content increased to 80% due to insufficient amount of starch binder.

© О.Л. Садова, М.І. Вишинський

The formation of biocomposites filled with flax, bagasse, banana and date palm fibers was carried out by pre-heating the composite and pressing under a pressure of 5 MPa at a temperature of 150 °C for 30 min. The bamboo-reinforced starch-based composite was prepared by pressing under a pressure of 20 MPa at a temperature of 130 °C for 5 min. The composite based on starch and hemp was prepared by pressing under a pressure of 10 MPa at a temperature of 130 °C for 5 min. All fibers, except bamboo and hemp, were treated with alkali (NaOH) before preparing the composite. Composite samples filled with fibers of flax, bagasse, date palm and banana in the amount of 50-60 wt. %, have the highest tensile strength. These strength values are 8-15 times higher than the strength value of the composite based on starch binder without fiber content (less than 4 MPa).

Composites of polymer and natural fiber absorb moisture in a humid environment. Moisture absorption affects the matrix-fiber interface, which leads to low stresses between the matrix and the fiber. The movement of water in the composite can be explained by the presence of defects in the matrix (voids, pores and cracks). Water absorbed by the matrix is of two types: free and bound. Free water is water molecules that move freely through the voids, and bound water is water molecules that are bound to the polar groups of the matrix [3].

According to the literature, the moisture absorption of starch/natural fiber composites is highly dependent on the type of fiber and its content. It was established that each type of fiber has a different cellulose content, and fibers with a high cellulose content significantly reduce the moisture absorption of the resulting composite. Mehanny and etc. investigated the influence of thermoplastic starch (TPS) matrix with different content (0, 20, 40, 60 and 80%) of bagasse fibers treated in NaOH on the moisture absorption of the obtained composite. The moisture absorption of the composite with a starch-based matrix without fibers was more than 53%, while at the lowest fiber content of 20% it was 48%. Moisture absorption decreases to 36% with an increase in fiber content to 80% [4]. According to Elsayed et al. [5, 6] increasing the content of NaOH-treated flax fiber from 0 to 60% led to a decrease in the moisture absorption of the TPS/flax composite from 48% to 38%.

It was established by the TGA method that the thermal decomposition of thermoplastic starch occurs in three main stages. The first stage - the formation of a peak on the crooked line at a temperature of 100°C is explained by the evaporation of water. The second stage – the formation of a peak on the crooked line near 200°C is associated with the evaporation of glycerol. The third stage – the formation of a peak around 330°C on the crooked line is associated with the thermal decomposition of starch. Composites with a high content of natural fibers based on a starch binder are a promising material for the production of panels for housing, automobiles and decorative applications [7].

The study of thermoplastic composites based on wheat gluten (the content varied from 0 to 20 wt.%), which were formed by pressing, is presented in the article [8]. The maximum tensile strength of thermoplastic starch/wheat gluten composites (1.1 MPa) was obtained using 10 wt.% wheat gluten. Crosslinking between protein chains of wheat gluten caused an increase in the tensile strength of thermoplastic starch/wheat gluten system composites. The temperature during maximum loss mass (TGA) of thermoplastic starch/wheat gluten composites was higher than that of thermoplastic starch. In addition, wheat gluten reduces water absorption.

Setting tasks. The purpose of the work is to study the mechanical properties and structure of biocomposite materials, based on a gluten solution of different concentrations.

Presentation of the main material. In order to increase the compressive strength of biocomposites, it is necessary to establish the optimal ratio of the components used to the formation of the biopolymer matrix. The content of chopped stalks of grain crops in biocomposite materials was 140 wt. parts with fraction of 0.7 mm. The degree of drying of the composition was 20% and 25%. The main heat treatment was carried out at a temperature of 150 °C with exposure for 2 hours. Additional heat treatment (TO2) was carried out at a temperature of 50 °C with exposure for 4 hours. The concentration of the gluten solution was 38%, 43% and 50%.

The strength of biocomposite materials (with the degree of drying of composition of 20%) without additional heat treatment (TO2) (Fig. 1) is 43.9 MPa and 57.0 MPa in the case of using a gluten solution concentration of 38% and 43%, respectively. The 23% higher compressive strength of biocomposites, the matrix of which was formed with a gluten solution concentration of 43%, can be explained by the presence of a smaller amount of unbound water in the materials. Unbound water prevents the formation of the maximum possible number of physical and chemical bonds between the components of the biocomposite system. During additional maintenance (exposure for 4 h at a temperature of 50 °C), the compressive strength of biocomposites, the matrices of which were formed with a gluten solution concentration of 38%

and 43%, increases by 19-22% and is 54.1 MPa and 73.2 MPa, respectively. This indicates additional structuring of biocomposites due to the removal of excess moisture from the biocomposite material during additional heat treatment.

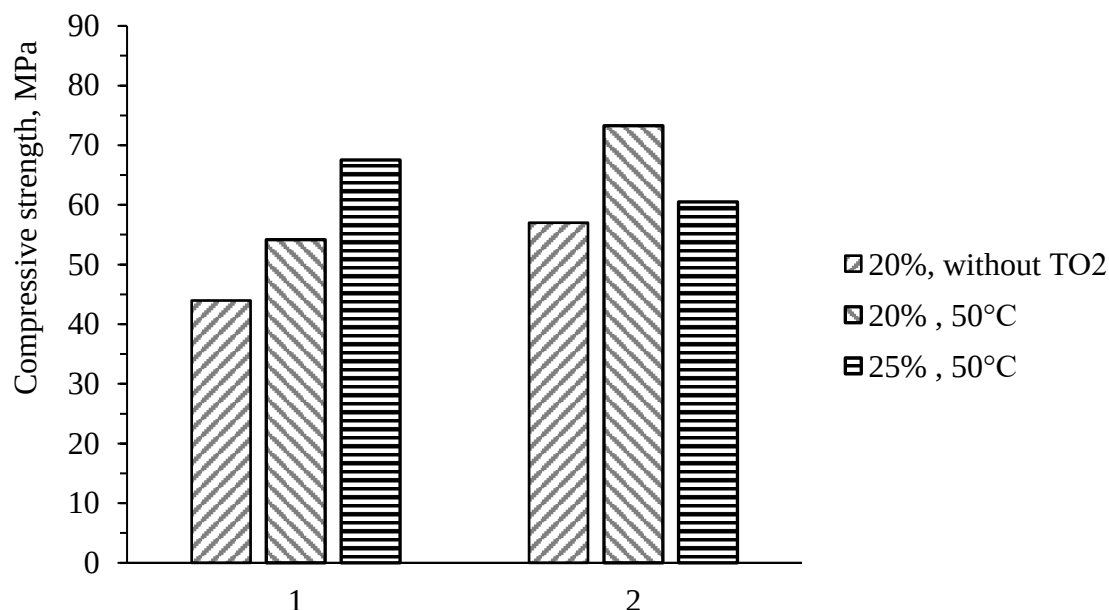


Fig. 1. Compressive strength of biocomposites under different modes of glutin matrix formation: 1 – concentration of glutin solution 38%; 2 – concentration of glutin solution 43%

Compressive strength increases by 20% (67.5 MPa) with an increase in the degree of drying of the composition up to 25% for biocomposites, the matrix of which was formed at a concentration of glutin solution of 38%. The increase in the strength of biocomposites can be explained by a higher degree of drying of the composition (additional moisture removal), which provided a higher degree of structuring of the material. The compressive strength decreases by 23% in the case of an increase in the degree of drying of the composition for biocomposites, the matrix of which was formed with a concentration of glutin solution of 43%. In this case, the decrease in strength can be explained by the insufficient moisture content due to the use of less water for the formation of the biopolymer matrix, since the degree of drying of the composition was 25%. Therefore, optimal moisture content in the material is necessary to ensure a higher degree of structuring of biocomposites, as well as their strength.

Additional thermal treatment of TO2 was carried out (exposure for 4 h at a temperature of 50 °C) for composite samples with a concentration of 50% glutin solution. Additional thermal treatment of TO2 (exposure for 4 h at a temperature of 50 °C) was carried out for composite samples with a concentration of glutin solution of 50%. The degree of drying of the composition was 20% and 25%. Biocomposites filled with 150 wt. parts of chopped cereal stalks and a degree of drying of the composition of 20% have the highest compressive strength of 82.8 MPa (Fig. 2). The average mass loss of the biocomposite sample after additional heat treatment is 0.06 g (Table 1).

The compressive strength of biocomposites decreases by 63% with an increase in the degree of compression of the composition to 25%, which is 50.9 MPa. The average mass loss of the biocomposite sample after additional heat treatment is 0.08 g. The decrease in compressive strength can be explained by the excessive removal of moisture (mass loss of 25%) from the volume of the material with a high content of filler, which did not allow the formation of the maximum possible number of bonds in the material.

For this biocomposite, absorption bands were detected on the IR spectrogram (Fig. 3) at frequencies of 1458.25 cm^{-1} with optical density $D=0.442$ and half-width $b=7.72 \text{ cm}^{-1}$, 1655.00 cm^{-1} with optical density $D=0.477$ and half-width $b=11.58 \text{ cm}^{-1}$, 1701.29 cm^{-1} with optical density $D=0.447$ and half-width $b=9.65 \text{ cm}^{-1}$. The obtained absorption bands indicate the presence of deformation vibrations of O-H-, C-H, N-H groups and valence vibrations of double bonds -C=C-, -C=O-, -N=O and -C=N-, the number of which increases during heat treatment. In the areas of higher wave numbers, absorption bands were recorded at frequencies of 2345.54 cm^{-1} with optical density $D=0.486$ and half-width $b=32.80 \text{ cm}^{-1}$ and 2364.83 cm^{-1} with optical density $D=0.503$ and half-width $b=21.22 \text{ cm}^{-1}$.

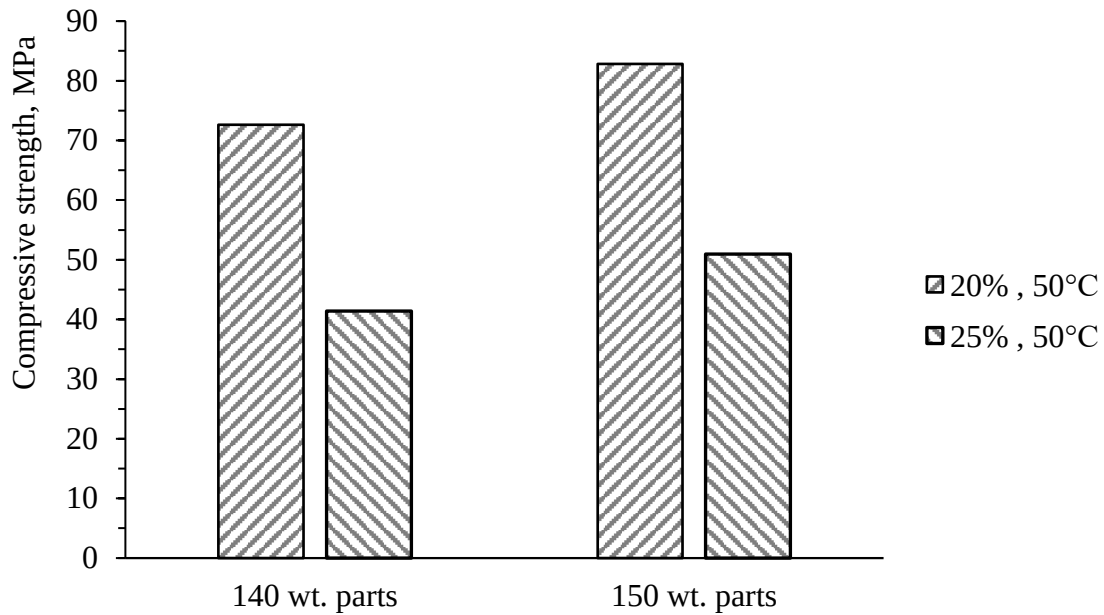


Fig. 2. Compressive strength of biocomposites with a concentration of glutin solution of 50%

Table 1.

Mass loss of biocomposite samples during preliminary heat treatment (drying)

The content of chopped stalks of grain crops, wt. parts	The degree of drying of the composition					
	20%			25%		
	m ₀ , g	m ₁ , g	Δm, g	m ₀ , g	m ₁ , g	Δm, g
140	8,74	8,56	0,18	8,02	8,08	-0,06
150	8,79	8,71	0,08	8,14	8,22	-0,08

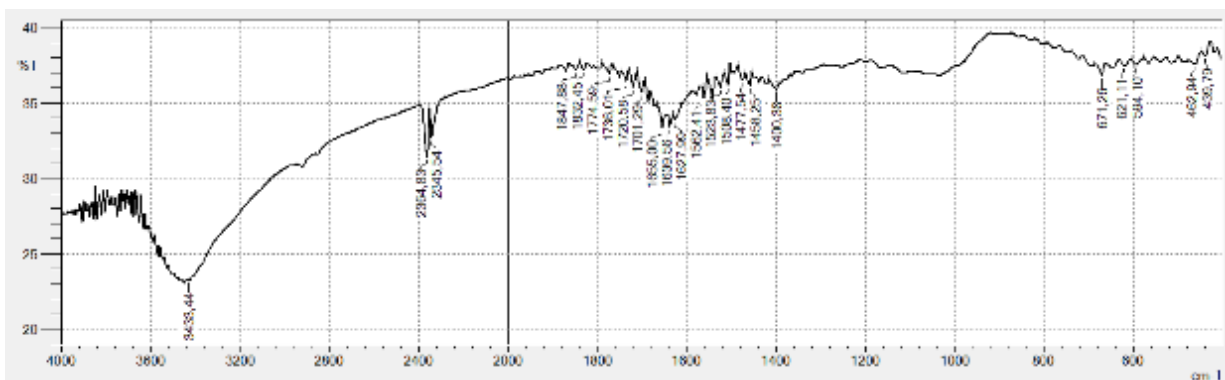


Fig. 3. IR spectrogram of a biocomposite based on a glutin matrix with a concentration of 50% glutin solution, which contains 150 wt. parts of chopped stalks of grain crops with a degree of drying of 20% (Fig. 2)

The compressive strength of biocomposites filled with 140 wt. parts chopped stalks of grain crops and the degree of drying of the composition 20 % is 72.6 MPa. This value of strength is lower by 12% compared to the samples that have the maximum value of compressive strength (82.8 MPa) for the given ratio of components of the polymer matrix. The average change in the mass of the sample after additional heat treatment is +0.18 g. The lower compressive strength of these samples can be explained by the lower content of the filler, which performs a reinforcing function.

Among the studied samples (Fig. 2) the lowest (2 times compared to the maximum value) compressive strength (41.4 MPa) was obtained for biocomposites containing 140 wt. parts of the filler, with a degree of drying of the composition of 25%. The average change in the mass of the sample after additional heat treatment is +0.08 g. The low compressive strength of this biocomposite can be explained by the low content of the filler (140 wt. parts) and the degree of drying of the composition (20%), which is associated with a decrease in the structuring of the material due to excess moisture content. Moisture, which is in a

vapor state, does not have time to be removed during heat treatment. Moisture condenses in the pores and voids of the material, which prevents its structuring.

Biocomposite samples were formed to study the impact toughness. The optimal composition and technology for these biocomposites were selected based on the results of compressive strength studies. Biocomposite samples were formed by pressing the composition in a mold under different pressures (8 MPa or 11 MPa). The duration of the main heat treatment of the samples was 2 hours at a temperature of 150 °C.

Biocomposites (sample No. 3, Table 2) containing 140 wt. parts of chopped stalks of grain crops with a degree of drying of the composition of 25%, formed under a pressure of 11 MPa. These biocomposite samples were subjected to additional heat treatment at a temperature of 50 °C with exposure for 4 hours. The obtained higher values of the impact toughness of biocomposites are ensured by a high degree of drying of the composition at the forming stage, which allows the removal of excess moisture. Higher pressing pressure of the composition and additional heat treatment of biocomposites at a low temperature also contribute to the formation of a greater number of physical and chemical bonds between the components of the biocomposite material.

Table 2.

Composition and of forming technology of biocomposites for the study of impact toughness

Sample No	Filler content, wt. parts	Degree of drying, %	TO2, 50 °C 4 hours	Pressing pressure, MPa	KC, kJ/m ²
1	140	20	+	8	4,82
2	140	25	-	8	2,82
3	140	25	+	11	6,56
4	150	20	+	8	4,25
5	150	25	+	8	3,05
6	150	20	-	8	3,92
7	150	20	-	11	1,52

Biocomposite samples No. 1, formed at a lower degree of composition drying (20%) and lower pressing pressure (8 MPa), have 27% lower values of impact toughness (4.82 kJ/m²) compared to biocomposites No. 3. This indicates the removal of an insufficient amount of moisture from the volume of biocomposite material for this filling (140 wt. parts) of the composition. Moisture forms microcracks by evaporating during additional heat treatment.

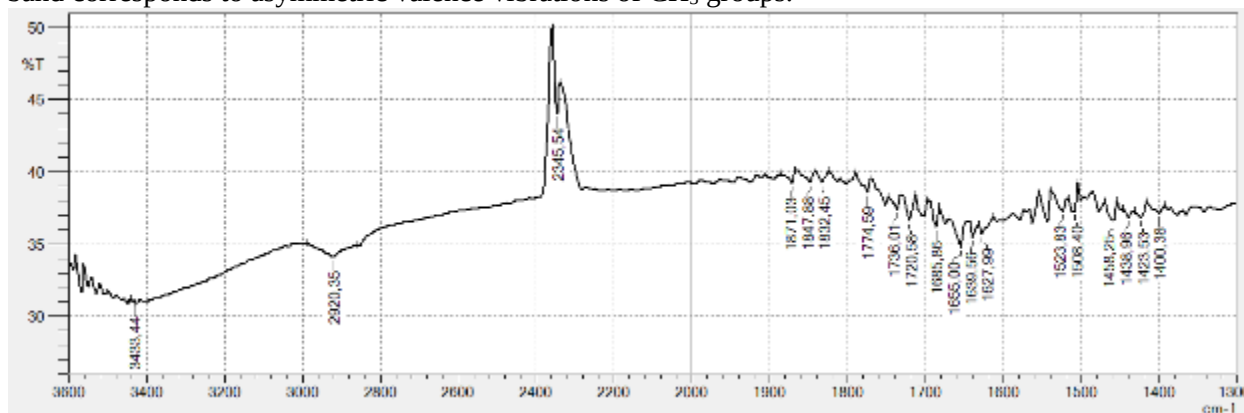
Among the biocomposites with a content of 140 wt. parts of chopped stalks of grain crops, the lowest impact toughness (2.82 kJ/m²) has the samples formed according to technology No. 2 (degree of drying 25%, pressing pressure 8 MPa). The low values of the studied characteristic can be explained by residual moisture in the material, since no additional heat treatment was performed for these biocomposites.

Among the biocomposite materials with a content of 150 wt. parts of chopped stalks of grain crops, the highest impact toughness (4.25 kJ/m²) have biocomposite samples formed by technology No. 4. However, this value is 35% lower compared to the value of impact toughness of biocomposite formed by technology No. 3. The 28% lower value of impact toughness (3.05 kJ/m²) of biocomposites formed according to technology No. 5 can be explained by the formation of an insufficient number of bonds between the components of the composite system due to the high degree of filling (150 wt. parts) and the degree of drying (25%) of the composition due to insufficient wetting of the filler with the gluten matrix.

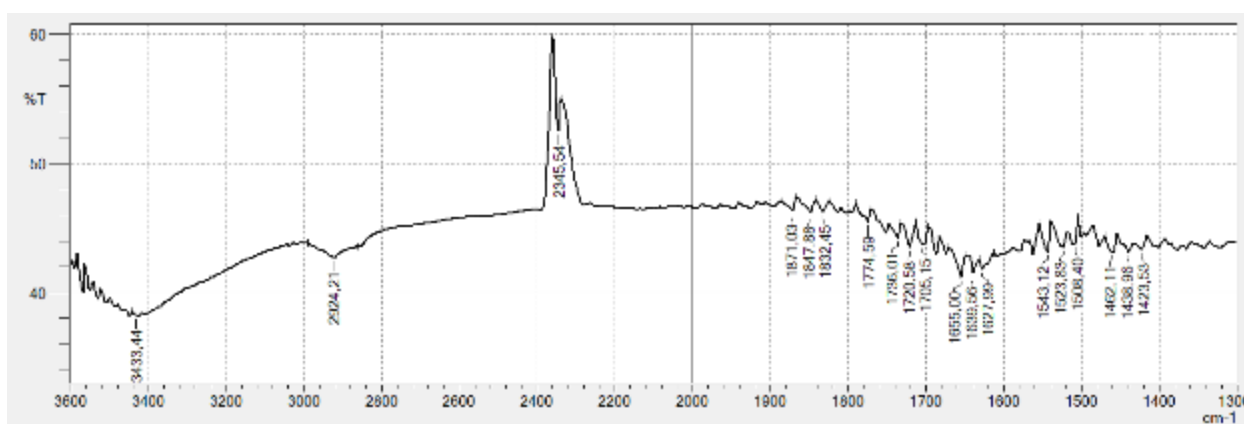
To study the impact toughness, biocomposites were formed with the content of the filler and the degree of drying of the composition, such as biocomposite No. 4 without additional heat treatment (No. 6 and No. 7). Impact toughness (3.92 kJ/m²) is 8% lower compared to biocomposite No. 4 in biocomposites formed by technology No. 6. The lowest impact toughness is 1.52 kJ/m² (2.8 times compared to No. 4 and 4.3 times compared to No. 3) have biocomposites formed according to technology No. 7. The obtained low impact toughness of biocomposites, the degree of drying of the compositions of which is lower (20%), indicate the presence of excess moisture in the volume of the material, which prevents structuring. Carrying out additional heat treatment at a low temperature allows to increase the degree of structuring of biocomposites due to the formation of more bonds due to the removal of excess moisture.

A complex spectrum of transmission bands in the frequency range of 1400 cm⁻¹... 1900 cm⁻¹ was revealed for the developed biocomposites. The most characteristic transmission bands (Fig. 4, a) at frequencies of 1438.96 cm⁻¹ with optical density D=0.434 and half-width b=7.72 cm⁻¹, 1655.00 cm⁻¹ with optical density D=0.459 and half-width b=13.51 cm⁻¹, 1720.58 cm⁻¹ with optical density D=0.437 and half-width b=9.65 cm⁻¹ was recorded for biocomposite material No. 1 (Table 2), which contains 140 wt. parts

of the filler with a degree of drying of the composition of 20% and a pressing pressure of 8 MPa. These bandwidths correspond to symmetric deformation vibrations of $-\text{CH}_3$ -groups and valence vibrations of $-\text{C}=\text{O}$ -groups. The fixed transmission band at the frequency of 2345.54 cm^{-1} with optical density $D=0.357$ and half-width $b=9.65 \text{ cm}^{-1}$ corresponds to valence vibrations $-\text{P}-\text{H}$. The transmission band at the frequency of 2920.35 cm^{-1} (optical density $D=0.467$ and half-width $b=63.65 \text{ cm}^{-1}$) was detected. This transmission band corresponds to asymmetric valence vibrations of CH_3 groups.



a



b

Fig. 4. IR spectrograms of biocomposites No. 1 (a) and No. 4 (b) (Table 2)

Biocomposite material No. 4 (Table 2), which contains 150 wt. parts of the filler with a degree of drying of the composition of 20% and a pressing pressure of 8 MPa is also characterized by transmission bands at similar frequencies (Fig. 4, b): 1438.96 cm^{-1} with an optical density $D=0.365$ and a half-width $b=11.58 \text{ cm}^{-1}$, 1655.00 cm^{-1} with optical density $D=0.385$ and half-width $b=11.58 \text{ cm}^{-1}$, 1720.58 cm^{-1} with optical density $D=0.362$ and half-width $b=9.65 \text{ cm}^{-1}$. The transmission band has a larger half-width value of $b=11.57 \text{ cm}^{-1}$ at frequencies of 2345.54 cm^{-1} (optical density $D=0.280$).

The transmission band, which corresponds to the vibrations of the methylene group, is shifted to the region of higher frequencies up to 2924.21 cm^{-1} with optical density $D=0.370$ and half-width $b=63.65 \text{ cm}^{-1}$. This indicates the activation of physicochemical processes of bond formation in the biocomposite. This material has lower values of optical densities compared to biocomposite material No. 1, which indicates a lower degree of structuring of the biocomposite system.

Conclusions. It was established that with a lower content of chopped stalks of grain crops (140 wt. parts) it is necessary to dry the composition until the moisture loss of 25% by weight. With a higher content of the filler (150 wt. parts), it is sufficient to dry the composition to a moisture loss of 20% by weight. This is economically beneficial, as the duration of the technological process is shortened, which will lead to a decrease in energy costs. Biocomposites filled with 150 wt. parts of chopped stalks of cereal crops and the degree of drying of the composition of 20% with a concentration of gluten solution of 50% have the highest compressive strength of 82.8 MPa. This material has a high degree of structuring, as evidenced by the IR spectrogram of the biocomposite. It was established that it is necessary to increase the degree of drying of the composition to 25% in the case of a lower concentration of gluten in the matrix and a higher content of water in the composition. The compressive strength of these biocomposites is 54.1 MPa. Degree of drying of the composition of 20% is sufficient for biocompositions with a higher concentration of gluten solution

(43% and 50%), which is associated with a lower water content in the matrix. The strength of these biocomposites is higher (73.2 MPa). A higher concentration of glutin solution of 50% increases its viscosity. The IR spectroscopy method confirmed that biocomposite materials that contain less chopped stalks of grain crops (140 wt. parts) have a higher degree of structuring compared to biocomposites with a content of 150 wt. parts of filler.

References

1. MD Recycled Plastic Biocomposites. Rezaur Rahman, Muhammad Khusairy Bin Bakri., 1st Edition - January 24, 2022.
2. Ahmad F., Choi H.S., Park M.K. Natural fiber composites selection in view of mechanical, light weight and economic properties. *Macromolecular materials and engineering*. 2015; 10-24.
3. Grigore M.E. Methods of recycling, properties and applications of recycled thermoplastic polymers. *Recycling*. 2017; 2(4).
4. Vazquez-Nunez E, Avecilla-Ramirez A, Rocio Lopez-Cuellar M. Green composites and their contribution toward sustainability. *Polymers and Polymer Composites*. 2021, Vol. 29(9S): 588-608.
5. Farah S, Anderson DG, Langer R. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications—a comprehensive review. *Adv Drug Deliver Rev* 2016; 107(1): 367-392.
6. Siakeng R, Jawaid M, Ariffin H, et al. Mechanical, dynamic, and thermomechanical properties of coir/pineapple leaf fiber reinforced polylactic acid hybrid biocomposites. *Polym Compos* 2019; 40(5): 2000-2011.
7. Mishra R, Behera B, Militky J. Recycling of textile waste into green composites: Performance characterization. Volume 35, Issue10, October 2014: 1960-1967.
8. Thakur V, Singha A and Thakur M. Green composites from natural fibers: mechanical and chemical aging properties. *Int J Polym Anal Charact* 2012; 17: 401-407.

Ю. В. Максим'юк, О. М. Федчук, О. В. Строк

Київський національний університет будівництва і архітектури

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ДОПОВНЕНОЇ РЕАЛЬНОСТІ В ТЕХНІЧНИХ НАУКАХ: ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю оптимізації технічних процесів за допомогою технологій доповненої реальності (AR), які підвищують продуктивність, точність і ефективність. Метою є оцінювання впливу AR на технічні процеси та розроблення рекомендацій для її інтеграції. Методи включають аналіз літератури, моделювання економічного ефекту та прикладні розрахунки. Результати показують, що AR скорочує час виконання завдань, знижує витрати та покращує якість продукції. У висновках наголошено на необхідності розроблення стандартів, підготовки персоналу та впровадження пілотних проєктів для ефективної інтеграції AR.

Ключові слова: віртуальні інтерфейси, цифрове моделювання, інтерактивні системи.

Y. Maksymiuk, O. Fedchuk, O. Strok

RESEARCH ON AUGMENTED REALITY TECHNOLOGIES IN TECHNICAL SCIENCES: PRACTICAL APPLICATION

The relevance of the study is determined by the need to optimize technical processes through augmented reality (AR) technologies, which enhance productivity, accuracy, and efficiency. The aim is to evaluate the impact of AR on technical processes and develop recommendations for its integration. Methods include literature analysis, modeling of economic effects, and applied calculations. The results demonstrate that AR reduces task completion time, lowers costs, and improves product quality. The conclusions emphasize the need for standardization, personnel training, and pilot projects to ensure effective AR integration.

Keywords: virtual interfaces, digital modeling, interactive systems.

Постановка проблеми. Доповнена реальність як технологія, що інтегрує віртуальні елементи у фізичний простір, відкриває нові можливості для розв'язання складних технічних завдань, що раніше були недосяжними або обмеженими традиційними методами. У контексті технічних наук ця технологія дозволяє моделювати складні інженерні процеси, візуалізувати об'єкти, які ще не створені, та оптимізувати робочі процеси завдяки інтерактивній взаємодії між людиною та системою. Водночас широке застосування доповненої реальності зіштовхується з низкою проблем, зокрема високими вимогами до апаратного забезпечення, відсутністю універсальних стандартів розроблення, а також необхідністю адаптації до специфічних потреб різних галузей. Сучасні наукові дослідження спрямовані на подолання цих перешкод та створення ефективних рішень, які відповідають вимогам інженерної, виробничої та освітньої сфер. Практична цінність полягає у створенні інтерактивних середовищ для підготовки фахівців, моделювання технологічних процесів і підвищення продуктивності завдяки швидшому прийняттю рішень на основі візуалізованих даних. Такі завдання вимагають міждисциплінарного підходу та адаптації наявних моделей взаємодії в контексті технічних і соціальних викликів сучасності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технології доповненої реальності (далі – AR) у контексті технічних наук охоплюють широкий спектр досліджень, які висвітлюють різні аспекти впровадження, застосування та перспектив розвитку цих інноваційних рішень. У статті В. Цибуленка та його співавторів детально розглянуто приклади використання AR у машинобудуванні, зокрема для оптимізації виробничих процесів, скорочення часу на виконання завдань і зниження витрат. Авторами також відзначено значний потенціал AR для зменшення кількості помилок у складальних процесах завдяки інтерактивним інструкціям та тривимірному моделюванню [1].

Термінологічні аспекти, а також специфіку комп'ютерних систем, які підтримують AR, дослідила В. Волинець. Ця наукова розвідка важлива для побудови чіткої класифікації технологій віртуальної, доповненої та змішаної реальності, що сприяє їх інтегрованому використанню в міждисциплінарних дослідженнях [2].

Робота Е. Abad-Segura і його команди є аналізом того, як AR-технології впливають на стійкість освітніх систем, забезпечуючи інтерактивність, залучення користувачів і підвищення мотивації до навчання. Їхній підхід має значення для використання AR в освітніх програмах

© Ю. В. Максим'юк, О. М. Федчук, О. В. Строк

технічних наук, де складний матеріал може бути візуалізований у реальному часі [3]. R. Hidayat та Y. Wardat систематизували наявні дослідження щодо застосування AR у STEM-дисциплінах, демонструючи, як ці технології сприяють підвищенню навчальних результатів і зацікавленості здобувачів вищої освіти [4]. Результати експериментів, які підтверджують позитивний вплив AR на мотивацію користувачів в освітніх середовищах, зокрема в технічних галузях, представлено в статті J. Cabero-Almenara [5].

Вплив AR на промислове виробництво, особливо в умовах Індустрії 4.0, проаналізували E. Bottani та G. Vignali. Їх дослідження підкреслює ефективність AR у забезпеченні точності виробничих процесів, моніторингу стану обладнання та підвищенні безпеки на виробництві [6]. F. Arena та колеги розглянули широкий спектр можливостей AR, підкресливши її важливість для проектування складних технічних систем і тестування їх функціональності [7]. Y. Chen зі співавторами сфокусувалися на використанні AR для візуалізації даних у реальному часі, що дозволяє значно покращити точність прийняття рішень у складних системах [8].

T. Syed та ін. зосередили увагу на технічних аспектах AR, як-от трекінг, інструменти розроблення та AR-дисплеї, а також підкреслили необхідність посилення безпеки даних під час роботи з такими системами. Ці аспекти є ключовими для масштабного впровадження AR у промисловості [9]. У дослідженні B. Berman і D. Pollack представили стратегії успішного впровадження AR у бізнес-середовищі, акцентуючи на таких організаційних бар'єрах, як навчання персоналу та адаптація процесів до нових технологій [10].

Комплексний аналіз впровадження AR у промислових галузях, включаючи виклики інтеграції та перспективи адаптації технологій до різних виробничих середовищ, провели L. De Souza Cardoso, F. Mariano та E. Zorza [11]. M. Gattullo і його колеги розробили методiku створення інтерактивних інструкцій для роботи з AR у промисловості, що підвищує ефективність і точність виконання завдань [12]. Застосування AR у будівництві проаналізували A. Oke і V. Arowojuwa, наголошуючи на її потенціалі для покращення управління проектами та оцінки конструкцій [13].

S. Zollmann, T. Langlotz, R. Grasset, W. Lo, S. Mori та H. Regenbrecht запропонували класифікацію методів візуалізації в AR, які можна адаптувати для широкого спектра технічних завдань. Ця робота є важливим внеском у розвиток методологічної бази для роботи з AR [14].

Таким чином, у дослідженнях підтверджено значний потенціал AR у підвищенні ефективності технічних процесів, поліпшенні візуалізації даних, автоматизації виробничих рішень і навчанні. Водночас підкреслено про необхідність подальших досліджень щодо відповіді на виклики інтеграції, створення стандартів і покращення методів безпеки.

Попри значний прогрес у дослідженні технологій доповненої реальності (AR), залишаються не досить вивченими кілька важливих аспектів. Відсутній комплексний аналіз сучасного стану розвитку AR у контексті технічних наук, що ускладнює розуміння загальних тенденцій та можливостей їх застосування. Можливості AR для оптимізації інженерних процесів і цифрового моделювання досліджено недостатньо, особливо в практичних умовах, де їхній вплив на продуктивність та ефективність потребує більш глибокої емпіричної оцінки.

Технічні та організаційні виклики, як-от відсутність стандартів, складності інтеграції з наявними системами та навчання персоналу, залишаються недопрацьованими, що стримує масштабування AR. Крім того, відсутність універсальних методів оцінювання впливу AR на продуктивність обмежує можливість об'єктивного порівняння результатів у різних галузях.

Запропоноване дослідження сприятиме заповненню цих прогалин, зокрема через системний аналіз, оцінювання практичного впливу AR на технічні процеси, а також розроблення рекомендацій для подолання бар'єрів і впровадження AR у різні сфери. Це дозволить розширити наукове розуміння доповненої реальності й створити базу для подальших міждисциплінарних досліджень.

Метою статті є дослідження практичних можливостей застосування технологій доповненої реальності в технічних науках з акцентом на їх вплив на вдосконалення цифрового моделювання, створення інтерактивних систем та інтеграцію віртуальних інтерфейсів у виробничі й освітні процеси.

Завдання статті:

- 1) провести аналіз сучасного стану розвитку технологій доповненої реальності в контексті технічних наук та визначити перспективи їх застосування;
- 2) дослідити можливості використання доповненої реальності для оптимізації інженерних процесів і цифрового моделювання з акцентом на підвищенні ефективності технічних рішень;

3) розробити рекомендації для подолання технічних та організаційних бар'єрів упровадження AR у практичну діяльність з огляду на її вплив на продуктивність і специфіку різних галузей.

Виклад основного матеріалу. Технології доповненої реальності (AR) займають дедалі вагомніше місце в технічних науках, надаючи нові можливості для розв'язання складних завдань. Вони дозволяють інженерам і проєктувальникам інтерактивно працювати з віртуальними об'єктами, моделювати процеси, проводити випробування в цифровому середовищі та вдосконалювати виробничі операції. Від розроблення нових механізмів до моніторингу стану складних систем, AR забезпечує інноваційний підхід до створення рішень, спрямованих на підвищення ефективності, точності та економічності. У технічних науках AR стає особливо актуальною в умовах сучасних викликів та змін у технологічному середовищі (табл. 1).

Табл. 1

Можливості та перспективи використання технологій доповненої реальності в технічних науках

Напрямок застосування	Технологічні можливості	Результати
Машинобудування	Моделювання конструкцій, інтерактивне тестування прототипів, візуалізація роботи механізмів	Зменшення потреби у фізичних моделях, скорочення часу розроблення
Енергетика	Моніторинг стану обладнання, прогнозування несправностей, оптимізація аварійних сценаріїв	Підвищення безпеки експлуатації та зниження ризиків простою
Автоматизація виробничих процесів	Інтерактивні інструкції для операторів, моделювання роботизованих систем	Покращення точності виконання складальних операцій
Архітектурне моделювання	Цифрові двійники проєктів, оцінювання інтеграції об'єктів у навколишнє середовище	Полегшення етапу планування та оптимізація проєктних рішень

Джерело: сформовано авторами на підставі [1; 4; 6; 11; 13]

У машинобудуванні використання AR дозволяє відмовитися від дорогих фізичних моделей, адже всі тестування та моделювання можна провести віртуально. Наприклад, інженери можуть взаємодіяти із цифровими двійниками механізмів, аналізувати їх роботу та одразу вносити корективи в проєкт. У галузі енергетики AR допомагає забезпечувати безперервну роботу обладнання, дозволяючи операторам у реальному часі відслідковувати його стан та прогнозувати можливі поломки. Такі рішення мінімізують ризики аварій і забезпечують стабільність енергопостачання.

У сфері автоматизації виробничих процесів AR інтегрується в складальні лінії, де працівники за допомогою інтерактивних інструкцій можуть швидко й точно виконувати складні операції. Це не тільки скорочує час виконання завдань, а й знижує ймовірність помилок. В архітектурному моделюванні AR сприяє створенню детальних цифрових моделей, які дозволяють оцінити інтеграцію будівель у реальне середовище та своєчасно внести необхідні зміни, забезпечуючи відповідність проєкту технічним і естетичним вимогам.

Технології доповненої реальності активно впроваджуються в інженерні процеси, забезпечуючи значну оптимізацію моделювання, проєктування та аналізу. Використання AR дозволяє створювати інтерактивні моделі, які дають змогу інженерам проводити віртуальне тестування, оцінювати конструктивні рішення та здійснювати модифікації в реальному часі. Це не лише прискорює розроблення складних технічних систем, але й знижує витрати на виготовлення фізичних прототипів [8]. Технологія забезпечує можливість інтегрувати віртуальні об'єкти в реальне середовище, що сприяє покращенню точності моделювання та дозволяє враховувати специфіку експлуатаційних умов. AR також є інструментом для аналізу ризиків і перевірки альтернативних рішень на ранніх етапах проєктування (табл. 2).

Доповнена реальність суттєво трансформує інженерні процеси на всіх етапах їх реалізації. У проєктуванні вона забезпечує можливість створювати віртуальні моделі з інтерактивною перевіркою відповідності технічним вимогам. Це дозволяє зменшити кількість помилок ще до початку виготовлення фізичних деталей. На етапі тестування AR використовується для

моделювання поведінки механізмів під різними навантаженнями, що допомагає оцінювати надійність і безпеку конструкцій без фізичних експериментів. У виробництві інтерактивні інструкції дозволяють працівникам виконувати складальні операції з високою точністю, навіть без глибокого досвіду. Наприклад, у робототехніці AR застосовується для програмування складальних робіт із покроковими вказівками. У контролі якості доповнена реальність дає змогу оперативно виявляти дефекти в продукції, що дозволяє уникнути серйозних витрат на їх виправлення в майбутньому.

Табл. 2

Використання технологій доповненої реальності на етапах інженерного процесу

Етапи інженерного процесу	Можливості доповненої реальності	Очікуваний ефект
Проектування	Віртуальне моделювання деталей, інтерактивна перевірка відповідності технічним вимогам	Підвищення точності, зменшення кількості помилок
Тестування	Симуляція роботи механізмів у реальних умовах, аналіз навантажень	Скорочення часу на перевірку рішень, підвищення безпеки
Виробництво	Інтерактивні інструкції для збирання та налаштування обладнання	Покращення продуктивності, мінімізація ризику людських помилок
Контроль якості	Візуалізація дефектів у реальному часі, моніторинг стану обладнання	Зниження витрат на усунення дефектів

Джерело: сформовано авторами на підставі [8; 9]

До того ж технології доповненої реальності суттєво розширюють можливості цифрового моделювання, яке є важливою складовою частиною сучасних інженерних процесів [2]. Завдяки AR створюються інтерактивні тривимірні моделі, що дозволяють проєктувальникам і конструкторам не лише візуалізувати об'єкти у віртуальному середовищі, а й інтегрувати їх у реальний контекст. Це відкриває доступ до більш точного аналізу параметрів конструкцій, їх функціонування та відповідності заданим умовам. Доповнена реальність дозволяє моделювати поведінку систем у реальному часі, включаючи аналіз їх взаємодії з навколишнім середовищем, що є критично важливим для складних інженерних рішень (табл. 3).

Цифрове моделювання з використанням доповненої реальності відкриває нові горизонти для аналізу, оптимізації та інтеграції конструкцій у реальне середовище. Візуалізація складних об'єктів у тривимірному просторі сприяє кращому розумінню їхньої структури і функціональності [3]. Наприклад, у машинобудуванні інженери можуть візуалізувати внутрішні механізми двигунів, що забезпечує спільне прийняття рішень у командах. Аналіз конструкцій з використанням AR дозволяє моделювати поведінку об'єктів під час навантажень, виявляти слабкі місця і швидко коригувати їх у віртуальному середовищі. Це скорочує час і витрати на фізичні тестування.

Оптимізація за допомогою AR дає можливість створювати і тестувати кілька альтернативних варіантів конструкцій, що дозволяє вибрати найбільш ефективне рішення. Наприклад, у будівництві архітектори можуть випробовувати різні типи фасадних матеріалів, оцінюючи їх стійкість до кліматичних умов. Контекстне моделювання є ще одним важливим аспектом: AR дозволяє перевірити, як конструкція виглядатиме та функціонуватиме в реальних умовах, ураховуючи просторові, екологічні або кліматичні фактори [8]. Це критично важливо, наприклад, для проєктування мостів або висотних споруд, де точність і адаптивність є ключовими показниками успішності.

Доповнена реальність (AR) здатна значно підвищувати продуктивність та знижувати витрати в технічних процесах завдяки оптимізації часу виконання завдань, зменшенню кількості помилок і підвищенню якості продукції. Основним економічним ефектом від використання AR є скорочення витрат на виробництво, зменшення часу виконання робіт і забезпечення точності операцій. Щоб об'єктивно оцінити ефективність впровадження AR, слід застосовувати підхід, заснований на розрахунку економії ресурсів і фінансових вигод.

Табл. 3

Можливості доповненої реальності в цифровому моделюванні

Аспекти цифрового моделювання	Можливості доповненої реальності	Результат
Візуалізація	Створення інтерактивних 3D-моделей, інтеграція об'єктів у реальний простір	Покращення комунікації між командами розробників
Аналіз конструкцій	Симуляція навантажень, оцінювання деформацій, перевірка відповідності технічним стандартам	Скорочення потреби у фізичних прототипах
Оптимізація	Перевірка альтернативних варіантів рішень у віртуальному середовищі	Вибір найефективніших варіантів рішень
Контекстне моделювання	Інтеграція моделей у реальні умови, аналіз їх функціональності на місцевості	Точний прогноз функціональності в реальних умовах

Джерело: сформовано авторами на підставі [12; 14]

Основні показники включають скорочення тривалості виробничого циклу, підвищення продуктивності працівників і зменшення витрат на помилки. Практичний економічний ефект від AR визначається на основі часу, що зекономлено, та відповідного зниження витрат. Формули розрахунку:

1. Часова економія:

$$\Delta T = T_{\text{без AR}} - T_{\text{з AR}}, \quad (1)$$

де ΔT – скорочення часу, $T_{\text{без AR}}$ – час виконання завдання до впровадження AR, $T_{\text{з AR}}$ – час після впровадження AR.

2. Економія витрат на оплату праці:

$$E_{\text{праці}} = \Delta T * C_{\text{години}} * N, \quad (2)$$

де $E_{\text{праці}}$ – економія витрат на робочу силу, $C_{\text{години}}$ – вартість години роботи, N – кількість працівників.

3. Загальний економічний ефект:

$$E_{\text{загальний}} = E_{\text{праці}} - E_{\text{впровадження}}, \quad (3)$$

де $E_{\text{впровадження}}$ – витрати на впровадження AR (обладнання, навчання, обслуговування).

Припустимо, на виробничому підприємстві здійснюється виготовлення складного механізму. До впровадження доповненої реальності час складання одного механізму становив 120 хвилин, а в процесі брали участь двоє працівників, кожен із середньою погодинною оплатою 400 гривень. Після впровадження AR час виконання завдання скоротився до 90 хвилин завдяки інтерактивним інструкціям та віртуальній візуалізації порядку складання. Загальні витрати на впровадження AR, включаючи закупівлю обладнання, навчання персоналу та налаштування системи, становили 60 000 гривень. У місяць підприємство виробляє 300 таких механізмів.

На кожному механізмі завдяки AR економлять 30 хвилин часу, тобто 0,5 години. Якщо врахувати, що працюють двоє працівників, то загальна економія часу становить 1 людино-годину на кожному механізмі. З огляду на погодинну оплату праці 400 гривень економія на складанні одного механізму становить саме 400 гривень. Для всіх 300 механізмів, що виготовляються протягом місяця, загальна економія – 120 000 гривень.

Витрати на впровадження AR окуповуються за один місяць, адже загальна економія вдвічі перевищує початкові інвестиції в 60 000 гривень. До того ж скорочення часу виконання завдань дає змогу збільшити обсяги виробництва без додаткових витрат, а використання інтерактивних інструкцій знижує кількість помилок під час складання, що додатково зменшує витрати на усунення дефектів і підвищує якість продукції.

Так, застосування AR на підприємстві демонструє значний практичний ефект, адже не тільки сприяє економії часу та коштів, але й підвищує ефективність і якість технічних процесів, створює конкурентні переваги для підприємств, дозволяючи їм залишатися інноваційними й адаптивними до сучасних викликів.

Впровадження технологій доповненої реальності (AR) у практичну діяльність відкриває перед інженерами, розробниками та керівниками організацій широкі перспективи, проте цей процес супроводжується низкою технічних і організаційних викликів, які формують нову реальність взаємодії з інноваціями. Одним із найбільших технічних бар'єрів є потреба у високопродуктивному апаратному забезпеченні, яке здатне створити реалістичну візуалізацію та точну синхронізацію віртуальних об'єктів із реальним середовищем. Наприклад, шоломи доповненої реальності чи інтерактивні дисплеї часто вимагають значних обчислювальних ресурсів, що робить їх інтеграцію в мобільні чи віддалені умови надзвичайно складним завданням. Необхідність стабільного підключення до високошвидкісного інтернету або локальних мереж також суттєво поглиблює цю проблему.

Іншою серйозною проблемою є нестача стандартизації у сфері AR. Кожен розробник використовує власні платформи, інструменти та архітектури, що ускладнює інтеграцію цих рішень із наявними системами. Наприклад, у виробничій сфері часто необхідно налаштувати AR-додатки так, щоб вони взаємодіяли з роботизованими механізмами або ERP-системами, а відсутність єдиних стандартів ускладнює цей процес, змушуючи організації витрачати ресурси на розроблення кастомізованих рішень.

З організаційного погляду важливо враховувати людський фактор, адже AR не лише змінює підхід до виконання завдань, але й вимагає від працівників нового способу мислення. Наприклад, технічний персонал, який звик працювати з традиційними інструментами, може скептично ставитися до впровадження AR через страх утратити контроль над процесами. Навчання та підвищення кваліфікації працівників є важливою складовою частиною впровадження, але потребує часу і значних витрат. До того ж менеджери зіштовхуються з питанням адаптації робочих процесів до нових технологій, які часто порушують усталені алгоритми роботи.

Фінансові аспекти додають ще один шар складності. Інвестиції в AR включають не лише закупівлю обладнання, але й створення унікального програмного забезпечення, налаштування технічної інфраструктури та витрати на підтримку цих систем. Однак навіть після впровадження виникає потреба в постійній модернізації, оскільки технології швидко оновлюються і невідповідність сучасним вимогам може стати причиною втрати конкурентних переваг.

Символічно, що саме AR – технологія, яка стирає межі між віртуальним і реальним – сама стає об'єктом цього протистояння: нові технічні можливості зіштовхуються із застарілими підходами до організації робочих процесів.

Інтеграція технологій доповненої реальності в технічні науки та суміжні галузі вимагає системного підходу, що враховує специфіку використання AR у різних сценаріях. Першочерговим завданням є створення інфраструктури, здатної підтримувати обчислювальні потреби AR-систем. Це включає вибір апаратного забезпечення, яке відповідає специфічним вимогам галузі, та адаптацію наявних систем до роботи з AR. Наприклад, для промислових підприємств важливо інтегрувати AR із системами автоматизації виробничих процесів, як-от SCADA або ERP, щоб забезпечити безперебійну роботу на всіх етапах виробництва [7].

Важливим аспектом є підготовка персоналу до роботи з новими технологіями. Навчальні програми повинні поєднувати теоретичну базу з практичними заняттями, які дозволяють працівникам не лише зрозуміти можливості AR, але й адаптувати її до специфіки своєї діяльності. У технічних науках це може включати симуляції для підготовки інженерів, які працюватимуть із тривимірними моделями механізмів, чи віртуальні лабораторії для тестування конструктивних рішень.

Значну увагу необхідно приділити розробленню та впровадженню стандартів для використання AR. Відсутність уніфікованих підходів ускладнює процес інтеграції, особливо для міждисциплінарних проєктів [7]. Розв'язання цього питання можливе через створення універсальних протоколів взаємодії між AR-додатками та наявними інформаційними системами [15]. Для архітектурного моделювання це може бути стандартизація форматів даних, що дозволить легше інтегрувати AR у BIM-системи, а в машинобудуванні – розроблення протоколів для обміну даними між CAD-моделями та AR-додатками.

Розроблення програмного забезпечення для AR має враховувати гнучкість системи та можливість її масштабування [10]. Це дозволить адаптувати рішення для різних галузей, зокрема інженерії, енергетики чи робототехніки. Наприклад, для виробничих підприємств важливо

забезпечити можливість оновлення AR-додатків відповідно до змін у процесах або появи нових вимог до обладнання.

Окремим питанням є оптимізація витрат на впровадження AR. Це можна досягти через залучення партнерів, які спеціалізуються на розробленні відповідних рішень, а також через державні програми підтримки інновацій. Для закладів освіти це може бути спільна розробка програм із компаніями-розробниками, що дозволить створити навчальні симулятори без суттєвого навантаження на бюджет.

Ефективна інтеграція AR потребує оцінювання потенційних ризиків, як-от кібербезпека чи конфіденційність даних, особливо у виробничих середовищах [10]. Впровадження рішень має враховувати можливі загрози та передбачати механізми їх запобігання. Наприклад, у робототехніці та автоматизації виробництва необхідно забезпечити захист від несанкціонованого доступу до систем, що використовують AR.

Практична інтеграція AR також передбачає проведення пілотних проєктів, які дозволяють оцінити ефективність рішень і виявити можливі недоліки ще до масштабного впровадження. Вибір сценаріїв для таких проєктів має враховувати як технічні можливості, так і актуальні потреби галузі. Наприклад, для архітектурних бюро це може бути тестування AR для візуалізації великих об'єктів, а для інженерних підприємств – оптимізація збирання складних механізмів за допомогою інтерактивних інструкцій.

Висновки. Встановлено, що технології доповненої реальності (AR) стають важливим інструментом для оптимізації технічних процесів у таких галузях, як машинобудування, енергетика, автоматизація виробництва та архітектурне моделювання. Використання AR сприяє скороченню часу виконання завдань, підвищенню точності операцій і зниженню витрат на виготовлення фізичних прототипів. Завдяки інтеграції AR забезпечується можливість віртуального тестування та моделювання в реальному часі, що суттєво розширює можливості аналізу та проєктування складних технічних рішень.

Основними проблемами впровадження технологій AR є високі вимоги до апаратного забезпечення, відсутність стандартів розроблення програмного забезпечення, складності інтеграції AR з наявними системами та потреба в підготовці персоналу. Крім того, значним бар'єром є високі початкові інвестиції, необхідні для впровадження технологій AR, а також потреба в розв'язанні питань кібербезпеки та конфіденційності даних.

Рекомендації щодо подолання цих проблем включають розроблення стандартів для інтеграції AR у різні галузі, створення навчальних програм для підготовки фахівців, упровадження пілотних проєктів для тестування ефективності технологій, а також розвиток державно-приватного партнерства для фінансування впровадження AR. Особливу увагу слід приділити адаптації міжнародного досвіду та розробленню універсальних протоколів взаємодії між AR-додатками та наявними інформаційними системами.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з аналізом довгострокового впливу технологій AR на продуктивність та інноваційність технічних процесів, оцінюванням економічної ефективності впровадження AR у масштабних проєктах та розробленням нових моделей інтеграції AR у національні політики. Крім того, важливо вивчити можливості адаптації AR для використання в умовах обмеженого фінансування, а також розробити методології для оцінювання її ефективності в різних галузях.

Список використаних джерел:

1. Цибуленко В. О., Шульга Л. І., Назаренко М. С. VR/AR-технології та їх застосування в машинобудуванні. *Інновації молоді в машинобудуванні*. 2020. № 2. С. 478–484. URL: <https://jpaic.aaukr.org/index.php/wissn087/article/view/202559> (дата звернення: 23.11.2024).
2. Волинець В. О. Віртуальна, доповнена і змішана реальність: сутність понять та специфіка відповідних комп'ютерних систем. *Питання культурології*. 2021. № 37. С. 231–243. DOI: <https://doi.org/10.31866/2410-1311.37.2021.237322> (дата звернення: 23.11.2024).
3. Abad-Segura E., González-Zamar M. D., Luque-de la Rosa A., Morales M. E. Sustainability of educational technologies: An approach to augmented reality research. *Sustainability*. 2020. № 12(10). Article 4091. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12104091> (date of access: 23.11.2024).

4. Hidayat R., Wardat Y. A systematic review of augmented reality in science, technology, engineering and mathematics education. *Education and Information Technologies*. 2024. № 29(8). P. 9257–9282. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10639-023-12157-x> (date of access: 23.11.2024).
5. Cabero-Almenara J., Roig-Vila R. The motivation of technological scenarios in augmented reality (AR): Results of different experiments. *Applied Sciences*. 2019. № 9(14). Article 2907. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9142907> (date of access: 23.11.2024).
6. Bottani E., Vignali G. Augmented reality technology in the manufacturing industry: A review of the last decade. *Iise Transactions*. 2019. № 51(3). P. 284–310. DOI: <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1493244> (date of access: 23.11.2024).
7. Arena F., Porto S., Pau G., Severino A. An overview of augmented reality. *Computers*. 2022. № 11(2). Article 28. DOI: <https://doi.org/10.3390/computers11020028> (date of access: 23.11.2024).
8. Chen Y., Guo Y., He C. An overview of augmented reality technology. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. № 1237(2). Article 022082. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1237/2/022082> (date of access: 23.11.2024).
9. Syed T. A., Mariyam H., Bilal M., Zafar S., Tahir M., Zafar N. In-depth review of augmented reality: Tracking technologies, development tools, AR displays, collaborative AR, and security concerns. *Sensors*. 2022. № 23(1). Article 146. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23010146> (date of access: 23.11.2024).
10. Berman B., Pollack D. Strategies for the successful implementation of augmented reality. *Business Horizons*. 2021. № 64(5). P. 621–630. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2021.02.027> (date of access: 23.11.2024).
11. De Souza Cardoso L. F., Mariano F. C. M. Q., Zorzal E. R. A survey of industrial augmented reality. *Computers & Industrial Engineering*. 2020. № 139. Article 106159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106159> (date of access: 23.11.2024).
12. Gattullo M., Fiorentino M., Uva A. E., Debernardis S., Monno G. Towards augmented reality manuals for industry 4.0: A methodology. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2019. № 56. P. 276–286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.10.001> (date of access: 23.11.2024).
13. Oke A. E., Arowoia V. A. An analysis of the application areas of augmented reality technology in the construction industry. *Smart and Sustainable Built Environment*. 2022. № 11(4). P. 1081–1098. DOI: <https://doi.org/10.1108/sasbe-11-2020-0162> (date of access: 23.11.2024).
14. Zollmann S., Langlotz T., Grasset R., Lo W. H., Mori S., Regenbrecht H. Visualization techniques in augmented reality: A taxonomy, methods and patterns. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2021. № 27(9). P. 3808–3825. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVCG.2020.2986247> (date of access: 23.11.2024).
15. Masood T., Egger J. Adopting augmented reality in the age of industrial digitalisation. *Computers in Industry*. 2020. № 115. Article 103112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.07.002> (date of access: 23.11.2024).

УДК 538.9

DOI 10.36910/775.24153966.2024.79.4

Т.В. Приймак¹, Д. М. Червінко¹, І. М. Гасюк¹, О. Г. Попадинець²

¹Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника

²Івано-Франківський національний медичний університет

ТРАНСФОРМАЦІЯ ЧАСТОТНОЇ ДИСПЕРСІЇ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТКАНИНИ ПЕЧІНКИ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ІНВАЗИВНИМИ ЕЛЕКТРОДАМИ ЗАЛЕЖНО ВІД ВІДСТАНІ МІЖ НИМИ

У роботі здійснено дослідження спектрів електричного імпедансу біологічних тканин (зразків печінки свині) залежно від умов експерименту. Діаграми Найквіста отримувались за двоелектродною схемою з використанням інвазивних електродів зі зміною відстані між ними. Отримано та опрацьовано оптимальні модельні еквівалентні електричні схеми досліджуваних систем, а також здійснено обчислення компонентів їх параметрів. Показані зміни частотної дисперсії електричних параметрів. Зроблено висновок про взаємозалежність напруженості електричного поля, використовуваних частот, розміщення електродів у досліджуваному зразку та здатності методу імпедансної спектроскопії розрізняти стан пошкодження біологічних тканин на основі їх електричних властивостей.

Ключові слова: імпедансна спектроскопія, інвазивні електроди, тканини печінки, дисперсія електричних параметрів, тангенс кута діелектричних втрат, резонансна частота.

T.V. Pryjmak, D.M. Chervinko, I.M. Hasiuk, O.H. Popadynets

TRANSFORMATION OF FREQUENCY DISPERSION IN ELECTRICAL PARAMETERS OF LIVER TISSUE DURING MEASUREMENT WITH INVASIVE ELECTRODES BASED ON DISTANCE BETWEEN ELECTRODES

This study investigates the spectra of electrical impedance in biological tissues (pig liver samples) depending on experimental conditions. Nyquist plots were obtained using a two-electrode configuration with invasive electrodes by using different distances between them. Optimal equivalent electrical circuit models of the studied systems were obtained and processed, and the components of their parameters were calculated. Changes in the frequency dispersion of electrical parameters were demonstrated. The study concludes on the interdependence of the electric field intensity, the frequencies which were used, location of the electrodes in the sample, and the ability of impedance spectroscopy to differentiate the state of biological tissue damage based on its electrical properties.

Keywords: impedance spectroscopy, invasive electrodes, liver tissue, dispersion of electrical parameters, dielectric loss tangent, resonance frequency.

Вступ. Метод імпедансної спектроскопії (ІС) знайшов своє застосування у широкому спектрі природничих наук, і, зокрема, у загальній медицині та її більш вузькоспеціалізованих сферах, таких як діагностика, кріохірургія, онкологія [1, 2, 3]. Широке використання ІС пов'язане із рядом його переваг перед іншими методиками аналізу біологічного матеріалу, зокрема, простота використання та навчання для практичного застосування відповідно, мобільність технічної частини, можливість проведення вимірювань у реальному часі, висока чутливість та точність [4].

Суть методу ІС полягає у вимірюванні частотної (ω) залежності дійсної (Z') та уявної частини (Z'') комплексного електричного імпедансу ділянки об'єкта для отримання параметричної частотної (ω) залежності: $Z''(\omega) = f(Z'(\omega))$ (діаграми Найквіста) та інтерпретації отриманих результатів через побудову електричної еквівалентної схеми і розрахунок параметрів її компонентів різними математичними та програмними засобами [5].

Однією із новітніх цілей ІС є не тільки визначення актуального структурно-функціонального стану досліджуваного біологічного матеріалу, а й визначення типу тканин на основі їх електричних властивостей [6]. Подібні переваги існують завдяки загаданій мобільності, наявності різних типів змінних електронних компонентів, необхідних для вимірювання, для прикладу, електродів та існуючих способів їх розміщення [7]. Задля спрощення використання клінічного оснащення проникаючої спрямованості, використовують відповідні інвазивні електроди, які дозволяють досягати визначеної глибини досліджуваної тканини [8].

Варто зауважити, що, на даний момент, згаданий підхід є затребуваний для великої кількості клінічних потреб (наприклад, для точного введення ліків та проведення діагностичних та хірургічних процедур) або для розрізнення між типами м'яких тканин та відділами тіла, що може бути надзвичайно важливим у діагностиці [9].

© Т.В. Приймак, Д. М. Червінко, І. М. Гасюк, О. Г. Попадинець

Якщо локальні вимірювання імпедансу можуть визначати тип тканини навколо вимірювального електроду або поверхневої частини будь-якого іншого клінічного обладнання при інвазивному використанні, це може застосовуватись оператором задля коректного спрямування приладу оператором до бажаної тканини [6]. При наявності адекватної просторової роздільної здатності, такий метод міг би сприяти спрощенню проведення широкого спектру клінічних процедур. Прикладами є біопсія та абляція у невеликих об'ємах, або доставка ліків через шкіру у судину чи невеликий об'єм м'язової, нервової або жирової тканини [10].

Не зважаючи на вказані переваги такого типу методики проведення ІС та його широке застосування, залишається не перевіраним вплив розташування голкових електродів та відстані між ними на параметри комплексного імпедансу у спектрі частот β -дисперсії (10кГц – 1МГц) [11].

У пропонованій роботі здійснено спробу визначення імпедансу із використанням голкових електродів, розміщених на різній відстані для вивчення впливу їх розташування на комплексний опір і його параметри, удосконалення методологічної частини імпедансної спектроскопії та виявлення факторів впливу у біологічному матеріалі на подібний підхід до вимірювання.

Матеріали і методи. Об'єктом для вимірювання було вирішено обрати печінку свині, у зв'язку із доступністю матеріалу та відносною поширеністю його використання. Отримані, одразу після забиття тварини, зразки зберігали у термостаті при температурі - 2°C.

Для проведення імпедансної спектроскопії використали звичайні, стерильні голки, калібром 21G, довжиною близько 38 мм з канюлею типу “Луер” із гострим кінчиком, яка сумісна із шприцами будь-якого об'єму та наконечником. Голки розташовувались на визначеній відстані одна від одної, зокрема, 4 см, 8 см, 12 см, 16 см, 20 см, 24 см, 28 см. Для регулювання відстані застосовували орієнтирну лінійку, із діелектричного матеріалу із просвердленими отворами на визначених відстанях. Структура експериментальної еквівалентної електричної схеми обґрунтована та вибрана аналогічною з приведеною нами у попередніх роботах [12].

Реєстрація спектрів електричного імпедансу у вигляді діаграм Найквіста проводилась з використанням спектрометра AUTOLAB PGStat 30 у діапазоні частот 0,01 Гц – 100 кГц. Для зменшення впливу амплітудних значень напруги вимірювального сигналу на стан органічних тканин діапазон потенціалу задавався в межах 0 – 5 мВ.

Моделювання електричних еквівалентних схем та чисельне опрацювання результатів вимірювання для визначення параметрів елементів еквівалентних схем проводилось із допомогою програмних середовищ FRA-2, та Z-View 2.

Реєстрація сигналу проводилась в автоматичному режимі, побудова залежностей дійсних та уявних значень питомої провідності σ' і σ'' , тангенсу кута втрат, резонансної частоти та опрацювання кривих здійснювалось і застосуванням прикладного програмного пакету Origin 8.0.

Частотна дисперсія електричної провідності та діелектричної проникності визначається із діаграм Найквіста за формулами (4, 5). Електрична провідність визначається за формулою:

$$\sigma = \frac{1}{Z^*} = \frac{S}{\rho^* \cdot l}, \quad (1)$$

де Z^* , ρ^* - комплексний імпеданс та питомий електричний опір, відповідно, а S , l – площа та товщина зразка, $\omega = 2\pi f$, ϵ_0 - електрична постійна, $j = \sqrt{-1}$.

За діаграмою, σ' - ($\sigma'' - \epsilon_0 \epsilon_\infty \omega$) (ϵ_∞ - значення діелектричної проникності при високих частотах) в області низьких частот визначалася величина питомої електропровідності на постійному струмі σ_{dc} при різних температурах.

Величина ϵ_∞ визначається з діаграми Коула-Коула $\epsilon'' - \epsilon'$ шляхом апроксимації експериментальної кривої до перетину з віссю абсцис [14].

Дійсна ϵ' і уявна ϵ'' діалектичні проникності визначаються за формулами:

$$\epsilon' = \frac{\rho''(\omega)}{(\rho''(\omega))^2 + (\rho'(\omega))^2 \cdot \epsilon_0 \cdot \omega}, \quad (2)$$

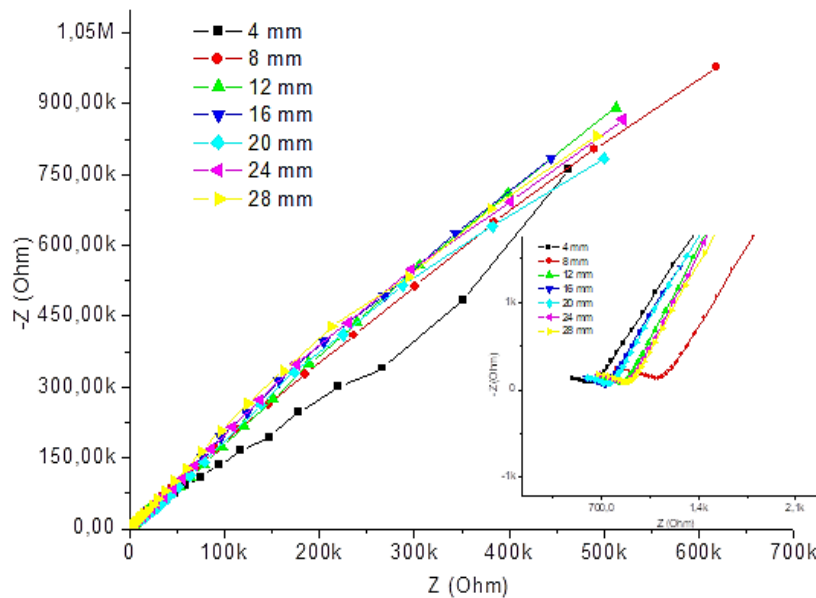
$$\epsilon'' = \frac{\rho'(\omega)}{(\rho''(\omega))^2 + (\rho'(\omega))^2 \cdot \epsilon_0 \cdot \omega}, \quad (3)$$

Частотна залежність дійсної та уявної складових комплексної провідності:

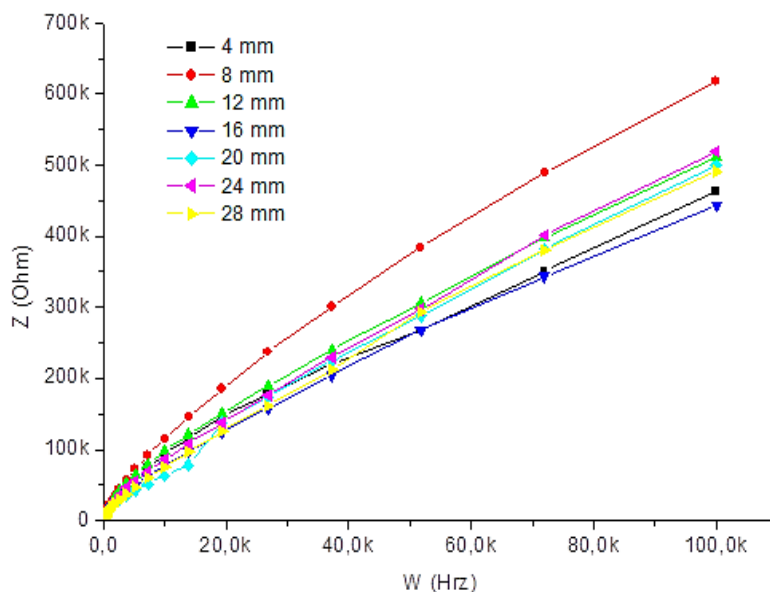
$$\sigma'(\omega) = \frac{\rho'(\omega)}{(\rho''(\omega))^2 + (\rho'(\omega))^2} \quad (4)$$

$$\sigma''(\omega) = \frac{\rho''(\omega)}{(\rho''(\omega))^2 + (\rho'(\omega))^2} \quad (5)$$

Результати та обговорення. Експериментально отримані діаграми Найквіста досліджуваних зразків для різних взаємних розміщень інвазійних електродів, зображені на рис. 1. Частотний діапазон отриманих спектрів становить 0,01 Гц – 100 кГц. Z' і $-Z''$ – дійсна та уявна складові імпедансу, відповідно. У вкладах зображені високочастотні ділянки спектрів.



a)



b)

Рис. 1. Спектри імпедансу тканин печінки із використанням голкових електродів: а) комплексний опір; б) частотна залежність дійсної частини комплексного імпедансу

Було показано, що значення комплексного імпедансу суттєво не змінюються при збільшенні відстані між голковими електродами у досліджуваному діапазоні (рис. 1), що вказує на відсутність суттєвих відмінностей між електричними властивостями чи збільшення опору у використаному органі у різних його ділянках. Окрім цього, зростання частоти теж не впливає зміну уявної частини імпедансу, що вказує на стабільність резистивних властивостей.

Аналіз вищенаведених діаграм Найквіста (рис. 1) дозволив побудувати відповідні електричні еквівалентні схеми, аналогічні до використовуваних нами для моделювання циліндричної конденсаторної комірки [13]. Значення параметрів компонентів вказаних схем наведені у таблиці 1.

CPE- та R - параметри електричних еквівалентних схем зразків відповідних розмірів, де R – це опір, а CPE-T – це елемент постійної фази, для якого визначено проміжні елементи між активним опором (при CPE-P = 0) або ідеальним конденсатором (CPE-P = 1). Для CPE-P < 1, елемент визначається, як псевдоконденсатор.

Динаміка залежності параметрів елементів еквівалентних схем CPE та R від відстані між голковими електродами, використаними під час експерименту, проілюстровані графічно на рис. 3 – 5. Згідно точної інтерпретації, складові елементи схеми R1-CPE, R2-CPE2 та R3-CPE3 відповідають компонентам електричної підсистеми тканини, відповідно, внутрішній області клітинної оболонки та міжклітинних утворень [13].

Табл. 1.

Відстань, см	R1, Ohm	CPE1-T, F	CPE1-P	R2, Ohm	CPE2-T, F	CPE2-P	R3, Ohm	CPE3-T, F	CPE3-P
4	5,89E+05	7,16E-06	7,35E-01	6,27E+02	9,21E-08	6,57E-01	5,50E+05	1,30E-04	1,44E+00
8	4,48E+04	1,77E-05	7,61E-01	1,14E+03	1,79E-07	5,83E-01	5,54E+06	6,67E-06	7,71E-01
12	3,60E+04	1,16E-05	8,09E-01	8,66E+02	1,01E-07	6,17E-01	5,19E+06	8,12E-06	7,88E-01
16	8,06E+03	1,59E-05	1,04E+00	7,43E+02	1,39E-07	6,09E-01	5,31E+06	8,56E-06	7,62E-01
20	3,03E+04	1,00E-05	7,56E-01	7,64E+02	1,75E-07	5,90E-01	1,77E+06	1,16E-05	9,19E-01
24	2,29E+04	1,61E-05	8,32E-01	8,98E+02	2,28E-07	5,70E-01	4,61E+06	8,10E-06	7,88E-01
28	1,01E+04	2,56E-05	8,31E-01	9,10E+02	1,70E-07	5,92E-01	4,49E+06	8,19E-06	7,83E-01

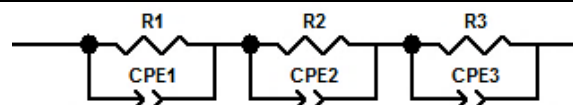


Рис. 2. Електрична еквівалентна схема зразків печінки із використанням голкових електродів для всіх відстаней

Параметри еквівалентних схем (рис. 2).

Було показано, що опори не продемонстрували суттєвих змін при зростанні відстані між електродами, зокрема, внутрішньо-клітинний, проте варто підмітити наявність дещо подібної динаміки змін та форми між кривими зовнішньо-клітинного та мембранного опору (рис. 3).

Не було помітно відмінностей змін CPE-T параметру еквівалентної схеми (CPE-T) трьох ланок, що говорить про стабільність ємнісних властивостей тканинних компонентів та ймовірну відсутність суттєвих пошкоджень досліджуваних органів (рис. 4а). Також бачимо стабільні опірні властивості органу та незначні стрибки значень CPE-R на певних відстанях між електродами, проте без чіткої тенденції (рис. 4б).

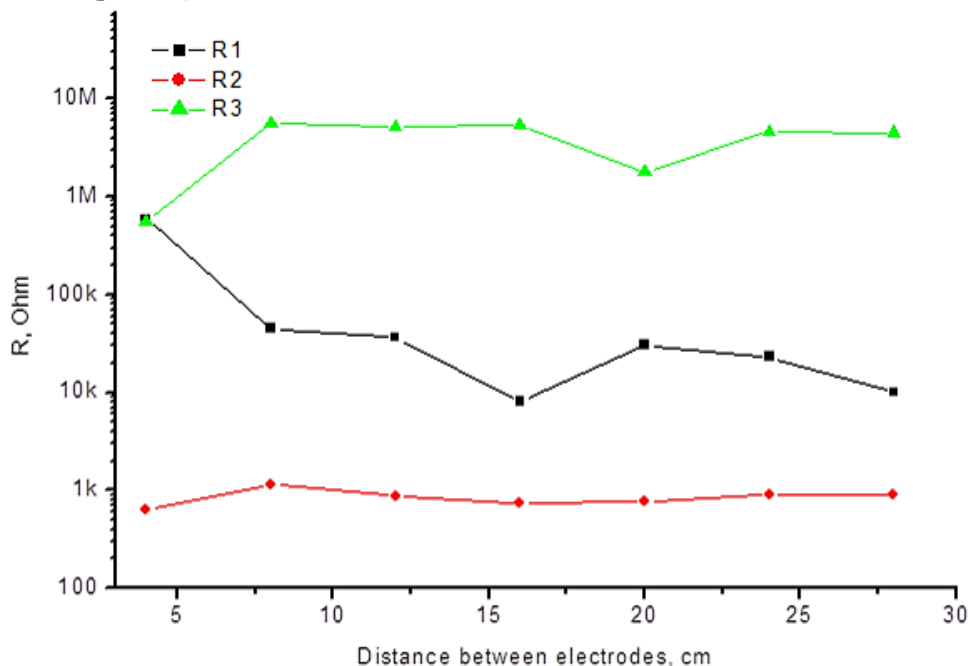
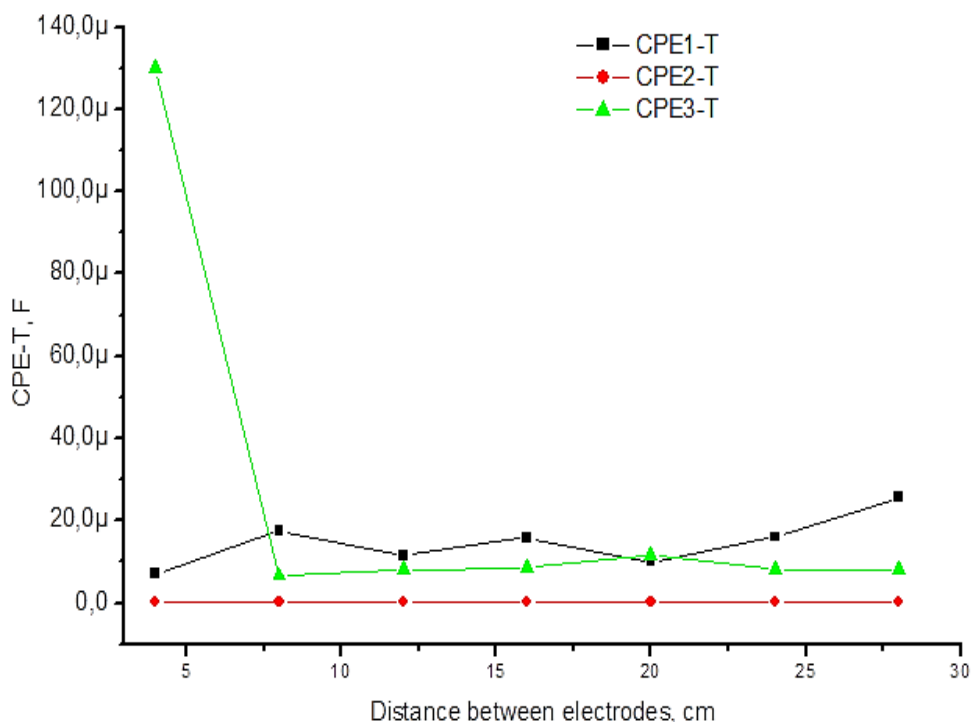
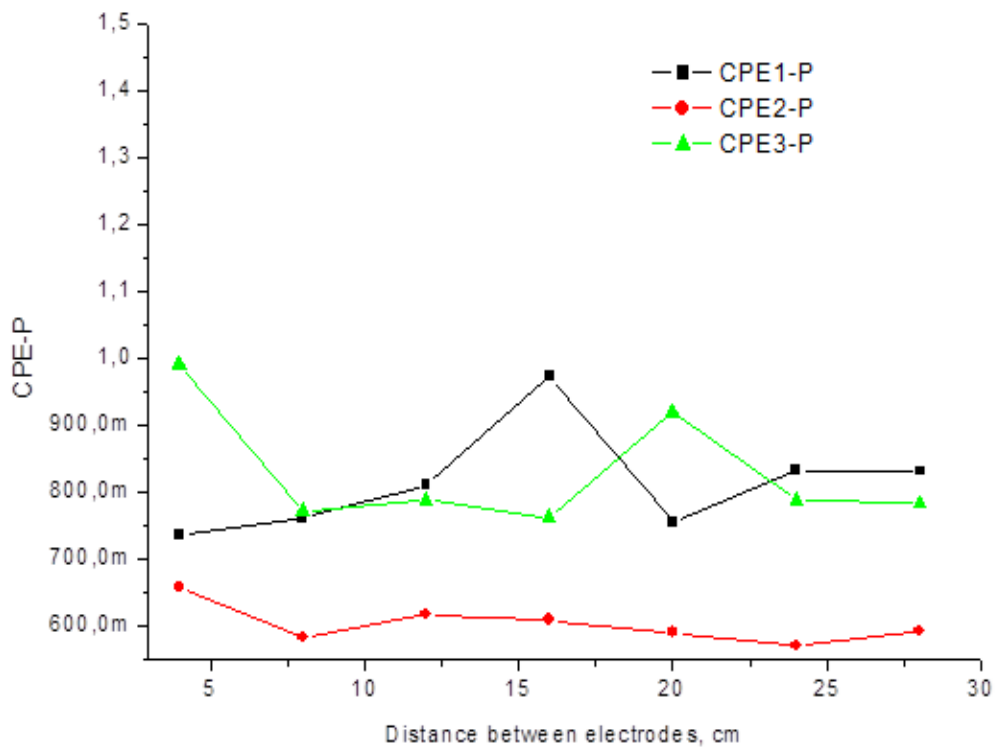


Рис. 3. Вплив відстані між голковими електродами на зміни параметру R еквівалентної електричної схеми при діапазоні частот 0,01 Гц – 100 кГц

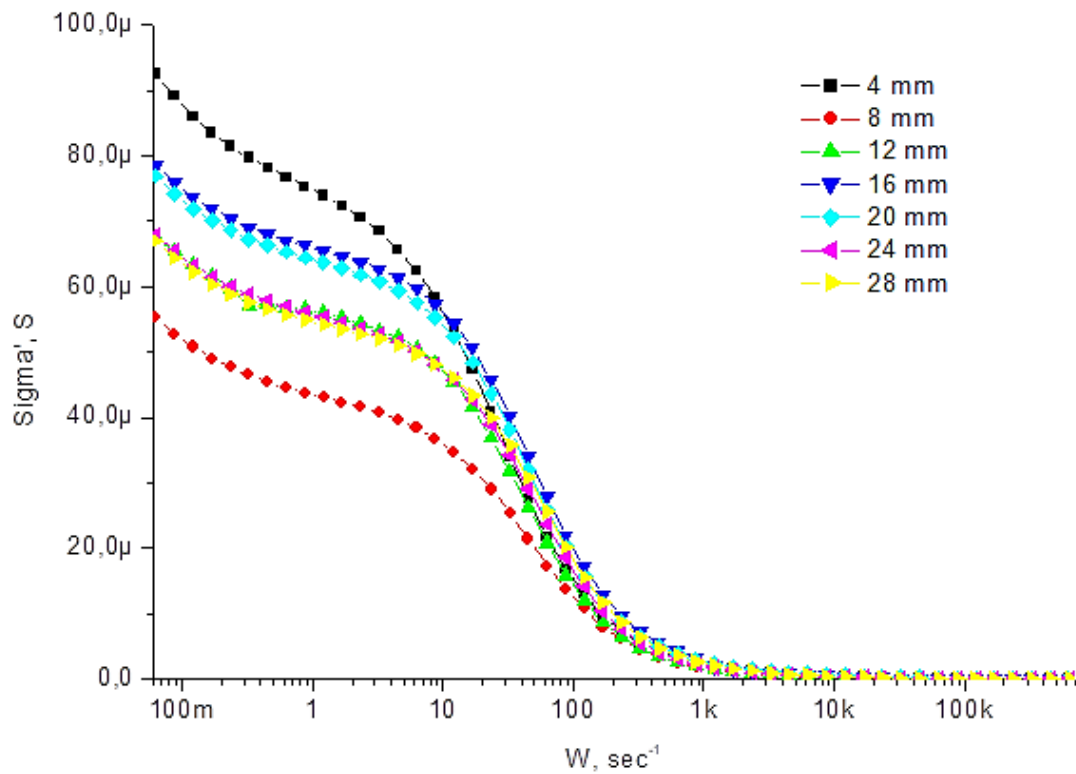


а)

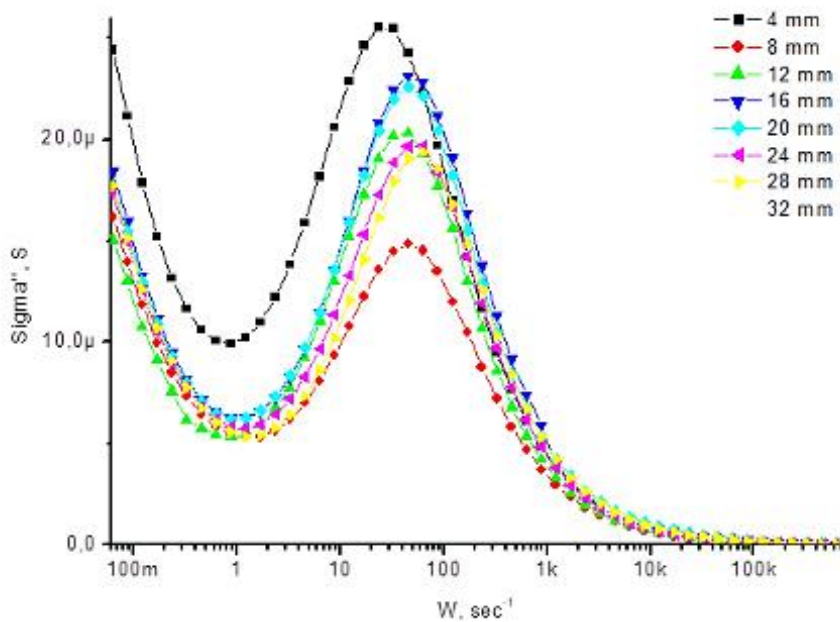


b)

Рис. 4. Вплив відстані між голковими електродами на зміни параметру CPE-T (a) та CPE-P (b) еквівалентної електричної схеми при діапазоні частот 0,01 Гц – 100 кГц



a)



б)
Рис. 5. Спектри залежності дійсної (а) та уявної частини (б) провідності зразків печінки на постійному струмі від відстані між електродами

Спектр залежності дійсної частини провідності демонструє зменшення параметру в зоні переходу із низьких частот до високих із відмінним первинним значенням параметру, яке не залежить від відстані між електродами (рис. 5а). Це може вказувати на вплив ділянки органу, де розміщувались електроди, зокрема, на локальне зменшення кількості рідини та носіїв заряду відповідно, наявність ділянок із колагеном або фіброзом, які володіють меншою провідністю, ніж звичайні тканини при меншій кількості диполів води [15].

Також показано поступове збільшення піку уявної частини провідності, проте без чіткої залежності від відстані між електродами (рис. 5б). Подібна зміна висоти піків на різних ділянках розміщення електродів може бути наслідком впливу окремих частот, як було показано у нашій роботі [13]. При повторній зйомці, через використання певної частоти, для прикладу, 100кГц, виникає більша діелектрична втрата, що сприяє збільшенню уявної частини провідності. Окрім цього, причинами може слугувати згадана відмінна композиція органу у різних його сегментах.

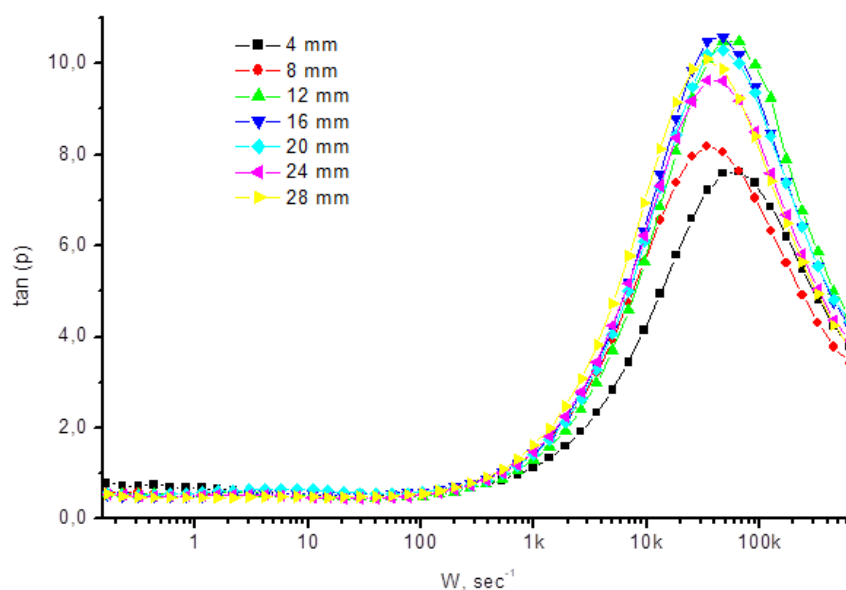


Рис. 6. Спектри залежності тангенсу кута втрат зразків печінки на постійному струмі від відстані між електродами

Спектр тангенсу кута діелектричних втрат демонструє збільшення піків у залежності від відстані між голковими електродами, проте без вираженої тенденції (рис. 6). Це підтверджує тенденцію до збільшення провідності при зміні розташування електродів, проте не прослідковується вираженої залежності від значення відстані між ними. Також це підтверджує можливість ІС розрізняти типи тканин на основі їх електричних властивостей. В силу використання органу без попередньої обробки, кількість ділянок із різним рівнем провідності, тканинного складу та кількості рідини є суттєвою, що дозволяє зробити висновок про достатню чутливість методу ІС до подібних змін.

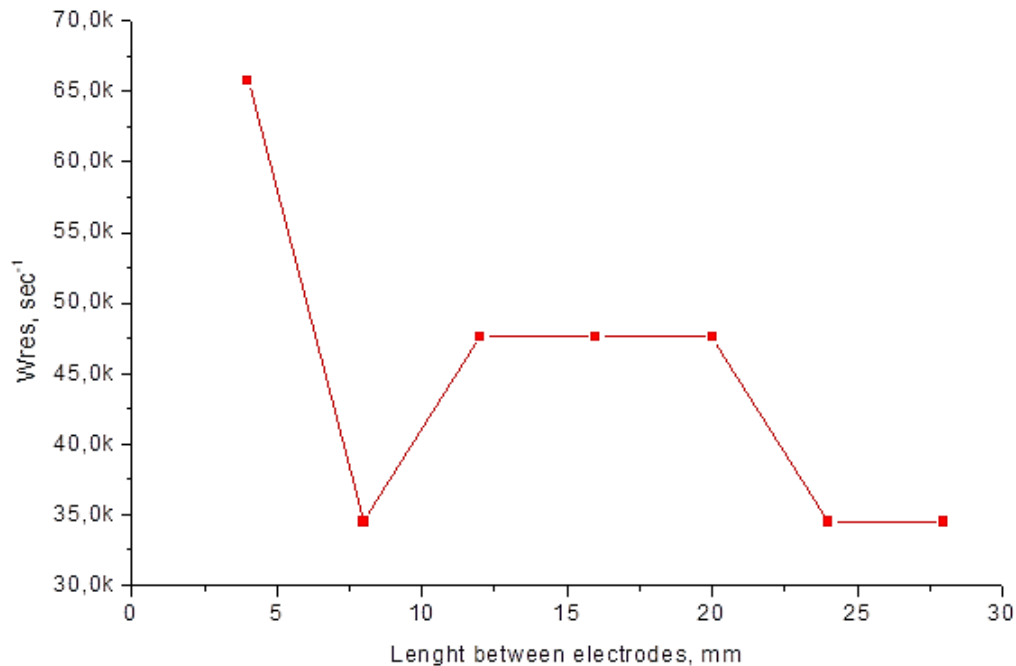


Рис. 7. Залежність резонансної частоти зразків печінки на постійному струмі від відстані між електродами.

Залежність резонансної частоти від частоти показує, що початкове її падіння дозволяє зробити припущення про ймовірно вищу концентрацію іонів у цій зоні або більшої кількості рідини (рис. 7). По мірі збільшення відстані між електродами зауважуємо різкий спад до відстані 8 см із наступним підйомом до 12 см, що вказує на зміну композиції тканини у цій ділянці. Подібна зміна спостерігається на відстані 24 см і далі, що також може говорити про наявність ділянок із меншою провідністю у зв'язку із попереднім фіброзом або певними патологічними змінами, попередньо не зауваженими.

Висновки. Дослідження параметрів діаграм Найквіста печінки із використанням проникаючих електродів, розміщених на різних відстанях, підтверджує придатність методу ІС для дослідження організації тканини та розрізнення ділянок на основі їх електричних властивостей, що дозволяє відстежувати також патологічні зони. Результати вказують на здатність подібного підходу виявляти окремі сегменти органу із зміненою тканинною композицією, що зумовлює виникнення провідності різного типу. Це може бути спричинено широким спектром причин, зокрема, патологічні зміни, різна кількість рідини, носіїв заряду та наявності утворень з низьким рівнем електропровідності.

Одним із основних індикаторів характеру провідності певної області тканини може слугувати резонансна частота визначена із частотної залежності тангенсу кута діелектричних втрат. На початкових стадіях вимірювання, при меншій відстані, частотна залежність ω_{res} має спадний характер. Другий етап змін супроводжується незначним зростанням та наступним спадом цієї величини. Така характеристика може, у перспективі, стати технологічно контрольованою величиною для створення методу швидкої та якісної характеристики композиції досліджуваної тканини.

Список посилань

1. Yu, T. H., Liu, J., & Zhou, Y. X. (2004). Using electrical impedance detection to evaluate the viability of biomaterials subject to freezing or thermal injury. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 378(7), 1793–1800. <https://doi.org/10.1007/s00216-004-2508-2>.
2. Murphy, E. K., Mahara, A., Khan, S., Hyams, E. S., Schned, A. R., Pettus, J., & Halter, R. J. (2017). Comparative study of separation between ex vivo prostatic malignant and benign tissue using electrical impedance spectroscopy and electrical impedance tomography. *Physiological measurement*, 38(6), 1242–1261. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/aa660e>.
3. Laufer, S., Ivorra, A., Reuter, V. E., Rubinsky, B., & Solomon, S. B. (2010). Electrical impedance characterization of normal and cancerous human hepatic tissue. *Physiological measurement*, 31(7), 995–1009. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/31/7/009>.
4. M. Aldobali and K. Pal, "Bioelectrical Impedance Analysis for Evaluation of Body Composition: A Review," 2021 *International Congress of Advanced Technology and Engineering (ICOTEN)*, Taiz, Yemen, 2021, pp. 1-10, doi: 10.1109/ICOTEN52080.2021.9493494.
5. Dean, D. A., Ramanathan, T., Machado, D., & Sundararajan, R. (2008). Electrical Impedance Spectroscopy Study of Biological Tissues. *Journal of electrostatics*, 66(3-4), 165–177. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2007.11.005>.
6. Kalvøy, H., Frich, L., Grimnes, S., Martinsen, O. G., Hol, P. K., & Stubhaug, A. (2009). Impedance-based tissue discrimination for needle guidance. *Physiological measurement*, 30(2), 129–140. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/30/2/002>.
7. Lozano-Nieto, A. (2022). Effects of Electrode Relocation on Bioelectrical Impedance Measurements on Potato Tissue. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 7(1), 1–5. <https://doi.org/10.24018/ejeng.2022.7.1.2697>.
8. Kinouchi, Y., Iritani, T., Morimoto, T., & Ohyama, S. (1997). Fast in vivo measurements of local tissue impedances using needle electrodes. *Medical & biological engineering & computing*, 35(5), 486–492. <https://doi.org/10.1007/BF02525528>.
9. Kalvøy, H., Tronstad, C., Nordbotten, B., Grimnes, S., & Martinsen, Ø. G. (2010). Electrical impedance of stainless steel needle electrodes. *Annals of biomedical engineering*, 38(7), 2371–2382. <https://doi.org/10.1007/s10439-010-9989-2>.
10. Cao, H., Tungjikusolmun, S., Choy, Y. B., Tsai, J. Z., Vorperian, V. R., & Webster, J. G. (2002). Using electrical impedance to predict catheter-endocardial contact during RF cardiac ablation. *IEEE transactions on bio-medical engineering*, 49(3), 247–253. <https://doi.org/10.1109/10.983459>.
11. Abasi, S., Aggas, J. R., Garayar-Leyva, G. G., Walther, B. K., & Guiseppi-Elie, A. (2022). Bioelectrical Impedance Spectroscopy for Monitoring Mammalian Cells and Tissues under Different Frequency Domains: A Review. *ACS measurement science au*, 2(6), 495–516. <https://doi.org/10.1021/acsmeasuresciau.2c00033>.
12. Taras Pryimak, Oksana Popadynets, Ivan Gasiuk, Taras Kotyk. (2021). Electrical impedance spectrum transformation of liver tissues under the influence of temperature. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 11(12), 1–11. <https://doi.org/10.9790/9622-1112010111>.
13. Pryimak, T., Chervinko, D., Voitkiv, H., & Hasyuk, I. (2024). Amplitude-Frequency Effect of Mixed Electric Field on Impedance Spectrum Parameters of Biological Tissue. *Physics and Chemistry of Solid State*, 25(2), 269–277. <https://doi.org/10.15330/pccs.25.2.269-277>.
14. Olekhovich, N.~M., Radyush, Y.~V., \& Pushkarev, A.~V.~ 2012, *Physics of the Solid State*, 54, 2236. doi:10.1134/S1063783412110248.
15. Ashoorirad, Masomeh & Saviz, Mehrdad & Fallah, Ali. (2019). On the electrical properties of collagen macromolecule solutions: Role of collagen-water interactions. *Journal of Molecular Liquids*. 300. 112344. 10.1016/j.molliq.2019.112344.

О.В. Гаврильченко, В.С. Шенбор

Національний університет «Львівська політехніка»

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНОГО КОНВЕЄРА ДЛЯ ЗАВАНТАЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ОБЛАДНАННЯ СИПКИМИ ПРОДУКТАМИ

В роботі розглядається вібраційний конвеєр з еліптичною траєкторією коливань транспортуючої поверхні для завантаження сипкими продуктами автоматизованого обладнання. Розроблена динамічна модель конвеєра з трьома робочими масами, яким задається різні швидкості транспортування.

Ключові слова: вібраційне транспортування, незалежне транспортування, вібраційні конвеєри, вібраційний привод, резонансне налагодження.

O.V. Gavrylchenko, V.S. Shenbor

JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF A VIBRATING CONVEYOR FOR LOADING AUTOMATED EQUIPMENT WITH BULK PRODUCTS

The paper considers a vibrating conveyor with an elliptical trajectory of vibrations of the conveying surface for loading automated equipment with bulk products. A dynamic model of the conveyor with three working masses, which are assigned different transportation speeds, is developed.

Keywords: vibration transportation, independent transportation, vibration conveyors, vibration drive, resonant tuning

Вступ. Вібраційні конвеєри широко застосовуються як транспортуючі засоби та завантажуючі пристрої у переробній та харчовій промисловостях. Значні достоїнства таких конвеєрів дозволяють ефективно застосовувати їх для вирішення технічних проблем обслуговування технологічного обладнання. У даній роботі досліджений вібраційний конвеєр, який успішно використаний для урівномірнення шару продукту за транспортування та завантаження вагових дозаторів пакувальних автоматів.

Постановка задачі. Особливістю пакувальних автоматів з ваговими дозаторами є те, що необхідно рівномірним шаром подавати продукт у заважувальний контейнер для запобігання його надмірних коливань, які підвищують похибку та тривалість зважування. Ефективним способом урівномірнення шару продукту за транспортування його від бункера до вагового дозатора є використання трьох вібраційних конвеєрів, у яких кожним наступним конвеєром забезпечується швидкість транспортування продукту у 1,2...1,6 рази більша від попереднього [1,2]. У таких випадках за направлених коливань несучого жолоба використовують три послідовно розташованих окремих конвеєрів з окремими трьома віброзбудниками. Враховуючи, що найбільшу швидкість транспортування забезпечують конвеєри з незалежними коливаннями за еліптичної траєкторії транспортування необхідно використати шість віброзбудників. Дана робота спрямована на розробку віброконвеєра з одним віброзбудником та трьома транспортуючими лотками, коливання яких забезпечується кінематичним збудженням.

Аналіз інформаційних джерел за тематикою досліджень. В теоретичних та експериментальних дослідження встановлено високу ефективність використання вібраційних конвеєрів для транспортування сипких продуктів [2,3,4], з використанням значних достоїнств вібраційного способу їх переміщення. Сфери використання вібраційних конвеєрів зростають – це потребує створення їх раціональних конструкцій, тобто, розроблення нових конструкцій на основі удосконалених коливних систем [5]. У ряді робіт розглянута можливість одержання еліптичних коливань коливними системами конвеєрів з кінематичним збудженням коливань транспортуючих жолобів [6,7].

Мета роботи. Розробити та дослідити модель нової запропонованої конструкції багатомасового конвеєра з трьома транспортуючими лотками та кінематичним збудженням коливань, призначеного для завантаження сипкими та гранульованими продуктами технологічного обладнання, наприклад – вагових дозаторів пакувальних автоматів.

Виклад основного матеріалу. У даній роботі запропоновано новий конвеєр [8], який працює лише від одного віброзбудника, в якого встановлені три несучі лотки з еліптичною траєкторією коливань.

На рис.1 наведено конструктивну схему такого конвеєра.

Перед дослідженням стояло задання дослідити роботу такого конвеєра з метою забезпечення зростання швидкості транспортування у кожного наступного лотка. Поставлене завдання можна

© О.В. Гаврильченко, В.С. Шенбор

вирішити шляхом незалежної зміни амплітуди поздовжніх коливань для кожного лотка (m_1 , m_2 , m_3), наприклад:

– налагодженням коефіцієнта динамічності кожної коливної системи мас m_1 , m_2 , m_3 , тобто підбором значенням мас або жорсткості пружного елемента за його різної ширини або довжини;

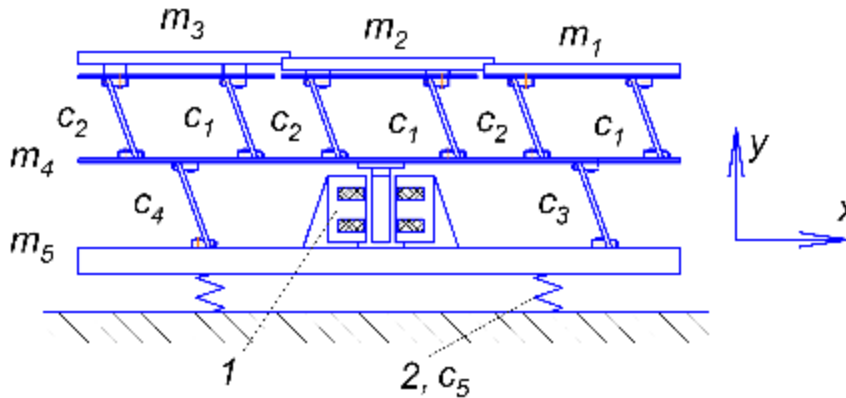


Рис.1. Конструктивна схема вібраційного конвеєра з трьома несучими лотками за еліптичною траєкторією коливань, де: m_1 , m_2 , m_3 – маси транспортуючих лотків, m_4 , m_5 – маса проміжна та маса основи, c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 – пружні елементи; а також – 1 – двотактний електромагнітний вібробудник, 2 – демпфери.

– відповідним підбором значення кута α рис.2 за незмінної маси та жорсткості пружних елементів;

– встановленням лотків мас m_1 , m_2 , m_3 кожного під іншим кутом ψ (рис.2) за однаковою або різною довжиною пружин у одній масі.

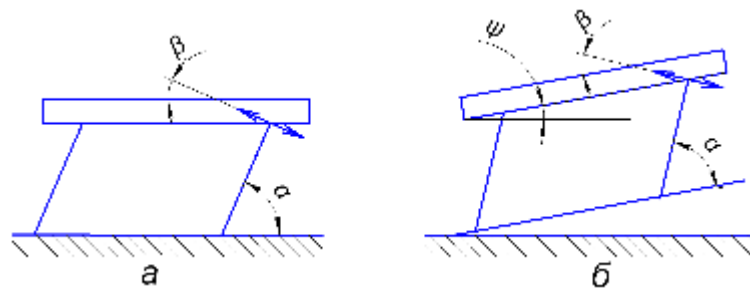


Рис.2. Кути, які визначають швидкість транспортування продукту вібраційним конвеєром

Були визначені степені вільності коливної системи зображеної на рис.1.

Визначимо степені вільності для кожної з мас:

m_1	m_2	m_3	m_4	m_5
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5, y_5

Вертикальні переміщення y_1 , y_2 , y_3 однозначно залежать від x_1 , x_2 , x_3 , x_4 , x_5 , y_4 , y_5 тому вони не є степенями вільності.

Враховуючи будову коливної системи (рис.1) визначимо переміщення верхніх кінців пружин y_1 , y_2 , y_3 враховуючи розподіл кутів розташування плоских пружин.

Вважаємо, що плоска пружина знаходиться під кутом α до горизонтальної площини, а кут, що рівний $90-\alpha$ являє собою кут вібрації β .

Швидкість транспортування сипких та гранульованих продуктів суттєво залежить від кута β і при розрахунках приймається дуже наближено в межах $\beta = 10 \dots 50^\circ$ та залежить від амплітуди коливань і параметра перевантаження [9].

Під час руху верхньої маси кут α змінює своє значення. Це обумовлено тим, що відбувається рух маси m_4 вздовж осі ступеня вільності x_4 , тим часом як нижня маса залишається нерухомою, а пружина жорстко защемленою.

Згідно рис.3

$$\frac{y_1 - y_4}{x_1 - x_4} = \operatorname{ctg}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = \operatorname{ctg}\alpha; y_1 = y_4 + (x_1 - x_4) \operatorname{ctg}\alpha$$

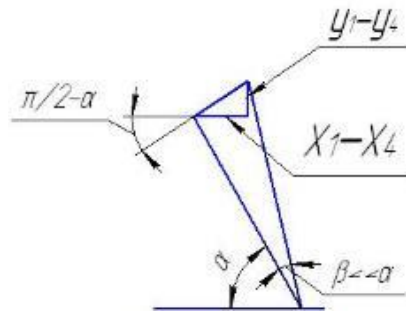


Рис. 3. Схема розподілу переміщень при роботі конвеєра

так само

$$y_2 = y_4 + (x_2 - x_4) \operatorname{ctg} \alpha; \quad y_3 = y_4 + (x_3 - x_4) \operatorname{ctg} \alpha.$$

Довжину пружного елемента незмінною і рівною L_0 , Тоді

$$\frac{x_4 - x_5}{L_0} = \cos \phi; \quad \phi = \arccos \frac{x_4 - x_5}{L_0};$$

$$(L_0 + y_4 - y_5)^2 + (x_4 - x_5)^2 = L_0^2; \quad y_4 - y_5 = L_0 \pm \sqrt{L_0^2 - (x_4 - x_5)^2}$$

Для спрощення приймемо $\sqrt{1 + \alpha} \approx 1 + \frac{\alpha}{2}$, тоді

$$y_4 = y_5 + \frac{(x_4 - x_5)^2}{2L_0}.$$

Запишемо вирази для значень вертикальних переміщень y_1, y_2, y_3, y_4 :

$$y_1 = y_4 + (x_1 - x_4) \operatorname{ctg} \alpha; \quad y_2 = y_4 + (x_2 - x_4) \operatorname{ctg} \alpha; \quad y_3 = y_4 + (x_3 - x_4) \operatorname{ctg} \alpha;$$

$$y_4 = y_5 - \frac{(x_4 - x_5)^2}{2L_0};$$

Виразимо y_1, y_2, y_3 через y_5 :

$$y_1 = y_5 - \frac{(x_4 - x_5)^2}{2L_0} + (x_1 - x_4) \operatorname{ctg} \alpha; \quad y_2 = y_5 - \frac{(x_4 - x_5)^2}{2L_0} + (x_2 - x_4) \operatorname{ctg} \alpha;$$

$$y_3 = y_5 - \frac{(x_4 - x_5)^2}{2L_0} + (x_3 - x_4) \operatorname{ctg} \alpha;$$

Одержане рівняння Лагранжа для першої координати:

$$m_1 \ddot{x}_1 + m_1 \operatorname{ctg} \alpha \left[\ddot{y}_5 - \frac{1}{L_0} \left((\dot{x}_4 - \dot{x}_5)^2 + (x_4 - x_5)(\ddot{x}_4 - \ddot{x}_5) \right) \right] + C_1 \left(y_1 - y_4 + \frac{(x_1 - x_4)^2}{2L_2} \right) \times \\ \times \left(\operatorname{ctg} \alpha + \frac{x_1 - x_4}{L_2} \right) + m_1 g \operatorname{ctg} \alpha = 0$$

для другої координати:

$$m_2 \ddot{x}_2 + m_2 \operatorname{ctg} \alpha \left[\ddot{y}_5 - \frac{1}{L_0} \left((\dot{x}_4 - \dot{x}_5)^2 + (x_4 - x_5)(\ddot{x}_4 - \ddot{x}_5) \right) \right] + C_2 \left(y_2 - y_4 + \frac{(x_2 - x_4)^2}{2L_2} \right) \times \\ \times \left(\operatorname{ctg} \alpha + \frac{x_2 - x_4}{L_2} \right) + m_2 g \operatorname{ctg} \alpha = 0$$

для третьої координати:

$$m_3\ddot{x}_3 + m_3\operatorname{ctg}\alpha \left[\ddot{y}_5 - \frac{1}{L_0} \left((\dot{x}_4 - \dot{x}_5)^2 + (x_4 - x_5)(\ddot{x}_4 - \ddot{x}_5) \right) \right] + C_3 \left(y_3 - y_4 + \frac{(x_3 - x_4)^2}{2L_2} \right) \times \\ \times \left(\operatorname{ctg}\alpha + \frac{x_3 - x_4}{L_2} \right) + m_3 g \operatorname{ctg}\alpha = 0$$

для четвертої координати:

$$m_4\ddot{x}_4 + \frac{\dot{x}_1 - \dot{x}_5}{L_0} (m_1\dot{y}_1 + m_2\dot{y}_2 + m_3\dot{y}_3) + \left(\frac{x_4 - x_5}{L_0} \operatorname{ctg}\alpha \right) (m_1\ddot{y}_1 + m_2\ddot{y}_2 + m_3\ddot{y}_3) - \\ - C_4 \left[(x_4 - x_5)^2 + (y_4 - y_5)^2 \right] \frac{x_4 - x_5}{\sqrt{(x_4 - x_5)^2 + (y_4 - y_5)^2}} + C_1 \Delta_1 \left(-\frac{x_1 - x_4}{L_2} \right) + \\ + C_2 \Delta_2 \left(-\frac{x_2 - x_4}{L_2} \right) + C_3 \Delta_3 \left(-\frac{x_3 - x_4}{L_2} \right) = P_0 \sin \omega t;$$

для п'ятої координати:

$$m_5\ddot{x}_5 + (m_1\ddot{y}_1 + m_2\ddot{y}_2 + m_3\ddot{y}_3) \frac{x_4 - x_5}{L_0} + (m_1\dot{y}_1 + m_2\dot{y}_2 + m_3\dot{y}_3) \frac{\dot{x}_4 - \dot{x}_5}{L_0} - \\ - C_5 \left(y_5 + \frac{x_5^2 + y_5^2}{2L_1} \right) \frac{x_5}{L_1} - C_4 (x_4 - x_5) = -P_0 \sin \omega;$$

Аналізуючи одержані рівняння можна відзначити, можливість використання багатомасових конвеєрів для транспортування виробів та продуктів з метою маніпулювання ними. Наприклад: як вказувалось, можна використати трьохмасовий конвеєр для завантаження вагових дозаторів, коли необхідно забезпечити рівномірне завантаження продуктом приймальний контейнер дозатора, для цього кожному наступному транспортуючому лотку надається швидкість транспортування продукту більша від попередньої.

Використовуючи одержані рівняння були побудовані графіки (рис.4) залежності амплітуди коливань жолоба для першої, другої та третьої мас (несучих жолобів конвеєра) за наступних умов:

- вимушуюче зусилля коливань $P_0=50$ Н,
- жорсткості плоских пружин $c_1=c_2=c_3=1 \cdot 10^4$ кг/м,
- частота коливань $f=25$ Гц,
- маси $m_1=1$ кг, $m_2=1.5$ кг, $m_3=3$ кг.

Розрахунок проводився в програмному забезпеченні MathCAD:

Для ілюстрації розглянемо випадок, за яким для забезпечення зростання амплітуди коливань транспортуючих лотків була збільшена маса у два рази у кожного наступного, $m_1=2$ кг, $m_2=4$ кг, $m_3=8$ кг.

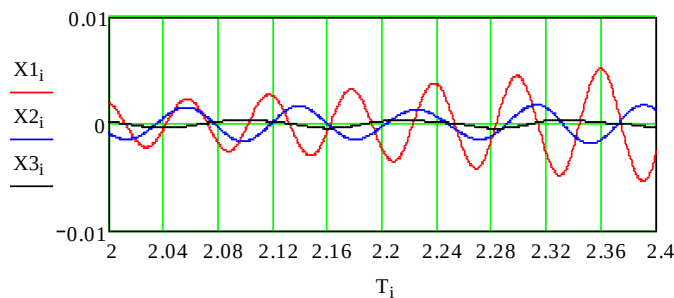


Рис.4. Графік залежностей переміщення мас жолобів масами m_1 , m_2 , m_3 від періоду коливань T_1 .

Висновки. Отже використовуючи багатомасовий конвеєр з трьома транспортуючими лотками, які одержують кінематичне збурення коливань від двомасної коливної системи з одним віброзбудником можна забезпечити зростаючу швидкість транспортування продукту у кожному наступному лотку і забезпечити урівномірнення шару продукту перед завантаженням технологічного обладнання, наприклад – вагового дозатора.

Даний принцип можна використовувати і для конструкцій з більшою кількістю транспортуючих мас, налаштовуючи кожен з яких на необхідну амплітуду, таким чином, регулюючи швидкість переміщення продуктів конвеєром на різних його ділянках. Це необхідно для того, щоб забезпечити здійснення операцій, які виконуються під час переміщення продукту та потребують певний час при неперервному русі продукту вібраційним конвеєром, а також, зменшити число одиниць обладнання, заміною декількох конвеєрів одним. Розглянута конструкція дозволить значно спростити процес завантаження автоматизованого обладнання, знизити потужність приводу та вартість транспортуючих засобів.

Надалі, необхідно провести дослідження залежності швидкості транспортування продуктів від параметрів коливань транспортуючих лотків, з метою забезпечення різних умов переміщення продуктів на багатомасовому конвеєрі з одним віброзбудником

Список літератури.

1. Гавва, О. М. Пакувальне обладнання в 3 кн. Кн. 1. Обладнання для пакування продукції в споживчу тару / О. М. Гавва, А. П. Беспалько, А. І. Волчко. - К. : "Упаковка", 2008. – 436 .
2. Кодра Ю. В., Стоцько З. А., Гаврильченко О. В. Завантажувальні пристрої технологічних машин. Розрахунок і конструювання : Навч.. пос. – Львів: „Бескид Біт”, 2008. – С.356.
3. Гавва О. М., Деренівська А. В., Кривопляс-Володіна Л.О., Забезпечення заданої інтенсивності переміщення сипких продуктів із бункера в лінійних вагових дозаторах, Вібрації в техніці та технологіях № 4 (68) 2012.-С.103-108.
4. Шоловій Ю. П. Особливості вібраційного транспортування дрібно-дисперсної сипкої продукції / Ю. П. Шоловій, Н. І. Магерус // Упаковка. – 2014. – №1. – С. 55 – 58.
5. А.А. Свиридов, Н.А. Усенко, Новая конструкция многомассного лоткового вибрационного грузочного устройства и его динамическая модель, Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. Вып. 12. Ч. 2., С. 226-231.
6. Бочарова Е.С., Усенко Н.А. Динамическая модель вибрационного грузочного устройства с синхронным приводом с эллиптическими колебаниями бункера // Вибрационные технологии, мехатроника и управляемые машины: сб. науч. ст.: в 2-х ч. / редкол.: С.Ф. Яцун (отв. ред.) [и др.]; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2014. Ч. 1. С. 60-63.
7. Системы автоматической загрузки штучных предметов обработки в технологические машины – автоматы: учеб. пособие / Н.А. Усенко [и др.]: под науч. ред. В.В. Прейса. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013.- С.310 с.
8. Вібраційний конвеєр: пат.132952 Україна/ Гаврильченко Олександр Віталійович (UA); Ланець Олексій Степанович (UA); Жигайло Василь Іванович (UA): МПК В65G 27/00; заявл. 01.06.1918; опубл.25.03.2019, Бюл. № 6/2019.
9. Повідайло В.О. Вібраційні процеси та обладнання – Львів: Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2004.-С.248.

Рецензент: Гурський Володимир Миколайович, професор, д.т.н., Львівська політехніка.

К.С. Шевчук^{1,2}, В.Ю. Науменко¹, О.В. Дерев'янка¹, О.Б. Згалат-Лозинський¹

¹ Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України

² Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИГОТОВЛЕННЯ ФІЛАМЕНТІВ ДЛЯ 3D-ДРУКУ З ABS ПЛАСТИКУ ЗМІЦНЕНОГО БАЗАЛЬТОВИМИ ВОЛОКНАМИ

У даній статті розглянуто процес виготовлення філаменту для 3D-друку з ABS пластику, зміцненого базальтовими волокнами. Проведено екструзію ABS з 10мас.% базальтових волокон, що дозволило отримати композитний матеріал для технології FDM друку. Аналіз показав рівномірний розподіл волокон у матриці. Виявлено проблеми, пов'язані з крихкістю філаменту та його поганою адгезією до платформи під час друку. Оптимізовано параметри 3D-принтера для друку виробів складної форми.

Ключові слова: 3D друк, базальт, композит, ABS пластик.

K.S. Shevchuk, V.Yu. Naumenko, O.V. Derevyanko, O.B. Zgalat-Lozinsky

MANUFACTURE OF FILAMENTS FOR 3D PRINTING FROM ABS PLASTIC REINFORCED WITH BASALT FIBERS

This article discusses the process of manufacturing filament for 3D printing from ABS plastic reinforced with basalt fibers. ABS was extruded from 10wt.% basalt fibers, which made it possible to obtain a composite material for FDM printing technology. The analysis showed a uniform distribution of fibers in the matrix. Problems related to the fragility of the filament and its poor adhesion to the platform during printing have been identified. The parameters of the 3D printer for printing complex shape parts were optimized.

Keywords: 3D printing, basalt, composite, ABS plastic.

Вступ

3D-друк – це сучасна технологія, яка відкриває нові можливості в різних галузях, від промисловості до медицини. В основі процесу лежить поступове нашарування матеріалів, що дозволяє створювати тривимірні вироби з високою точністю [1-3]. Адитивні технології використовуються для виготовлення прототипів, деталей механізмів, індивідуальних виробів і навіть складних біологічних структур. Однак якість і функціональність надрукованих виробів значною мірою залежать від матеріалів, які використовуються в процесі, а також технології 3D друку [4, 5]. За основу для цього дослідження було обрано 3D-друк за допомогою технології моделювання методом наплавлення шарів (fused deposit modelling – FDM), де для друку використовується пластиковий філамент.

Існує широкий спектр матеріалів для 3D-друку методом FDM, зокрема різні види пластиків: ABS, PLA, PP та інші. Проте кожен із них має свої обмеження, такі як міцність, стійкість до зовнішніх впливів і екологічні проблеми. Це ставить перед дослідниками завдання пошуку нових рішень для підвищення фізико-механічних та інших властивостей використовуваних полімерних матеріалів. Одним із таких рішень є армування пластиків, що підвищує їхню міцність та довговічність [6-8].

Найбільш популярним матеріалом для армування є волокна, включаючи скловолокно, вуглеводні волокна та базальтові волокна [9]. Включення базальтових волокон у термопластики значно підвищує механічні властивості 3D-друкованих матеріалів, таких як міцність і жорсткість [10]. Це особливо важливо для конструкцій, де важливі механічні навантаження. Наприклад автори роботи [11] вказують на те що використання базальтових волокон як внутрішньої арматури в бетоні покращує його механічні властивості.

Також суміші базальту з ABS або PLA успішно використовуються для створення міцних композитних матеріалів [12, 13]. Термопластичні композити, зміцнені базальтовим волокном, пропонують економічну альтернативу композитам на основі вуглецевого волокна. Важливо підкреслити, що виробництво базальтового волокна є дешевшим порівняно з S-скловолокном, що робить його вигідною заміною для S-скловолокна [14].

У роботі [15] представлено дослідження впливу додавання базальтових волокон на механічні властивості переробленого поліпропілену. Міцність на розрив переробленого поліпропілену (ПП) була виміряна як 31,8 МПа. Додавання 2% мас. базальтового волокна до ПП призвело до підвищення міцності на розрив на 11,65%.

Базальтові волокна, як наповнювачі для матриці із ПП, позитивно впливають на модуль Юнга та термічну стабільність, зазначається у роботі [16]. А у роботі [17] вказано що 5 мас. % базальтових волокон у ПП та ПА12, виготовлених за допомогою 3D-друку методом FDM, підвищують показники жорсткості, в порівнянні із литтям під тиском.

Автори роботи [18] порівнювали механічні характеристики пластику армованого базальтовими волокнами та скловолокном. Насправді базальтовий композит продемонстрував на 35–42% вищий модуль Юнга, а також кращу міцність на стиск і вигин.

Ідея заповнити цими волокнами полімерну матрицю є відносно недавньою і може запропонувати дуже цікаві перспективи, які ще недостатньо досліджені. Більшість авторів працюють з ПЛА або ПП пластиками [15 - 17], а пластики високої міцності типу ABS ще не досліджені в достатній мірі. З викладеного вище можна зробити висновок про актуальність дослідження впливу армування пластику ABS базальтовими волокнами на механічні властивості, але перш ніж перейти до дослідження фізико-механічних та інших властивостей композиту, для чого необхідно отримати якісний матеріал/філамент на основі полімеру армованого базальтовими волокнами.

Мета роботи

В представленій роботі досліджували умови введення базальтового волокна (10 мас.%) в полімерну матрицю на основі ABS пластику та його екструзію для отримання філаменту для 3D друку методом FDM.

Матеріали та методи

Максимально текучий пластик ABS корейської марки LG у формі гранул циліндричної форми діаметром 3 мм зміцнювали базальтовим волокном у кількості 10 мас. %. Змішування проводили на планетарному млині SAND1 при швидкості 250 об/хв впродовж 1.5 год.

Філамент для 3D-друку отримували за допомогою Exo extruder (Україна) (рис. 1). Екструзію полімер-базальтового композиту проводили за температури 260 °C з діаметром сопла 1,5 мм. Отриманий матеріал виходив занадто крихким, що унеможливило автоматичне намотування його на стандартну катушку, тому філамент після охолодження намотували вручну.



Рис. 1. Exo extruder

Результати дослідження

Отриманий методом екструзування полімер-базальтовий композит представлено на рис. 2. Діаметр філаменту змінювався в межах 1.55-1.75 мм. Аналіз зламу філаменту показав, що базальтові волокна розподілені рівномірно в полімерній матриці (рис. 2 б).

Із отриманого філаменту на 3D принтері MALYAN Desktop 3D Printer (рис. 3) за температури столу в 100°C і сопла 235°C була надрукована шестерня (рис. 4, 5). Коефіцієнт екструзії було

встановлено на рівні 1.15, оскільки отриманий матеріал пористий, і для суцільної заливки моделі за тієї ж швидкості друку потрібно більше матеріалу продавлювати через сопло.



а



б

Рис. 2. Філамент після першого екструдювання на echo extruder: а – загальний вид (x14), б – злам полімер-базальтового композиту (x28)

Зважаючи на високий ступінь заповнення ABS філаменту базальтовим волокном під час 3D-друку виникло ряд проблем, в першу чергу з відшаруванням під час друку композитного матеріалу від столу 3D принтера. За допомогою зміни налаштувань принтера та визначення оптимальних параметрів друку (коригування відстані між столом та соплом, температури столу, швидкості друку, та коефіцієнту екструзії) було досягнуто максимальної відповідності надрукованого виробу заданій моделі.

Наша подальша робота буде зосереджена на пошуку оптимального вмісту базальтового волокна в пластику ABS для досягнення балансу між технологічними параметрами філаменту (пластичність для можливості автоматичного намотування на стандартну катушку, мінімальне відхилення діаметру) та фізико-механічними властивостями надрукованих виробів.

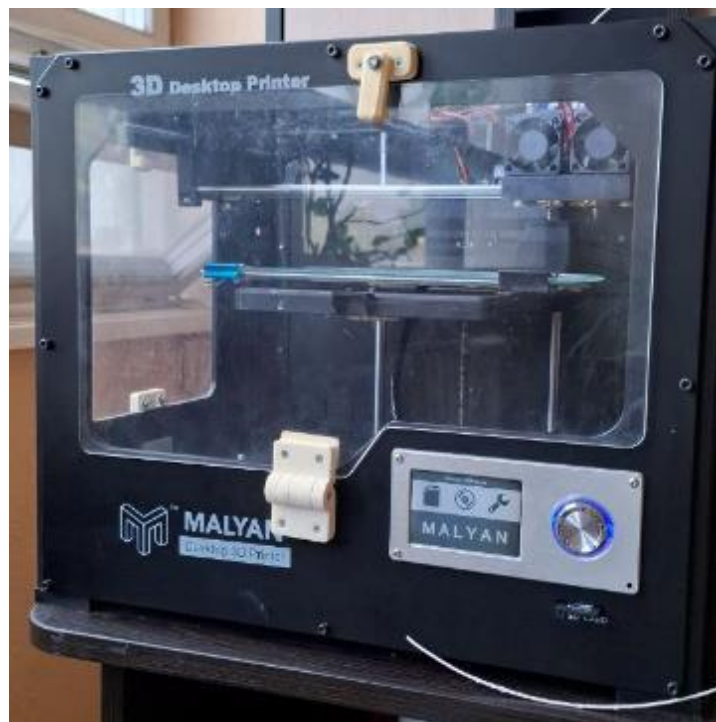


Рис. 3. 3D принтер MALYAN Desktop 3D Printer



Рис. 4. Процес друку шестерні на 3Д принтері MALYAN Desktop 3D Printer



Рис. 5. Шестерня надрукована на 3Д принтері MALYAN Desktop 3D Printer

Висновки

Було проведено дослідження умов отримання філаменту методом екструзії для 3Д друку за технологією FDM на основі пластику ABS з додаванням 10 мас. % базальтових волокон. В результаті отримано композиційний матеріал із рівномірно розподіленими базальтовими волокнами. З отриманого композиційного матеріалу було надруковано шестерню, розміри якої відповідали заданій цифровій моделі.

Список використаних джерел інформації

1. Shen, H.T. Interaction of Ice Covers with River Channels and Bridges // Journal of Fluids Engineering. – 1981. – Vol. 103, No. 3. – P. 365–368. DOI: [10.1115/1.2900701] (<https://doi.org/10.1115/1.2900701>).
2. Zgalat-Lozynskyy, O.B. Materials and Techniques for 3D Printing in Ukraine (Overview). Powder Metall Met Ceram 61, 398–413 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11106-023-00327-y>
3. Згалат-Лозинський, О. Б. (2024). Сучасні технології 3D-друку, мікрохвильової обробки та іскро-плазмового спікання для виготовлення виробів із композиційних матеріалів на основі тугоплавких сполук: За матеріалами доповіді на засіданні Президії НАН України 6 березня 2024 року. Вісник Національної академії наук України, (5), 91–98. <https://doi.org/10.15407/visn2024.05.092>
4. Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. – Springer, 2015. – 498 p.

5. O. Tolochyna, N. Zgalat-Lozynska, Y. Podrezov, D. Verbylo, O. Tolochyn, O. Zgalat-Lozynskyy, The role of flexible polymer composite materials properties in energy absorption of three-dimensional auxetic lattice structures, *Materials Today Communications*, Vol. 37, 2023, 107370, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107370>.
6. Xu, D., Li, Y., et al. Mechanical and Morphological Properties of Polymers // *Polymer Testing*. – 2022. – Vol. 107. – Article 107545. DOI: [10.1016/j.polymertesting.2022.107545] (<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107545>).
7. Zgalat-Lozynskyy, O.B., Matviichuk, O.O., Litvyn, R.V. et al. Microwave Sintering of 3D Printed Composites from Polymers Reinforced with Titanium Nitride Particles. *Powder Metall Met Ceram* 62, 164–173 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11106-023-00380-7>
8. Zgalat-Lozynskyy, O., Matviichuk, O., Tolochyn, O. et al. Polymer Materials Reinforced with Silicon Nitride Particles for 3D Printing. *Powder Metall Met Ceram* 59, 515–527 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11106-021-00189-2>
9. MDPI. Special Issue on Fiber Reinforced Polymer Concrete: Analysis, Modeling, and Application // *Polymers* [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.mdpi.com/journal/polymers/special_issues/Fiber_Reinforced_Polymer_Concrete_Analysis] (https://www.mdpi.com/journal/polymers/special_issues/Fiber_Reinforced_Polymer_Concrete_Analysis)
10. Davis, L.C. Fiber Reinforcement in Thermoplastics // *Comprehensive Composite Materials*. – 2000. – Vol. 2. – P. 489–510. DOI: [10.1016/B978-0-443-13623-8.00012-5] (<https://doi.org/10.1016/B978-0-443-13623-8.00012-5>).
11. Feng, P., et al. Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Concrete // *Cement and Concrete Composites*. – 2019. – Vol. 97. – P. 106–115. DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2018.11.015] (<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.11.015>).
12. Research on Basalt Fiber-Reinforced ABS Thermoplastic Composite in Space // *3D Print* [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу: [<https://3dprint.com/254829/basalt-fiber-reinforced-abs-researchers-develop-thermoplastic-composite-in-space>] (<https://3dprint.com/254829/basalt-fiber-reinforced-abs-researchers-develop-thermoplastic-composite-in-space>).
13. MDPI. Mechanical Behavior of Reinforced Polymers // *Polymers*. – 2023. – Vol. 16, No. 6. – Article 831. DOI: [<https://www.mdpi.com/2073-4360/16/6/831>] (<https://www.mdpi.com/2073-4360/16/6/831>).
14. International Journal of Textile Science. Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Textiles // *International Journal of Textile Science*. – 2012. – Vol. 1, No. 4. – P. 19–28. DOI: [10.5923/j.textile.20120104.02] (<https://doi.org/10.5923/j.textile.20120104.02>).
15. Smith, A. et al. Advanced Materials and Their Applications // *Materials Letters*. – 2022. – Vol. 323. – Article 132942. DOI: [10.1016/j.matlet.2022.132942] (<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132942>).
16. Anderson, P., et al. Polymer Composites and Their Industrial Applications // *Polymer Composites*. – 2023. – Vol. 44, No. 3. – P. 567–578. DOI: [10.1002/pc.28641] (<https://doi.org/10.1002/pc.28641>).
17. Johnson, R., et al. Applications of Smart Materials in Engineering // *Journal of Composites Science*. – 2023. – Vol. 7, No. 9. – Article 367. DOI: [10.3390/jcs7090367] (<https://doi.org/10.3390/jcs7090367>).
18. Miller, S. et al. Behavior of Polymer Concrete // *Composites Part B*. – 2011. – Vol. 42, No. 4. – P. 778–789. DOI: [10.1016/j.compositesb.2011.01.030] (<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.030>).

О.В. Гаврильченко, В.С. Шенбор

Національний університет «Львівська політехніка»

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНОГО КОНВЕЄРА З НЕЗАЛЕЖНИМИ КОЛИВАННЯМИ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВИРОБІВ ТА МАТЕРІАЛІВ

В роботі розглядається вібраційний конвеєр з незалежними нормальними та поздовжніми коливаннями транспортуючого лотка, наведені розрахунки пружної системи, які забезпечують стабільну роботу конвеєра та високу швидкість транспортування, а також результати експериментальних досліджень залежності швидкості транспортування виробів з різних матеріалів від параметрів незалежних коливань.

Ключові слова: вібраційне транспортування, незалежне транспортування, вібраційні конвеєри, вібраційний привод, резонансне налагодження.

O.V. Gavrylchenko, V.S. Shenbor

JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF A VIBRATING CONVEYOR WITH INDEPENDENT OSCILLATIONS FOR THE TRANSPORTATION OF PRODUCTS AND MATERIALS

The paper considers a vibrating conveyor with independent normal and longitudinal vibrations of the conveying tray, provides calculations of the elastic system, which ensure stable operation of the conveyor and high transportation speed, as well as the results of experimental studies of the dependence of the transportation speed of products made of different materials on the parameters of independent vibrations.

Keywords: vibration transportation, independent transportation, vibration conveyors, vibration drive, resonant tuning

Вступ. Вібраційні конвеєри призначені для автоматизації переміщень між одиницями технологічного обладнання та між робочими позиціями і застосовуються в транспортних, транспортно-орієнтованих та транспортно-маніпулюючих системах для подачі, розподілення деталей та виробів та їх обліку, а також для завантаження дозуючого та пакувального обладнання сипкими матеріалами. Особливо ефективно застосування вібраційних конвеєрів з незалежними поздовжніми та нормальними коливаннями, які забезпечуються електромагнітними віброзбудниками, в яких можна дистанційно регулювати амплітуди вертикальних та горизонтальних коливань, здійснювати регулювання швидкості та зміну напрямку транспортування шляхом налагодження параметрів еліптичної траєкторії коливань робочої та реактивної маси. Еліптичні коливання реалізують ефективні безвідривні режими транспортування виробів у порівнянні з направленими коливаннями. Такі конвеєри характеризуються компактністю, малою споживаною потужністю, ефективною віброізоляцією та надійністю.

Постановка задачі. Перед дослідженнями було поставлене завдання обґрунтувати параметри конструкції та режиму роботи вібраційного конвеєра виконаного за двомасовою коливальною схемою.

Робоча і реактивна маси сконструйовані таким чином, що їх центри мас і центри жорсткості співпадають, що забезпечує відсутність додаткових “паразитних” кутових коливань.

Аналіз інформаційних джерел за тематикою досліджень. В роботах [1,2,3,4] наведено принципи розрахунку вібраційних конвеєрів різноманітної конструкції, які дозволили розробити методику розрахунку та проектування конвеєра розглянутого у даній роботі, особливістю даного конвеєра є стабільність незалежних коливань і відповідно швидкості транспортування виробів.

Пружну систему вібраційного конвеєра розраховують на жорсткість і міцність, що забезпечує стабільну роботу в білярезонансному режимі та довговічність його роботи.

Мета роботи. Необхідно розробити методику проектування даного типу конвеєрів з умов забезпечення заданої швидкості транспортування та її стабільності. Створити методику розрахунку комбінованої металогумової пружної системи конвеєра. Провести експериментальні дослідження.

Основні результати дослідження. Робоча маса розробленого конвеєра складається з транспортуючого лотка 1, двох якорів 2, електромагнітного віброзбудника горизонтальних коливань і якоря 3 віброзбудника вертикальних коливань, двох кронштейнів 4 для кріплення пружних елементів (гранчастих пружин), які утворюють в сумі жорстку раму. Реактивна маса складається з електромагнітного віброзбудника 5 приводів горизонтальних і вертикальних коливань, в якому розміщені дві котушки поздовжніх та одна вертикальних коливань і корпусу реактивної маси 6 з кронштейнами для кріплення пружин, які жорстко з’єднані між собою.

Робоча та реактивна маси зв'язані комбіновано пружною системою: двома гранчастими металевими пружинами 7 і чотирма парами гумових пружних блоків 8 та 9.

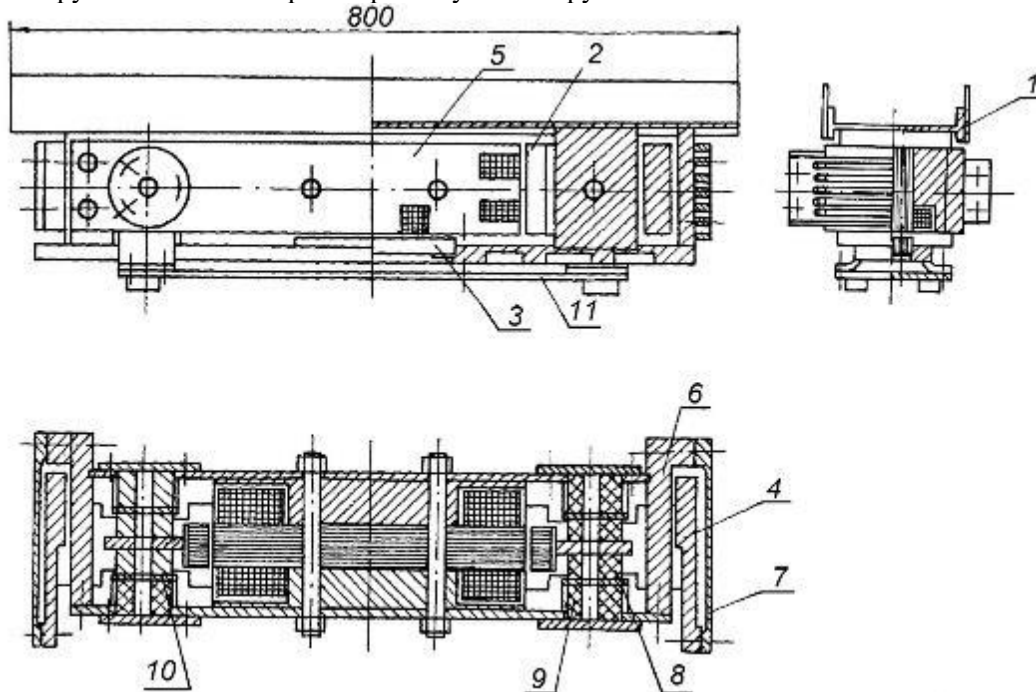


Рис.1. Конструктивна схема конвеєра з незалежними коливаннями

Стійки 10 встановлені в нейтральних площинах гумових блоків, які утворюються в результаті антифазних коливань зв'язаних з ними елементів 8 і 9, закріплені до основи 11, що забезпечує надійну віброізоляцію конструкції. Оскільки пружна система транспортера є комбінованою, то її сумарна горизонтальна жорсткість складається з жорсткості металевих і гумових пружних елементів.

$$C_K = C_M + C_G. \quad (1)$$

Відомо [4], що жорсткість металевої пружини, защемленої на кінцях, рівна

$$C_1 = \frac{12E \cdot I_1 \cdot k_3}{l^3}, \text{ Н/м} \quad (2)$$

де E - модуль пружності матеріалу пружин (для пружинних сталей рівний $2,1 \cdot 10^5$ МПа); I_1 - момент інерції перерізу ґратки пружини, для прямокутного перерізу рівний

$$I_1 = \frac{a^3 \cdot b}{12}, \text{ м}^4 \quad (3)$$

де a - робоча товщина пружини в м; b - ширина ґратки пружини в м; k_3 - коефіцієнт защемлення, який характеризує різницю між дійсним і теоретичним (абсолютно жорстким) защемленням ($k_3 = 0.75 \dots 0.9$) [1]; l - робоча незащемлена довжина пружини в м.

Оскільки конвеєр має дві ґратчасті пружини (рис.2), кожна з яких складаються з i пружин (ґраток) розмірами $a \times b$ і враховуючи (3) отримаємо

$$C_M = \frac{12 \cdot E \cdot I_1 \cdot k_3}{l^3} \cdot 2 \cdot i = \frac{2 \cdot E \cdot a^3 \cdot b \cdot i \cdot k_3}{l^3} \quad (4)$$

Жорсткість гумового блоку (рис.3) визначають за формулою (5) [2].

$$C_G = \frac{G_s \cdot S}{h} \quad (5)$$

де G_s - модуль зсуву (для еластичної гуми твердістю по Шору 30 [2]: $G_s = 0,28$ МПа); S - площа перерізу гумової втулки в м²; h - товщина блоку в м ($h = h_1 + h_2$).

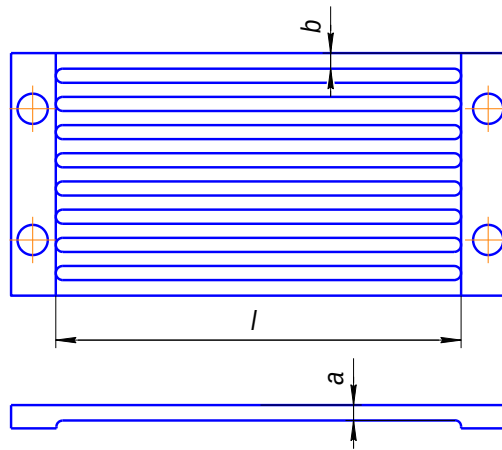


Рис.2. Гратчаста пружина конвеєра

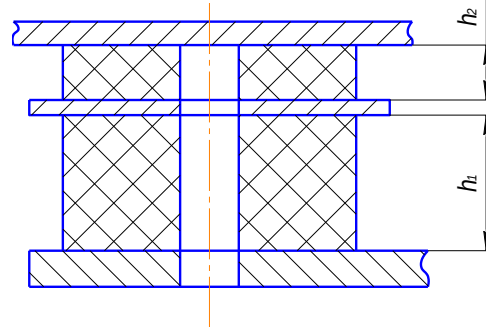


Рис.3. Гумовий блок

Оскільки конвеєр оснащений чотирма гумовими блоками, то

$$C_r = \frac{4G_s \cdot S}{h}$$

а сумарна жорсткість пружної системи лотка-транспортера

$$C_k = \frac{2 \cdot E \cdot a^3 \cdot b \cdot i \cdot k_3}{l^3} + \frac{4G_s \cdot S}{h} \quad (6)$$

З теорії коливань відомо, що горизонтальна жорсткість пружної системи рівна

$$C_k = 4 \cdot \pi^2 \cdot \nu_{гор}^2 \cdot M_{np} \quad (7)$$

де $\nu_{гор}$ - власна частота горизонтальних коливань конвеєра в Гц;

$M_{np} = m_1 \cdot m_2 / (m_1 + m_2)$ - приведена маса конвеєра, а m_1 і m_2 - відповідно робоча і реактивна маси конвеєра. Прирівнявши (6) і (7) і враховуючи, що

$$b = a \cdot \frac{\nu_{ов}}{\nu_{гор}} \quad (8)$$

де $\nu_{ов}$ - власна частота вертикальних коливань конвеєра в Гц,

отримаємо формулу для розрахунку товщини пружини.

$$a = \sqrt[4]{\frac{2 \cdot \nu_{гор} \cdot l^3 \cdot (2\pi^2 \cdot \nu_{гор} \cdot M_{np} \cdot h - G_s \cdot S)}{E \cdot \nu_{ов} \cdot i \cdot h \cdot k_3}} \quad (9)$$

Власні частоти $\nu_{гор}$ і $\nu_{ов}$ приймають, виходячи з умови, що пружна система повинна забезпечити оптимальні резонансні налаштування $= \Omega / \Omega_{гор}$ горизонтальних і $z_6 = \Omega / \Omega_{ов}$ вертикальних коливань, де $\Omega = 2\pi\nu$ - кутова частота вимушуючих коливань в Гц; ν - частота вимушуючих коливань ($\nu = 50$ Гц); $\Omega_{гор} = 2\pi\nu_{гор}$ - кутова частота власних горизонтальних коливань в Гц; $\Omega_{ов} = 2\pi\nu_{ов}$ - кутова частота власних вертикальних коливань в Гц.

Оптимальне резонансне налаштування горизонтальних коливань повинне забезпечувати досягнення стабільних амплітуд горизонтальних коливань за мінімальних змушуючих зусиль горизонтальних віброзбудників і приймається в межах $z_{гор} = 0,94 \dots 0,96$. Оптимальне резонансне налаштування вертикальних коливань повинне забезпечувати незмінність вертикальних коливань

робочого органу при зміні маси завантаження (транспортування) в широких межах. Резонансне налаштування, яке забезпечує самостабілізацію вертикальних коливань, визначається залежністю (10) [3],

$$z_e = \sqrt{\frac{\lambda}{1 + \lambda}} \quad (10)$$

де $\lambda = m_1/m_2$.

За відсутності необхідності забезпечення самостабілізації вертикальних коливань приймають $z_e = 0,85 \dots 0,9$.

Довговічність пружної металевої системи забезпечується за умови [3,4]

$$\sigma_{\max} = \frac{3 \cdot E \cdot y \cdot a}{l^2} \leq [\sigma_{-1}] \quad (11)$$

де $\sigma_{\max}$ - максимальне напруження, яке виникає в пружних металевих елементах в МПа;

$y = 0,8 A_0 = 0,8(A_{01} + A_{02})$ в м - прогин пружини,

де A_0 - відносний розмах коливань, рівний сумі розмахів коливань робочої A_{01} і реактивної A_{02} мас:

$$A_0 = A_{01} + A_{02};$$

$[\sigma_{-1}]$ - допустиме напруження при симетричному навантаженні в МПа (для сталі 65Г $[\sigma_{-1}] = 200 \text{ МПа}$, для сталі 60 С2 $[\sigma_{-1}] = 300 \text{ МПа}$).

При невиконанні умови (11) необхідно збільшити довжину пружини l і відповідно перерахувати її товщину a .

Віброконвеєр приводиться у рух двома електромагнітними віброзбудниками 2, 3 (рис.1). Віброзбудник горизонтальних коливань під'єднаний до мережі за двотактною схемою через два взаємно обернених діодів. Віброзбудник вертикальних коливань за однократною схемою через діод.

Граткові металеві пружини і гумові пружні елементи дозволяють реалізувати незалежні горизонтальні та вертикальні коливання. При одночасному ввімкненні горизонтальних і вертикального віброзбудників зі зсувом фаз між ними $\varphi = 60^\circ$ (забезпечується трифазною мережею змінного струму напругою 380 В) маси здійснюють коливання за еліптичною траєкторією, забезпечуючи ефективне безвідривне транспортування виробів.

Безвідривне вібропереміщення забезпечується при параметрі перевантаження $W \leq 1$, що забезпечується при вертикальній складовій амплітуди коливань $A_e \leq 0,1 \text{ мм}$ при частоті 50 Гц. Транспорт дозволяє реверс транспортування при зміні кута зсуву фаз на 180° .

Безвідривне вібропереміщення відбувається коли параметр перевантаження $w \leq 1$ [3], що забезпечується при $A_e \leq 0,1 \text{ мм}$ і частоті 50 Гц. Зміна зсуву фаз коливань на 180° забезпечує реверсування руху матеріалів і деталей.

Залежності швидкості транспортування від зсуву фаз між горизонтальними та вертикальними складовими коливань наведені на рис.4.

В даних експериментах досліджується залежність швидкості транспортування деталей з різним коефіцієнтом тертя, в тому числі сипких продуктів, від кута зсуву фаз.

Досліджувані зразки твердих матеріалів мали однакову площу зчеплення але різну масу.

Досліджувані тверді матеріали: сталь нешліфована, текстоліт, поліетилен, гума.

Досліджувані дрібнодисперсні матеріали: манка, цукор, мука, сіль.

Вихідні :

- розмах горизонтальний: 1,8 мм;
- розмах вертикальний: 0,2 мм;
- кут зсуву фаз від 0 до 180° з інтервалом 15° .

Матеріал	Інтервал значень кута зсуву фаз за якого відбувається транспортування виробів	Максимальна швидкість транспортування
текстоліт	$15^\circ - 165^\circ$	$V = 200 \text{ мм/с}$, $\varphi = 105^\circ$
сталь	$15^\circ - 165^\circ$	$V = 131 \text{ мм/с}$, $\varphi = 105^\circ$
поліетилен	$15^\circ - 150^\circ$	$V = 143 \text{ мм/с}$, $\varphi = 90^\circ$
гума	$15^\circ - 165^\circ$	$V = 142 \text{ мм/с}$, $\varphi = 75^\circ$
манка	$15^\circ - 165^\circ$	$V = 132 \text{ мм/с}$, $\varphi = 90^\circ$

цукор	15°-165°	$V=132, \text{ мм/с}, \varphi = 90^\circ$
мука	15°-150°	$V=132, \text{ мм/с}, \varphi = 90^\circ$
сіль	15°-165°	$V=132, \text{ мм/с}, \varphi = 90^\circ$

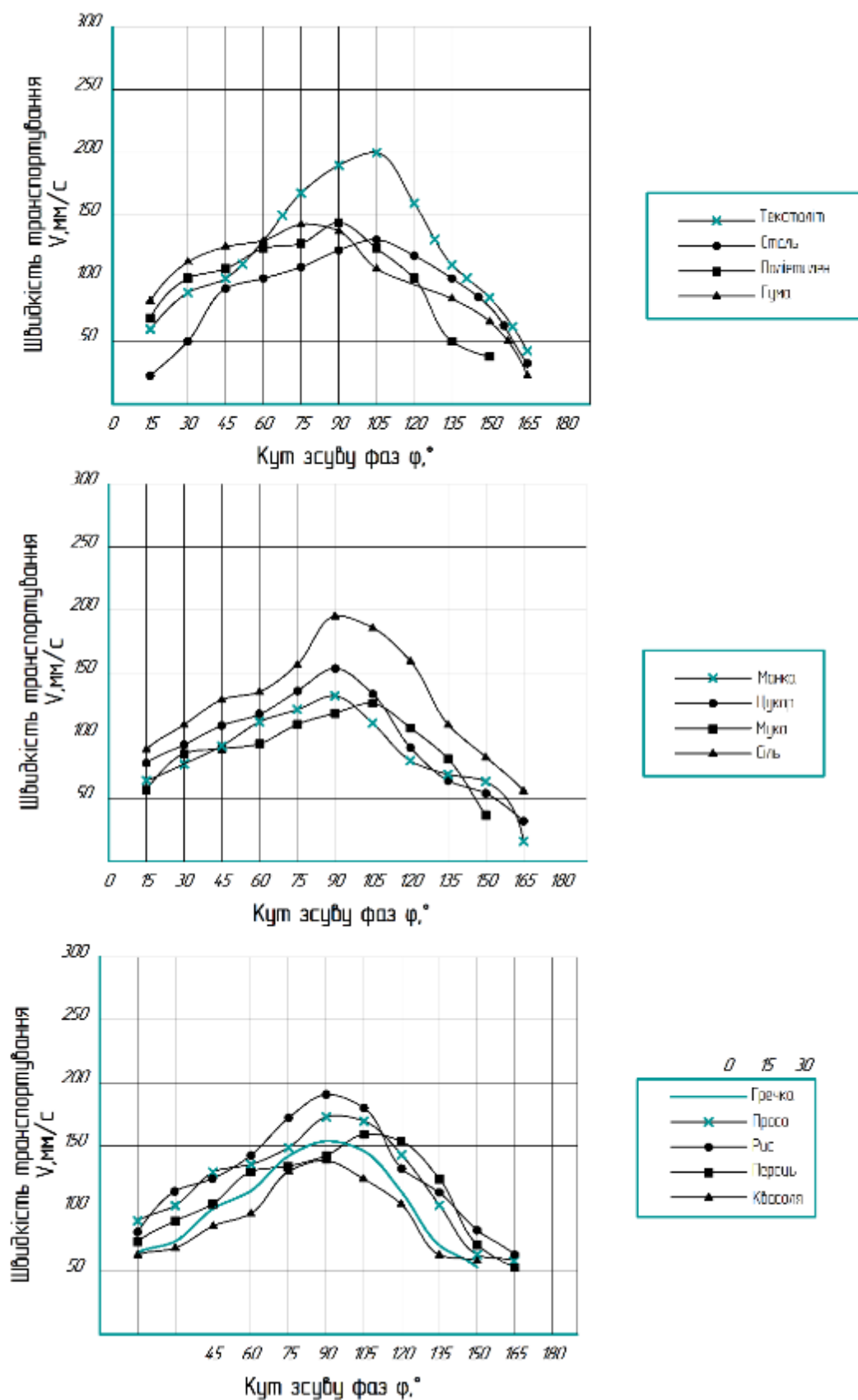


Рис.4 Діапазон зміни зсуву фаз φ між горизонтальною та вертикальною складовими амплітуди коливань за якого забезпечується вібраційне транспортування

Матеріал	Зсув фаз між поздовжньою та вертикальною амплітудою коливань ϕ за якого відбувається транспортування виробів у безвідривному режимі.	Максимальна швидкість транспортування V	Зсув фаз за максимальної швидкості транспортування
текстоліт	15^0-165^0	200мм/с	$\phi = 105^0$
сталь	15^0-165^0	131мм/с,	$\phi = 105^0$
поліетилен	15^0-150^0	143мм/с,	$\phi = 90^0$
гума	15^0-165^0	142мм/с,	$\phi = 75^0$
манка	15^0-165^0	132мм/с,	$\phi = 90^0$
цукор	15^0-165^0	132мм/с,	$\phi = 90^0$
мука	15^0-150^0	132мм/с, $\phi = 90^0$	$\phi = 90^0$
сінь	15^0-165^0	132мм/с, $\phi = 90^0$	$\phi = 90^0$

Висновки. Розроблена конструкція двомасового вібраційного конвеєра з незалежними горизонтальними та вертикальними коливаннями та з металевогумовою плужною системою.

Розроблена методика розрахунку пружної системи конвеєра. Проведені експериментальні дослідження залежності швидкості транспортування від режимів транспортування.

Список використаної літератури

1. Клузов И.Н. Автоматическая загрузка технологических машин. Справочник [И.С.Бляхеров и др.] Под общ. Ред. И.А.Клузова-М.: Машиностроение, 1990-400с.: ил.22см
2. Повидайло В.А. Расчет и конструирование бункерных питателей. М – К, 1962.
3. Повидайло В.А. Принципы создания вибрационных устройств и машин для автоматизированных производств. / Вибрации в технике и технологиях. – 1994., №1
4. Повидайло В.А. Оптимальные режимы работы вибрационных питателей, Станки и инструмент , 1960. №5.
5. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т./Ред. совет: В.Н Челомей (пред.).-М.: Машиностроение, 1981.-Т.4. Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э.Э. Лавендела. 1981. 509 с.. ил.
6. Биховский И.И. Основы теории вибрационной техники . М.: Машиностроение, 1969, 363с.
7. Дослідження впливу параметрів коливань на ефективність вібраційного транспортування деталей. Методичні вказівки до лабораторної роботи. Укл. Повидайло В.О., Шоловій Ю.П. – Львів, ДУЛП, 1996. – 14с.
8. Повидайло В.А.Вібраційні процеси та обладнання. Львів,2004 р.
9. Врублевский И.И., Шенбор В.С. Вибрационный конвейер. Авторское свидетельство СССР № 804553. – ЛПИ, 1981.
- 10.Щигель В.А., Врублевский И.И., Шенбор В.С., Якимец Р.В. Вибрационный манипулятор. Авторское свидетельство СССР №835902. – ЛПИ, 1981.
- 11.Щигель В.А., Врублевский И.И., Шенбор В.С. Способ вибрационного манипулирования деталями. Авторское свидетельство СССР №1033395. – ЛПИ, 1983.

Рецензент: Гурський Володимир Миколайович, професор, д.т.н., Львівська політехніка

Л.І. Никируй¹, І.П. Яремій¹, С.А. Федосов²¹Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника²Луцький національний технічний університет

НАНОКОМПОЗИТИ НА ОСНОВІ TiO₂ ДЛЯ ФОТОКАТАЛІТИЧНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ ОРГАНІЧНИХ БАРВНИКІВ

Цей огляд присвячений опису нанокompatитних фотокаталізаторів, як ефективних матеріалів для очищення води від органічних барвників (зокрема, Конго червоного, Метиленового синього, Метилоранжу, Родаміну Б та ін.). Нанокompatитні фотокаталізатори є структурованими пористими матеріалами, які здатні плавати на поверхні води та поглинати сонячне світло для активації хімічних реакцій. В огляді описано принципи дії фотокаталізаторів в процесах деструкції органічних речовин, захисту від біологічних забруднень та самоочищення поверхні води. Даний огляд підкреслює важливість проведення додаткових досліджень та розвитку нанокompatитних фотокаталізаторів з метою підвищення їх ефективності та застосування під час очищення води.

Ключові слова: нанокompatитні фотокаталізатори, очищення води, діоксид титану, барвник.

L.I. Nykyruy, I.P. Yaremiy, S.A. Fedosov

TiO₂-BASED NANOCOMPOSITES FOR PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF ORGANIC DYES

This review focuses on nanocomposite photocatalysts as effective materials for the removal of organic dyes from water (including Congo Red, Methylene Blue, Methyl Orange, Rhodamine B and others). Nanocomposite photocatalysts are structured porous materials capable of floating on the water surface and absorbing sunlight to activate chemical reactions. The review outlines the principles of photocatalyst action in processes such as the degradation of organic compounds, prevention of biological contamination, and self-cleaning of water surfaces. This review emphasizes the importance of further research and development of nanocomposite photocatalysts to enhance their efficiency and expand their application in water purification.

Keywords: nanocomposite photocatalysts, water purification, titanium dioxide, dye.

Вступ та постановка проблеми. Очищення води від забруднень та збереження екологічно чистих водних ресурсів є важливими завданнями сучасного суспільства. В пошуку нових технологій для ефективного очищення водних джерел, нанокompatитні фотокаталізатори здобувають все більше уваги серед науковців та інженерів [1]. Ці інноваційні матеріали поєднують в собі переваги фотокаталізу та плаваючої платформи, яка відкриває широкі можливості для їх практичного застосування [2].

Плаваючі фотокаталізатори розглядаються, як потенційні кандидати, які могли б подолати недоліки, пов'язані з використанням порошку TiO₂. Проблема виникає, коли порошкоподібний TiO₂, в забрудненому розчині утворює суспензію, що ускладнює його повторне використання після очищення води. Це обмеження може бути подолано за допомогою використання плаваючих нанокompatитних фотокаталізаторів, які забезпечують легке розповсюдження фотоактивних матеріалів в водних середовищах. Вони можуть бути виготовлені з різних матеріалів, таких як діоксид титану (TiO₂), в якості фотокаталізатора та графіту [3], полімерів [4], природних мінералів [5] в якості плаваючих платформ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним механізмом роботи плаваючих фотокаталізаторів є поглинання світла, активація фотокаталізатора та взаємодія з забруднюючими речовинами у воді. Світло провокує виникнення електрон-діркових пар, які сприяють фотохімічним реакціям, що дозволяють руйнувати різні забруднюючі речовини у воді. Їх унікальні властивості дозволяють їм плавати на поверхні води, забезпечуючи ефективний контакт забрудненої води з каталізатором та сонячним світлом. Це у свою чергу, сприяє підвищенню швидкості проходження реакції та покращенню якості очищення води [6].

Підготовка плаваючих фотокаталізаторів включає в себе різноманітні методи, що залежать від конкретного застосування та його властивостей. Основними методами приготування плаваючих фотокаталізаторів є: золь-гель [7], сольвотермальний [8] та гідротермальний методи [9]. Золь-гель методом можна отримати плаваючі структури, наприклад, плаваючі кульки або пінки. Розчин золь-гелю піддається термальній обробці в закритому автоклаві за високого тиску та температури [10]. Гідротермальний метод дозволяє отримати плаваючі фотокаталізатори з високою чистотою та однорідною морфологією [9]. Метод гідролізу передбачає проходження реакції прекурсорів з водою для утворення ефективних фотокаталізаторів [11]. Важливою складовою цього методу є контроль

© Л.І. Никируй, І.П. Яремій, С.А. Федосов

pH середовища та температури реакції. Описані методи синтезу можуть бути використані для отримання різних типів плаваючих фотокаталізаторів залежно від конкретних застосувань. Контрольований синтез та оптимізація параметрів відкривають нові можливості для досягнення більш ефективного очищення водних ресурсів.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для повного розуміння потенціалу плаваючих нанокompозитних фотокаталізаторів ми провели детальний огляд їхньої роботи та матеріалів, що використовуються для їх приготування. Наш огляд спрямований на підтримку подальшого розвитку та використання нанокompозитних фотокаталізаторів для покращення якості води. Оскільки, додаткові дослідження в цьому напрямку можуть допомогти підвищити ефективність та застосування фотокаталізаторів у майбутньому.

Застосування плаваючих нанокompозитних фотокаталізаторів. Плаваючі фотокаталізатори можуть бути успішно використані для очищення води від органічних речовин [12], пестицидів [13], водоростей [4], нафтових продуктів [14], барвників [15,16] та бактерій [17]. Фотокаталітична реакція, передбачає утворення реакційноздатних радикалів на поверхні фотокаталізатора та їх взаємодії з молекулами поллютантів.



Рис. 1. Застосування плаваючого нанокompозитного фотокаталізатора

Фотокаталітичне руйнування барвників. Завдяки тому, що плаваючі фотокаталізатори знаходяться на поверхні води, вони демонструють чудові показники утворення радикалів і високу ефективність руйнування поллютантів. Науковці прогнозують, що їх можна буде використовуватися для сонячного фотокаталізу без додаткового перемішування та насичення киснем. В роботі [7] синтезовано мезопористий фотокаталізатор з великою площею поверхні ($99.23 \text{ м}^2 \cdot \text{г}^{-1}$) та розміром пор (33.39 нм). Виявлено, що допування структури анатазу (TiO_2) атомами В і N сприяє розширенню пор і підвищенню активності фотокаталізатора з вузькою шириною забороненої зони. Плаваючі властивості були отримані за рахунок сполучення зі спученим перлітом (EP). Найкраща ефективність фотодеградації Родаміну Б (РБ) отриманим зразком В–N– TiO_2 /EP (6 мг/г, 24 мас.% TiO_2) досягла 99.1 % протягом 5 годин опромінення у видимій області світла та 99.8 % за 1 годину опромінення в УФ-області світла. Представлений плаваючий фотокаталізатор отриманий золь-гель методом, продемонстрував можливість застосування для очищення навколишнього середовища від органічних барвників.

У дослідженні [6] були приготовлені плаваючі ценосфери летючої золи (FAC) на основі шаруватого гібридного карбонізованого хітозану та TiO_2 легованого Fe-N. Виявлено, що легування Fe-N звужує ширину забороненої зони фотокаталізатора, а шар карбонізованого хітозану (Cts) збільшує адсорбційну здатність та покращує поглинання видимого спектру світла. Порівняно з Fe-N- TiO_2 /FAC і N- TiO_2 /FAC, композитний фотокаталізатор демонструє вищу ефективність руйнування РБ. Константа швидкості реакції фотодеградації РБ за допомогою Fe-N- TiO_2 /FAC-Cts становила 0.01018 хв^{-1} , що приблизно в 1.5 і 2.09 рази вище, ніж при опроміненні видимим світлом зразків Fe-N- TiO_2 /FAC і N- TiO_2 /FAC, відповідно. Захоплення дірок та електронів іонами Fe^{3+} і синергетичний ефект адсорбції та фотодеградації були основними факторами підвищення ефективності композитного матеріалу. Композитний фотокаталізатор можна повторно використовувати щонайменше три рази поспіль без зниження ефективності деградації барвника Родаміну Б.

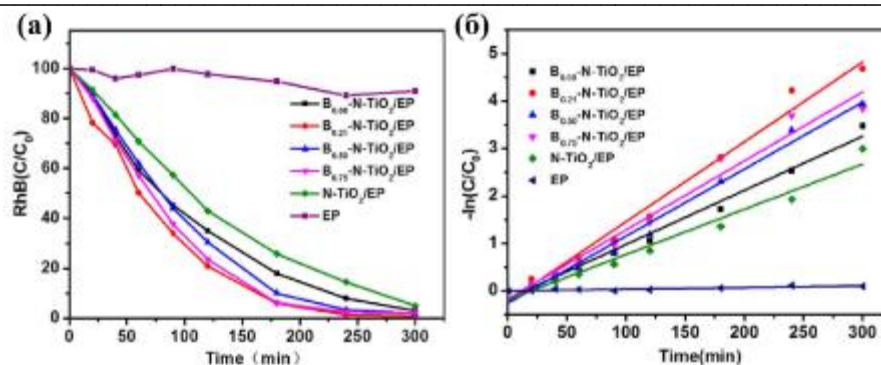


Рис. 2. Фотокаталітична активність синтезованих зразків: (а) опромінення видимим світлом; (б) кінетичні криві представлені в координатах псевдопершого порядку [7]



Рис. 3. Препаративний метод отримання Fe-N-TiO₂/FAC-Cts [6]

Плаваючі ценосфери летючої золи, покриті нанокомпозитними плівками AgCl/TiO₂ товщиною близько 2 мкм були підготовлені в роботі [16]. Отримані ценосфери летючої золи, покриті плівками фотокаталізаторів AgCl/TiO₂, продемонстрували високу фотокаталітичну активність під час розкладу Родаміну Б. При концентрації AgCl 0.21 г, швидкість фотодеградації становила 94.96% за 180 хв опромінення видимим світлом, а швидкість видалення ТОС досягала 20.34% за тих же умов.

В роботі [18] описаний новий активний фотокаталізатор на основі композиту TiO₂-PANI, нанесеного на маленькі шматочки пробки (Cork). Композит виготовлено методом просочення пробки поліаніліном (PANI)-модифікованим TiO₂. Оптимальна концентрація TiO₂-PANI, становить приблизно 50 мас.%. Підготовлений плаваючий фотокаталізатор TiO₂-PANI/Cork показав високу ефективність розкладу Метилового оранжевого (МО) під дією сонячного світла. Плаваючий фотокаталізатор продемонстрував хорошу фотостабільність, після повторного використання протягом чотирьох циклів деградації барвника. Композит TiO₂-PANI/Cork продемонстрував декілька важливих переваг, таких як: (i) проста підготовка без використання спеціальних прекурсорів титану; (ii) активація під дією видимого світла; (iii) підвищення використання сонячного опромінення; (iv) ефективна окиснення фотокаталізатора за рахунок близькості до поверхні розділу повітря/вода.

У дослідженні [15] була проведена іммобілізація наночастинок діоксиду титану (TiO₂-NP) на плаваючій підкладці (Cork), з використанням полівінілового спирту (PVA) для закріплення TiO₂ на поверхні. Енергія забороненої зони наночастинок TiO₂, становила 3.0 еВ. Виявлено, що наночастинок TiO₂ мають меншу швидкість рекомбінації електронно-діркових пар порівняно з чистою фазою анатазу. При оптимальному мольному співвідношенні TiO₂/PVA (1:8) фотокаталізатор TiO₂/PVA/Cork руйнував Метилений синій (МС) під дією видимого та імітованого сонячного опромінення на 98.43% та 77.09%, відповідно. Краща продуктивність

фотодеградації МС залежала від кількості активних форм кисню. Кінетика деградації МС відповідала закону першого порядку. Плаваючий фотокаталізатор продемонстрував хорошу придатність до багаторазового використання, що призвело до зниження ефективності видалення МС до 78.13%, після п'яти циклів використання.

В роботі [9] було модифіковано та іммобілізовано TiO_2 на поліпропіленових (ПП) гранулах для отримання фотокаталізатора активного у видимому спектрі світла. Нанозоль TiO_2 спочатку був отриманий з *n*-бутоксиду титану ($\text{Ti}(\text{OBu})_4$) у присутності ацетилацетону (AcAc), а потім оброблений триетиламіном (TEA) за кімнатної температури. Потім був застосований одноетапний процес іммобілізації оброблених наночастинок TiO_2 на підкладці з ПП у реакторі високого тиску (150 °C). Було виявлено, що нанозоль TiO_2 з AcAc як інгібуючим агентом призвів до високої активності у видимому спектрі світла. Межа поглинання світла становила до 800 нм, а швидкість поглинання досягала від 32 до 66%, залежно від часу обробки TEA. Ефективне руйнування розчину барвника МО, продемонструвало можливість використання приготовлених композитів, для розкладу органічних забруднень.

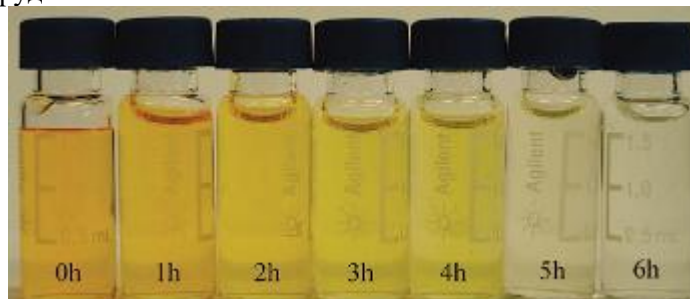


Рис. 4. Фотографії, що демонструють зміну кольору розчину барвника МО внаслідок фотокаталітичного окиснення з часом [9].

В роботі [19] приготовлений високоактивний фотокаталізатор на основі TiO_2 -P25, прищепленого до гранул пінополістиролу (EPS). Підтверджено, що 18 мас.% TiO_2 міцно прищепилися на поверхню частинок EPS. Отриманий плаваючий фотокаталізатор продемонстрував високу ефективність для деградації трьох барвників: Метиленового синього, Індигокарміну та Дрімаренового червоного (ДЧ). Порівняно з іншими плаваючими фотокаталізаторами, TiO_2 /EPS продемонстрував кілька суттєвих переваг, таких як: (i) просте приготування без використання дорогих прекурсорів титану; (ii) використання високоактивного комерційного TiO_2 -P25 та (iii) використання нетоксичних полімерних відходів EPS, які мають хімічну та механічну стійкість.

В роботі [20] був приготовлений плаваючий фотокаталізатор TiO_2 покритий Ni-P та закріплений на поліпропіленовій (ПП) порожнистій кульковій підкладці. Покриття Ni-P було нанесено на порожнисту кульку з ПП у присутності TiO_2 . Порожниста кулькова підкладка з ПП була достатньо покрита Ni-P, в якому було підтверджено присутність Ti. Отриманий зразок плавав на поверхні, коли його поміщали у водні розчини (Рис. 5). Фотокаталітичну активність було підтверджено розкладом Метиленового синього. Виявлено, що покриття Ni-P захищає ПП від руйнування самим TiO_2 .

Останнім часом, дослідження плаваючих нанокомпозитних фотокаталізаторів на основі полімерних підкладок стало популярним рішенням. В роботі [21] плаваючі нанокомпозитні плівки TiO_2 -полістиролу були виготовлені за допомогою методу лиття. Дослідження проводилися в реакторі періодичної дії за оптимізованих умов, а для більшого об'єму розчину вивчався ефект рециркуляції. Повне знебарвлення модельного барвника (Ремазол бірюзовий синій (РБС)) досягалося через 80 хвилин опромінення у реакторі періодичної дії. У режимі рециркуляції, спостерігалось знебарвлення приблизно на 75% за 6 годин опромінення. Багаторазове використання фотокаталітичної плівки було перевірено, і результати представляють ефективність знебарвлення близько 70%. Максимальне зниження загального органічного вуглецю, становило близько 25%.

Використання плаваючих платформ для фотокаталізатора є дієвою стратегією з точки зору покращення поглинання світла. У роботі [22] для флоатації комерційних наночастинок TiO_2 -P25 використовували плаваючу органічну основу на основі полі(вінілового спирту) (PVA). Завдяки використанню CaCl_2 і борної кислоти було покращено зшивання PVA, змішаного з альгінатом натрію (PVA-Alg). Щоб підвищити хімічну та механічну стабільність, композит модифікували триметилхлорсиланом для отримання плаваючої платформи (MPVA-Alg). Результати ІЧ-спектроскопії підтвердили, що хімічна модифікація PVA-Alg призвела до зниження гідрофільності,

що сприяє флоатації у стічних водах. Максимальне фотокаталітичне видалення аміаку, становило 63% і 57% композитом $\text{TiO}_2/\text{MPVA-Alg}$ під УФ- та видимим опроміненням, відповідно.

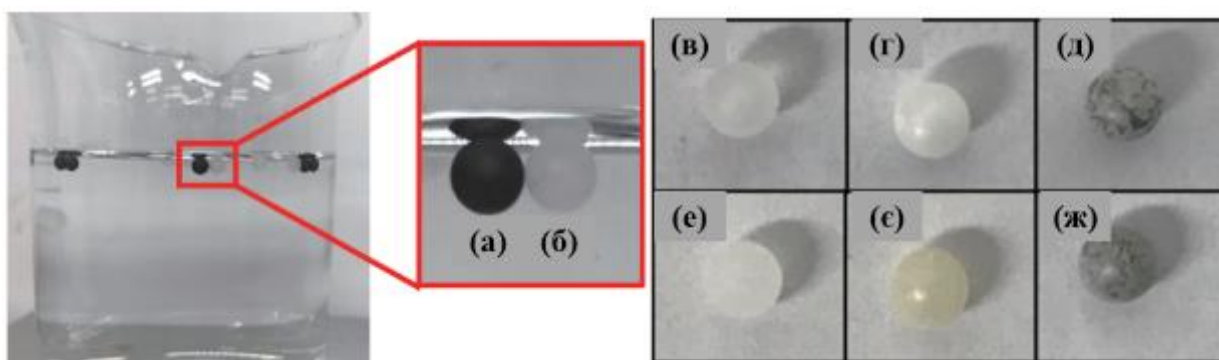


Рис. 5. Фото (а) NiP-Ti-PP та (б) чистих поліпропіленових кульок, що плавають на воді.

Зміна кольору зразків до (в, г, д) і після (е, с, ж) УФ-опромінення протягом 6 год; (в, е) кульки ПП; (г, с) кульки ПП, покриті плівкою TiO_2 ; (д, ж) кульки NiP-PP , покриті плівкою TiO_2 [20].

У роботі [5] описано нові фотокаталізатори на основі композиту TiO_2 /вермикуліт з великою площею поверхні. Ці каталізатори демонструють можливість плавати на поверхні води, де відбувається найбільше освітлення, що призводить до підвищення їх фотокаталітичної ефективності. Фотокаталітичні випробування проведені з допомогою барвника Дрімаренового червоного. Отриманий композит TiO_2 (20 мас.%) / EV, є дуже активним каталізатором з константою швидкості реакції $2.1 \cdot 10^{-1} \text{ хв}^{-1}$, тоді як $\text{TiO}_2\text{-P25}$ осідає на дно реактора і залишається неактивним через погане поглинання світла.

В роботі [23] золь-гель методом виготовлено плаваючі фотокаталізатори TiO_2 , леговані бором (B) і азотом (N) та прищеплені на спучений перліт (B-N- TiO_2/EP). Результати показали, що шляхом зміни вмісту бору в B-N- TiO_2/EP можна отримати фотокаталізатори з високою площею поверхні та пористістю. Збільшення вмісту бору інгібує перетворення анатазу TiO_2 у рутильну фазу. Порівняно з N- TiO_2/EP , B-N- TiO_2/EP демонструє очевидний зсув краю смуги поглинання, і інтенсивність поглинання видимої області збільшується. Підвищена швидкість фотодеградації Родаміну Б, B_{0.57}-N- TiO_2/EP може досягати 94% після 3 годин опромінення видимим світлом. Крім того, плаваючий фотокаталізатор можна легко відокремити та повторно використати, демонструючи потенціал для практичного застосування в очищенні навколишнього середовища.

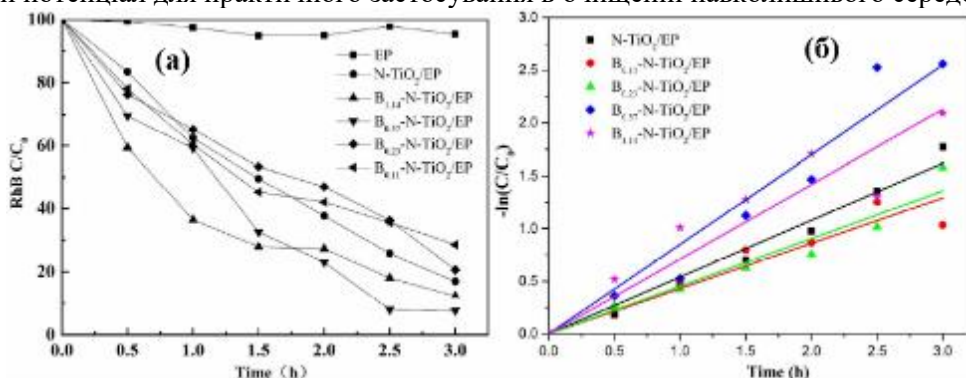


Рис. 6. Фотодеградація Родаміну Б на нанокompозитах B-N- TiO_2/EP при опроміненні видимим світлом (а) та кінетичні криві представлені в координатах псевдопершого порядку (б) [23].

Плаваючі фотокаталізатори є перспективним варіантом розкладу забруднюючих речовин за допомогою сонячного випромінювання. У роботі [24] нанопласти TiO_2 були іммобілізовані в матриці з ацетату целюлози та забезпечені опорою з використанням етиленвінілацетату для підготовки плаваючого фотокаталізатора. Ефективність плаваючого фотокаталізатора оцінювалася з використанням барвника Конго червоного (КЧ). Повне руйнування 10 мг/л розчину барвника було отримано за 12 год. Використання сонячного світла та низькі витрати на технічне обслуговування дозволяють використовувати плаваючий фотокаталізатор для очищення стічних вод від органічних поллютантів.

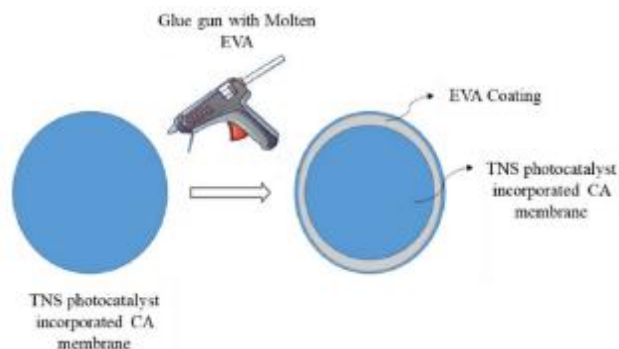


Рис. 7. Схематичне зображення синтезу композитного фотокаталізатора [24].

У роботі [25] приготовлені плаваючі фотокаталізатори на основі композитів поліетилену низької щільності та 30, 68 і 82 мас.% $\text{TiO}_2\text{-P25}$. Деградація модельного барвника Метиленового синього за допомогою УФ (Hg 245 нм) і сонячного опромінення показала високу ефективність. Отриманий плаваючий фотокаталізатор можна повторно використовувати щонайменше три рази поспіль без зменшення видалення загального органічного вуглецю після кожного повторного використання.

Перенесення гетерогенного фотокаталізу з лабораторії в реальні умови є складним процесом через, ефекти послаблення проникнення світла у товщу води, забруднення води важкими металами та руйнування фотокаталізаторів. В роботі [3] представлені вирішення цих проблем, розробляючи фотокаталізатор на основі зелених целюлозних нановолокон (CNF), отриманих з деревини. Повітряні бульбашки були стабільними, за рахунок поверхнево-активних речовин, які забезпечували термодинамічну стабільність, а отримані фотокаталітичні пінки плавали на воді протягом усього періоду випробувань (4 тижні). Напівпровідниковий фотокаталізатор, $\text{g-C}_3\text{N}_4$, був отриманий шляхом змішування фотокаталізатора з повітряно-бульбашковою суспензією з подальшим литтям і сушінням для отримання твердої піни. В умовах опромінення видимим світлом, майже втричі більше барвника РБ було видалено через 6 годин плаваючою нанокомпозитною піною $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-CNF}$, порівняно з чистим порошком $\text{g-C}_3\text{N}_4$.

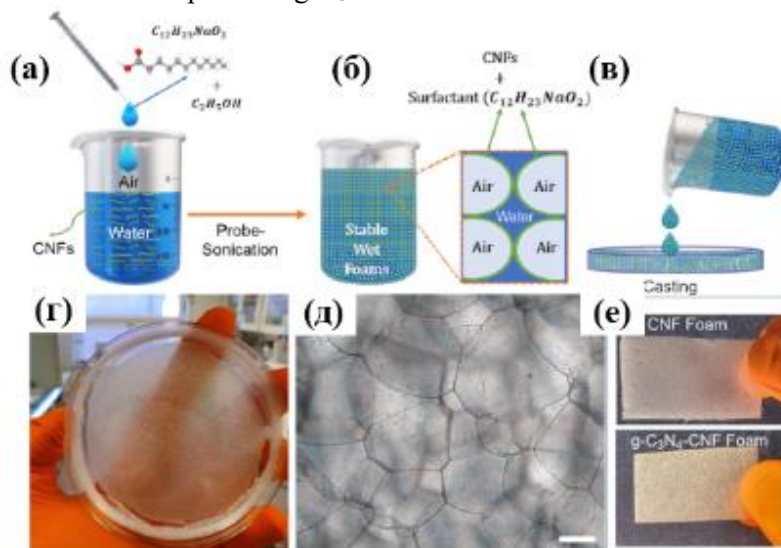


Рис. 8. Схематична ілюстрація приготування вологої стабільної піни: (а) додавання поверхнево-активної речовини до CNF у воді; (б) змішування для отримання вологої стабільної піни і (в) лиття; (г) комірчастий твердий матеріал на основі CNF показаний після висихання і (д) крупним планом комірчаста структура піни на основі CNF; (е) піна $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-CNF}$ і піна на основі CNF [3].

В роботі [26] представлено високоактивний і міцний плаваючий фотокаталізатор на основі саліцилової кислоти (SA) та модифікованого TiO_2 , іммобілізованого на невеликих шматочках стовбура пальми (PT) в якості нової пористої опори. Як поліютант, використовували барвник Конго червоний. Отримані результати показали, що модифікація поверхні наночастинок $\text{TiO}_2\text{-SA}$ покращує їх фотокаталітичну активність. Зокрема, було виявлено, що композит $\text{TiO}_2\text{-SA}$ (50

мас.%) / PT є високоактивним. Встановлено, що їх фотокаталітична активність зберігається протягом чотирьох послідовних циклів використання.

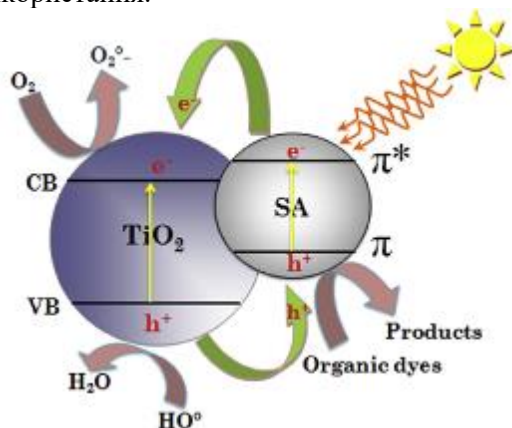


Рис. 9. Механізм електронно-діркового переміщення у структурі приготовленого фотокаталізатора під дією сонячного світла (e^- : електрон; h^+ : дірка) [26].

У роботі [11] використовували порожнисті скляні мікросфери (HGMS), як носій і полістирол (PSt) як основу. PSt прищеплювали на поверхню HGMS за допомогою силанових зв'язків. Потім аморфний діоксид титану (TiO_2), отриманий шляхом гідролізу тетрабутилтитанату (ТБТ), осідав на поверхні PSt, утворюючи частинки HGMS/PSt/ TiO_2 . Використовуючи метод прожарювання, було отримано композитні частинки з порожнистим TiO_2 , завантаженим на поверхню HGMS (HGMSHT). Результати СЕМ показали, що порожнистий TiO_2 був компактним на поверхні HGMS і утворював багатшарову сітчасту структуру (Рис. 10). Питомою площею поверхні частинок HGMSHT становила $26 \text{ м}^2/\text{г}$. Результати експерименту з фотодеградацією Родаміну Б під ультрафіолетовим і сонячним опроміненням продемонстрували, що завдяки більшій питомій площі поверхні ефективність композитних частинок HGMSHT є високою.

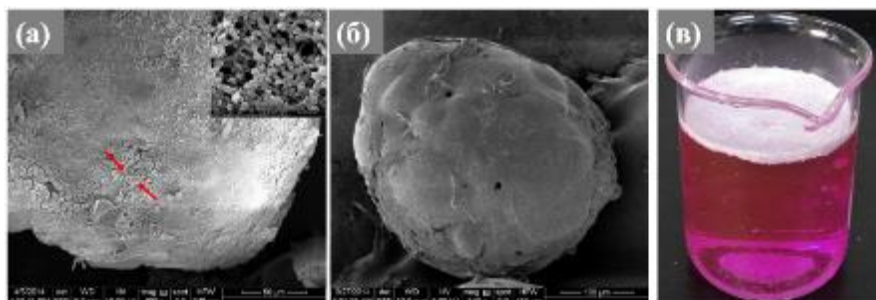


Рис. 10. СЕМ-фото HGMSHT (а) та HGMS (б) після прожарювання при 550°C ; (в) зображення композитних фотокаталізаторів, застосованих для деградації РБ [11].

Табл. 1.

Деградація барвників плаваючими нанокompозитними фотокаталізаторами.

[Нанокompозитний фотокаталізатор]	[Барвник]	Джерело опромінення	Час	Ефективність видалення (%)	Літ.
B-N- TiO_2 /EP (6 мг/г, 24 мас. % TiO_2)	РБ 10 мг/л	видиме світло $\lambda > 420 \text{ нм}$	5 год	99.1	[7]
Fe-N- TiO_2 /FAC-Cts (0.2 г)	РБ 8 мг/л	видиме світло	6 год	93.13	[6]
Зольні ценосфери з AgCl/ TiO_2 (0.1 г)	РБ 12.5 мг/л	видиме світло $\lambda > 420 \text{ нм}$	3 год	94.96	[16]
TiO_2 -PANI (50 мас.%) / Cork (1 г/л)	МО 15 мг/л	сонячне світло	3.5 год	95.2	[18]
TiO_2 /PVA/Cork (1:8) (0.5 г)	МС 6 мг/л	видиме світло	2 год	98.43	[15]
TiO_2 -P25/EPS (1,0 г)	МС 50 мг/л	сонячне світло	2 год	$*20 \cdot 10^{-3} \text{ хв}^{-1}$	[19]

NiPTi-PP (10 кульок)	МС 0.2 мг/л	УФ-світло	2 год	29	[20]
PCLf+TiO ₂ (0.25 г)	АО7 10 мг/л	сонячне світло	24 год	100	[27]
Polystyrene-TiO ₂ (PST) (12 мас.%)	РБС 10 мг/л	УФ-світло	1.5 год	100	[21]
TiO ₂ (20 мас.%) /EV (200 мг)	ДЧ 50 мг/л	УФ-світло	6 год	*2.1·10 ⁻¹ хв-1	[5]
B0.57-N-TiO ₂ /EP (2 г/л)	РБ 2.5 мг/л	УФ-світло	3 год	94	[23]
TiO ₂ наноліст (TNS) (100 мг)	КЧ 10 мг/л	сонячне світло	12 год	100	[24]
TiO ₂ (82)/LDPE (1 г)	МС 0.16 ммоль/л	сонячне світло	4 год	100	[25]
g-C ₃ N ₄ -CNF (182 мг CNFs + 50 мг g- C ₃ N ₄)	РБ 5 мг/л	видиме світло	6 год	95	[3]
TiO ₂ -SA (50 мас.%) /PT (1.0 г/л)	КЧ 10 мг/л	сонячне світло	2.5 год	98.2	[26]
HGMSHT (0.5 г)	РБ 5 мг/л	сонячне світло	4 год	96	[11]

* константа швидкості реакції

Висновки. За останні десятиліття плаваючі нанокompозитні фотокаталізатори на основі TiO₂ привернули значну увагу науковців зі всього світу. Виявлено, що їх розповсюджене застосування може призвести до використання сонячної енергії для зменшення забруднення довкілля. Тому, наступні дослідження повинні бути зосереджені на розробці та оптимізації високоефективного ширококутового поглинання світла фотокаталізатором для покращення ефективності використання сонячної енергії. Майбутня стратегія розвитку нанокompозитних фотокаталізаторів, полягає в іммобілізації активних матеріалів на різних легких підкладках: перліт, вермикуліт, скляні кульки, полімери, пробка та графіт. Зокрема, активне використання ефективних та стабільних плаваючих нанокompозитних фотокаталізаторів дозволить покращити якість води та сприятиме очищенню навколишнього середовища.

Список використаних джерел:

- [1] A.M. Nasir, J. Jaafar, F. Aziz, N. Yusof, W.N.W. Salleh, A.F. Ismail, M. Aziz, A review on floating nanocomposite photocatalyst: Fabrication and applications for wastewater treatment, J. Water Process Eng. 36 (2020) 101300. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101300>.
- [2] Z. Xing, J. Zhang, J. Cui, J. Yin, T. Zhao, J. Kuang, Z. Xiu, N. Wan, W. Zhou, Recent advances in floating TiO₂-based photocatalysts for environmental application, Elsevier B.V., 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.12.005>.
- [3] P.R. Anusuyadevi, A. V. Riazanova, M.S. Hedenqvist, A.J. Svagan, Floating photocatalysts for effluent refinement based on stable pickering cellulose foams and graphitic carbon nitride (g-C₃N₄), ACS Omega. 5 (2020) 22411–22419. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02872>.
- [4] X. Wang, X. Wang, J. Zhao, J. Song, C. Su, Surface modified TiO₂ floating photocatalyst with PDDA for efficient adsorption and photocatalytic inactivation of Microcystis aeruginosa, Water Res. 131 (2018) 320–333. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.062>.
- [5] L.C.R. Machado, C.B. Torchia, R.M. Lago, Floating photocatalysts based on TiO₂ supported on high surface area exfoliated vermiculite for water decontamination, Catal. Commun. 7 (2006) 538–541. <https://doi.org/10.1016/j.catcom.2005.10.020>.
- [6] J. Song, X. Wang, Y. Bu, X. Wang, J. Zhang, J. Huang, R.R. Ma, J. Zhao, Photocatalytic enhancement of floating photocatalyst: Layer-by-layer hybrid carbonized chitosan and Fe-N-codoped TiO₂ on fly ash cenospheres, Appl. Surf. Sci. 391 (2017) 236–250. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.04.021>.
- [7] H. Xue, Y. Jiang, K. Yuan, T. Yang, J. Hou, C. Cao, K. Feng, X. Wang, Floating photocatalyst of B-N-TiO₂/expanded perlite: a sol-gel synthesis with optimized mesoporous and high photocatalytic activity, Sci. Rep. 6 (2016) 2–10. <https://doi.org/10.1038/srep29902>.
- [8] T. Wang, Y. Li, J. hao Pan, Y. ling Zhang, L. guang Wu, C. ying Dong, C. juan Li, Alcohol solvothermal reduction for commercial P25 to harvest weak visible light and fabrication of the resulting floating photocatalytic spheres, Sci. Rep. 9 (2019) 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50457-w>.
- [9] H. Han, R. Bai, Buoyant photocatalyst with greatly enhanced visible-light activity prepared through a low temperature hydrothermal method, Ind. Eng. Chem. Res. 48 (2009) 2891–2898.

© Л.І. Никурий, І.П. Ярмей, С.А. Федосов

<https://doi.org/10.1021/ie801362a>.

[10] J. Zhang, X. Wang, X. Wang, J. Song, J. Huang, B. Louangsouphom, J. Zhao, Floating photocatalysts based on loading Bi/N-doped TiO₂ on expanded graphite C/C (EGC) composites for the visible light degradation of diesel, *RSC Adv.* 5 (2015) 71922–71931. <https://doi.org/10.1039/c5ra12783a>.

[11] J. Wang, B. He, X.Z. Kong, A study on the preparation of floating photocatalyst supported by hollow TiO₂ and its performance, *Appl. Surf. Sci.* 327 (2015) 406–412. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.11.112>.

[12] M. Długosz, P. Zmudzki, A. Kwiecień, K. Szczubiałka, J. Krzek, M. Nowakowska, Photocatalytic degradation of sulfamethoxazole in aqueous solution using a floating TiO₂-expanded perlite photocatalyst, *J. Hazard. Mater.* 298 (2015) 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.05.016>.

[13] C. Shifu, C. Gengyu, Photocatalytic degradation of organophosphorus pesticides using floating photocatalyst TiO₂•SiO₂/beads by sunlight, *Sol. Energy.* 79 (2005) 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.10.006>.

[14] H. Qiu, J. Hu, R. Zhang, W. Gong, Y. Yu, H. Gao, The photocatalytic degradation of diesel by solar light-driven floating BiOI/EP composites, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 583 (2019) 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123996>.

[15] N. Hidayah, M. Idris, J. Rajakumar, K.Y. Cheong, B.J. Kennedy, T. Ohno, A. Yamakata, H.L. Lee, Titanium Dioxide/Polyvinyl Alcohol/Cork Nanocomposite: A Floating Photocatalyst for the Degradation of Methylene Blue under Irradiation of a Visible Light Source, *ACS Omega.* 6 (2021) 14493–14503. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01458>.

[16] P. Huo, Y. Yan, S. Li, H. Li, W. Huang, Floating photocatalysts of fly-ash cenospheres supported AgCl/TiO₂ films with enhanced Rhodamine B photodecomposition activity, *Desalination.* 256 (2010) 196–200. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.01.012>.

[17] S. Varnagiris, M. Urbonavicius, S. Sakalauskaite, R. Daugelavicius, L. Pranevicius, M. Lelis, D. Milcius, Floating TiO₂ photocatalyst for efficient inactivation of *E. coli* and decomposition of methylene blue solution, *Sci. Total Environ.* (2020) 137600. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137600>.

[18] M. Sboui, M.F. Nsib, A. Rayes, M. Swaminathan, A. Houas, TiO₂-PANI/Cork composite: A new floating photocatalyst for the treatment of organic pollutants under sunlight irradiation, *J. Environ. Sci.* (2017) 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.11.024>.

[19] F. Magalha, R.M. Lago, Floating photocatalysts based on TiO₂ grafted on expanded polystyrene beads for the solar degradation of dyes, *Sol. Energy.* 83 (2009) 1521–1526. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.04.005>.

[20] S. Nijpanich, Y. Kamimoto, T. Hagio, R. Ichino, Preparation of a floating photocatalyst via electroless Ni-P-TiO₂ composite plating on polypropylene balls for wastewater treatment, *J. Water Environ. Technol.* 17 (2019) 131–140. <https://doi.org/10.2965/jwet.18-039>.

[21] S. Das, H. Mahalingam, Reusable floating polymer nanocomposite photocatalyst for the efficient treatment of dye wastewaters under scaled-up conditions in batch and recirculation modes, *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 94 (2019) 2597–2608. <https://doi.org/10.1002/jctb.6069>.

[22] M. Zendezhaban, M. Ashjari, S. Sharifnia, Preparation of floatable TiO₂/poly(vinyl alcohol)-alginate composite for the photodegradation of ammonia wastewater, *Int. J. Energy Res.* 44 (2020) 2150–2163. <https://doi.org/10.1002/er.5072>.

[23] X. Wang, X. Wang, W. Wang, J. Zhang, Z. Gu, L. Zhou, J. Zhao, Enhanced visible light photocatalytic activity of a floating photocatalyst based on B-N-codoped TiO₂ grafted on expanded perlite, *RSC Adv.* 5 (2015) 41385–41392. <https://doi.org/10.1039/c5ra06056g>.

[24] A.K. Nair, D. Roy George, N. Jos Baby, M. Reji, S. Joseph, Solar dye degradation using TiO₂ nanosheet based nanocomposite floating photocatalyst, *Mater. Today Proc.* 46 (2021) 2747–2751. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.481>.

[25] F. Magalhães, F.C.C. Moura, R.M. Lago, TiO₂/LDPE composites: A new floating photocatalyst for solar degradation of organic contaminants, *Desalination.* 276 (2011) 266–271. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.03.061>.

[26] M. Sboui, M.F. Nsib, A. Rayes, T. Ochiai, A. Houas, Application of solar light for photocatalytic degradation of Congo red by a floating salicylic acid-modified TiO₂/palm trunk photocatalyst, *Comptes Rendus Chim.* 20 (2017) 181–189. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2015.12.007>.

[27] D. Marković, S. Milovanović, Ž. Radovanović, I. Zizovic, Z. Šaponjić, M. Radetić, Floating Photocatalyst Based on Poly(ε-caprolactone) Foam and TiO₂ Nanoparticles for Removal of Textile Dyes, *Fibers Polym.* 19 (2018) 1219–1227. <https://doi.org/10.1007/s12221-018-8148-5>.

В. І. Шеремет, М. Я. Втерковський, С. Ю. Тесля, Т. О. Соловійова

*Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"***ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ХОЛОДНОГО ІЗОСТАТИЧНОГО ПРЕСУВАННЯ
ПОРОШКІВ МАГНІЮ ТА ЙОГО СПЛАВІВ**

Досліджено закономірності процесів формування порошкових сплавів магнію методом холодного ізостатичного пресування (ХІП) із подальшим спіканням. Дослідження проводилися за різних тисків пресування (100–400 МПа) та з використанням методів ХІП і одновісного пресування для порівняння. Результати свідчать, що ХІП забезпечує вищу рівномірність ущільнення завдяки всебічному стиску, порівняно з одновісним пресуванням, що страждає від анізотропії та нерівномірного ущільнення. Встановлені механізми утворення механічного та хімічного контакту між частинками у сплавах на основі магнію, зокрема Mg-20мас.%WE43-10мас.%ZK61. Показано, що за рахунок активації систем ковзання магнію під дією всестороннього стиску відбувається прискорення течія матеріалу та його ущільнення. Встановлено, що при ХІП дифузійні процеси масопереносу пришвидшуються завдяки збільшенню площі контактів між частинками, що сприяє формуванню більш щільної мікроструктури після спікання.

Ключові слова: магній, порошкова металургія, спікання, холодне ізостатичне пресування

V. Sheremet, M. Vterkovskiy, S. Teslia, T. Soloviova

**OPTIMIZATION OF THE COLD ISOSTATIC PRESSING PROCESS OF MAGNESIUM
POWDERS AND ITS ALLOYS**

The regularities of the formation processes of magnesium powder alloys using the cold isostatic pressing (CIP) method followed by sintering have been investigated. The study was conducted at various pressing pressures (100–400 MPa) using CIP and uniaxial pressing methods for comparison. The results indicate that CIP provides higher uniformity of compaction due to isotropic compression, in contrast to uniaxial pressing, which suffers from anisotropy and uneven compaction. The mechanisms of mechanical and chemical contact formation between particles in magnesium-based alloys, particularly Mg-20wt.%WE43-10wt.%ZK61, were identified. It was shown that the activation of magnesium slip systems under isotropic compression leads to material flow and densification. It was established that during CIP, diffusion processes of mass transfer are accelerated due to an increase in the contact area between particles, contributing to the formation of a denser microstructure after sintering.

Keywords: magnesium, powder metallurgy, sintering, cold isostatic pressing

Постановка проблеми. Формування виробів з порошкових матеріалів є одним з ключових напрямків розвитку сучасного матеріалознавства [1]. На відміну від традиційних методів ливарного виробництва використання методів порошкової металургії дозволяють значно розширити як фізико-механічні властивості так і їх техніко-економічну складову. Одним з найбільш перспективних напрямків щодо імплементації методів порошкової металургії є виробництво деталей з металів та сплавів, які володіють низькою густиною [2]. Особливий технологічний інтерес для галузей авіації, машинобудування, медицини та електроніки знаходить магній.

Проте впровадження магнію у високотехнологічні галузі обмежується низькою проблем, пов'язаних із традиційними методами обробки, такими як лиття чи гаряче штампування [3]. Ці методи часто призводять до нерівномірності мікроструктури, утворення дефектів, таких як пори, і недостатньої корозійної стійкості. Під час використання порошкових технологій виникають ряд інших труднощів пов'язаних як з пресуванням так і подальшим спіканням [4].

Першою проблемою є отримання деталей складної форми з порошків магнію пресуванням. Відомо, що під час одновісного пресування порошкова пресовка обмежена бічними поверхнями матриці та площиною руху верхнього та нижнього пуансонів. Це не дозволяє отримувати вироби з високою рівномірністю щільності по висоті пресовки та складною геометрією.

Другою проблемою отримання виробів з магнію є подальші процеси спікання, які значно лімітовані наявною окисною плівкою на поверхні [5-6]. Відповідно під час отримання виробів потрібно застосовувати технології та методи обробки за яких оксидна плівка буде зруйнована чи розчинена.

Потенційною технологією отримання деталей складної форми з магнію є інжекційне формування порошків, проте дана технологія потребує ретельного підбору компонентів зв'язки, які під час каталітичного видалення можуть реагувати з магнієм та лімітувати процеси спікання [7]. Вирішенням даної проблеми може бути використання технології холодного ізостатичного пресування (ХІП). Формування за технологією ХІП передбачає ущільнення порошку в еластичних оболонках прикладанням тиску через рідину чи газ [8-9]. За рахунок всестороннього стиску можливо не тільки отримати високу рівномірність щільності сплавів, але й досягнути часткового

© В. І. Шеремет, М. Я. Втерковський, С. Ю. Тесля, Т. О. Соловійова

руйнування оксидів на поверхні, що є особливо корисним під час роботи з матеріалами, які мають підвищену спорідненість до кисню.

Незважаючи на широкий потенціал технології, в наукових публікаціях на дану тему відсутні дані щодо аналізу процесів формування контактів між частинами, виявлення механізмів, які лежать в основі компактування та подальшого спікання. Встановлення впливу технологічних параметрів формування на кінцеві показники щільності та мікроструктури має важливе прикладне та фундаментальне значення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Отримання виробів з порошків традиційно асоціюється з класичними підходами порошкової металургії – пресування та спікання. Burke P. та ін. [10] показали зміну кінетики спікання порошків магнію під час ущільнення методами одновісного пресування та спікання та під дією ХІП. Показано, що за рахунок ХІП може відбуватись часткове руйнування шарів оксидів, що збільшує реакційну площу між частинками порошків та інтенсифікує процеси дифузії. Після обробки ХІП вдалось підвищити твердість спечених сплавів, однак зміни капілярно-пористого стану матеріалу не встановлено. В роботі [11] показано високу ефективність використання методу ХІП для формування нанокмполімерів на основі магнію зміцнених частинами карбиду кремнію. Порівняно з іншими методами формування вдається знизити рівень внутрішнього тертя та гомогенізувати мікроструктуру. У зв'язку з гексагональною ґраткою магнію під час прикладання всестороннього стиску можуть проходити ефекти мартенситного перетворення, що може додатково змінювати властивості сплавів магнію. Особливо перспективною прикладання деформації є в області біоматеріалів. Відомо, що формування тексти деформації, а особливо орієнтація площин {0001} відносно поверхні матеріалу може змінювати щільність корозійного струму.

Наприклад, орієнтація площин, перпендикулярно до поверхні, забезпечує кращу корозійну стійкість. Також деформація дозволяє покращити рівномірність формування пасиваційного шару на поверхні сплавів, тим самим знижуючи швидкість деградації та виділення водню [12, 13]. Не зважаючи на перспективність технології отримання виробів за допомогою ХІП в літературних джерелах відсутні загальні засади процесу формування механічного контакту в умовах всестороннього стиску, та не передбачені технологічні рекомендації щодо оптимальних режимів отримання виробів з порошків магнію та його сплавів.

Постановка проблеми дослідження. Виходячи з викладеного, встановлення основних засад процесу холодного ізостатичного пресування сплавів магнію є актуальним завданням.

Мета роботи полягає в дослідженні процесів формування порошкових сплавів магнію методом холодного ізостатичного пресування з подальшим спіканням, та встановленні механізмів які лежать в основі утворення механічного хімічного контакту між частинками.

Викладення основного матеріалу. З метою отримання комплексного сплаву магнію було взято вихідні порошки сплавів WE43, ZK61 (середній розмір частинок 40 мкм) отриманих розпилюванням та механічно подрібненого чистого магнію розміром до 300 мкм. Гомогенну суміш сплаву Mg-20 мас.%WE43-10 мас.% ZK61 отримували методом кавітаційного змішування в спирті.

Після змішування порошки піддавались сушці у вакуумній сушильній шафі за 70 °C протягом 1 год. Дослідження процесів формування сплаву магнію Mg-20мас.%WE43-10мас.%ZK61 проводили методом холодного ізостатичного формування з використанням мокрого чохла за тисків 100, 200, 300, 400 МПа. З метою порівняння даних отриманих по технології ХІП було додатково проведено формування одновісним пресуванням в закритих прес формах. Сформовані сплави піддавались спіканню за температури 600 °C, в середовищі аргону протягом 2 годин.

Дані щодо зміни щільності від тиску пресування після пресування та спікання наведено на рисунку 1.

Щільність пресовок порошкової композиції Mg-20мас.%WE43-10мас.%ZK61 збільшується зі збільшенням тиску пресування під час використання як для одновісного пресування, так і ХІП (рис. 1).

При наборі тиску пресування в 100 МПа, в обох випадка ущільнення, переважно, досягається за рахунок переміщення та проковзування частинок відносно одна одної. На цій стадії пластична деформація частинок відіграє незначну роль в ущільненні [14]. Перебіг процесів ущільнення на даному етапі переважно залежить від специфіки типу пресування. Під час використання ХІП відбувається всестороннє стиснення порошкового тіла до отримання заданої щільності, за рахунок такого типу прикладання тиску вдається отримати високу рівномірність розподілу щільності по висоті пресовки. На відміну від ХІП під час ущільнення порошків одновісним пресуванням значна частина зусилля йде на подолання зовнішнього тертя між стінками матриці, що призводить до не

рівномірного переміщення порошку в порожнині прес форми і як наслідок утворення областей перепресування.

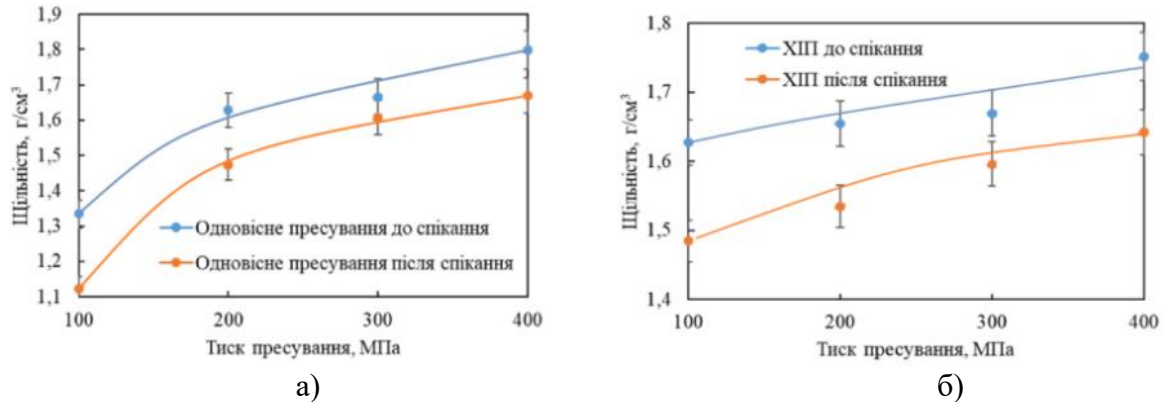


Рис. 1. Залежність щільності від тиску пресування та методу пресування зразків до та після спікання: а) – одноосне пресування; б) – холодне ізостатичне пресування (ХІП)

Відповідно стабілізація щільності пресовок під час отримання методом ХІП вдається досягнути вже за тиску 200 МПа порівняно з одноосним пресуванням (рис. 1, а, б). Під час одноосного пресування спостерігається класична зміна відносної щільності від тиску пресування, з переходом від переміщення частини з більш щільним укладанням, до обтиснення компактного тіла. (рис. 1, а). При подальшому наборі тиску (200 МПа, 300 МПа та 400 МПа) пластична деформація і явища, за рахунок яких вона реалізується: дислокаційне ковзання, двійникування та релаксація напружень в одному зерні в дислокаційну систему сусідніх, відіграють привілейовану роль в ущільненні. Як показано в низці робіт [15] при пластичній деформації починаючи з тиску в 100 МПа в зернах WE43 реалізується дислокаційний механізм деформації з переважаючим задіянням базисної системи ковзання дислокацій. При цьому, в окремих зернах, спостерігалось утворення двійників.

Також зазначається, що для зародження двійників з низьким фактором Шмідта (MSF) необхідною умовою є задіяння призматичних систем ковзання. Тобто, для утворення двійників обох груп в зернах мають бути задіяні як базисна так і призматичні системи ковзання. Відомо [16], що при тисках більших 200 МПа в Mg активізуються обидві системи ковзання. Але важливим фактором при цьому є кристалографічна орієнтація зерен по відношенню до прикладеного зусилля.

Ймовірно, що при ХІП, за рахунок дії усестороннього тиску більше зерен піддаються пластичній деформації, оскільки більше зерен розташовані кристалографічно «вигідно» до прикладеного зусилля, в частинках WE43 утворюються більше твінів (двійників), які вибудовують окремі границі всередині кожної частинки. Кожна границя двійника є бар'єром для проходження дислокації, більш того, вже на етапі пресування 300 МПа дислокаційні системи окремих зерен можуть вичерпати потенціал ковзання, що призводить до їх деформаційного зміцнення.

Таким чином, менша щільність зразків отриманих ХІП (рис. 1, б) за прикладених зусиль пресування від 200 МПа в порівнянні з одноосно спресованими за тих самих тисків зразками, пояснюється меншим впливом анізотропії масиву зерен, які деформуються. В більшій кількості зерен водночас задіяні і базисна, і призматична системи ковзання, в більшій кількості зерен утворюються двійники, що ускладнює дислокаційний механізм пластичної деформації компакту, що усестороннє стискається.

Дослідження вплив тиску пресування ХІП та одноосного пресування на усадку після спікання наведено на рисунку 2. Оскільки під час використання низького тиску в 100 МПа в основі ущільнення лежать процеси структурної деформації, які зберігають високу пористість забезпечити утворення хімічних контактів між частинками порошоків не вдається. Висока пористість може сприяти дії механізмам випаровування та конденсації, проте через низький парціальний тиск парів магнію, його конденсація не відбувається на увігнутих поверхнях між частинами порошоків.

Підвищення тиску пресування до 200 та 300 МПа призводить збільшення щільності в зразках, закриття відкритих пор та, як наслідок, стримування та унеможливлення процесів масопереносу через газову фазу [17]. З підвищенням тиску пресування до 400 МПа пресовки отримані ХІП та одноосним пресуванням є найбільш щільними (рис. 2), збільшується площа та кількість контактів між сусідніми частинками.

В зразках, які піддавали одновісному та холодному ізостатичному пресуванню в 400 МПа питома площа поверхні частинок, яка не має контакту з сусідніми частинками зменшується, що може задіювати новий механізм масопереносу, а саме зернограничної дифузії. Вірогідно, змінюється вміст елементів в різних точках об'єму зразків, виникає концентраційний градієнт від об'єму до поверхні зразків, що є рушієм процесу дифузії. Об'ємна усадка при спіканні більша у зразків отриманих одновісним пресуванням при усіх тисках пресування (рис. 2).

Ймовірним поясненням меншого показника усадки у ХІП зразків є фактор домінуючого механізму дифузії. При тисках 100 та 200 МПа зразки, які було отримано ХІП, мають менший показник пористості (рис. 1, а), а отже більшу площу контакту сусідніх частинок. Збільшення кількості та площі поверхонь дотику сусідніх частинок є рушієм дифузійних процесів, які відбуваються при спіканні. Твердотільна дифузія разом зі зміною концентрацій елементів по об'єму пришвидшує процес спікання, а отже й збільшує відсоток усадки. В зразках, які отримані одноосовим пресуванням до тиску 300 МПа пористість є суттєвою (рис. 1, б) і, відповідно, питома площа контакту між сусідніми частинками меншою в порівнянні з зразками отриманими холодним ізостатичним пресуванням, дифузійні процеси масо переносу тверде тіло – тверде тіло лімітовані кількістю та площею контактів між частинками, усадка є менш помітною.

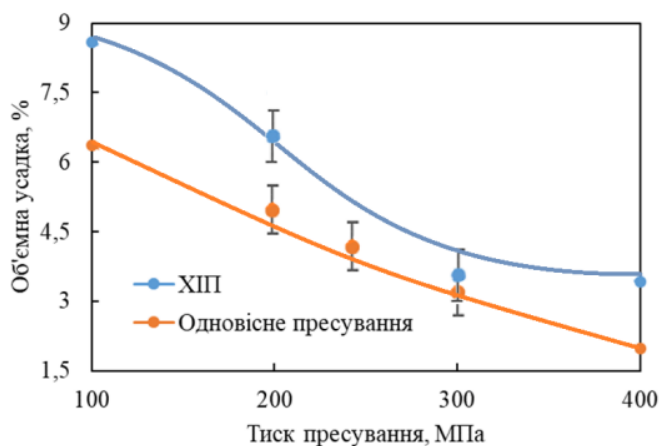


Рис. 2. Об'ємна усадка при спіканні зразків отриманих при різних тисках одновісним пресуванням та холодним ізостатичним пресуванням

Мікроструктура сплавів отриманих після спікання наведено на рисунку 3. Сплав отриманий за одновісного пресування має розвинену систему границь зерен, що зумовлено відсутністю якісного контакту між двома сусідніми частинками. В умовах ХІП за рахунок наявності багатьох векторів дії тиску, вдається ущільнити матеріал під дією різних систем ковзання, що дозволяє забезпечити високу ступінь механічного контакту та як наслідок високої щільності після спікання.

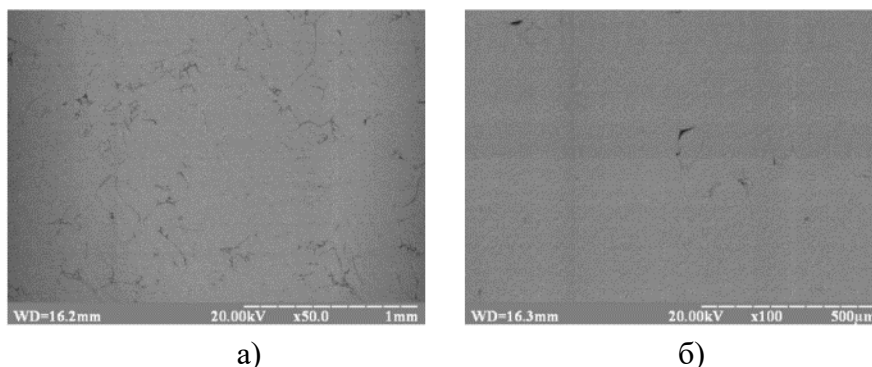


Рис. 3. Мікроструктура сплавів Mg-20мас.%WE43-10мас.%ZK61 отриманих (а) одновісним пресуванням та ХІП (б) за 300 МПа

Висновки

Показано, що під час отримання порошкових сплавів магнію перспективною технологією ущільнення є метод холодного ізостатичного пресування в еластичних оболонках. Показано, що ущільнення сплаву Mg-20 мас. %-WE43-10 мас. % ZK61 відбувається за рахунок активації систем ковзання під дією ізостатичного тиску з наступною пластичною деформацією. Встановлено, що основна деформація в зернах реалізується за рахунок дислокаційного механізму з переважним

задіянням базисної системи ковзання дислокацій. Встановлено, що на відміну від одностороннього пресування методи ХП дозволяють отримати після спікання високу ступінь хімічного контакту між частинами та однорідність розподілу щільності по висоті пресовки.

Робота виконана за фінансової підтримки Міністерства освіти та науки України (проект № 0123U100934).

Література

1. Степанчук А. М. Теорія і технологія пресування порошкових матеріалів. Навчальний посібник / А.М. Степанчук. – Київ : Центр учбової літератури, 2016. – 336 с.
2. Bettles, C. J. Magnesium Powder Metallurgy: Process and Materials Opportunities /C. J. Bettles // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2008. – Vol. 17, Is. 3, P. 297–301.
3. Luo A. A. Magnesium casting technology for structural applications / A. A. Luo // Journal of Magnesium and Alloys. – 2013. – Vol. 1, No. 1. P. 2–22.
4. Mechanical and structural properties of bulk magnesium materials prepared via spark plasma sintering / Matěj Březina a , Michaela Hasoňová a , Stanislava Fintová [et al.] // Materials Today Communications. – 2021. – Vol. 28. – P. 102569.
5. Wolff M. Sintering of Magnesium / Martin Wolff, Thomas Ebel, Michael Dahms // Advanced Engineering Materials. – 2010. – Vol. 12, no. 9. – P. 829–836.
6. Sintering Fundamentals of Magnesium Powders / P. Burke,G.J. Kipouros,D. Fancelli &V. Laverdiere // Canadian Metallurgical Quarterly. – 2009. – Vol. 48, No 2. – P. 123–132. .
7. The Activation of Magnesium Sintering by Zinc Addition / S. Teslia, M. Kovalenko, M. Teslia [et al.] // Alloys. – Vol. 3, Is. 3. – P. 178-189.
8. Akimov G. Ya. Cold isostatic pressing as a method for fabricating ceramic products with high physicomechanical properties / G. Ya. Akimov // Refractories and Industrial Ceramics –1998. – Vol. 39. – P. 283 – 287.
9. Yield and Densification Behavior of Rapidly Solidified Magnesium Powders / S. C. Yoon, E. J. Kwak, T. S. Kim [et al.] // Materials Transactions. – 2008. – Vol. 49. – P. 967–971.
10. Sintering Fundamentals of Magnesium Powders / P. Burke, G. J. Kipouros, D. Fancelli, V. Laverdiere // Canadian Metallurgical Quarterly. – 2009. – Vol. 48, Is. 2.– P. 123–132.
11. Computational analysis and experimental calibration of cold isostatic compaction of Mg-SiC nanocomposite powders / F. Rahimi Mehr [et al.] // Materials Today Communications. – 2021. –Vol. 27. – P. 102321.
12. Corrosion behavior of severely plastically deformed Mg and Mg alloys / Ahmad Bahmani, Mehrab Lotfpour, Milad Taghizadeh, Woo-Jin Kim // Journal of Magnesium and Alloys. – 2022. – Vol. 10, Is. 10. – P. 2607 – 2648.
13. Effects of Deformation Texture and Grain Size on Corrosion Behavior of Mg–3Al–1Zn Alloy Sheets / Da-Wei Li, Hui-Yuan Wang, Dong-Song Wei [et al.] // ACS Omega. – 2020. – Vol. 5, Is. 3. – P. 1448–1456.
14. Attia U. M. Cold-isostatic pressing of metal powders: a review of the technology and recent developments / Usama M. Attia // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. – 2021. – P. 1–24.
15. Jahedi M. Deformation and fracture mechanisms in WE43 magnesium-rare earth alloy fabricated by direct-chill casting and rolling / Mohammad Jahedi, Brandon A. McWilliams, Marko Knezevic // Materials Science and Engineering: A. – 2018. – Vol. 726. – P. 194–207.
16. Role of slip and {10-12} twin on the crystal plasticity in Mg-RE alloy during deformation process at room temperature / Yunwei Gui [et al.] // Journal of Materials Science & Technology. – 2021. – Vol. 80. – P. 279–296.
17. Гегузин Я.Е. Физика спекания / Я. Е. Гегузин. – М.: Наука, 1984. – 310 с.

Рецензент: Мініцький А. В., д. т. н., проф. КІП ім. Ігоря Сікорського, НН ІМЗ ім. Є. О. Патона, каф. ВТМ та ПМ

В.І. Осипенко, М.Р. Прусс

Черкаський державний технологічний університет

ВПЛИВ ВНТРИШНЬОЇ СТРУКТУРИ ТА РОЗМІРІВ ТИПОВИХ СОПЕЛ НА ПОЛЕ РІЗУЧОГО ТИСКУ АСИСТУЮЧОГО ГАЗУ ПРИ ГАЗОЛАЗЕРНОМУ РІЗАННІ

В роботі запропоновано обладнання та методика дослідження взаємодії між струменем асистуючого газу та поверхнею деталі. Дана взаємодія формує так званий ріжучий тиск який відіграє важливу роль в газолазерному різанні. Наведено результати експериментальних досліджень закономірностей впливу внутрішньої структури і розмірів сопел, манометричного тиску всередині сопла, величини зазору між торцем сопла та деталі на формування геометрії струменя та величини ріжучого тиску в довільному перетині струменя.

Ключові слова: газолазерне різання, ріжучий тиск, асистуючий газ, сопло, струмінь асистуючого газу, зазор.

V.I. Osypenko, M.R. Pruss

INFLUENCE OF THE INTERNAL STRUCTURE AND DIMENSIONS OF TYPICAL NOZZLES ON THE CUTTING PRESSURE FIELD OF THE ASSISTANT GAS IN GAS LASER CUTTING

This paper presents the developed equipment and methodology for studying the aerodynamic interaction between the assist gas jet and the surface of a workpiece. This interaction forms cutting pressure, which plays an important role in gas laser cutting technologies. Air and nitrogen were used as the assist gases. The results of a systematic set of experimental studies of the regularities of the influence of the internal structure and geometric dimensions of nozzles, gauge pressure inside the nozzle, the gap size between the nozzle tip and the workpiece on the formation of the jet geometry, and the cutting pressure in an arbitrary jet cross section are presented. The obtained data can serve as the basis for the efficient design of gas laser cutting processes for maximum productivity by accurately predicting the cutting pressure that the gas jet of the selected nozzle will create under specific technological conditions.

Key words: gas laser cutting, cutting pressure, assist gas, nozzle, assist gas jet, gap.

Постановка проблеми. Асистуючий газ відіграє центральну роль у технологіях газолазерного різання металів. Аеродинамічна взаємодія між струменем асистуючого газу і деталлю формує так званий ріжучий тиск, який в основному і обумовлює характер видалення розплаву з зони різання. Зрозуміло, що за будь якої потужності лазерного випромінювання, об'єми плавлення матеріалу не можуть перевищувати об'єми його видалення [1]. Відомо, що динаміка гальмування потоку асистуючого газу визначається тиском в системі подачі газу, внутрішньою структурою і розмірами сопла, величиною зазору між торцем сопла та деталлю і є ключовим фактором, який впливає на об'єми видаленого матеріалу і, відповідно, на швидкість і якість різання. Через важливість даного фактора існує багато робіт присвячених різним аспектам впливу асистуючого газу на процес газолазерного різання металів [1, 2, 3, 4].

В роботі [5] виконано цикл досліджень по встановленню ролі конструкції сопел у формуванні параметрів струменів асистуючого газу. Однак їх результати важко використовувати українським виробникам верстатів для газолазерного різання через велику номенклатуру сопел різної внутрішньої структури та розмірів, які пропонує насичений ринок. Тому багато дослідників відзначають, що потенціал сучасних потужних (6 кВт – 12 кВт) оптоволоконних лазерів далеко не завжди використовується в повній мірі через неефективне видалення розплавленого матеріалу струменем асистуючого газу [6]. Тому вкрай важливою є інформація про реальний ріжучий тиск в зоні обробки, яке створює сопло відомої внутрішньої структури та розмірів в конкретних технологічних умовах. Це дозволяє більш адекватно обирати як тип сопла так і параметри лазерного процесу при проектуванні ефективних технологій. Враховуючи сказане робота, представлена в даній статті, спрямована на ідентифікацію полів ріжучого тиску, як засади надійного, високоякісного і продуктивного різання з високим рівнем відтворюваності процесів на конкретній лазерній технологічній установці. При виконанні досліджень в якості асистуючих газів використовувалися повітря та азот.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ріжучий тиск на поверхні заготовки прямо обумовлений тиском гальмування потоку струменя, створюваного соплом конкретної внутрішньої структури та розмірів. Різниця даних параметрів навіть за однакового тиску на вході в сопло призводить до варіацій швидкості та діаметра потоку по довжині струменя. Додатковим фактором варіативності є утворення ударних хвиль, яке призводить до додаткових коливань ріжучого тиску на поверхні деталі в зоні обробки [7,8]. Дана варіативність безпосередньо впливає на швидкість

видалення утвореного розплаву і, як наслідок, на продуктивність і якість різання та відповідно погіршує рівень відтворюваності процесу.

В роботі (9 Miller, 1988) пропонується розраховувати відстань від торцю сопла до першого диску Маха за наступним емпіричним рівнянням:

$$\frac{x_m}{d} = 0,67 \sqrt{\frac{P_0}{P_a}} \quad (1)$$

де x_m – відстань від зрізу сопла до першого диску Маха;

d – вихідний діаметр сопла;

P_0 – повний манометричний тиск всередині сопла;

P_a – атмосферний тиск.

Точність наведеного рівняння є сумнівною через те, що воно не враховує теплофізичні параметри газу та того факту, що за реальних умов газолазерного різання струмів гальмується на поверхні деталі, тобто не є вільним. Є цілий ряд спроб розробки математичних моделей процесів газолазерного різання, але в результаті використаних спрощень і допущень вони недостатньо адекватно відтворюють реальні фізичні процеси [10,11]. Однак наведені матеріали дають чітке розуміння того, що зміни співвідношення P_0/P_a , внутрішньої структури та розмірів сопла, величини зазору між торцем сопла та поверхнею деталі призводять до варіативності в структурі струменя і, відповідно, в появі невизначеності значень величини ріжучого тиску асистуючого газу. Дана невизначеність знижує точність проєктування режимів високої продуктивності та погіршує рівень відтворюваності процесу навіть при незначних змінах даних параметрів.

Мета статті. Отримання точних експериментальних даних про параметри полів ріжучого тиску, що формуються соплами з відомими внутрішньою структурою та розмірами і здатні забезпечити ефективне видалення розплавленого матеріалу та, відповідно, підвищити швидкість і якість різання на вироблених в Україні сучасних промислових верстатах укомплектованих новими лазерними джерелами високої потужності.

Виклад основного матеріалу.

Обладнання, та методи дослідження. В роботі [12] авторами даної статті запропоновано обладнання і методика та виконано комплекс досліджень полів ріжучого тиску, які формувалися двома типами сопел різної внутрішньої структури. Однак при цьому використане обладнання дозволяло реєструвати лише середні значення тиску в зоні гальмування асистуючого газового струменя, що по суті є певним недоліком. З урахуванням цього було розроблено та реалізовано нову установку. Вона дозволяє з високою точністю локально реєструвати ріжучий тиск (тиск гальмування) вимірювальним перетворювачем тиску в зоні отвору діаметром 0.4 мм в металічному диску, що моделює заготовку. Дослідження виконувалися на експериментальному верстаті компанії «Арамис», провідного виробника лазерних технологічних установок в Україні. Основна інформація про верстат наведена в таблиці 1. 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 1 а).

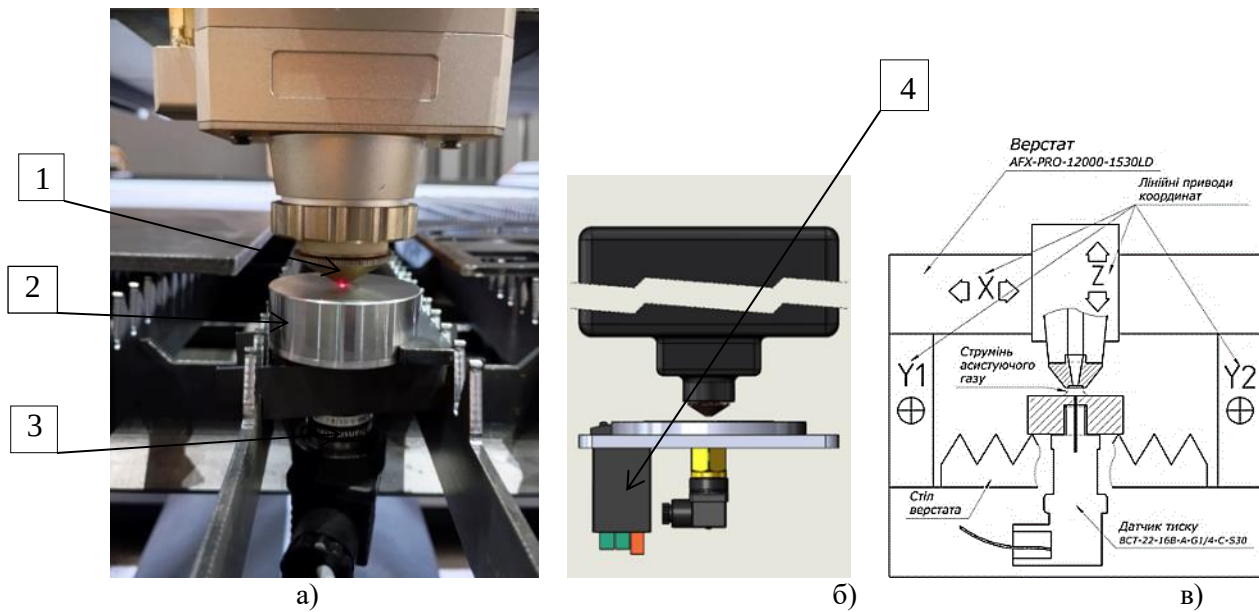
Табл. 1

Моделі основних систем верстата для проведення досліджень

Верстат	AFX-PRO-12000-1530LD
Модель лазера, діаметр оптоволока	MAX Photonics 12 kWt, оптоволокну 100 мкм
Модель оптичної головки, коліматор	BOCI BLT642, f 200 мм

На рис. 1, 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. Сканування дискового зонда вздовж вісей X та Y газового струменя виконувалося за рахунок покрокового зміщення сопла оптичної головки приводом відповідної координати верстата відносно центра приймального отвору (крок 0,2 мм).

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'єзорезистивний датчик тиску моделі BCT110 (рис. 2). Технічні характеристики датчика наведено в таблиці 2.



1 – сопло оптичної головки верстата; 2 – дисковий зонд; 3 – п'єзорезистивний датчик тиску моделі ВСТ110; 4 – контролер ЕРА100.

Рис. 1. Загальний вигляд дискового зонда з вимірювальним перетворювачем тиску (п'єзорезистивний 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)



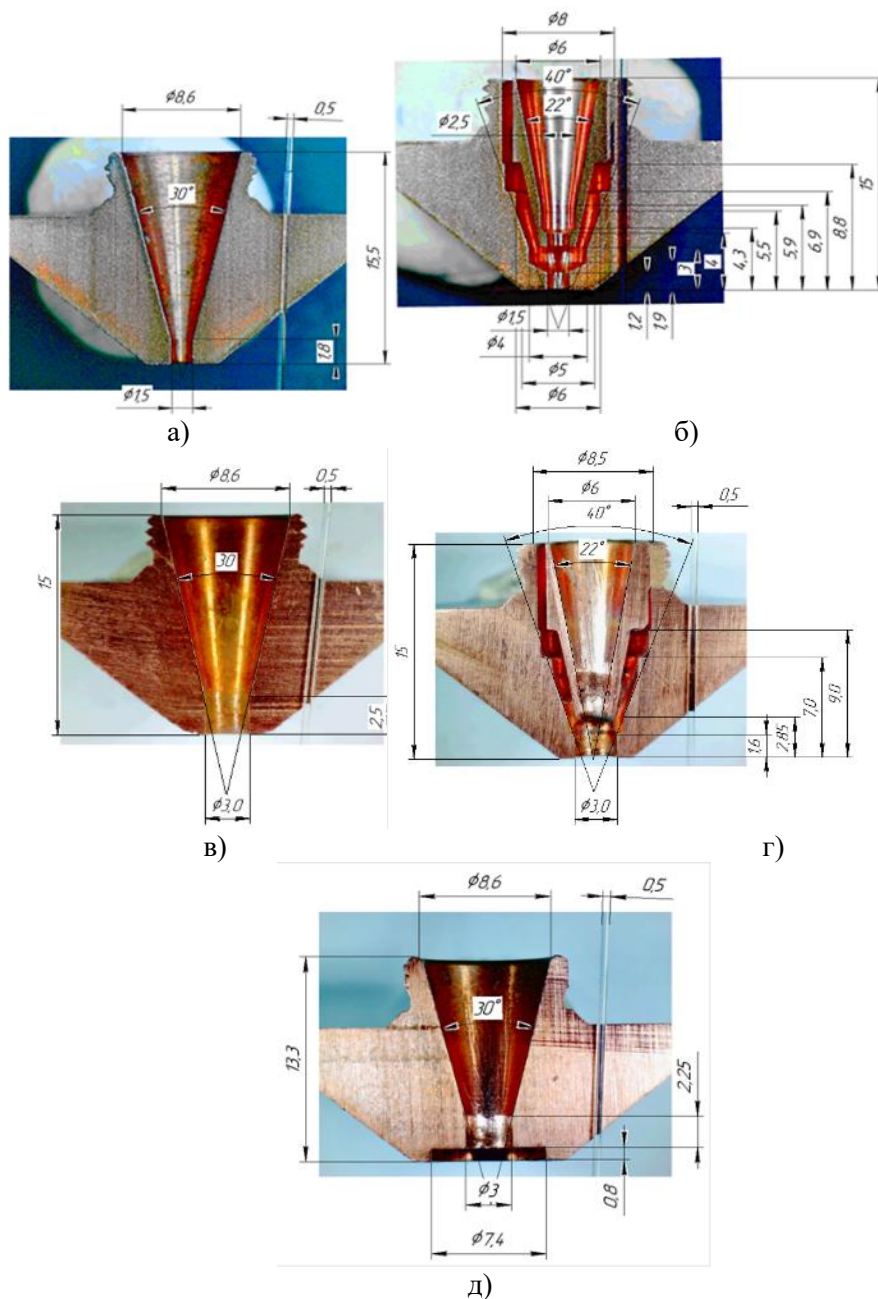
Рис. 2. Загальний вигляд п'єзорезистивного датчика тиску моделі ВСТ110 підключеного до контролера ЕРА100 та персонального комп'ютера

При проведенні досліджень використовувалися 5 типів найбільш вживаних у верстатах компанії «Арамис» сопел компанії Thermacut. Внутрішня структура та розміри сопел наведені на рис. 3. В якості асистуючих газів використовувалися повітря та азот. 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	-20С...- +85С



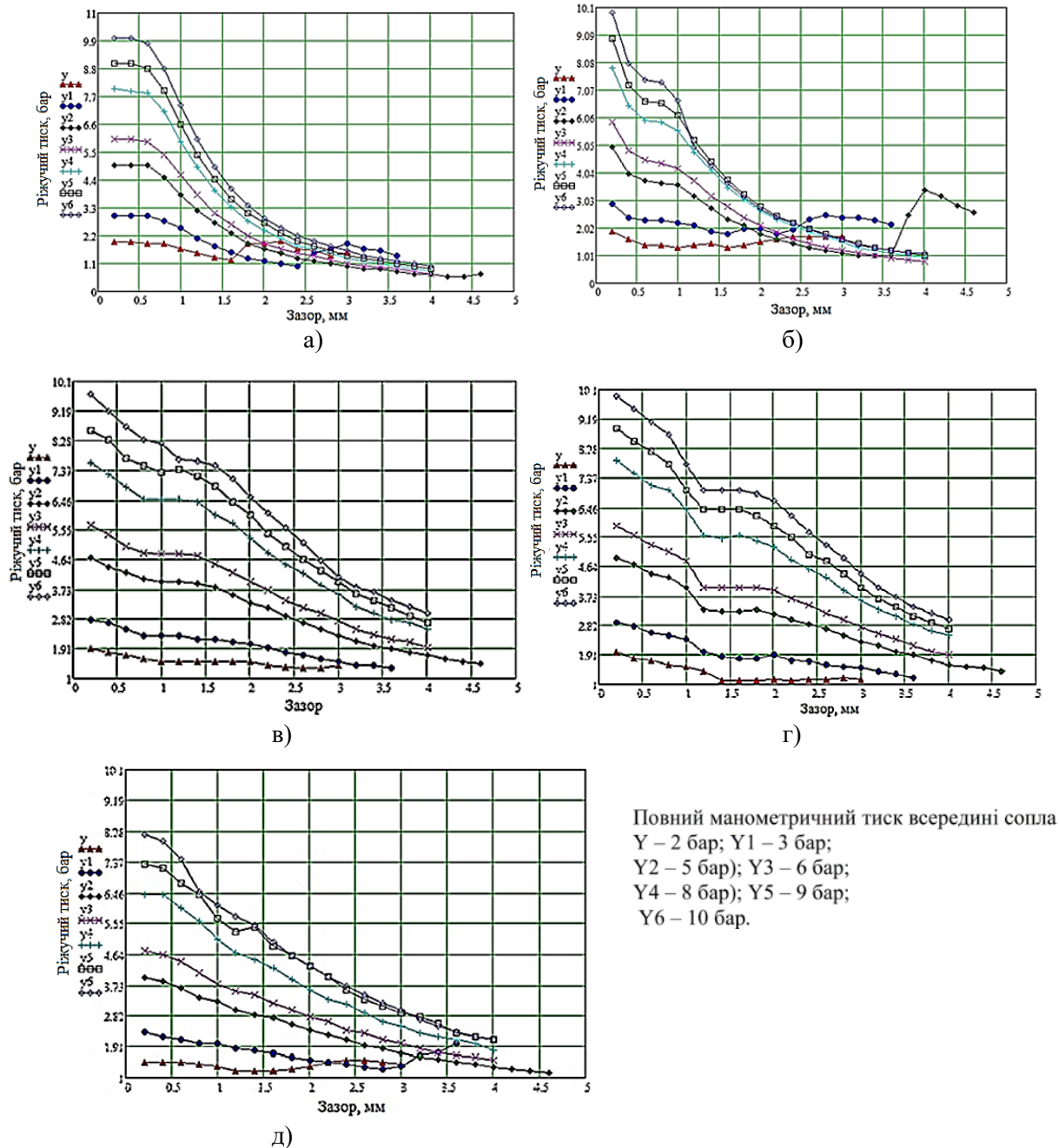
а – одноканальне з вихідним діаметром 1,5 мм; б – двоканальне з діаметром центрального отвору 1,5 мм; в – одноканальне з вихідним діаметром 3 мм; г – двоканальне з діаметром центрального отвору 3 мм; д – одноканальне з вихідним діаметром 3 мм та бустеризацією вихідного отвору.

Рис. 3. Внутрішня структура та розміри сопел компанії Thermacut, використаних в експериментах

Результати досліджень. Використовуючи розроблену установку було виконано комплекс експериментальних досліджень впливу внутрішньої структури і геометричних розмірів сопла (рис. 3), повного манометричного тиску всередині сопла та зазору між соплом та деталлю на ріжучий тиск на вісі струменя та розподіл тиску по його поперечному перетину. Детальний аналіз отриманих результатів дозволив встановити наступне.

Ріжучий тиск на вісі струменя. Відразу варто констатувати, що вже перші результати досліджень показали, що ріжучі тиски створювані струменями повітря і азоту за однакових вхідних умов практично відрізняються лише в межах похибки експерименту (їх вплив на сам процес плавлення та формування структури поверхневих шарів деталей в межах даного дослідження не розглядався). Це можливо пояснити близькими теплофізичними характеристиками обох газів (78,09 об'єму повітря складає азот). Тому, враховуючи мету роботи і вартість балонного азоту, було ухвалено рішення в подальших дослідженнях в якості асистуючого газу використовувати повітря,

поширюючи отримані результати і на використання азоту. Отримані графіки зміни ріжучого тиску по вісі струменя для всіх розглянутих типів сопел представлені на рис. 4. За використання одноканального та двоканального сопел з вихідним діаметром 1,5 мм при різанні на малих зазорах 0,5 мм – 1 мм (менші зазори як правило не використовуються через високий ризик пошкодження оптичної головки) одноканальне сопло за величиною ріжучого тиску у всьому діапазоні зміни повного манометричного тиску має очевидні переваги, які з тенденцією до зменшення зберігаються до зазору 2,5 мм (рис. 4, а, б).



а – одноканальне з вихідним діаметром 1.5 мм; б – двоканальне з діаметром центрального отвору 1.5 мм; в – одноканальне з вихідним діаметром 3 мм; г – двоканальне з діаметром центрального отвору 3 мм; д – одноканальне з вихідним діаметром 3 мм та бустеризацією вихідного отвору.

Рис. 4. Зміна ріжучого тиску по вісі струменя залежно від повного манометричного тиску всередині сопла та зазору між соплом і деталлю

Обидва типи сопла при зростанні зазорів мають зони відносно незмінних ріжучих тисків. Для одноканального це діапазон зазорів 0,2 мм – 0,6 мм, двоканального 0,6 мм – 1 мм. Зі зростанням зазору спостерігається чітка тенденція до нівелювання впливу повного манометричного тиску на ріжучий тиск на вісі струменя. Так для одноканального сопла при зміні повного манометричного

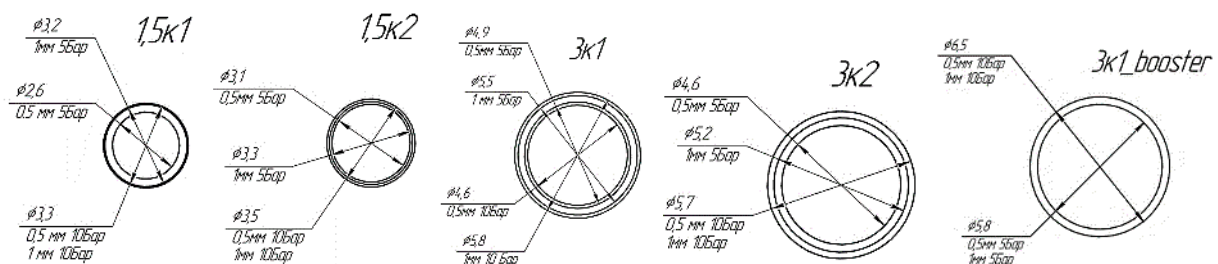
тиску від 10 бар до 8 бар різниця тисків різання практично нівелюється на зазорах ≥ 2.2 мм, для двоканального вже ≥ 1.4 мм. Одноканальне сопло в зоні малих робочих зазорів (0.5 мм – 1 мм) формує менші діаметри та кути розходження струменя порівняно з двоканальним (рис. 5, а, б). Таким чином результати експериментів показують, що двоканальне сопло наведеної структури та розмірів (рис. 3, б) не забезпечує виконання свого основного завдання – обмеження розширення струменя. Враховуючи суттєво вищу вартість таких сопел порівняно з одноканальними, доцільність їх застосування при використанні в якості асистуючих газів повітря та азоту є вкрай сумнівною.

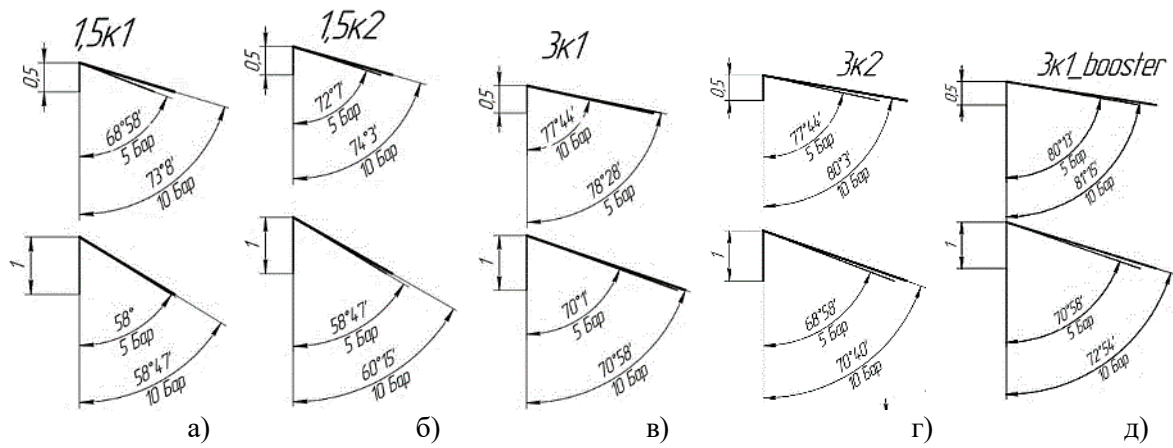
Одноканальне та двоканальне сопла з вихідним діаметром 3 мм (рис. 4, в, г) на зазорах до 0.8 мм формують дещо менші ріжучі тиски в порівнянні з соплами з вихідним діаметром 1.5 мм. Зі зростанням зазорів перевага в формуванні ріжучих тисків переходить до сопел з вихідним діаметром 3 мм. Так за повного манометричного тиску 10 бар одноканальне сопло з вихідним діаметром 1.5 мм на зазорі 1 мм формує ріжучий тиск 7.4 бар, а сопло з вихідним діаметром 3 мм – 8.28 бар. Це очевидно обумовлено тим, що збільшені вихідні діаметри при зростанні зазорів від 0.8 мм забезпечують значно менші як швидкість падіння ріжучого тиску так і рівень нівелювання впливу повного манометричного тиску всередині сопла. Як і в попередньому випадку сопла з вихідним діаметром 3 мм при зростанні зазорів мають зони відносно незмінних ріжучих тисків.

Для одноканального це діапазон зазорів 1 мм – 1.4 мм, двоканального 1.2 мм – 1.8 мм. В цілому ці сопла з різною внутрішньою структурою та однаковим вихідним діаметром виявили достатньо близькі характеристики як за параметрами формування ріжучого тиску, так і діаметрів та кутів розходження струменя (рис. 5, в, г). Це знову ставить питання про доцільність застосування дорогих двоканальних сопел в технологічних умовах різання, що близькі до умов проведення експериментів.

Результати отримані за використання в експериментах одноканального сопла з вихідним діаметром 3 мм та бустеризацією вихідного отвору (рис. 3, д) наведені на рис. 4, д. Внутрішня структура бустеризованого сопла відрізняється від типового одноканального (рис. 3, г) наявністю в торці кільцевої канавки (так званого бустера) діаметром 7.4 мм та глибиною 0.8 мм. В цілому, як видно з графіків, наявність бустера призводить до зниження ріжучих тисків практично у всьому досліджуваному діапазоні. Тобто з точки зору ефективності видалення розплаву з зони різання тиском асистуючого газу наявність бустера лише погіршує ситуацію. Однак їх використання саме в установках укомплектованих потужними оптоволоконними лазерами (як правило 10 кВт – 12 кВт) може бути пояснено термодинамікою процесу. Наявність бустера призводить до збільшення площ контакту асистуючого газу з поверхнями сопла та матеріалу деталі безпосередньо в зоні різання, що дозволяє покращувати їх охолодження і тим самим може впливати як на ресурс сопла так і на якість різання.

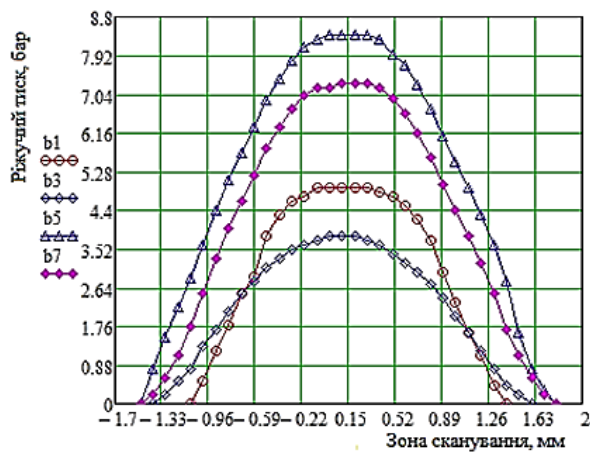
На рис. 6 представлені результати сканування поля ріжучого тиску по поперечному перетину струменя на зазорах 0.5 мм та 1 мм за повного манометричного тиску всередині сопла 5 бар та 10 бар. Різниця результатів сканування вздовж вісей X та Y знаходилися в межах похибки експерименту, тому на рис. 6 наведено графіки розподілу тиску вздовж вісі Y. Це є додатковим підтвердженням високої точності виставлення співвісності центральних отворів сопел та приймального отвору дискового зонда і, відповідно, адекватності отриманих результатів. Ріжучий тиск в центрі струменя (діаметр приймального отвору дискового зонда обрано з міркувань близькості до середньої величини ширини різку ≈ 0.4 мм) в основному обумовлює характер видалення розплаву з зони різання і відповідно суттєво впливає на максимально можливу продуктивність різання. Діаметр струменя і характер розподілу тиску по його поперечному перетину є факторами, що впливають на винесення тепла з зони різання і тим самим можуть впливати на термонапруги в матеріалі деталі, шорсткість отриманих поверхонь, структуру та глибину зони термічного впливу і відповідно на якість технології.



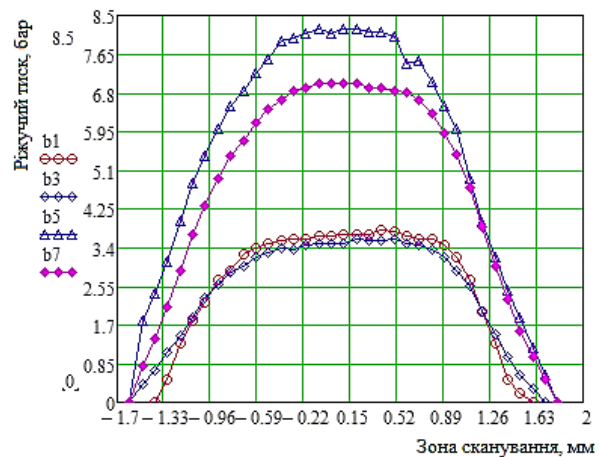


а – одноканальне з вихідним діаметром 1.5 мм; б – двоканальне з діаметром центрального отвору 1.5 мм; в – одноканальне з вихідним діаметром 3 мм; г – двоканальне з діаметром центрального отвору 3 мм.

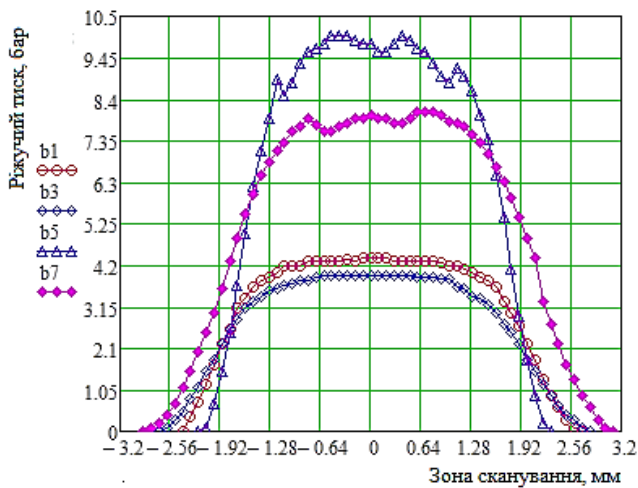
Рис. 5. Результати розрахунків діаметрів та кутів розходження струменів залежно від повного манометричного тиску всередині сопла (5 бар, 10 бар) та зазору між соплом і деталлю (0.5 мм, 1 мм)



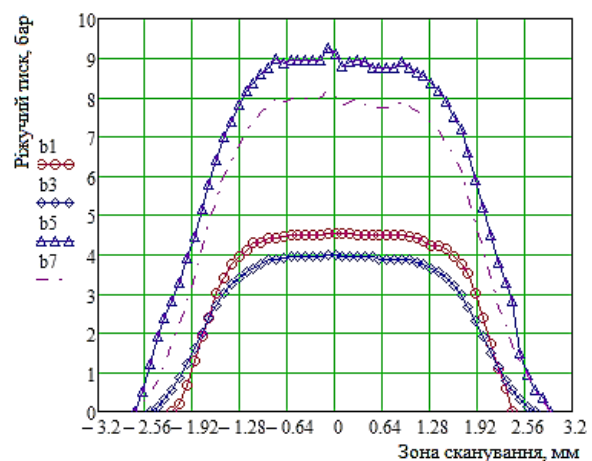
а)



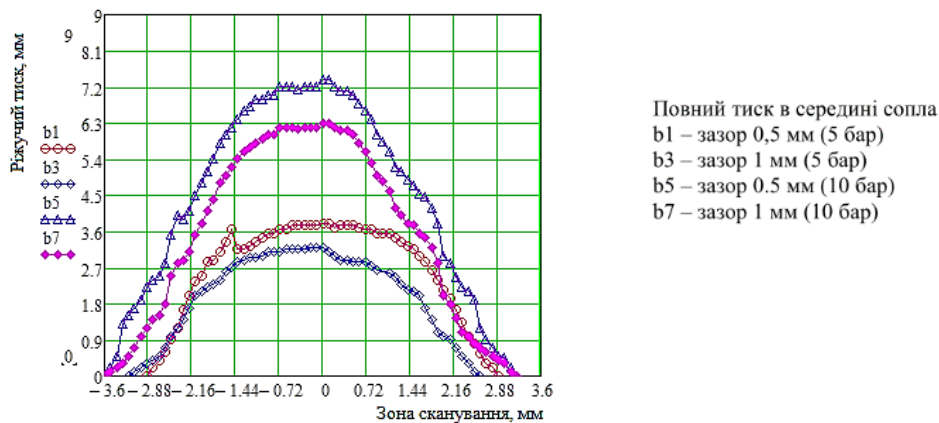
б)



в)



г)



д)

а – одноканальне з вихідним діаметром 1.5 мм; б – двоканальне з діаметром центрального отвору 1.5 мм; в – одноканальне з вихідним діаметром 3 мм; г – двоканальне з діаметром центрального отвору 3 мм; д – одноканальне з вихідним діаметром 3 мм та бустеризацією вихідного отвору.

Рис. 6. Результати сканування розподілу поля тиску в зоні гальмування струменя

Висновки.

1. Запропоновано конструкцію зонда та методику для локальної високоточної реєстрації величини ріжучого тиску утвореного при гальмуванні струменя асистуючого газу сформованого соплом оптичної головки на поверхні деталі, в будь-якій точці перетину струменя за технологічних умов газолазерного різання.

2. В результаті проведеного комплексу експериментальних досліджень вперше отримані точні чисельні дані про локальні значення величин ріжучого тиску, які формуються найбільш масовими соплами компанії Thermacut в зоні різання. Отриманий масив експериментальних даних, дозволив виявити закономірності впливу внутрішньої структури та розмірів сопла, манометричного тиску всередині сопла, величини зазору між соплом деталлю на геометрію сформованого струменя асистуючого газу (повітря і азот) та величини ріжучого тиску в будь-якому його перетині при гальмуванні на поверхні деталі.

3. На практиці використання отриманих результатів дозволяє зробити більш адекватним та ефективним проектування процесів газолазерного різання максимальної продуктивності, за рахунок точного прогнозування величини ріжучого тиску, який створить газовий струмінь обраного сопла в конкретних технологічних умовах.

4. В більш широкому сенсі застосування розробленого обладнання і методики дозволяє відносно просто отримати інформацію про ріжучий тиск створюваний довільним типом сопла, яким комплектується верстат за тих чи інших технологічних умов (отримати газодинамічний «паспорт» сопла). Відповідно створюється умови для більш надійного забезпечення продуктивного високоякісного різання та підвищення рівня відтворюваності процесу.

Список використаних джерел:

1. Halm, U., Nießen, M., & Schulz, W. (2021). Simulation of melt film dynamics in laser fusion cutting using a boundary layer approximation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 168, 120837.
2. Darwish, M., Orazi, L., & Angeli, D. (2019). Simulation and analysis of the jet flow patterns from supersonic nozzles of laser cutting using OpenFOAM. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102, 3229-3242.
3. Zhang, Z., & Gogos, G. (2004). Theory of shock wave propagation during laser ablation. *Physical Review B*, 69(23), 235403.
4. Chen, K., Yao, Y. L., & Modi, V. (2001). Gas dynamic effects on laser cut quality. *Journal of manufacturing processes*, 3(1), 38-49.
5. Fieret, J., Terry, M. J., & Ward, B. A. (1987, September). Invited Paper Overview Of Flow Dynamics In Gas-Assisted Laser Cutting. In *High Power Lasers: Sources, Laser-Material Interactions, High Excitations, and Fast Dynamics* (Vol. 801, pp. 243-250). SPIE.
6. 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.

© В.І. Осипенко, М.Р. Прусс

- Wen P, Zhang C, Yuan Y, Fan X (2016) Evaluation and optimal design of supersonic nozzle for laser-assisted oxygen cutting of thick steel sections. *Int J Adv Manuf Technol* 86(5-8):1243- 1251.
7. Borkmann, M., & Mahrle, A. (2021). Numerical analysis of the primary gas boundary layer flow structure in laser fusion cutting in context to the striation characteristics of cut edges. *Fluids*, 7(1), 17.
8. Zhou, Y., Kong, J., & Zhang, J. (2016). Study on the role of supersonic nozzle in fiber laser cutting of stainless steel. *Materials Sciences and Applications*, 8(1), 85-93.
9. Miller, D. R. (1988). Free jet sources. In *Atomic and Molecular Beam Methods* (ed. G. Scoles), (Vol. I, pp. 14–53). Oxford University Press.
10. Asproulis I (2014) RANS modelling for compressible turbulent flows involving shock wave boundary layer interactions. Master's thesis, University of Manchester.
11. Yu N, Jourdain R, Gourma M, Shore P (2016) Analysis of DeLaval nozzle designs employed for plasma figuring of surfaces. *Int J Adv Manuf Technol* 87(1-4):735-745.
12. V. I. Osypenko, O. P. Plakhotnyi, S. P. Serediuk, M. R. Pruss, O. V. Timchenko, (2023) The influence patterns of nozzle design and technological parameters of gas-assisted laser cutting on the stagnant pressure of assisting gas. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, 28/3, 156-167. <http://vtn.chdtu.edu.ua/article/view/288972>

В.І. Осипенко, Л.М. Мізнік, Л. Д. Мисник

Черкаський державний технологічний університет

ПОШУК РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОФІЛЮ РІЗАЛЬНОГО КРАЮ НОЖА ПОДРІБНЮВАЧА ПЛАСТИЧНО В'ЯЗКИХ МАТЕРІАЛІВ

Стаття присвячена дослідженню процесу різання пластично в'язких матеріалів та пошуку профілю різального краю ножа, який задовольнятиме поставленим вимогам різання і забезпечить ефективність та зменшення витрат енергії під час процесу різання. Розраховано залежність між робочим і конструктивним кутами загострення ножа при ковзанні. Визначено раціональний профіль різального краю ножа, який дозволяє зменшити кінематичний кут загострення відносно конструктивного, що забезпечує зменшення опору матеріалу та скорочення витрат енергії.

Ключові слова: процес різання, різальне обладнання, ножі подрібнювачі, швидкість різання, кут загострення, пластично в'язкі матеріали, профіль різального краю ножа.

V.I. Osypenko, L.M. Miznyk, L. D. Mysnyk

SEARCH OF THE RATIONAL PROFILE OF THE CUTTING EDGE OF THE KNIFE OF THE CUTTER OF PLASTIC VISCOUS MATERIALS

The article is dedicated to the study of the plastically sticky stuff cutting process and search of the profile for a cutting edge to comply with all the technical demands and supply efficacy and reduction of energy while cutting process. The dependence on a working and a constructive angle of the knife sharpening while sliding is calculated. There was calculated the appropriate profile of the cutting edge of the knife that supplies the reduce of the working angle of sharpening to constructive one. This provides the reducing strength of materials and energy consumption.

Key words: cutting process, cutting machine, choppers, cutting speed, sharpening angle, plastically sticky stuff, profile of the cutting edge of the knife.

Formulation of the problem. Cutting is one of the basic technological processes in food production. Look, quality and yield of the finished product depends specifically on this process. A variety of products are cut, both homogeneous and those with a complex multi-layered structure; viscous, plastic, hard and brittle materials; semi-finished products and finished products. The cutting process for each case has many differences. The main working body of cutting machines are knives [1]. They can be various: rotary, cylindrical, conical; round and disk, which are used mainly for cutting plastic and soft materials; flat, tape, which are working as a rule, according to the principle of pressure cutting or scissors; ribbon knives for cutting bread and other flour products while hot; sickle-shaped knives, which are used primarily for transverse cutting of bundle-like materials and for chopping fish, meat, vegetables during processing, as well as cutting wire (string), which in terms of cutting quality corresponds to knives with a blunt blade. In cutting equipment, plate and band knives with a serrated, wave-shaped cutting edge are most often used as working organs [2]. An important indicator of the process of grinding food raw materials is energy consumption during cutting [3]. Efficiency and energy consumption during the cutting process are directly affected by such a parameter of the chopper knife as the sharpening angle, which depends on the geometry of the blade, and therefore it is advisable to conduct research on finding the profile of the cutting edge of the knife, which will satisfy the cutting requirements, in particular, plastically viscous materials.

Analysis of recent research and publications. The analysis of domestic and foreign literature publications showed that there is enough material and research on finding the profile of the cutting edge of a knife and cutting modes of food products (confectionery, meat, vegetables, fish) [6] and dough, bakery products [7] at the appropriate equipment. Works [5], [8] research the movement regimes of the knife blade on a multilayer material. During the research of the cutting process it was established that the reduction of cutting forces is affected by the reduction of friction due to the high speed of sliding and up to 60% of the total energy is spent. In work [4] the impact of the power of the cutting process on the angle of inclination of the saws and the sharpening angles of the knife blade was studied. It was established that when tilting sawmills from 15° to 20° is optimal. In work [8], the process of hydrojet water-polymer processing of food products by cutting was investigated. The presented results made it possible to create equipment for universal water-polymer cutting in 3D mode. Having conducted an analysis of literary sources on the research of cutting modes of food products, we can conclude that along with traditional cutting methods, such methods as vibration cutting and water-polymer jet cutting are gaining popularity.

The goal of the work. The most important working body of cutting machines are chopper knives. They are used for grinding plastically viscous materials, dividing them into pieces, cubes, etc., or giving them a specific shape. The main parameter of the chopper knife that affects energy consumption is the sharpening angle, which is characterized by the geometry of the blade. The presented research is devoted to the search for the rational profile of the cutting edge of the knife of the shredder of plastically viscous materials.

The main research material. When grinding plastically viscous materials that contain connective tissue, up to 90-95% of the total cutting costs are accompanied by compression, shear, extrusion, mixing, friction, heating and other phenomena which are not directly related to the cutting process. The angle of sharpening the knife directly affects energy consumption. When cutting fibrous and plastic materials, it is better to choose the minimum sharpening angle, which ensures a decrease in material resistance and a decrease in energy consumption.

With a certain constructive angle of sharpening, the direct effect on the material is the kinematic angle of sharpening, which changes depending on the profile of the cutting edge and its position relative to the material. At the same time, sliding or pulling cutting occurs at a speed v_k , directed along this edge, at a feed speed v_n , which is directed perpendicular to the cutting edge (Figure 1).

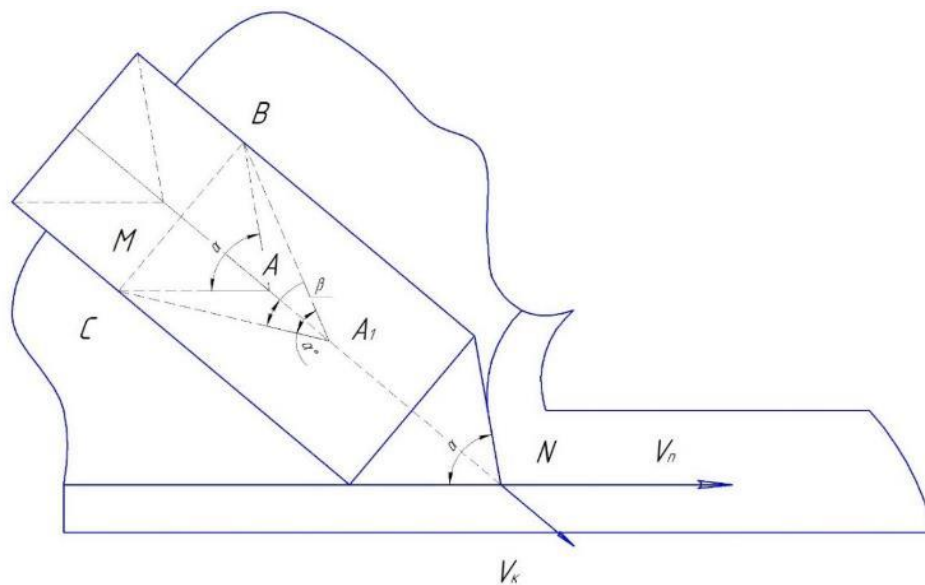


Figure 1. Scheme of sliding cutting

Let us consider the speed of the cutting parts of the material along both sides of the knife to be the same. Then, in the absence of sliding of the knife ($v_k = 0$), the path of the material along both faces of the knife consists of segments $AB = AC$. If the knife has a relative sliding speed v_k , then when moving along the cutting edge for a distance AA_1 the path of the cut parts of the material can be shown by the segment $A_1B = A_1C$, that is, cutting can be done not in the ABC plane, but in the A_1BC plane. If for a stationary knife the working sharpening angle α is equal to the constructive angle between the wedge faces, then when the knife slides, the sharpening angle will be equal to $\alpha_0 = BA_1C$.

The relationship between the working and constructive sharpening angles is expressed by the dependence:

$$\sin \frac{\alpha_0}{2} = \frac{CB}{2A_1C} = \frac{2AC \sin \frac{\alpha}{2}}{2 \frac{AC}{\sin \beta}} = \sin \frac{\alpha}{2} \sin \beta, \quad (1)$$

where $\beta = \arctg \frac{v_n}{v_k}$.

The best profile of the cutting edge of a rotating knife is considered to be a curve, the tangent to which coincides at each point with the tangent to the circle and passes through the point we will consider.

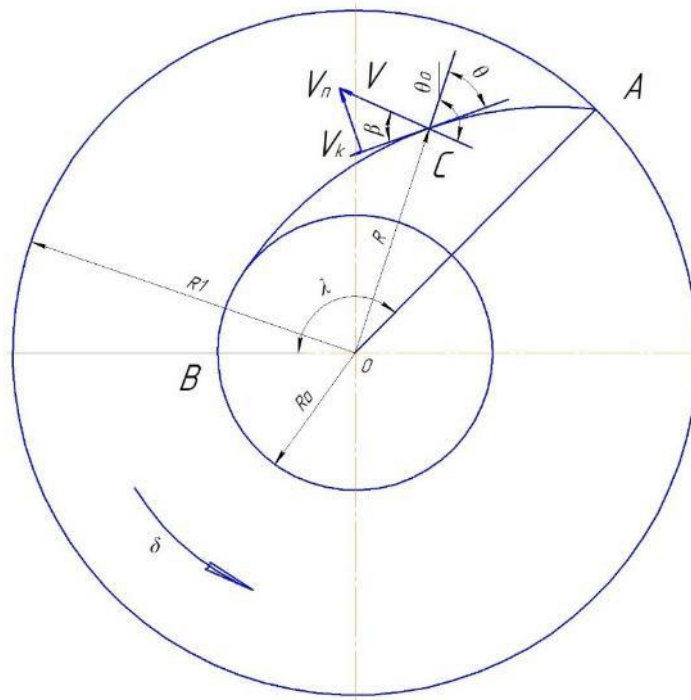


Figure 2. Knife cutting edge profile

Let us take an arbitrary profile of the cutting edge of the knife (Figure 2), rotating relative to the center O , and a polar coordinate system with the pole at the center O .

We select an arbitrary point C on the curve and enter the following notations: v is the linear speed vector of the knife at point C ; v_k is the component of velocity v directed tangentially to the curve AB ; v_n is the component of velocity v directed along the normal to the curve AB at point C ; β is the angle formed between the velocity vector v and its component v_k ; r is the radius of OC ; θ is the angle formed by the direction of the vector OC and the positive direction to the curve AB at point C ; θ_0 is the angle formed by the direction of the vector OC and the positive direction of the tangent at point C to the circle with radius OC .

There should be drawn a line between the specified points A and B so that the sliding speed is maximum and constant. The practice of solving similar problems shows that the given problem can have a number of solutions and the optimal one can be determined using the theory of variational calculus.

To build the desired profile of the cutting edge of the knife, from all the curves that pass through the given points, we choose the curve $r = r(\lambda)$ where the functional is minimal:

$$F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (\theta_0 - \theta) d\lambda, \quad (2)$$

where $\theta_0 - \theta = \beta$.

The value θ is determined from the following equation

$$\theta = \arctg\left(\frac{1}{r} \frac{dr}{d\lambda}\right), \quad (3)$$

where r – is the radius from the axis of rotation to the point of the blade under consideration.

Let's enter the notation

$$x = \left(\frac{1}{r} \frac{dr}{d\lambda}\right) \quad (4)$$

Let's expand the $\arctg x$ function into a power series, for $x < 1$ we get:

$$\arctg x = \frac{\pi}{2} - \left(x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} - \frac{x^7}{7} \dots\right) \quad (5)$$

Consider only such curves $r = r(\lambda)$, for which $x^2 \leq 1$. Then we leave the first two terms of the expansion in equation (5) and, taking into account equations (3) and (4), we obtain:

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{r} \frac{dr}{d\lambda} \quad (6)$$

Substituting equation (6) into expression (2), taking into account that $\theta = \frac{\pi}{2}$:

$$F = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(\frac{1}{r} \frac{dr}{d\lambda} \right)^2 d\lambda \quad (7)$$

The Euler equation for the functional (7) will have the form:

$$\frac{d^2 r}{d\lambda^2} - \frac{1}{r} \left(\frac{dr}{d\lambda} \right)^2 = 0 \quad (8)$$

The solution of equation (8) is the function:

$$r = C_1 e^{C_2 \lambda}, \quad (9)$$

where C_1 and C_2 are constant values that characterize the mechanical properties, blade geometry, cutting speed, etc.;

λ is the turning angle of the knife;

e is the base of the natural logarithm.

The calculations show that the profile of the cutting edge of the knife, which meets the requirements, is described by a segment of a logarithmic spiral.

Constant values C_1 and C_2 are found based on the design dimensions of the knife blade.

During the study, calculations of the kinematic cutting angle α_0 were carried out with a constructive sharpening angle from 10° to 90° (through 5°) and a knife rotation angle from 135° to 240° (through 15°). The results of the calculations are shown in Table 1. The calculations took into account that $r = 50$ mm, $\lambda_0 = 0$, $r_1 = 100$ mm, $\lambda = 135^\circ \dots 240^\circ$.

Table 1

Meanings of kinematic cutting angle α_0 were carried out with a constructive sharpening and a knife rotation

	α	λ							
		135°	150°	165°	180°	195°	210°	225°	240°
α_0 , degrees	10°	$2^\circ 48'$	$2^\circ 34'$	$2^\circ 20'$	$2^\circ 08'$	$1^\circ 59'$	$1^\circ 51'$	$1^\circ 44'$	$1^\circ 37'$
	15°	$4^\circ 13'$	$3^\circ 51'$	$3^\circ 30'$	$3^\circ 13'$	$2^\circ 58'$	$2^\circ 48'$	$2^\circ 36'$	$2^\circ 26'$
	20°	$5^\circ 37'$	$5^\circ 12'$	$4^\circ 40'$	$4^\circ 17'$	$3^\circ 58'$	$3^\circ 41'$	$3^\circ 27'$	$1^\circ 15'$
	25°	7°	$6^\circ 23'$	$5^\circ 49'$	$5^\circ 20'$	$4^\circ 57'$	$4^\circ 16'$	$4^\circ 18'$	$4^\circ 03'$
	30°	$8^\circ 27'$	$7^\circ 38'$	$6^\circ 57'$	$6^\circ 23'$	$5^\circ 55'$	$5^\circ 30'$	$5^\circ 09'$	$4^\circ 50'$
	35°	$9^\circ 43'$	$8^\circ 51'$	$8^\circ 04'$	$7^\circ 24'$	$6^\circ 51'$	$6^\circ 23'$	$5^\circ 59'$	$5^\circ 17'$
	40°	$11^\circ 05'$	$10^\circ 06'$	$9^\circ 12'$	$8^\circ 27'$	$7^\circ 49'$	$7^\circ 17'$	$6^\circ 49'$	$6^\circ 24'$
	45°	$12^\circ 25'$	$11^\circ 18'$	$10^\circ 17'$	$9^\circ 27'$	$8^\circ 45'$	$8^\circ 09'$	$7^\circ 18'$	$7^\circ 10'$
	50°	$13^\circ 43'$	$12^\circ 29'$	$11^\circ 22'$	$10^\circ 27'$	$9^\circ 40'$	9°	$8^\circ 26'$	$7^\circ 55'$
	55°	$14^\circ 59'$	$13^\circ 39'$	$12^\circ 26'$	$11^\circ 25'$	$10^\circ 14'$	$9^\circ 50'$	$9^\circ 12'$	$8^\circ 19'$
	60°	$16^\circ 15'$	$14^\circ 47'$	$13^\circ 28'$	$12^\circ 22'$	$11^\circ 27'$	$10^\circ 40'$	$9^\circ 58'$	$9^\circ 22'$
	65°	$17^\circ 28'$	$15^\circ 54'$	$14^\circ 39'$	$13^\circ 17'$	$12^\circ 18'$	$11^\circ 27'$	$10^\circ 43'$	$10^\circ 04'$
	70°	$18^\circ 39'$	$16^\circ 59'$	$15^\circ 27'$	$14^\circ 11'$	$13^\circ 08'$	$12^\circ 14'$	$11^\circ 27'$	$10^\circ 45'$
	75°	$19^\circ 49'$	$18^\circ 02'$	$16^\circ 25'$	$15^\circ 04'$	$13^\circ 57'$	$12^\circ 59'$	$12^\circ 15'$	$11^\circ 24'$
	80°	$20^\circ 56'$	$19^\circ 03'$	$17^\circ 20'$	$15^\circ 55'$	$14^\circ 44'$	$13^\circ 43'$	$12^\circ 50'$	$12^\circ 03'$
	85°	$22^\circ 01'$	$20^\circ 02'$	$18^\circ 14'$	$16^\circ 44'$	$15^\circ 29'$	$14^\circ 25'$	$13^\circ 29'$	$12^\circ 40'$
	90°	$23^\circ 03'$	$20^\circ 58'$	$19^\circ 50'$	$17^\circ 31'$	$16^\circ 13'$	$15^\circ 06'$	$14^\circ 08'$	$13^\circ 16'$

To study the results, graphs of the dependence of the angle of sharpening when sliding on the angle of rotation of the knife were plotted at different values of the working angle of sharpening with a stationary knife (Figure 3-9).

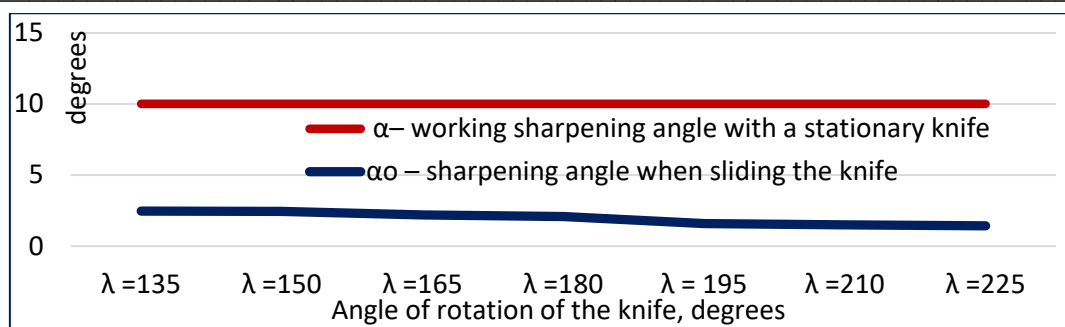


Figure 3. The results of determining α_0 at the constructive sharpening angle 10°

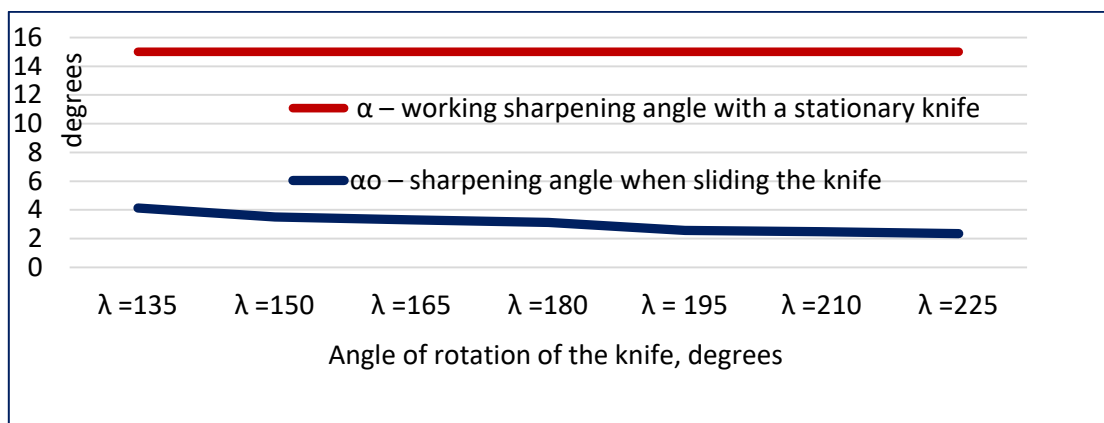


Figure 4. The results of determining α_0 at the constructive sharpening angle 15°

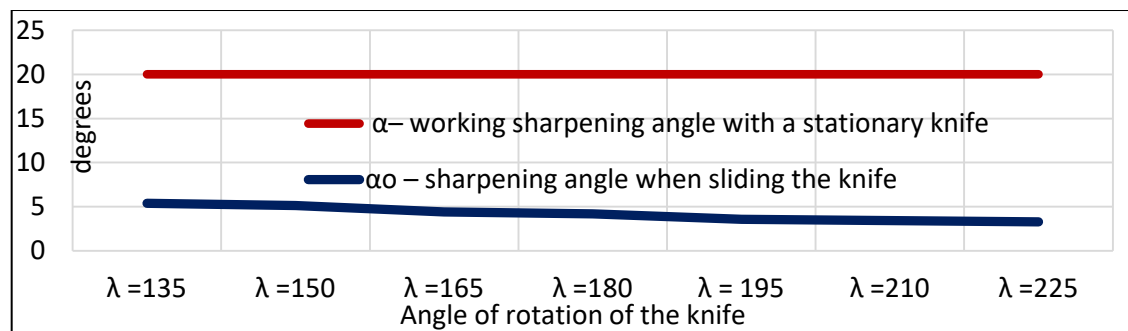


Figure 5. The results of determining α_0 at the constructive sharpening angle 20°

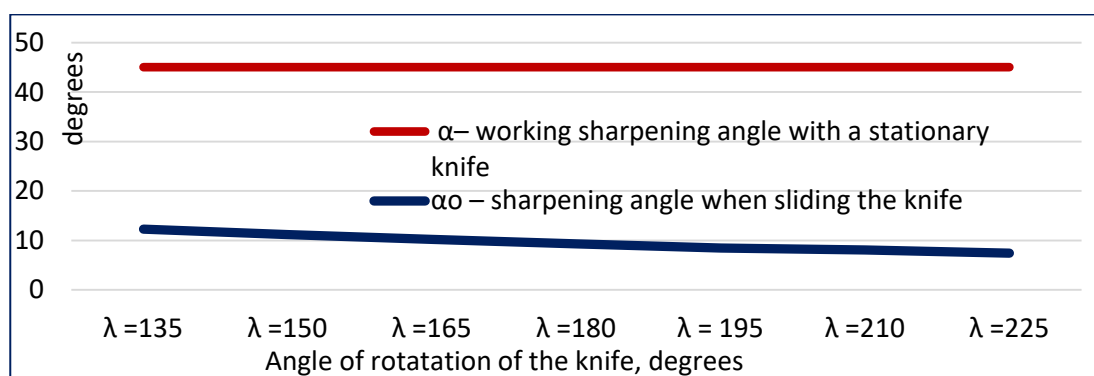


Figure 6. The results of determining α_0 at the constructive sharpening angle 45°

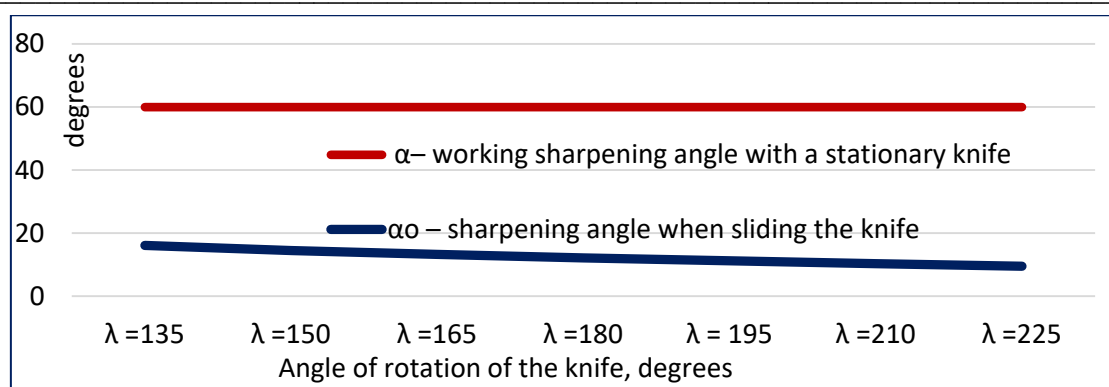


Figure 7. The results of determining α_0 at the constructive sharpening angle 60°

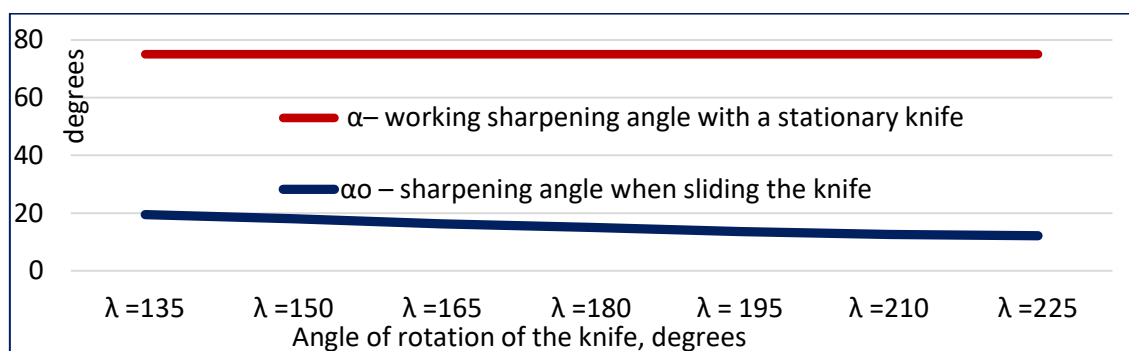


Figure 8. The results of determining α_0 at the constructive sharpening angle 75°

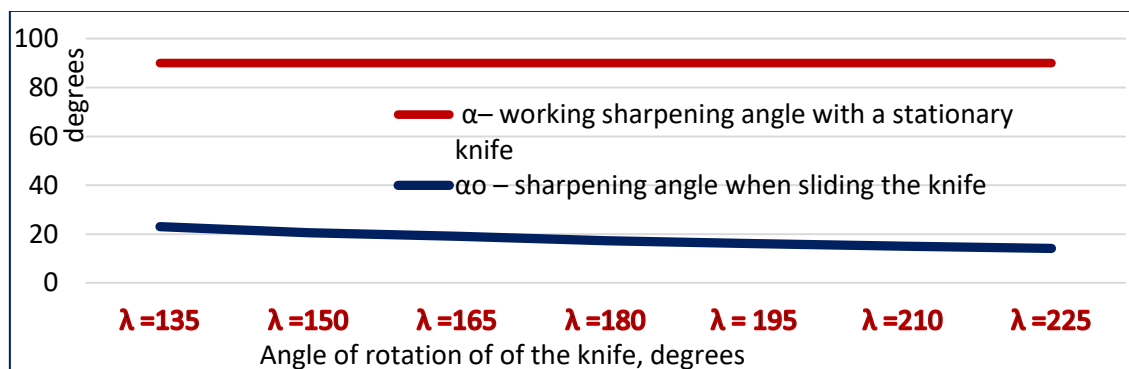


Figure 9. The results of determining α_0 at the constructive sharpening angle 90°

Conclusion. The analysis of the results of research and calculations convincingly shows that when the profile of the cutting edge of the knife is described by a segment of a logarithmic spiral, the kinematic sharpening angle relative to the structural one decreases by 2-4 times, that ensures a decrease in material resistance and a decrease in energy consumption. Therefore, it is advisable to implement the profile of the cutting edge of the knife along a logarithmic spiral.

References

1. Research of Power Parameters of the Technological Process of Cutting Bakery Products / O.T. Velyka, S.E. Liaskovska, M. Petryk / Automation of Production Processes in Mechanical Engineering and Instrument Engineering. Vol. 55 (2021), Pp. 34-42. <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2021/nov/25560/211352maket-34-42.pdf>
2. Rational Modes of Cutting Food Products / V.S. Guts, O.O. Gubenia // Resource- and Energy-saving Technologies of Production and Packaging of Food Products are the Main Principles of its

Competitiveness: Materials of the II International Specialized Scientific and Practical Conference, September 11, 2013 – K. 2013, Pp. 36-38. <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/21243>

3. Reduction of Energy Consumption When Cutting Visco-elastic Materials / A.V. Shaina, O.E. Melnyk // Improvement of Processes and Devices of Food Production. Vol. 35 (2017), Pp. 42-48. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Otkhv_2017_35_8

4. Zaverbnyi A.R., Kodra U.V. Determination of Design Parameters of Machines for Cutting Bakery Products. // Bulletin of the Lviv Polytechnic National University. Optimization of Production Processes and Technical Control in Mechanical Engineering and Instrument Engineering. - 2018. - № 891. - Pp. 3-7. http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPO_2018_891_3

5. Batrachenko Olexandr. Simulation of Influence of Constructive Parameters of Meat Bowl Cutterknives on Their Endurance at Alternative Oscillations // Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, 2023, 178, p. 363–385.

https://doi.org/10.1007/978-3-031-35467-0_23

6. Viktor Goots, Oleksii Gubenia, Bogdan Lukianenko (2013), Modeling of cutting of multilayer materials, Journal of Food and Packaging Science, Technique and Technologies, No2, Pp. 294295.3. DOI: <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/21113>

7. V. Guts, O. Gubenia, S. Stefanov, W. Hadjiiski (2010), Modelling of Food Product Cutting, 10th International Conference “Research and Development in Mechanical Industry - 2010”, Donji Milanovac, Serbia, 10-16 September 2010. Vol. 2. Pp. 1100-1105.

<http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/21118>

8. Pogrebniak A.V. Study of the Process of Hydrojet Water-polymer Processing of Food Products by cutting // Scientific Bulletin of S.Z. Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnology. Gzytsky Series: Food Technologies. 2017. Vol. 19. № 75. Pp. 134–139.

http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvlnuftech_2017_19_75_29

В. В. Яковець

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ У ВЕБ-ДОДАТКАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ

Ужгородський національний університет

У статті досліджено проблему автоматизованого виявлення аномалій у веб-додатках в умовах зростання складності систем і обсягів даних. Розроблено та експериментально перевірено три алгоритми, які забезпечують підвищення точності та швидкості виявлення аномалій. Встановлено, що модуль часової кореляції демонструє найвищу точність, адаптивний пороговий моніторинг забезпечує швидкість реагування, а гібридна кластеризація характеризується збалансованими показниками. Виявлено ключові проблеми впровадження, зокрема обчислювальну складність і потребу в адаптації моделей. Запропоновано рекомендації для інтеграції алгоритмів у системи моніторингу та окреслено перспективи розробки оптимізованих методів і вивчення нових типів загроз.

Ключові слова: виявлення аномалій, веб-додатки, інтелектуальний аналіз даних, адаптивний моніторинг, часові ряди, кластеризація, алгоритми, кібербезпека.

V. Yakovets

DEVELOPMENT OF METHODS FOR ANOMALY DETECTION IN WEB APPLICATIONS USING DATA MINING TECHNIQUES

The article addresses the issue of automated anomaly detection in web applications amid increasing system complexity and data volumes. Three algorithms were developed and experimentally validated to enhance the accuracy and speed of anomaly detection. It was established that the time correlation module demonstrates the highest accuracy, the adaptive threshold monitoring ensures rapid response, and hybrid clustering offers balanced performance. Key implementation challenges, including computational complexity and the need for model adaptation, were identified. Recommendations for integrating the algorithms into monitoring systems were proposed, and prospects for developing optimized methods and exploring new types of threats were outlined.

Keywords: anomaly detection, web applications, data mining, adaptive monitoring, time series, clustering, algorithms, cybersecurity.

Постановка проблеми. Виявлення аномалій у веб-додатках є актуальною проблемою в умовах стрімкого розвитку цифрових технологій і зростання обсягів даних. Аномалії можуть свідчити про порушення в роботі програмного забезпечення, потенційні кібератаки або інші небажані події, що впливають на функціональність і безпеку веб-додатків. Традиційні методи моніторингу й аналізу даних часто є недостатньо ефективними через їхню неспроможність обробляти великі обсяги інформації в реальному часі або враховувати складність сучасних багатокомпонентних систем.

Використання методів інтелектуального аналізу даних для виявлення аномалій відкриває нові можливості у створенні високоточної й адаптивної системи моніторингу, яка здатна виявляти неочевидні закономірності й аномальні дії. Це завдання має важливе наукове значення, оскільки передбачає розроблення нових алгоритмів і моделей для автоматизованого аналізу складних даних. Практична цінність проблеми полягає у підвищенні рівня безпеки та надійності веб-додатків, що є особливо актуальним для секторів, де обробляється конфіденційна інформація, таких як банківська справа, електронна комерція або охорона здоров'я.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження сучасних методів виявлення аномалій у веб-додатках свідчать про зростаючу важливість інтелектуального аналізу даних для підвищення точності, швидкості та адаптивності алгоритмів. У контексті цієї тематики дослідження К. Чижмара, О. Дніпрова, О. Коротюка, Р. Шаповала та О. Сидоренка акцентують увагу на кібербезпеці державних інформаційних систем і підкреслюють необхідність інтегрованих рішень для моніторингу веб-додатків [1].

Результати Х. Сю та його команди демонструють перспективність варіаційних автоенкодерів для виявлення аномалій у сезонних веб-показниках, що забезпечує високу точність у динамічних умовах [2]. С. Юань і його колеги довели ефективність інтеграції прогнозування подій із виявленням аномалій, використовуючи самонавчальні нейронні мережі. Такий підхід дозволяє передбачати потенційні ризики у веб-додатках [3].

Метод слабко супервізованого виявлення аномалій, запропонований Х. Чжао та його співавторами, демонструє високі результати в умовах обмеженого доступу до даних для навчання моделей, що є важливим для ресурсозалежних систем [4]. У свою чергу, Д.-К. Хуан та його команда

розробили метамодель для аналізу пошукових запитів, яка показує високу ефективність у виявленні відхилень у поведінці користувачів [5].

Дослідження К. Агарвала фокусується на ансамблевих методах для підвищення точності алгоритмів, підкреслюючи переваги комбінованих підходів у складних середовищах [6]. Огляд Р. Чалапаті та С. Чавлі висвітлює важливість глибокого навчання для аналізу багатовимірних даних, яке дозволяє моделювати складні патерни аномалій [7].

Розробка К. Чоя та його команди орієнтована на аналіз часових рядів. Їхні моделі оптимізують виявлення аномалій у динамічних середовищах, що корисно для моніторингу веб-додатків у реальному часі [8]. С. Ван та його співавтори акцентують на автоматизації аналізу логів, що дозволяє виявляти зловмисну активність у мережеских додатках [9].

Методологія Ю. Гао зосереджується на поведінковому аналізі користувачів через веб-журнали, підтверджуючи ефективність таких даних у запобіганні загрозам [10]. К. Сі пропонує інноваційний підхід до відновлення тензорів для аналізу інтернет-трафіку, що дозволяє ідентифікувати складні залежності у веб-даних [11].

Розроблена М.С. Рахманом гібридна система для моніторингу соціальних мереж показала, що поєднання поведінкових та контентних характеристик підвищує точність виявлення аномалій [12]. Р. Ван та інші досліджують глибоке навчання для створення адаптивних систем моніторингу, що ефективно працюють у складних умовах [13].

Огляд М. Сівача та С. Манна підкреслює важливість аналізу веб-журналів для підвищення ефективності моніторингу [14]. Модель HELAD, розроблена Ю. Чжуном, забезпечує високу точність завдяки використанню ансамблевого навчання, що робить її релевантною для великих мережеских систем [15]. С. Чжан розробив стійкий підхід до аналізу нестабільних веб-журналів, що сприяє зниженню впливу шумів і підвищенню ефективності алгоритмів [16].

Отже, аналіз наукових публікацій показує значні досягнення у сфері інтелектуального аналізу даних для виявлення аномалій. Отримані результати формують наукову основу для вдосконалення сучасних алгоритмів моніторингу веб-додатків.

У дослідженнях виявлення аномалій у веб-додатках залишаються невирішеними кілька важливих аспектів. По-перше, існуючі методи мають обмеження у адаптивності до динамічних умов веб-додатків, що знижує їхню ефективність. По-друге, необхідна розробка нових алгоритмів, здатних швидко обробляти великі обсяги даних і враховувати поведінкові особливості користувачів. По-третє, більшість робіт не підтверджуються емпіричними дослідженнями на реальних даних, що обмежує їхню практичну цінність. Крім того, точність і швидкість виявлення аномалій часто досліджуються окремо, без урахування їхньої взаємодії. Нарешті, відсутні конкретні рекомендації щодо інтеграції цих методів у реальні системи моніторингу.

Пропоноване дослідження спрямоване на усунення цих прогалин через розробку адаптивних алгоритмів, експериментальну перевірку їх ефективності на реальних даних і формулювання практичних рекомендацій для інтеграції. Це сприятиме як розвитку теоретичних основ, так і підвищенню ефективності моніторингу веб-додатків у реальних умовах.

Мета статті – аналіз ефективних методів виявлення аномалій у веб-додатках із використанням інтелектуального аналізу даних, спрямованих на підвищення рівня безпеки та функціональності сучасних веб-систем.

Завдання статті:

1. Проаналізувати існуючі підходи до виявлення аномалій у веб-додатках, визначити їхні переваги та обмеження, а також виявити ключові фактори, що впливають на точність і швидкість цих підходів.

2. Сформулювати рекомендації щодо інтеграції запропонованих методів в реальні системи моніторингу веб-додатків для підвищення їх ефективності та надійності.

Виклад основного матеріалу. Аналіз сучасних підходів до виявлення аномалій у веб-додатках демонструє їхню ключову роль у забезпеченні безпеки, функціональності та стабільності цих систем. У зв'язку зі стрімким зростанням обсягів даних, підвищенням складності архітектур веб-додатків і рівня загроз кібератак, виникає потреба у впровадженні нових, більш ефективних інструментів для моніторингу та виявлення аномальних дій. Аномалії у веб-додатках можуть бути спричинені різними чинниками, такими як технічні помилки, збої у програмному забезпеченні або цілеспрямовані атаки, і проявлятися у вигляді нетипових запитів, змін у структурі даних чи неочікуваних сплесків активності.

Для вирішення цих завдань було розроблено кілька підходів, які можна поділити на три основні категорії: методи на основі порогових значень, статистичні підходи та методи, що

базуються на інтелектуальному аналізі даних. Кожен із них пропонує унікальні можливості для аналізу аномалій, проте їхня ефективність залежить від специфіки застосування, характеру оброблюваних даних і обчислювальних ресурсів. Методи на основі порогових значень зосереджені на встановленні жорстких меж для визначення аномальної поведінки, тоді як статистичні підходи орієнтовані на аналіз розподілу даних і виявлення закономірностей. Найбільш сучасним і перспективним є використання методів інтелектуального аналізу даних, які застосовують алгоритми машинного навчання для ідентифікації складних і неочевидних патернів.

У таблиці 1 узагальнено основні характеристики, переваги та недоліки кожного з цих підходів, що дає змогу оцінити їхній потенціал для застосування у різних умовах.

Табл. 1

Основних підходи до виявлення аномалій у веб-додатках

Метод	Ключові особливості	Переваги	Недоліки
Порогові значення	Використання встановлених меж для виявлення аномалій.	Простота реалізації, швидкість виконання.	Обмежена гнучкість, неможливість адаптації до змін.
Статистичні методи	Аналіз розподілу даних та ідентифікація відхилень від нормального розподілу.	Можливість роботи з великими масивами даних.	Залежність від припущень про розподіл даних, складність реалізації.
Інтелектуальний аналіз даних	Використання алгоритмів машинного навчання для виявлення складних патернів.	Висока точність, адаптивність до змін, автоматизація.	Велика обчислювальна складність, потреба у великій кількості даних для навчання.

Джерело: сформовано автором на підставі [2;3;6;7;8;9;10]

Порогові методи є ефективними для простих веб-додатків, де визначення аномалій базується на перевищенні фіксованих значень, наприклад, ліміту кількості запитів до сервера. У таких випадках система оперативно блокує підозрілу активність, проте не здатна враховувати складні сценарії поведінки користувачів [2, 10]. Наприклад, у веб-додатку для електронної комерції цей метод може не виявити аномалій у вигляді підроблених замовлень через нестандартну структуру запитів.

Статистичні методи забезпечують більш гнучкий підхід, дозволяючи враховувати ймовірнісну природу аномалій [6, 9]. Наприклад, у системі онлайн-банкінгу статистичний аналіз може допомогти ідентифікувати аномальну кількість транзакцій у певному часовому проміжку. Водночас залежність від правильного вибору моделі розподілу даних може знизити ефективність методу у випадках, коли дані не відповідають заданим припущенням.

Методи інтелектуального аналізу даних демонструють найвищу ефективність у сучасних умовах, оскільки здатні виявляти складні й неочевидні закономірності. Наприклад, використання нейронних мереж у системі моніторингу соціальних мереж дає змогу автоматично визначати аномальну поведінку ботів, адаптуючись до змін їхньої стратегії. Зокрема, у разі виявлення підозрілих публікацій алгоритм може аналізувати їхній контент, враховуючи не лише текстову інформацію, а й зображення або метадані, що значно підвищує рівень безпеки системи.

Автоматизоване виявлення аномалій у веб-додатках є важливим інструментом забезпечення їхньої стабільної роботи та кібербезпеки [3, 7, 13]. Традиційні підходи, такі як статичні порогові значення або стандартні методи класифікації, часто виявляються неефективними у сучасних умовах, коли дані стають дедалі складнішими, а загрози – більш динамічними та витонченими.

Запропоновані алгоритми розроблено на основі інтелектуального аналізу даних і враховують не лише явні відхилення, але й приховані закономірності, які складно ідентифікувати за допомогою звичайних методів. Вони базуються на інтеграції статистичного аналізу, машинного навчання та глибокого нейронного моделювання для досягнення максимальної точності. Особливістю цих алгоритмів є їхня адаптивність, масштабованість і здатність до самонавчання. Вони створені з урахуванням практичних потреб у виявленні аномалій у реальному часі, забезпечуючи швидке реагування на загрози та мінімізацію впливу на продуктивність системи.

Запропоновані алгоритми передбачають створення багаторівневих моделей для аналізу даних, що дозволяють гнучко поєднувати реактивні й проактивні підходи. Реактивний підхід спрямований на швидке виявлення аномалій шляхом аналізу вхідних потоків даних, тоді як проактивний підхід враховує історичні дані й дозволяє прогнозувати потенційні ризики. Алгоритми базуються на

використанні комбінованих методів, які адаптуються до змін у середовищі веб-додатків, що робить їх більш ефективними порівняно з існуючими рішеннями. У таблиці 2 наведено основні характеристики трьох розроблених алгоритмів.

Табл. 2

Алгоритми виявлення аномалій у веб-додатках

Назва алгоритму	Принцип роботи	Очікуваний результат
Адаптивний пороговий моніторинг	Використання змінних порогових значень, які адаптуються до трендів у потоках даних.	Виявлення аномалій у режимі реального часу із мінімізацією хибнопозитивних сигналів.
Модуль часової кореляції	Аналіз часових рядів для ідентифікації нетипових змін, враховуючи залежність між різними параметрами.	Визначення складних аномалій, які проявляються у часовій динаміці.
Гібридна кластеризація	Поєднання кластеризації та факторного аналізу для сегментації даних і виявлення аномалій у групах.	Висока точність у багатовимірних середовищах із різномірними наборами даних.

Джерело: власна розробка автора

Запропоновані алгоритми мають високий потенціал для ефективного застосування у різних умовах. Адаптивний пороговий моніторинг може бути використаний у веб-додатках із динамічними потоками даних, таких як сервіси потокового мовлення. Передбачається, що система автоматично регулюватиме порогові значення залежно від часу доби, активності користувачів та інших факторів. Це дає змогу виявляти аномальні сплески трафіку, які можуть свідчити про DDoS-атаки або підозрілу активність, забезпечуючи стабільну роботу системи без втрат продуктивності.

Модуль часової кореляції має перспективи для застосування в аналітичних платформах, що використовуються у фінансових операціях, де необхідно враховувати залежність між показниками, такими як обсяги транзакцій, географічне розташування та час здійснення операцій. Очікується, що цей алгоритм дозволить виявляти серії транзакцій, які відхиляються від звичайного патерну, та автоматично ідентифікувати підозрілі дії, що сприятиме запобіганню шахрайству.

Гібридна кластеризація може знайти своє застосування у складних системах моніторингу великих корпоративних веб-додатків, таких як ERP-системи. Прогнозується, що цей алгоритм забезпечить сегментацію користувачів за їхньою поведінкою та аналіз кожної групи на наявність нетипових дій. Наприклад, у групі користувачів із доступом до конфіденційних даних алгоритм зможе виявляти незвичну активність, яка може вказувати на потенційний витік даних.

Для перевірки ефективності запропонованих алгоритмів виявлення аномалій було проведено експеримент, що імітував реальні умови роботи веб-додатків. Основною метою було оцінити здатність алгоритмів виявляти аномалії, швидкість їхньої роботи та кількість хибнопозитивних спрацювань. Для цього використовувалися дані, отримані з веб-середовища, створеного на основі симуляції реальної активності користувачів. Дані включали нормальні дії, а також імітовані аномалії, такі як нестандартні запити, пікове навантаження та технічні збої.

Симуляційне середовище було побудоване на основі простого веб-додатку з базовими функціями, включаючи автентифікацію, перегляд контенту та виконання транзакцій. Дані збиралися у вигляді потоків запитів, які генерувалися за допомогою скриптів, що імітували дії реальних користувачів, та спеціально доданих аномальних дій. Для забезпечення реалізму використовувалися змінні параметри, такі як час доби, інтенсивність запитів та частота повторюваних дій. Обсяг даних складав близько 10 000 запитів, з яких 5% були аномальними.

Алгоритми тестувалися в однакових умовах. Для адаптивного порогового моніторингу порогові значення визначалися динамічно, залежно від попередньо зібраних трендів. Модуль часової кореляції використовував часові ряди для аналізу залежності між різними параметрами запитів, такими як час надсилання, тип дії та IP-адреса. Гібридна кластеризація виконувала сегментацію користувачів за поведінковими патернами, після чого визначалися аномальні групи (табл. 3).

Отримані результати свідчать, що модуль часової кореляції продемонстрував найвищу точність, виявивши найбільшу кількість аномалій із мінімальним рівнем хибнопозитивних спрацювань. Проте час його обробки був довшим, що обмежує його застосування у реальному часі. Адаптивний пороговий моніторинг забезпечив найшвидший час реагування, але мав дещо вищий рівень хибнопозитивних спрацювань, що може спричиняти зайві реакції системи. Гібридна

кластеризація забезпечила збалансовані результати за всіма показниками, що робить її універсальним рішенням для складних багатовимірних середовищ.

Табл. 3

Науково-практична оцінка ефективності алгоритмів для виявлення аномалій у веб-додатках

Метод	Застосування	Кількість виявлених аномалій	Хибнопозитивні спрацювання (%)	Середній час обробки (мс)
Адаптивний пороговий моніторинг	Використання змінних порогових значень для динамічного аналізу потоків даних.	85	12	45
Модуль часової кореляції	Аналіз залежності у часових рядах для виявлення нетипових змін.	92	8	70
Гібридна кластеризація	Поєднання кластеризації та аналіз факторів для сегментації даних.	89	10	65

Джерело: власна розробка автора

Точність і швидкість виявлення аномалій у веб-додатках залежать від низки ключових чинників, серед яких якість вхідних даних, обчислювальні ресурси, налаштування алгоритмів і характер самих аномалій [9, 12]. Перш за все, якість даних відіграє вирішальну роль, оскільки наявність шумів, пропущених значень або некоректних даних може значно знижувати ефективність алгоритмів [14]. Наприклад, якщо дані не були попередньо нормалізовані або містять некоректні часові мітки, це може призвести до помилкової інтерпретації поведінки системи як аномальної. Водночас надто великі обсяги даних із високим рівнем варіативності можуть створювати надмірне навантаження на алгоритм, уповільнюючи його роботу.

Другим важливим чинником є обчислювальні ресурси, доступні для роботи алгоритмів. Методи, що базуються на складних моделях, таких як глибокі нейронні мережі чи багатовимірні кластеризація, потребують значних ресурсів для обробки великих потоків даних у реальному часі [7, 8]. Брак ресурсів може спричинити затримки у виявленні аномалій, що критично у системах, де потрібна миттєва реакція на загрози. Оптимізація алгоритмів під конкретні апаратні умови може стати викликом, особливо для малих або середніх підприємств із обмеженим доступом до потужних обчислювальних систем.

Ще одним чинником є параметри навчання алгоритмів, які визначають їхню здатність до адаптації та точність виявлення аномалій. Вибір неправильних параметрів, таких як розмір кластерів або порогові значення, може спричинити високий рівень хибнопозитивних або хибнонегативних результатів. Наприклад, занадто жорсткі порогові значення можуть призводити до того, що нормальна поведінка інтерпретується як аномальна, створюючи зайві сповіщення та знижуючи ефективність системи. З іншого боку, надто широкі межі знижують чутливість алгоритмів, що ускладнює своєчасне виявлення дійсно небезпечних подій. Характер аномалій є важливим аспектом, який впливає на ефективність алгоритмів. Простежується різниця між явними аномаліями, які легко ідентифікувати, та прихованими аномаліями, що мають складні патерни або проявляються лише у взаємозв'язках між різними параметрами [15]. Сучасні методи виявлення часто демонструють високу ефективність для перших, але стикаються з труднощами у роботі з останніми. Наприклад, складно виявити аномалії, які проявляються лише у часових рядах, якщо алгоритм не враховує тимчасові залежності між подіями.

Для інтеграції розроблених методів виявлення аномалій у реальні системи моніторингу веб-додатків слід дотримуватися послідовного підходу, що включає технічну та організаційну підготовку, а також забезпечення безперервної адаптації. Перш за все, рекомендується реалізувати прототипи алгоритмів у середовищі тестування, максимально наближеному до умов реальної роботи системи. Це дозволить оцінити ефективність методів і визначити оптимальні параметри для їх подальшого налаштування.

Наступним кроком є інтеграція алгоритмів у виробниче середовище з урахуванням існуючої архітектури веб-додатків. Особливу увагу слід приділити сумісності алгоритмів із поточними системами моніторингу та безпеки. Для забезпечення стабільної роботи рекомендується використовувати модульний підхід, який дає змогу додавати або замінювати алгоритми без впливу на загальну функціональність системи.

Одним із важливих практичних кроків є створення системи автоматичного оновлення моделей на основі нових даних. Це може бути реалізовано через періодичне навчання алгоритмів із використанням останніх зібраних даних, що забезпечить їхню адаптивність до змін у поведінці користувачів або структурі запитів. Крім цього, слід передбачити резервні механізми для реагування на збої або перевантаження системи, такі як ручне коригування порогових значень або тимчасове відключення окремих модулів.

Для ефективного впровадження рекомендується розробити докладну документацію, яка міститиме опис функціональності алгоритмів, їхніх параметрів та інструкції для адміністраторів системи. Важливим аспектом також є навчання персоналу, відповідального за роботу з системою, для забезпечення розуміння принципів її функціонування та можливих сценаріїв реагування на аномалії.

Крім того, слід забезпечити інтеграцію системи моніторингу з панелями візуалізації, які дозволяють відстежувати тренди, аналізувати результати роботи алгоритмів та швидко приймати рішення у випадку виявлення загроз. Такі інструменти можуть включати графіки активності, списки підозрілих запитів або сповіщення про критичні аномалії. Це сприятиме комплексному аналізу роботи системи та підвищенню її ефективності.

Узагальнюючи викладене, рекомендації спрямовані на розробку системи моніторингу веб-додатків, яка відзначається адаптивністю, надійністю та простотою у використанні. Така система має ефективно виявляти аномалії, забезпечуючи своєчасну реакцію на загрози, мінімізацію ризиків та підвищення рівня безпеки в умовах сучасних викликів. Така система має ефективно виявляти аномалії, забезпечуючи своєчасну реакцію на загрози, мінімізацію ризиків та підвищення рівня безпеки в умовах сучасних викликів.

Висновки. Таким чином, встановлено, що методи інтелектуального аналізу даних є ефективними для виявлення аномалій у веб-додатках завдяки їхній здатності адаптуватися до складних і динамічних середовищ. Запропоновані алгоритми, такі як адаптивний пороговий моніторинг, модуль часової кореляції та гібридна кластеризація, забезпечують врахування різноманітних типів аномалій, досягаючи високої точності та швидкості аналізу. Результати експериментальної перевірки підтвердили, що ці методи ефективно виявляють складні патерни та мінімізують хибнопозитивні сигнали, що є ключовими для забезпечення функціональності та безпеки веб-додатків.

Основними проблемами, виявленими під час дослідження, є висока обчислювальна складність методів інтелектуального аналізу даних, необхідність попередньої обробки великих обсягів інформації та складність налаштування параметрів алгоритмів під конкретні сценарії використання. Також наголошено на важливості якісного джерела даних, оскільки наявність шумів і некоректної інформації суттєво знижує ефективність роботи алгоритмів.

У рекомендаціях підкреслено важливість попереднього тестування алгоритмів у реалістичних умовах, застосування гібридного підходу, що поєднує кілька методів для підвищення адаптивності системи, а також інтеграції моделей машинного навчання із системами моніторингу в реальному часі. Особливу увагу слід приділяти розробці модульних рішень, які забезпечують гнучке налаштування алгоритмів відповідно до змін у середовищі веб-додатків.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з оптимізацією обчислювальних процесів для зменшення витрат ресурсів, розвитком методів автоматизованого навчання моделей і створенням інтегрованих систем моніторингу, які можуть ефективно працювати у великих багатокомпонентних середовищах. Крім того, важливим напрямом є вивчення впливу нових типів аномалій, що виникають у зв'язку з розвитком технологій і змінами у поведінці користувачів.

Список використаних джерел:

1. State Information Security as a Challenge of Information and Computer Technology Development / K. Chyzhmar et al. *Journal of Security and Sustainability Issues*. 2020. P. 819–828. URL: [https://doi.org/10.9770/jssi.2020.9.3\(8\)](https://doi.org/10.9770/jssi.2020.9.3(8)) (date of access: 29.12.2024).
2. Unsupervised Anomaly Detection via Variational Auto-Encoder for Seasonal KPIs in Web Applications / H. Xu et al. *the 2018 World Wide Web Conference*, Lyon, France, 23–27 April 2018. New

York, New York, USA, 2018. URL: <https://doi.org/10.1145/3178876.3185996> (date of access: 29.12.2024).

3. Connecting Web Event Forecasting with Anomaly Detection: A Case Study on Enterprise Web Applications Using Self-supervised Neural Networks / X. Yuan et al. *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*. Cham, 2020. P. 481–502. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63086-7_27 (date of access: 29.12.2024).

4. Weakly Supervised Anomaly Detection via Knowledge-Data Alignment / H. Zhao et al. *WWW '24: The ACM Web Conference 2024*, Singapore Singapore. New York, NY, USA, 2024. URL: <https://doi.org/10.1145/3589334.3645429> (date of access: 29.12.2024).

5. Juan D.-C., Shah N., Tang M., Qian Z., Marculescu D., Faloutsos C. M3A: Model, MetaModel, and Anomaly Detection in Web Searches. *arXiv*. 2016. 10 p. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1606.05978> (date of access: 29.12.2024).

6. Aggarwal C. C. Outlier Ensembles. *Outlier Analysis*. Cham, 2016. P. 185–218. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-47578-3_6 (date of access: 29.12.2024).

7. Chalapathy R., Chawla S. Deep Learning for Anomaly Detection: A Survey. *arXiv*. 2019. 34 p. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.03407> (date of access: 29.12.2024).

8. Deep Learning for Anomaly Detection in Time-Series Data: Review, Analysis, and Guidelines / K. Choi et al. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 120043–120065. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3107975> (date of access: 29.12.2024).

9. Machine Learning in Network Anomaly Detection: A Survey / S. Wang et al. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 152379–152396. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3126834> (date of access: 29.12.2024).

10. Gao Y., Ma Y., Li D. Anomaly detection of malicious users' behaviors for web applications based on web logs. *2017 IEEE 17th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, Chengdu, 27–30 October 2017. 2017. URL: <https://doi.org/10.1109/icct.2017.8359854> (date of access: 29.12.2024).

11. Graph based Tensor Recovery for Accurate Internet Anomaly Detection / K. Xie et al. *IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications*, Honolulu, HI, 16–19 April 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/infocom.2018.8486332> (date of access: 29.12.2024).

12. An efficient hybrid system for anomaly detection in social networks / M. S. Rahman et al. *Cybersecurity*. 2021. Vol. 4, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s42400-021-00074-w> (date of access: 29.12.2024).

13. Deep Learning for Anomaly Detection / R. Wang et al. *WSDM '20: The Thirteenth ACM International Conference on Web Search and Data Mining*, Houston TX USA. New York, NY, USA, 2020. URL: <https://doi.org/10.1145/3336191.3371876> (date of access: 29.12.2024).

14. Siwach M., Mann S. Anomaly detection for web log data analysis: A review. *Journal of Algebraic Statistics*. 2022. Vol. 13. No. 1. P. 129–148. URL: <https://publishoa.com/index.php/journal/article/view/68> (date of access: 29.12.2024).

15. HELAD: A novel network anomaly detection model based on heterogeneous ensemble learning / Y. Zhong et al. *Computer Networks*. 2020. Vol. 169. P. 107049. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2019.107049> (date of access: 29.12.2024).

16. Robust log-based anomaly detection on unstable log data / X. Zhang et al. *ESEC/FSE '19: 27th ACM Joint European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering*, Tallinn Estonia. New York, NY, USA, 2019. URL: <https://doi.org/10.1145/3338906.3338931> (date of access: 29.12.2024).

В.М. Франчук, Л.М. Самчук

Луцький національний технічний університет

УПРАВЛІННЯ ТА КОНТРОЛЬ ЯКОСТІ НА ВИРОБНИЦТВІ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ДЕТАЛЕЙ ТИПУ КОРПУС

В роботі представлено аналіз наявних систем управління та контролю якості на виробництві при виготовленні деталі типу корпус. За зразок для аналізу взято корпус типу UCF 208, розглянуто його технологічний процес виготовлення, з можливими помилками на кожному етапі. Встановлено найкращі методи які можуть допомогти у вирішенні таких проблем, а саме методи SPC, LIMS, ZQS та методу використання комп'ютерного бачення та системи перевірки на основі штучного інтелекту. Запропоновані підходи дозволяють покращити технологічний процес зменшення дефектів на виробництві деталі типу корпус.

Ключові слова: якість, метод, технологічний процес, корпус.

V.M. Franchuk, L.M. Samchuk

MANAGEMENT AND QUALITY CONTROL IN PRODUCTION IN THE MANUFACTURE OF HOUSING TYPE PARTS

The paper presents an analysis of existing quality management and control systems in the production of housing-type parts. The UCF 208 type housing was taken as a sample for analysis, and its manufacturing process was examined, including potential errors at each stage. The most effective techniques that can assist solve these issues were identified, specifically SPC, LIMS, ZQS methods, as well as the use of computer vision and AI-based inspection systems. The proposed approaches improve the manufacturing process by preventing defects in the production of housing-type parts.

Keywords: quality, method, technological process, housing.

Постановка проблем. У сучасному машинобудуванні деталі типу корпус відіграють ключову роль у багатьох технічних системах, забезпечуючи захист і підтримку механічних компонентів. Корпуси повинні мати високу точність виготовлення, міцність і стійкість до зношування, що вимагає від виробничих процесів дотримання суворих стандартів якості. Водночас збільшення обсягів виробництва, автоматизація технологічних процесів і вимоги до зниження виробничих витрат ставлять перед підприємствами нові виклики щодо управління та контролю якості. Недотримання норм і стандартів якості на будь-якому етапі виробничого процесу може спричинити серйозні фінансові збитки, зниження продуктивності та погіршення репутації виробника. Таким чином, актуальність проблеми забезпечення високого рівня якості при виготовленні корпусних деталей обумовлюється потребою підвищення надійності і тривалості експлуатації готової продукції.

Метою роботи є аналіз наявних систем управління та контролю якості на виробництві при виготовленні деталей типу корпус, завдяки яким буде забезпечено дотримання заданих технічних характеристик, оптимізацію виробничих процесів та зниження кількості дефектів.

Огляд літературних джерел. У роботі [1] було проаналізовано технологічний процес виготовлення деталі «Корпус EY8.172.700». В результаті аналізу конструкції деталі та її технологічності виявлено недоліки в базовому технологічному процесі: використання застарілого обладнання та малоефективних методів обробки. Також запропоновано вдосконалений варіант технологічного процесу механічного оброблення деталі для покращення його техніко-економічних показників, а саме використання верстату з ЧПК, завдяки якому ефективність і собівартість виготовлення деталі значно покращується. Також було розроблено контрольно-вимірювальний пристрій для вимірювання поверхневого та радіального биття критичних оброблюваних поверхонь.

В роботі [2], досліджено вплив факторів та параметрів виробничого процесу на якість виготовленої продукції. Розглянутий метод для визначення індивідуальних факторів, що впливають на якість виробу, з врахуванням змінних параметрів виробничого процесу, які відповідають за геометричні відхилення деталей. У даній роботі запропоновано новий підхід, який дозволяє визначити вплив параметрів виробничого процесу на характеристики якості для систем, що знаходяться в русі. Новий підхід також висвітлено на прикладі рентгенівської шторки.

У дослідженні [3] розглянуто питання якості продукції яка стала одним з найважливіших факторів, на які слід звертати увагу у виробничому середовищі через зростаючу конкуренцію на світовому ринку. У цій роботі було визначено і порівняно дві різні групи факторів які впливають на якість продукції на виробництві: "Жорсткі" та "м'які". Завдяки проведеному аналізу було доведено

що "м'які" фактори мають сильніший вплив на якість продукції, а отже, організації-виробники повинні приділяти більше уваги цим факторам, щоб підвищити якість продукції.

В роботі [4] досліджено ключові фактори, що мають вплив на якість процесу, а також прогнозування та оптимізацію характеристик якості процесу з метою точного прогнозування точності обробки на гнучких виробничих лініях та досягнення ефективної якості. В якості об'єкта дослідження використано гнучку виробничу лінію, що обробляє шпіндельну коробку. Після перевірки точності прогнозування на 24 наборах даних про якість обробки отворів для шпинделя отримано модель прогнозування з відносною похибкою менш ніж 0,01, що надає зразок для аналізу потенційних проблем якості процесу на виробничій лінії.

У статті [5] розглянуто технологічний процес виготовлення деталі «Корпус», та запропоновано шляхи покращення процесу виготовлення. Завдяки аналізу було виявлено, що в наявній процедурі виготовлення матеріал з якого виробляється заготовка майбутньої деталі не піддається литтю, що значно обтяжує процес і робить його більш дорогавартісним. Також після додаткових дослідів виявлено проблеми із ріжучими інструментами, через які ефективність усього процесу падала в двічі, тому було запропоновано варіант більш ефективного та стійкого інструменту. Завдяки цим покращенням, ефективність та рентабельність усього виробництва може значно підвищитись, без значних капіталовкладень.

У статті [6] досліджено наявний стан факторів, що мають вплив на систему управління якістю на виробництві. Розкрито сутність факторів, які впливають на удосконалення системи контролю якості на підприємстві. Описано види факторів: зовнішні та внутрішні. Зазначено, що фактори формують макросередовище підприємства, проте вони не піддаються контролю з боку підприємства та можуть впливати на його діяльність. Розглянуто фактори мікросередовища, які впливають на систему управління якістю на підприємстві.

У статті [7] йдеться про важливість контролю якості в виробництві, щоб уникнути дефектів продукції та ризиків для споживачів. Наведено приклад з відкликанням подушок безпеки Takata, що стало найбільшим в історії автомобільним відкликанням. Описано інструменти для контролю якості, такі як Статистичний контроль процесів (SPC), методологія SixSigma та інші Lean-інструменти (TPM, Kaizen, 5S). Наголошується на перевагах контролю якості, таких як підвищення лояльності клієнтів, зниження ризиків і збільшення прибутків.

В роботі [8] розглядаються аспекти контролю якості у виробництві металевих деталей. Описуються найкращі практики інспекції вхідних матеріалів, контролю якості в процесі виробництва, підготовки поверхонь, остаточної інспекції та тестування. Важлива роль приділяється системам управління якістю (QMS), таким як ISO 9001, та принципам Total Quality Management (TQM). Також наголошується на важливості простежуваності та документації для ефективного контролю якості.

У статті [9] розглядається важливість контролю якості у виробництві, його методи, інструменти та виклики. Контроль якості (QC) гарантує відповідність продукції стандартам, що забезпечує задоволеність клієнтів, відповідність регуляціям, зниження витрат та покращення процесів. Описані методи, такі як статистичний контроль процесів, візуальний огляд, функціональні тести. Також висвітлено сучасні інструменти для контролю якості, як-от системи управління якістю (QMS) та II-інспекція. Окремо згадано різницю між забезпеченням якості (QA) та контролем якості (QC).

У статті [10] розглядається контроль якості під час виробництва зубчастих машинних елементів методом металевого формування. Описано проблеми, що виникають через зміщення заготовок у процесі виробництва, що призводить до втрат якості. Традиційно контроль якості базується на методах SPC, але стаття пропонує нові підходи до моніторингу якості під час самого процесу виробництва. Основна увага приділена спостереженню за геометричними характеристиками компонентів і використанню технологій для вимірювання та прогнозування якості в реальному часі.

У роботі [11] досліджується ефективний спосіб підвищення якості та продуктивності виробничої лінії в промисловості. Метою є виявлення дефектів компанії та розробка рішень для покращення роботи лінії. Основний акцент зроблено на використанні 7 інструментів контролю якості для аналізу даних виробничої лінії, виявлення найбільш поширених дефектів та їх причин. Пропонуються різні методи вирішення проблем, з яких обирається найкращий для рекомендації компанії, з подальшим порівнянням результатів до і після впровадження.

Викладення основного матеріалу. За зразок для аналізу взято корпус типу UCF 208. (рис. 1). Корпус UCF 208 обрано для дослідження через його універсальність, високу надійність, доступність на ринку та зручність у монтажі. Він є стандартом у промисловості завдяки здатності витримувати високі навантаження, легкої заміни, а також він підходить для різних умов експлуатації. UCF 208 — це стандартний фланцевий підшипниковий вузол, який складається з корпусу з чотирма отворами для кріплення і самовстановлюваного кулькового підшипника. UCF 208 широко використовується в різних сферах промисловості, включаючи сільське господарство, транспорт, будівництво і механічне обладнання. Цей підшипниковий вузол підходить для умов, де є помірні радіальні та осеві навантаження. Його головна перевага — простота монтажу і можливість самовирівнювання, що робить його універсальним рішенням для різних механічних систем.

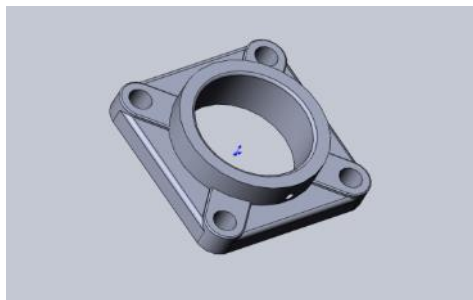


Рис. 1. Корпус фланцевого підшипникового вузла UCF 208

Процес виготовлення корпусу фланцевого підшипникового вузла UCF 208 включає кілька важливих етапів, кожен з яких має свої специфічні операції, технологічні вимоги та контрольні заходи. Основним матеріалом для виготовлення корпусу є сірий чавун, який забезпечує необхідні характеристики міцності, стійкості до зношування та поглинання вібрацій.

Процес виготовлення займає 10 етапів:

1. Підготовка матеріалів
2. Проектування та створення литтєвої форми
3. Лиття чавуну
4. Охолодження та вибивання
5. Очищення відливки
6. Механічна обробка
7. Термічна обробка (якщо необхідно)
8. Фарбування та захист від корозії
9. Контроль якості
10. Остаточна обробка та упаковка.

Під час кожного з цих етапів виробничого процесу можливе виникнення різноманітних помилок, які можуть суттєво вплинути на якість кінцевого продукту, зокрема помилки можуть початись вже з першого етапу під час підготовки матеріалів, а саме головним фактором неякісної деталі є невідповідність матеріалів специфікаціям, тобто використання неякісної або некоректної сировини, що суттєво може вплинути на міцність та довговічність деталі.

Прикладом помилки під час проектування деталі корпусу UCF 208 може бути неправильний розрахунок розмірів або допусків отворів для підшипника. Наприклад, якщо в кресленні закладено занадто малий діаметр центрального отвору, куди вставляється підшипник, то підшипник або не вставиться взагалі, або його встановлення потребуватиме додаткових зусиль, що може призвести до деформації або пошкодження корпусу та самого підшипника. З іншого боку, якщо отвір зроблений занадто великим, це призведе до недостатньої фіксації підшипника, що спричинить його зміщення під час роботи та зниження стійкості всієї конструкції. Така проєктна помилка виведе з ладу всю систему підшипникового вузла і може вимагати повного перероблення креслень і партії виробів.

Під час механічної обробки деталі корпусу UCF 208 можливою помилкою може бути неточність у свердлінні отворів для кріплення. Наприклад, якщо верстат неправильно налаштований або свердло змістилося під час роботи, отвори можуть бути зроблені з відхиленням від потрібного діаметра або неправильно розташовані відносно центру фланця. Це призведе до того, що підшипниковий вузол не зможе бути надійно закріплений на місці або з'єднання деталей буде неточним. В результаті така деталь не відповідатиме стандартам, її буде складно монтувати, і це

© В.М. Франчук, Л.М. Самчук

може вплинути на надійність усієї конструкції або спричинити передчасний знос підшипників під час експлуатації.

На етапі контролю якості перевіряють безпосередню відповідність деталі загально-заявленим стандартам, найбільшою помилкою на цьому етапі є пропуск дефектів під час перевірки, яка може призвести до збоїв у роботі обладнання яке використовує даний корпус зокрема через не якісну продукцію. Виникнути така проблема може через використання недостатньо кваліфікованого персоналу та застарілої вимірювальної техніки, яка може давати хибні показники.

Для забезпечення високої якості корпусів, зокрема таких як UCF 208, необхідно впроваджувати ефективні методи контролю на всіх етапах виробництва. Основними методами, що сприяють запобіганню потенційним проблемам із якістю та забезпеченню підвищеної надійності продукції, є комплексна система контролю на всіх етапах виробництва, застосування сучасних технологій і інструментів для перевірки якості, а також дотримання встановлених стандартів і методик удосконалення виробничих процесів. Такі підходи включають ретельний вхідний контроль якості матеріалів, статистичний контроль процесів для раннього виявлення відхилень, неруйнуючі методи тестування для виявлення дефектів без пошкодження виробів, контроль геометричних параметрів і точності, випробування міцності та інших характеристик матеріалів, тестування готової продукції в умовах, що імітують реальну експлуатацію, а також сертифікацію відповідно до міжнародних стандартів якості. Обрано було методи: ZQS ("нуль дефектів"), LIMS (Система управління лабораторною інформацією), SPC (Статистичний контроль процесу), комп'ютерного бачення та ШІ (використання штучного інтелекту), як найефективніші методи контролю якості, оскільки вони забезпечують повний цикл — від запобігання дефектам до автоматичного моніторингу та аналізу даних. ZQS допомагає уникати помилок на ранніх етапах, LIMS оптимізує зберігання інформації, SPC стабілізує процес через статистичний контроль, а комп'ютерне бачення дозволяє виявляти візуальні дефекти з високою точністю. ШІ використовується для прогнозування можливих проблем і автоматизації процесів, що разом мінімізує ризик браку та підвищує ефективність виробництва корпусів. Ці методи обрано не випадково, оскільки кожен із них максимально відповідає потребам контролю якості на виробництві корпусів.

1. ZQS - Підхід нуль дефектів. Концепція ZQS (Zero Quality Surveillance) або "нуль дефектів"— це стратегія, спрямована на досягнення ідеальної якості продукції шляхом повного усунення дефектів у виробничому процесі. Ця концепція впроваджується через серію кроків, які дозволяють попереджати помилки, знижувати кількість дефектів до нуля і вдосконалювати процеси на всіх етапах виробництва.

Мета системи нуль дефектів — не просто виявлення дефектів на виході, а їх попередження на кожному етапі процесу. Це включає аналіз можливих ризиків і потенційних проблем ще на етапі проектування та планування виробництва.

2. Метод використання комп'ютерного бачення та системи перевірки на основі штучного інтелекту. Така технологія дозволяє автоматизувати перевірку продукції та виявляти дефекти на різних етапах виробництва без втручання людини, зменшуючи ризики пропуску дефектів та підвищуючи загальну ефективність виробництва. Ці системи не статичні; вони вчать та вдосконалюються з часом. Аналізуючи більше даних, моделі штучного інтелекту стають кращими у виявленні та класифікації дефектів, зменшують помилкові спрацьовування та підвищують загальну точність перевірки.

Перевагами такого методу є висока точність і швидкість, яка не залежить від людини, а отже й кількість помилок через людський фактор меншає.

Проблеми та рішення: початкове налаштування та навчання моделям штучного інтелекту вимагають значних даних і досвіду. Співпраця з експертами зі штучного інтелекту та комп'ютерного зору для адаптації систем до конкретних умов виробництва може подолати ці перешкоди.

3. Метод LIMS. Система управління лабораторною інформацією. LIMS (Laboratory Information Management System) – це автоматизована система управління даними, що використовується в лабораторіях для збору, обробки, зберігання та аналізу інформації, пов'язаної з процесами досліджень і тестування. Система LIMS може суттєво покращити управління лабораторними даними, підвищити точність вимірювань і спростити робочі процеси. Переваги використання LIMS:

- Підвищення ефективності
- Зменшення помилок
- Краща доступність даних
- Відповідність стандартам

- Адаптивність та масштабованість

4. Метод SPC. Статистичний контроль процесу. SPC (Statistical Process Control) (рис. 2) — це метод управління якістю, який використовує статистичні методи для спостереження та контролю виробничих процесів. Основна мета SPC полягає у виявленні і усуненні варіацій у процесах, що можуть призвести до дефектів у продукції. Це допомагає забезпечити стабільно-високу якість продукції, зменшити витрати та покращити ефективність виробництва.

Основними компонентами SPC є:

- Контрольні карти
- Контроль стабільності процесу
- Аналіз причинно-наслідкових факторів (Root cause analysis)
- Визначення меж контрольованого процесу

Переваги SPC:

Виявлення проблем на ранніх стадіях:

- SPC дозволяє швидко виявити відхилення в процесах, що допомагає уникнути значних витрат на виправлення дефектів у кінцевій продукції.

Зниження витрат:

- Оптимізація процесів і зменшення кількості дефектів знижують витрати на виправлення, зберігання та повернення дефектної продукції.

Покращення якості:

- Завдяки систематичному контролю і корекції варіацій, якість продукції підвищується, що позитивно впливає на задоволеність клієнтів.

Систематизація управління:

- Впровадження SPC сприяє створенню системи управління якістю, що включає залучення всіх працівників до процесу покращення якості.

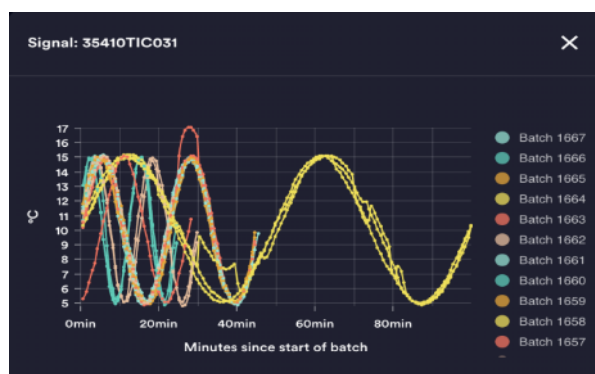


Рис. 2. Діаграма «SPC»

На діаграмі зображено залежність температури (в градусах Цельсія) від часу (в хвиликах) для кількох партій виробів, позначених номерами Batch 1657–1667. Кожна лінія на графіку відповідає конкретній партії та показує зміну температури протягом виробничого процесу.

- По осі Y відображено температуру в градусах Цельсія (від 5 до 17°C).
- По осі X відкладений час у хвиликах з початку партії (від 0 до 80 хвилин).
- Різнокольорові лінії представляють різні партії виробів.

Видно, що температура протягом виробничого циклу для кожної партії коливається за хвилеподібною траєкторією. Деякі партії, наприклад Batch 1657 (червона лінія), мають інший характер коливань у порівнянні з іншими партіями, такими як Batch 1667 (жовта лінія), яка має чітко виражену амплітуду температурних змін. Цей графік допомагає оцінити стабільність температурного процесу для різних партій і може вказувати на відхилення або аномалії в температурному режимі під час виробництва.

Характеристики, показані на графіку були обрані не випадково – завдяки такому графіку можна повністю контролювати температурний рівень у технологічному процесі, та порівнювати партії між собою, що в свою чергу дозволяє відстежувати контрольованість усього процесу.

Використовуючи ці методи управління якістю, ми маємо можливість вирішити помилки, які можуть завадити отриманню якісного кінцевого продукту. Задля вирішення проблем

невідповідності матеріалів специфікаціям, які виникають у виробничому процесі, ефективним інструментом є метод LIMS (Laboratory Information Management System).

За допомогою LIMS лабораторії можуть автоматизувати процес збору даних про матеріали, зокрема фізичні, хімічні та механічні властивості. Це дозволяє забезпечити точне тестування матеріалів, таких як метали, сплави або полімери, що використовуються у виробництві корпусу. LIMS дозволяє задати чіткі межі для ключових параметрів, таких як твердість, міцність на розрив, теплопровідність та інші технічні характеристики матеріалів, що використовуються у виробництві корпусу.

Якщо під час перевірки виявляються відхилення від встановлених стандартів, система автоматично сигналізує про невідповідність. Це допомагає швидко виявляти і вирішувати проблеми до початку повномасштабного виробництва, запобігаючи використанню неякісних матеріалів і знижуючи ризик браку або дефектів у готових продуктах.

Проблему неправильного розрахунку розмірів або допусків отворів для підшипників, зокрема в таких деталях, як корпуси UCF 208, можна значно знизити або навіть викоринити, використовуючи метод SPC (Statistical Process Control). Цей метод дозволяє розпізнавати і контролювати варіації у виробничих процесах, що впливають на точність і відповідність критичних параметрів продукції, таких як розміри та допуски отворів для підшипників.

Використовуючи метод SPC, кожен етап виробничого процесу контролюється в реальному часі. Контрольні карти дозволяють моніторити змінні параметри, такі як діаметри отворів, і негайно сигналізувати про будь-які відхилення від нормативів. Завдяки цьому можна своєчасно вносити коригування у процес виробництва і забезпечити дотримання заданих розмірів та допусків.

Для вирішення проблем неточностей у свердлінні отворів для кріплення, одним із найсучасніших та ефективних підходів є використання методу комп'ютерного бачення та системи перевірки на основі штучного інтелекту (ШІ). Цей підхід дозволяє виявляти відхилення у розмірах, положенні та якості обробки отворів, забезпечуючи високу точність і автоматизовану перевірку на етапі виробництва.

Комп'ютерне бачення дозволяє використовувати високоточні камери для сканування кожного виробу після свердління отворів. Система ШІ аналізує зображення та порівнює їх із 3D-моделями або кресленнями деталі, щоб оцінити відповідність розмірів та положення отворів специфікаціям.

Це забезпечує точний контроль над кожним виробом у реальному часі, і будь-які відхилення, навіть на мікрометровому рівні, можуть бути виявлені негайно. Такий підхід дозволяє значно знизити ймовірність помилок у свердлінні та забезпечити відповідність виробів стандартам.

Для вирішення проблеми пропуску дефектів під час перевірки у виробничих процесах одним із найефективніших підходів є ZQS (ZeroQualitySampling) — підхід "нуль дефектів". Цей метод спрямований на досягнення максимальної якості продукції через запобігання появі дефектів на всіх етапах виробництва, а не лише їх виявлення після завершення процесу. Традиційні методи перевірки якості передбачають виявлення дефектів вже на етапі готової продукції або під час вибірових перевірок. Це може призводити до того, що частина дефектів залишається непоміченою і потрапляє на наступні етапи виробництва або до, кінцевого споживача. Підхід ZQS, навпаки, фокусується на запобіганні виникнення дефектів з самого початку. Це досягається завдяки впровадженню систем превентивного контролю якості на кожному кроці виробничого процесу. Підприємства, які впроваджують ZQS, створюють середовище, в якому контроль якості є невід'ємною частиною кожної операції.

Найбільш поширеним та широкоживаним методом з перерахованих є SPC. Цей метод широко використовується на виробництвах по всьому світу, оскільки допомагає контролювати та поліпшувати якість продукції за допомогою статистичних методів. SPC використовують такі технологічні гіганти як Toyota, Ford, General Motors у сфері автомобілебудування, Intel, Samsung -у виготовленні мікропроцесорів та інших компонентів, Boeing та Airbus у авіаційній промисловості. Отже метод SPC є також багатостороннім і його можна інтегрувати у різні промислові комплекси, які можуть суттєво відрізнитись один від одного своєю специфікою виробництва та виробленою ним продукцією.

Проте метод використання комп'ютерного бачення та системи перевірки на основі ШІ стрімко розвивається та стає більш універсальним і впроваджується у багатьох сучасних виробництвах, через свою точність та якість роботи, яку не завжди може дати працівник через недостатню кваліфікацію чи людський фактор. Також методи комп'ютерного бачення та систем перевірки на основі ШІ не лише стрімко розвиваються, а й стають невід'ємною частиною індустрії 4.0, що

базується на автоматизації, цифровізації та інтеграції сучасних технологій у виробничі процеси. Окрім удосконалення якості продукції та зменшення залежності від людського фактора, ці системи відкривають більше нових можливостей для оптимізації всього циклу виробництва, що дуже важливо для технологічного процесу.

Отже контроль якості має величезне значення для успіху та конкурентоспроможності компаній-виробників металевих деталей. Виробники можуть постійно постачати високоякісні деталі, які відповідають або перевищують очікування клієнтів, запроваджуючи комплексні заходи контролю якості протягом усього виробничого процесу, запроваджуючи надійні системи управління якістю та активно шукаючи та враховуючи оцінки клієнтів. У сучасному виробничому середовищі, що швидко змінюється, надання пріоритету якості на кожному етапі виробничого процесу та інвестиції в передові технології, інструменти та талант є важливими для виробників, щоб вирізнитися з них, зменшити витрати, підтримувати міцні взаємовідносини з клієнтами та підштовхувати стійке зростання бізнесу. Відданість якості є фундаментальною запорукою довгострокової життєздатності та процвітання у сфері виробництва металевих деталей.

Висновки. Завдяки проведеному аналізу наявних систем управління та контролю якості на виробництві, було підібрано найкращі методи які вирішують наявні проблеми у виробництві корпусу UCF 208. Завдяки методам SPC, LIMS, ZQS та методу використання комп'ютерного бачення та системи перевірки на основі ШІ, можна покращити технологічний процес, підвищити якість готової продукції і зменшити витрати на виробництво через зменшення кількості дефектних виробів, без великих капіталовкладень. Дослідження в області управління та контролю якості повинні зосередитись на інтеграції інноваційних технологій, на приклад таких як комп'ютерне бачення, предиктивна аналітика та роботизація, з традиційними системами управління якістю. Важливими аспектами дослідження мають бути економічна ефективність впровадження цих рішень та їхній вплив на зниження дефектів, оптимізацію виробничих процесів і дотримання технічних характеристик продукції.

Список використаних джерел:

1. Д. С. Скалацький Технологія виготовлення деталі «Корпус ЕУ8.172.700» з використанням верстатів з ЧПК: реферат. Хмельницький, 2024. 74 с.
2. B.Heling, B.Schleich, S. Wartzack An approach for determining the influence of manufacturing process parameters on product quality characteristicsErlangen, 2020. P. 212–217.
3. R.Lombard, C. C.Waveren, K.-Y. Chan Factor affecting quality in a manufacturing environment for a non-repairable product. Pretoria, 24 July 2018. P. 137–142.
4. Research on Process Quality Prediction and Control of Spindle Housings in Flexible Production Lines / BoHuangetal. Zigong, 19 July 2023. P. 1–29.
5. A.S.Vereshchagina, A.A.Kharitonov Ways of increase of efficiency of technological process in terms of the engineering enterprise. Novosibirsk, 20 March 2019. P. 76–81.
6. Д. Мазур Фактори, які впливають на систему управління якістю на підприємстві // Вісник Хмельницького національного університету. 2024. № 2. С. 360–364.
7. D. Staff Quality Control in Manufacturing | Duralabel. Resources. URL: <https://resources.duralabel.com/articles/quality-control-in-manufacturing> (дата звернення: 13.10.2024).
8. Quality Control in Metal Parts Manufacturing. BOSS Magazine. URL: <https://thebossmagazine.com/quality-control-in-metal-parts-manufacturing/> (дата звернення: 13.10.2024).
9. Mastering Quality Control in Manufacturing: A ComprehensiveGuide. MontBlanc AI. URL: <https://montblanc.ai/quality-control-in-manufacturing/> (дата звернення: 13.10.2024).
10. IMEKO News&Events. URL: <https://www.imeko.info/publications/tc14-2013/IMEKO-TC14-2013-50.pdf> (дата звернення: 13.10.2024).
11. International Journal of Science Engineering and Technology. URL: https://www.ijset.in/wp-content/uploads/IJSET_V9_issue5_468.pdf (дата звернення: 13.10.2024).

Рецензент: Мікуліч Олена Аркадіївна, доктор технічних наук, професор, Луцький НТУ

В.В. Герасимов¹, О.О. Молнар², В.Д. Рудь³, М.В. Полажинець¹, Ю.Ю. Жигуц²Мукачівський державний університет¹ДВНЗ «Ужгородський національний університет»²Луцький національний технічний університет³

РОЗРОБКА СУЧАСНИХ ІНДИВІДУАЛЬНИХ СИСТЕМ БЕЗПЕКИ ПРИ РОБОТІ З РОЗКРІЙНИМ ОБЛАДНАННЯМ В ШВЕЙНІЙ ГАЛУЗІ

Одним із основних ризиків, який виникає під час роботи з обладнанням легкої промисловості є травмування від рухомих частин машин. Багато швейних машин мають рухомі частини, які можуть призвести до серйозних травм, якщо працівник не використовує їх обережно або якщо машина не обслуговується належним чином або присутній людський фактор неувважності виконання певної операції. Останнє становить особливу небезпеку під час виконання операції розкрою матеріалів на стрічкових машинах. Певної проблеми набуває така ситуація, коли на такій доволі небезпечній технологічній операції замість досвідченого персоналу, як зазвичай, починають працювати менш кваліфіковані працівники, що спричинено особливостями роботи підприємства під час військового стану. З метою запобігання травмування працівника ріжучим інструментом під час виконання ним технологічних операцій авторами запропоновано розробку у вигляді індивідуального пристрою захисту руки із залученням сучасних цифрових технологій. Проаналізовані основні підходи щодо виготовлення пристрою захисту, запропоновані базові схемні рішення, що надають змогу реалізувати систему захисту вже у кінцевому виді. Акцент зроблено на пристрої захисту, конструкція якого може бути реалізована на розповсюдженій та доступній елементній базі. Також, автори передбачають розширення можливостей цього пристрою безпеки шляхом адаптації до нього інших додаткових функціонально-технологічних опцій, що підвищує його ефективність та конкурентоспроможність на промисловому ринку.

Ключові слова: пристрій безпеки, система захисту, процес різання, швейне виробництво.

V.V. Gerasimov, O.O. Molnar, V.D.Rudj, M.V. Polazhynets, Yu.Yu. Zhiguts

DEVELOPMENT OF MODERN INDIVIDUAL SAFETY SYSTEMS WHEN WORKING WITH CUTTING EQUIPMENT IN THE GARMENT INDUSTRY

One of the main risks that arises when working with light industry equipment is injury from moving machine parts. Many sewing machines have moving parts that can lead to serious injury if the worker does not use them carefully or if the machine is not properly maintained or if there is a human factor of inattention to a particular operation. The latter is particularly dangerous when cutting materials on a draw frame. This situation becomes a particular problem when, as usual, less qualified workers start working on this rather dangerous technological operation instead of experienced male staff which is caused by the peculiarities of the enterprise's operation during martial law. In order to prevent the worker from being injured by a cutting tool while performing technological operations, the development of an individual hand protection device with the involvement of modern digital technologies have been proposed by authors. The main approaches to the manufacture of the protection device and propose basic circuit solutions that allow implementing the protection system in its final form have been analysed. The emphasis is placed on the protection device, the design of which can be implemented on a common and affordable element base. The authors also envisage expanding the capabilities of this security device by adapting other additional functional and technological options to it, which increases its efficiency and competitiveness.

Keywords: safety device, protection system, cutting process, sewing production.

Вступ. В сучасному світі швейна промисловість постійно еволюціонує завдяки впровадженню новітніх технологій [1-4]. Зокрема, розкрійні інструменти, такі як ножі, ножиці, лазери, до того ж різальні інструменти постійно модернізуються для підвищення ефективності та безпеки [3].

Найбільш небезпечними з точки зору безпеки праці інструментами та технологічно інноваційними операціями в області розкроювання матеріалів в галузі легкої промисловості можна вважати такі засоби і методи показані на рис. 1 та проаналізовані в табл. 1.



Рис. 1. Технологічне обладнання для розкроювання швейних матеріалів

Ця таблиця надає короткий огляд передових методів розкрою, їх переваг та основних правил

безпеки. Звісно, кожен метод має свою специфіку та може вимагати додаткових інструкцій для забезпечення максимальної безпеки. В той же час, аналізуючи основні методи розкрою на виробництві, можна зробити висновок, що найбільшу небезпеку для працівника швейного виробництва становить технологія розкроювання матеріалів на стрічкових машинах (рис. 1).

Табл. 1

Аналіз методів розкрою швейних матеріалів

Метод розкрою	Технічні переваги	Правила техніки безпеки
Ручний розкрій (ножиці)	Гнучкість та можливість вирізання деталей різних форм. Відсутність необхідності в електроенергії.	Завжди тримати ножиці закритими, коли вони не використовуються. Не передавати ножиці вістрям вперед. Зберігати ножиці в безпечному місці, недоступному для недосвідченого персоналу.
Електричні розкрійні ножі	Швидке та ефективне вирізання великих об'ємів тканини. Єдність та рівномірність розрізу.	Вимкнути прилад після завершення роботи. Використовувати в місцях, де немає води або інших рідин. Не торкатися рухомого леза під час роботи.
Лазерне розкроювання	Висока точність та якість розрізу. Мінімальні втрати матеріалу. Автоматизований процес.	Носити захисні окуляри від лазерного випромінювання. Не дивитися безпосередньо на лазерний промінь. Забезпечити належне вентилування, оскільки дія лазера може спричинити виділення шкідливих газів під час роботи.
Ультразвукове розкроювання	Відсутність відходів, оскільки тканина "запаюється" на краях. Швидкий процес різання.	Носити захисні рукавички та окуляри. Уникати прямого контакту з обладнанням під час його роботи.

Аналітичні дослідження та їх обговорення. Реальна ситуація на підприємствах вказує на використання ще традиційних механічних засобів розкрою, що підвищує ймовірність отримання травми працівником, зокрема при роботі з стрічковими розкрійними машинами. Спеціальна кольчужна рукавичка (рис. 2), яка повинна застосовуватись розкрійником, не відповідає умовам комфортного користування під час роботи з ріжучим інструментом. Зазвичай нею не користуються працівники розкрійних цехів. Фактично вона уособлює технології, які застосовувались ще декілька століть тому. На ринку засобів безпеки представлена велика кількість таких захисних пристроїв та пристосувань. Тому автори вирішили запропонувати розробку сучасних інтелектуальних засобів безпеки, які можна застосувати під час роботи на розкрійному обладнанні [2]. Сучасні досягнення в області сенсорних систем та мікроелектроніки дозволяють створювати «розумну рукавичку», яка буде зручною та інтелектуальною, і дозволить реагувати на небезпеку заздалегідь [2,3].



Рис. 2. Кольчужна рукавичка для роботи з ріжучим інструментом

Основним викликом при розробці подібних систем є відстеження відстані між ріжучими поверхнями (лезо, ріжуча кромка, вібруюча або циркулярна пила тощо) та рукою робітника. Для цього можна запропонувати декілька рішень:

- відстеження положення руки працівника за допомогою камери, та комп'ютерним аналізом відстані його від небезпечних деталей;

© В.В. Герасимов, О.О. Молнар, В.Д. Рудь, М.В. Полажинець, Ю.Ю. Жигуц

- використання ємнісного сенсора між рукою та ріжучими кромками;
- індуктивний зв'язок між спеціальною рукавицею на руці оператора та ріжучим інструментом.

Кожен з перерахованих методів має свої переваги та недоліки. Використання відеоаналізу є універсальним розв'язком проблеми захисту робітника, без необхідності використання захисних засобів, однак виникає потреба у «навчанні» системи нейронних мереж під конкретну конфігурацію обладнання. Крім того потрібно забезпечити робоче місто якісним круговим освітленням без тіней, використання відеокамер з високою роздільною здатністю, тому що від цього буде залежати точність вимірювань відстані руки оператора від небезпечного обладнання. Ну і звичайно для малого часу реакції системи на небезпечні події, швидкість обробки повинна бути дуже високою, з використанням апаратних засобів формування аналізуючої нейронної мережі на основі, наприклад, програмованих логічних матриць [4] бо така програмна реалізація буде мати більшу інертність. Така система буде високовартісна. Разом із вказаними недоліками вона не виправдовує своє використання в умовах масового виробництва.

Використання ємнісного або індуктивного зв'язку виглядає набагато простішим рішенням. Для такого методу на металеву ріжучу кромку потрібно подавати високочастотний сигнал в декілька десятків вольт з генератора частотою (10^5 - 10^6 Гц). В захисну рукавицю робітника для формування ємнісного зв'язку мають бути вплетені нитки, які проводять електричний струм (металеві або краще карбонові). Ріжуча кромка в такому випадку виконує функцію однієї з обкладинок сенсорного конденсатора, а сітка ниток рукавиці іншу. Амплітуда напруги (яка і буде пропорційна відстані) може бути легко продетектована звичайним діодним амплітудним детектором, та у подальшому оброблена на однокристальному мікроконтролері, з виводом попереджувального звукового сигналу зі змінною частотою. Амплітуда та частота сигналу повинна наростати зі зменшення відстані між ріжучим інструментом та рукою оператора. А при зменшенні її до критичного значення, обладнання має бути знеструмлене.

У випадку індуктивного зв'язку змінюється конструктивно лише рукавиця, в якій електропровідні нитки мають формувати витки сенсорної котушки. Далі обробка сигналу виконується як і у випадку ємнісного сенсора, описаного вище. При наявності в цеху великих електромагнітних перешкод (які створюють прилади освітлення, електромотори швейного та розкрійного обладнання), замість звичайного діодного амплітудного детектора краще використовувати синхронний детектор або підсилювач (рис. 3).

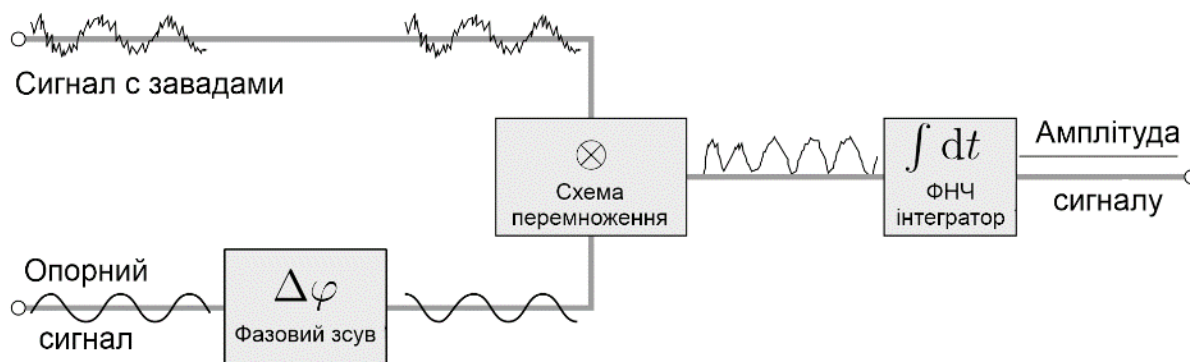


Рис. 3. Блок-схема синхронного детектора

Синхронний детектор або підсилювач – такий тип підсилювача, який може виокремити сигнал з відомою несучою частотою з надзвичайно «зашумленого середовища». Залежно від динамічного діапазону приладу, можуть бути надійно виявлені корисні сигнали в мільйон разів менші за шумові компоненти. Блок-схема синхронного детектора представлена на рис. 3. По суті, це гомодинний детектор (homodyne detector), за яким слідує фільтр нижніх частот.

Використання ємнісних або індуктивних сенсорних технологій в захисних рукавичках (рис. 4) відкриває нові можливості для підвищення безпеки на виробництві. Проте, успіх таких інновацій залежить від точності та надійності систем, а також від їхньої інтеграції до робочих процесів [5].

В табл. 2 показані ключові відмінності між ємнісним та індуктивним методами. Ємнісний метод характеризується малою вартістю компонентів та високою чутливістю до зовнішніх умов, тоді як індуктивний метод має більшу точність виявлення небезпек та більшу надійність, але викликає більшу технологічну складність при його реалізації та має більшу вартість [5,6].

Обидва методи мають свої переваги та обмеження, які необхідно враховувати при їх використанні в системах техніки безпеки (рис. 4).

Табл. 2

Таблиця порівняння ємнісного та індуктивного методів [4]



Рис. 4. Пропоновані схеми ємнісної (а), та індуктивної (б) реалізації зв'язку для захисної рукавички

Аспект	Ємнісний метод	Індуктивний метод
Точність виявлення	Середня	Висока
Чутливість до зовнішніх умов	Висока	Середня
Вартість компонентів	Низька	Вища за ємнісний
Технологічна складність	Середня	Вища
Надійність у виробничих умовах	Середня	Висока
Вимоги до обслуговування	Низькі	Середні
Вплив на ергономіку рукавиці	Мінімальний	Може впливати на гнучкість
Інтеграція з іншим обладнанням	Добра	Складніша
Використання в різних умовах	Обмежений	Ширший
Вплив електромагнітних перешкод	Середній вплив	Менший вплив
Можливість масштабування	Висока	Середня

Іншим аспектом реалізації даної системи безпеки є створення зворотного зв'язку до користувача таким пристроєм. Чим ближче пальці працівника до рухомої стрічки, тим інтенсивнішим буде сигнал генератора (в обох запропонованих схемах реалізації). Якщо застосовувати простий звуковий сигнал (його пропорційне зростання), то у зв'язку із тим, що в цеху існує доволі сильний звуковий шум від різних робочих інструментів, сигнал тривоги не буде чути. Як альтернативу, можна запропонувати вібраційний тактильний сигнал. Для цього, потрібно оцифровувати сигнал за допомогою вбудованого або зовнішнього аналого-цифрового перетворювача (АЦП), та передавати його у цифровому виді через відповідний канал (протокол) зв'язку. Дану операцію можна реалізовувати за допомогою мікроконтролерного керування. Таке рішення дещо ускладнює реалізацію проекту, але значно розширює можливості системи. Рівень сигналу з АЦП нормується і калібрується програмно за відстанню до інструменту та адаптації до дії зовнішніх факторів. Сигнал індикації відстані та безпеки, крім тактильно-вібраційного [7], може бути продубльований через канал зв'язку "Bluetooth", що досить просто реалізувати у випадку мікроконтролерного керування схемою у цілому, додавши наприклад зворотній зв'язок на системі Ардуїно [8-10]. Прикладом такої реалізації може бути смарт-рукавичка [11] дизайн якої представлений на рис. 5.

Розширення можливостей смарт-рукавички може відбуватись внаслідок програмування в систему керування пристрою нових функцій, пов'язаних з виконанням додаткових допоміжних технологічних операцій. Наприклад, можливість адаптації швидкості обертання ріжучого леза (стрічки) у залежності від параметрів різання, які отримує розкрійна машина від сенсорів рукавички. Такий підхід підвищує якість процесу різання матеріалів, зберігає енергоресурси, вказує на потребу у технічному обслуговуванні розкрійної системи, тощо.

Висновки. Впровадження захисних технологій у розкрійне обладнання є ключовим для забезпечення безпеки працівників. Використання смарт-рукавичок та інших сучасних технологій з датчиками та управлінням на основі мікроконтролера може значно знизити ризик травмування.



Рис. 5. Пропозиція смарт-рукавички з застосуванням мікроконтролерного керування

Однак ці технології мають свої виклики, як наприклад, висока вартість та складність інтеграції. Аналогові методи, такі як ємнісні та індукційні системи, хоч і простіші, можуть бути менш ефективними у певних критичних ситуаціях. Удосконалення цих технологій повинно бути зосереджене на забезпеченні оптимального балансу між безпекою, вартістю та ефективністю.

Список літератури:

1. Березненко С. М. Основи технологій експериментального та підготовчо-розкрийного виробництва: навч. посіб. – К.: КНУТД, 2017. - 171 с.
2. Основні вимоги правил охорони праці до підготовчо-розкрийного виробництва. URL: <https://oppb.com.ua/news/osnovni-vymogy-pravyl-ohorony-praci-do-pidgotovcho-rozkriynogo-vyrobnytva>.
3. Романюк О. О, Скідан В. В., Гончарук А. Ю. Основні вимоги безпеки до виробничого обладнання та технологічних процесів при виробництві товарів широкого вжитку. Енергозбереження та промислова безпека: виклики та перспективи: матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (4–5 червня 2019 року. м. Київ). – Київ: Основа, 2019. С. 237–245.
4. Héctor Allende, Claudio Moraga, Rodrigo Salas. Artificial neural networks in time series forecasting: a comparative analysis. *Kybernetika*. 2002. № 38. Pp. 685-707.
5. Переваги і недоліки різних типів датчиків. URL: <https://tehnar.net.ua/perevagi-i-nedoliki-riznih-tipiv-datchikiv/>.
6. Індуктивні датчики: принцип дії, різновиди, застосування. URL: <https://eleksun.com.ua/uk/blog/article/induktyvni-datchyky-pryncyp-diyi-riznovydu-zastosuvannya>.
7. Мельник А.В., Бевза О.М. Ємнісний датчик присутності // Електронна та акустична інженерія. 2020. т. 3(1). - С. 10-14.
8. Kovach A., Gerasimov V., Molnar A. Ensuring safety in the cutting production of a sewing enterprise "Smart glove". Monografia: Technologie, procesy i systemy produkcyjne. Wydawnictwo naukowe Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego. 2023. Pp. 93-97.
9. Tavassolian M., Cuthbert T. J., Napier C., Peng J. Y., Menon C. Textile-Based Inductive Soft Strain Sensors for Fast Frequency Movement and Their Application in Wearable Devices Measuring Multiaxial Hip Joint Angles during Running. *Advanced Intelligent Systems*. 2020. Vol. 2(4). Pp. 165-186.
10. Il'kovič S. Modernization of science education using teaching aids based on microcontrollers. *International scientific journal «Education and science» natural and technical sciences*. 2023. №1(34). Pp. 26-32.
11. Caeiro-Rodríguez M., Otero-González I., Fernando A. Mikic-Fonte, Lamas-Nistal M. A Systematic Review of Commercial Smart Gloves: Current Status and Applications. *Sensors (Basel)*. 2021. № 21(8), Pp. 2667 <https://doi.org/10.3390/s21082667>.

Рецензент: Рубіш Василь Михайлович проф., док. фіз.-мат. наук, завідувач Ужгородської лабораторії матеріалів оптоелектроніки та фотоніки Інституту проблем реєстрації інформації НАН України

Ю. В. Муравинець

Луцький національний технічний університет

ОЦІНКА ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ПРИТИСКНОГО ТРАНСПОРТЕРА НА НАДІЙНІСТЬ ПРИТИСКАННЯ ПАСМ

У статті проведено оцінку впливу параметрів притискного транспортера на надійність притискання сировини пасом в його каналі та отримано математичні залежності, які дозволяють визначити вплив параметрів притискних циліндрів транспортера на зовнішнє зусилля притискання пасом в його каналі під час роботи.

Ключові слова: конвеєр, параметри, притискні планки, зусилля накопичення, накопичувальний конвеєр, багатofакторний експеримент.

Y. V. Muravynets

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE CLAMPING CONVEYOR ON THE RELIABILITY OF STRAND CLAMPING

In the article, the influence of the parameters of the pressure conveyor on the reliability of the compression of raw material strands in its channel was evaluated, and mathematical relations were obtained that allow determining the influence of the parameters of the pressing cylinders of the conveyor on the external pulling force of the strands. duct during heating operation.

Keywords: conveyor, parameters, clamping bars, storage force, storage conveyor, multifactor experiment.

Statement of the problem.

In recent years, unfortunately, despite the great importance of the linseed industry, the opportunities of the linseed agricultural complex have been lost. However, it should be noted that linen products are very popular all over the world, especially in the markets of European countries and the USA.

Analysis of the latest research and publications.

Theoretical and experimental research devoted to the primary processing of flax and analysis of the design and improvement of A.M. machines. Ipatova [1], F.A. Dyachkova [2], M.M. Suslova [3], A.B. Lapshin [4] and many other scientists. The analysis of the studies showed that a significant part of them was devoted to the important connection of the three-drum instrument. Machines for forming balls and machines for unwinding rolls are also widely used. However, insufficient attention is paid to the functioning of the transport mechanism in the literature.

An analysis of the studies showed that a significant part of them is devoted to the important unit of the triple instrument. Ball forming machines and roll unwinding machines are usually considered. However, insufficient attention is paid to the functioning of the transport mechanism in the literature.

But it is precisely because of the imperfections in the design of the scraper conveyor that the analysis of known studies has shown that during the compaction process, the loss of long fibers is on average 9.6%, provided that the average length of the stem conveyor is 70 cm, and when reducing the length to 60-65 cm, the amount of losses increases by 17-17.9%.

Therefore, the purpose of this work is to analyze known studies and designs of transport mechanisms in order to identify a list of unexplained, but scientifically based aspects of their work.

Purpose of the study. An important and urgent task today is the improvement of flax processing technology through the modernization of milling and spinning units, which will ensure an improvement in the quality of the fibers obtained from it and other products containing flax.

Research results. The effect of the parameters of the pressure rollers for the pressure transfer on the reliability of the pressure of the tape in the channels was estimated based on the value of the drag force, which was determined based on the experiment of multiple variables.

The impact factors were taken as follows:

- Distance from the cylinder axis to the thread attachment point – x_1 ;
- Rotary spring compression force - x_2 ;
- Pressure roller diameter - x_3 ;

According to [5], conducting a multiparameter experiment involves performing n number of experiments.

Let us determine the number of experiments required for research:

$$n = m^k = 2^3 = 8, \quad (1)$$

© Ю. В. Муравинець

m – are the research levels;
 k – their levels of variability.

Table 1

Shows the factors and their levels of variability			
Are the research levels	Their levels of variability.		
	UPPER	ZERO	LOWER
X1	360	180	0
X2	210	120	30
X3	200	130	60

Use coefficient notation to convert normal coefficient values to notation values:

$$x_i = \frac{X_i - X_0}{\Delta_i} \quad (2)$$

Where – the values X_i , X_0 of the contrast ratio are normal at the tested levels and at zero;

Δ_i - replacement interval;

x_i - this is an encrypted agent.

The experimental conditions are given in Table 2. Value obtained experimentally. The reproducibility of the experiments was verified according to the Cochran standard:

$$G \leq G(0,05; n; f_i), \quad (3)$$

де $G \leq G(0,05; n; f_i)$ – the critical value of the Cochran criterion, which was chosen depending on the level of significance, the number of independent variance estimators, and the number of degrees of freedom for each estimator.

Table 2

Conditions for conducting experiments							Output parameter, y , H			
Points of the plan	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	y_1	y_2	y_3	$y_{ср}$
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	17,7	17,2	16,5	17,19
2	-1	+1	-1	-1	+1	-1	58,0	59,16	59,12	58,76
3	-1	+1	+1	-1	-1	+1	70,50	70,62	69,58	70,25
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1	32,90	31,70	32,48	32,38
5	+1	-1	+1	-1	+1	-1	8,91	8,98	7,76	8,55
6	+1	-1	-1	-1	-1	+1	2,65	3,95	3,60	3,4
7	+1	+1	-1	+1	-1	-1	9,68	10,89	10,03	10,2
8	-1	-1	+1	+1	-1	-1	29,57	29,64	29,74	29,65

Response surfaces are given (Figure 1).

From the response surface obtained, it can be seen that the closer the threads are to the roller axis, the more effort is required to extract the threads during the combing process.

It can be seen from the response surfaces obtained that the closer the filaments are to the cylinder axis, the greater the effort exerted to pull the filaments during the carding process.

When it is far away from the axis, much less effort is necessary, even with the large compressive force of the pressure roller spring, to ensure reliable clamping. Excessive increase in compressive force causes fiber injury.

In addition, the large distance between the axes of the seedlings does not allow reduction of their dimensions.

The response surfaces are generated according to the normal factor equations shown in the figure 2.

The compressive force of the springs has the greatest influence on the pulling force.

The second most important factor is the distance from the drum axis to the thread placement. The diameter of the seedlings has little effect.

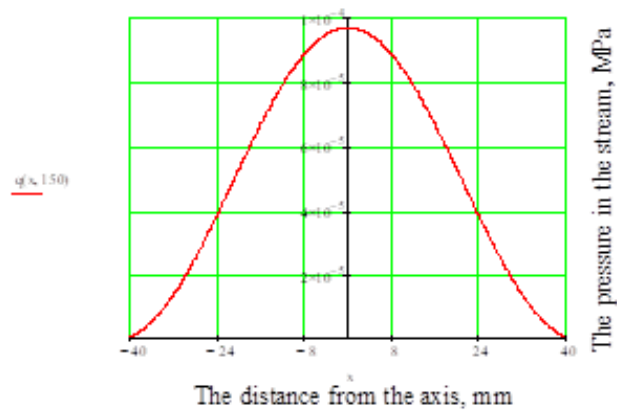


Figure 1. Response surfaces (equations in cryptographic coefficients) In normal operators the equation will be written: $y(X_1, X_2, X_3) = 0,238X_1 + 0,42X_2 + 0,0024X_3 - 0,001$

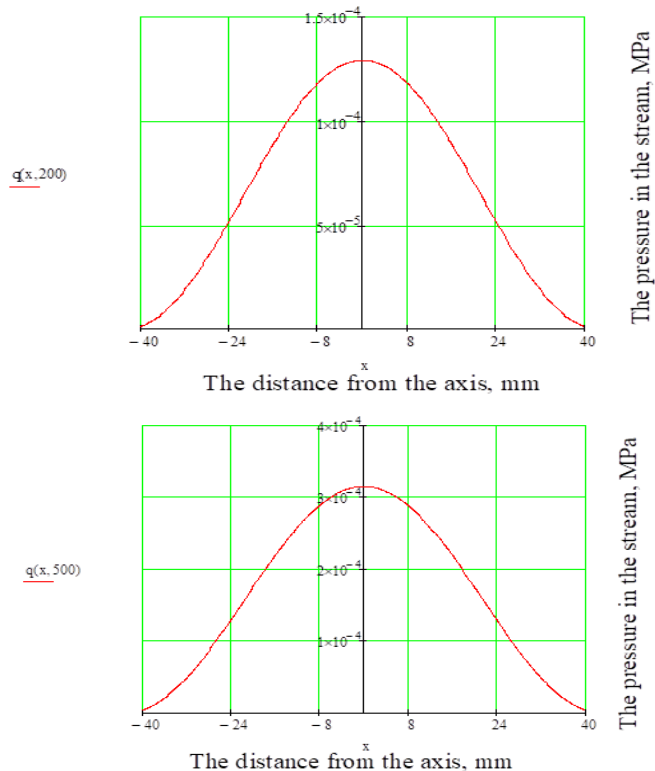


Figure 2. Response surfaces (equations in natural operators).

Conclusions. Studies of the influence of the tension vector parameters on the reliability of the scythe fixation showed that the necessary pulling force is affected by the pressure force of the roller and the distance from the axis of the roller to the point of tension of the scythe; Roll diameter. Moreover, the influence of this last factor is the least important.

Literature

1. Markov V. IN. Primary processing of flax and other flax crops: Textbook for mediums. special studies established. - M. : Light and food industry, 1981.- 376p.
2. Ipatov A. M. Theoretical basis of mechanical processing of stalks of pulp crops / A. M. Ipatov. - M. Legprombytizdat. 1989.-144 p.
- 3 Nalobina O.O. Mechanical and technological bases of interaction of working bodies flax harvesting of plant material: di ... dr. sc. sciences: 05.05.11 / Nalobina Elena. - K., 2008. - 341 p.
4. Muravynets Y.V. Improvement trusts linen processing technology by upgrading breaking-threshing units: dicandidate sc. sciences: 05.18.02 / Muravynets Yulia. - H., 2014. - 127 p.

В. І. Заваринський, Р. В. Павлюк, Ю. І. Озимок

Національний лісотехнічний університет України

НАПРЯМКИ ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ РЕЙСМУСОВИХ ВЕРСТАТІВ

Наведено аналіз принципової схеми рейсмусового верстата і виявлені основні механізми, які впливають на точність оброблення. Проаналізовані конструкції механізмів подавання заготовок рейсмусових верстатів, механізми базування заготовок на верстаті та нова конструкція різального інструменту. Встановлені основні переваги наведених конструкцій, їх недоліки та запропоновано напрямки їх подальшого вдосконалення.

Ключові слова: рейсмусовий верстат, механізм подавання, механізм базування, різальний інструмент

V. Zavarynskyi, R. Pavluk, Yu. Ozymok

DIRECTIONS FOR IMPROVING THE DESIGNS OF PLANER MACHINES

The analysis of the schematic diagram of a planer machine has been presented, identifying the main mechanisms that influence processing accuracy. The designs of the feeding mechanisms of planer machines, the work piece clamping mechanisms, and the new cutting tool design have been analyzed. The main advantages and disadvantages of these designs have been established, and suggestions for their further improvement have been proposed.

Keywords: planer machine, feeding mechanism, clamping mechanism, cutting tool.

Introduction. The primary goal of woodworking production is to obtain parts and products of the required shape, size, and surface roughness with minimal costs, which remains a crucial task for modern manufacturing. Regulation of accuracy and surface roughness is of significant practical importance because performing the initial operations with the required precision reduces the actual allowances for machining in subsequent operations, thus enabling wood conservation and resulting in an environmental benefit. Furthermore, this improves the final accuracy of the parts and creates a more feasible opportunity to automate finishing processes due to more precise preliminary calibration of work pieces during the initial operations.

Problem statement. The high requirements for machining accuracy are particularly relevant for a type of longitudinal milling machine, such as planer machines, whose task is to form the required thickness of workpieces with the necessary surface roughness. An analysis of the use of planer machines, the typical schematic diagram of which is shown in Fig. 1, reveals that the quality of the products obtained after processing on these machines primarily depends on the design of the workpiece feeding mechanisms (1), their clamping on the machine (2), and the design of the cutting tool (3).

Presentation of the main material. Let us consider the main designs of the mentioned mechanisms and their directions for improvement.

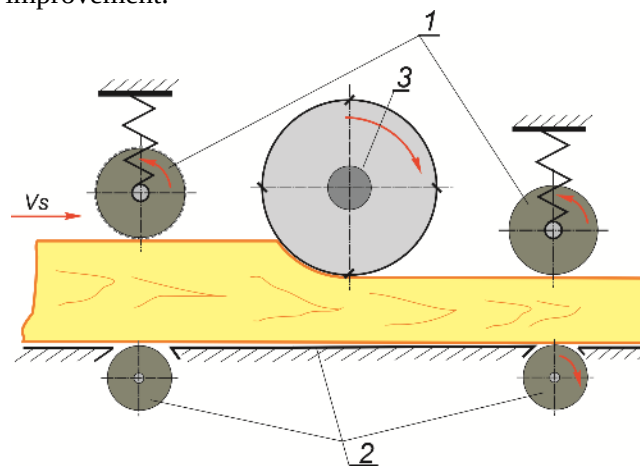


Fig 1. Schematic diagram of a planer machine: 1 – workpiece feeding mechanism; 2 – basing mechanism; 3 – cutting tool.

To simultaneously process several workpieces with different allowances for machining, the front roller in the workpiece feeding mechanism is made sectional [1], and each section can independently tilt upwards when feeding workpieces of varying thickness. The front roller of a single-sided planer is made corrugated. The corrugations provide good grip and reliable feeding of the processed workpieces into the machine. Additionally, the roller is made sectional (Fig. 2), consisting of a set of corrugated rings 1 mounted

on a common shaft 2. Elastic elements, such as steel springs 3 or rubber bushings-dampers 4, are placed in the gap between the rings and the shaft.

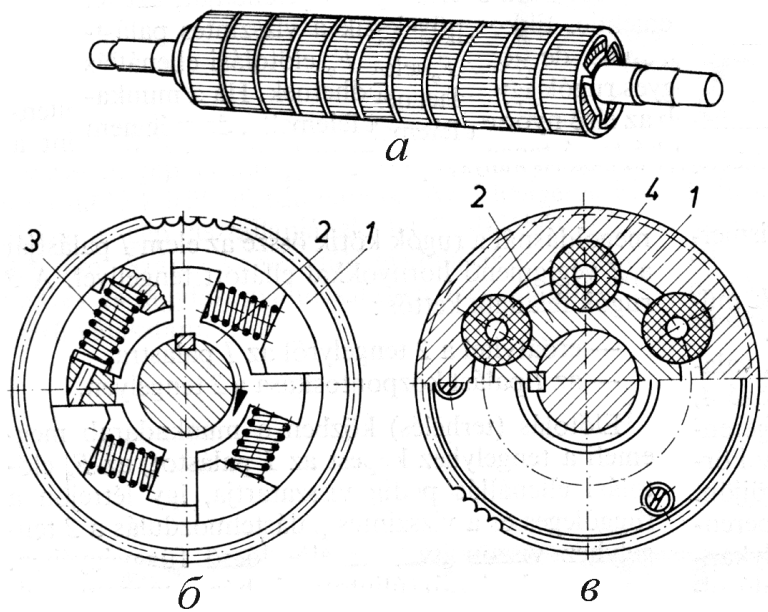


Fig 2. Sectional feeding roller: a – general view; b – cross-section of the spring sectional roller; c – the same with rubber rings; 1 – outer grooved ring; 2 – drive shaft; 3 – springs; 4 – rubber bushings.

The elastic elements allow the outer rings to move independently of each other and the shaft in the vertical plane. This makes it possible to process several workpieces with different allowances simultaneously.

Such a design is widely used in various models of planer machines, but it has the following disadvantages. Due to the use of rubber elastic rings or springs, the pressure of the roller on the upper surface of the workpieces will depend on their thickness, and in some cases, the teeth of the roller sink into the workpiece to such an extent that further allowance removal is done to a lesser degree, leaving traces of tooth indentation on the processed surface. Another disadvantage is that rubber rings or springs are under continuous load, and after some time, they lose their elastic properties and need to be replaced. To ensure uniform pressure on the surface of the workpiece, other designs of sectional rollers are used. Let's consider one such design, which is based on the use of a viscous fluid hydroplastic [2].

The sectional roller (Fig. 3) consists of steel grooved sections 1 and a drive shaft 2 with an internal cavity 3, which is filled with hydroplastic. The left and right trunnions 4 are rigidly connected to the shaft 2. Bearings 5 are installed on them in housings 6, which are mounted on the machine frame 7. A drive sprocket 8 is fixed on the right trunnion 4. The left trunnion has a rod 9, which interacts with a spring 10, adjusted by a nut 11.

Between the shaft 2 and the section housing 1, three plungers 12 are installed, which are located on the shaft in bushings 13 and one end enters the groove of the section. The sectional roller is positioned above the planer machine table 14, along which the bar workpieces 15 are fed.

During the operation of the machine and the feeding of blanks with varying thicknesses, the grooved sections 1 shift by an amount corresponding to the thickness variation relative to the drive shaft 2. In this process, a row of plungers 12 enters the cavity of the shaft 3, displaces the hydroplastic, and simultaneously transmits torque from the shaft 2 to the sections 1. The change in the volume of the shaft cavity 3, due to the plungers 12 entering it, is compensated by the movement of the rod 9. The working pressure force of the sections 1 on the blanks 15 is adjusted using the nut 11.

The main advantage of the considered design of the sectional roller is that it has a single damping element for all sections, can provide an adjustable pressing force that does not damage the surface of the blanks, and ensures a uniform force for all blanks that are simultaneously fed through the roller.

Next, we will consider the workpiece clamping scheme on the planer table according to position 2 in Fig. 1. In the modern scheme of combined clamping of the bottom surface of the workpiece on rollers and the table surface, it is difficult to adjust the machine depending on the wood species and the workpiece parameters. The workpiece clamping scheme should be chosen in such a way as to minimize wood loss,

reduce deviations from the flatness of the base surface formed during planing, and simultaneously ensure the required roughness of the processed surface.

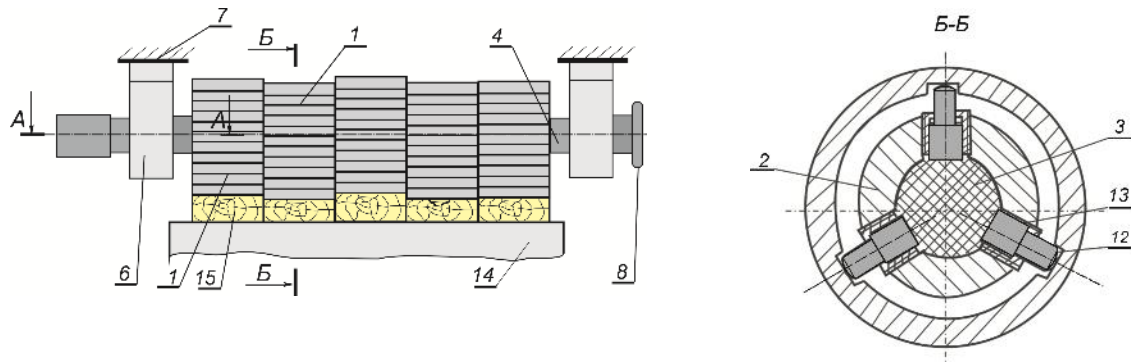


Fig 3. Sectional roller with hydroplastic: 1 – grooved section; 2 – roller shaft; 3 – axial hydro cavity; 4 – trunnion; 5 – bearing; 6 – bearing housing; 7 – planer machine frame; 8 – drive sprocket; 9 – rod; 10 – spring; 11 – adjusting nut; 12 – plunger; 13 – bushing; 14 – planer machine table; 15 – workpiece.

During the processing of workpieces on a planer, at the entry and exit points of the workpiece in the cutting zone, a clamping error occurs due to wood deformation and workpiece deflection under the cutting force. The instantaneous cutting force along the tool's contact arc with the wood varies in magnitude due to changes in the chip thickness. The maximum cutting force is generated practically when the cutters engage with the workpiece, which occurs in the form of a shock during operation. Under the influence of this force, the workpiece bends and presses against the surface of the table.

In order to eliminate the arm between the point of application of the cutting force and the clamping point of the workpiece, it is proposed [3] to install an additional intermediate non-driven roller (Fig. 4) in the cutting zone as auxiliary support.

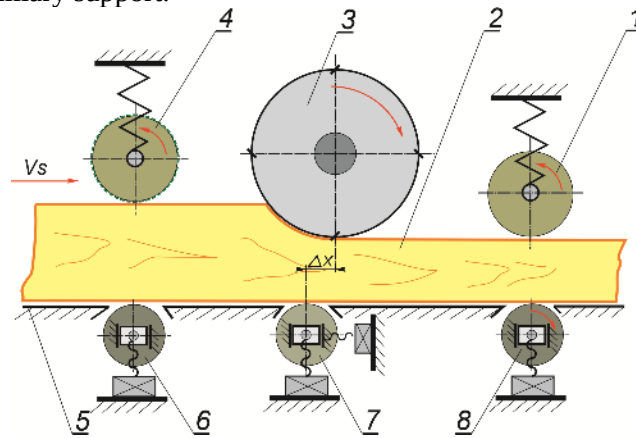


Fig 4. Schematic diagram of the new workpiece clamping mechanism for the planer: 1 – rear feed roller; 2 – workpiece; 3 – cutter shaft; 4 – front feed roller; 5 – table; 6 – table support roller; 7 – additional supporting roller; 8 – base roller of the table.

To ensure better cutting conditions and prevent workpiece vibration, the vertical axis of the roller must be displaced from the cutter shaft axis in the direction of the workpiece feed by a distance equal to half of the contact arc Δx , which is determined by the formula:

$$\Delta x = \frac{\sqrt{h \cdot (D - h)}}{2},$$

where h – thickness of the removed layer, mm; D – diameter of the cutter shaft.

For the CP6-9 machine, with the diameter of the knife shaft $D = 125$ mm and the thickness of the cutting layer $h = 5$ mm, the amount of displacement:

$$\Delta x = \frac{\sqrt{5 \cdot (125 - 5)}}{2} = 12,2 \text{ mm.}$$

This clamping scheme ensures better surface quality of the processed workpiece.

Next, we will consider the improvement of the cutter shaft of the planer (position 3, Fig. 1). Recently, a new design of the planer cutter shaft with a spiral arrangement of cutting inserts (shear-type cutter shaft) has been gaining popularity [4].

Fig. 5 shows the cutter shaft with a spiral arrangement of cutting inserts.

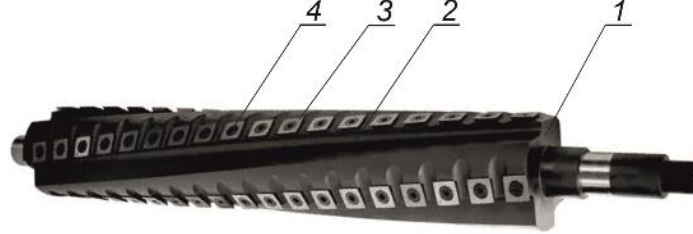


Fig 5. Construction of the cutter shaft of a planer machine with cutting inserts arranged in a spiral: 1 – shaft housing; 2 – spiral projection; 3 – cutting insert; 4 – screw for securing the insert.

The shaper shaft has a housing (1) with six spirals (2), on which cutting elements are mounted. These cutting elements are made of hard alloy and have the form of thin square inserts (3). The inserts have a central hole for fastening with screws (4). The inserts are 2 mm thick, have cutting edges on all sides, and are installed with a twist along the axis of the cutter shaft in a spiral pattern.

Advantages of the design:

- The shaft design allows the cutting elements to smoothly enter the woodcutting process, ensuring high-quality surface processing of the workpiece by cutting the wood fibers at an angle.
- If the inserts encounter a hard knot or nail during processing and get damaged, only the damaged inserts need to be replaced.
- The shaper shaft lasts 15 to 20 times longer than the planer shaft because the rotary inserts have four cutting edges. When one edge dulls, the insert is rotated by 90 degrees, and the next edge begins to work.
- The shaft is precisely balanced and does not require additional balancing after knife replacement.
- Due to its design, the shaper shaft generates a low noise level during operation.
- The cutting edge arranged in a spiral pattern relative to the workpiece surface provides superior surface quality for woodworkpieces.

In addition to the mentioned advantages, the design of the shaper shaft has the following disadvantages:

- Significant time expenditure for reinstalling the knives in the form of inserts, the number of which can reach up to 132 pieces for a shaft length of 630 mm.
- The complexity of manufacturing the shaft itself to ensure the precise positioning of the insert-knives.
- The increased cost of the shaper shaft compared to a standard cutter shaft by several times.

Conclusions. As a result of the analysis of the proposed improvements to planer machines, it should be noted that they significantly address the task of improving processing efficiency for planer machines. However, there have been no attempts to make greater use of electronic devices for tuning planer machines based on artificial intelligence. This task should be addressed through further theoretical and experimental studies of the processes of workpiece positioning and their processing with the new tool – the shaper shaft.

References:

1. Shostak V.V. General Purpose Woodworking Machines [Text]: Textbook / V.V. Shostak, A.S. Hryhoriev, Ya.I. Savchuk, I.M. Pyshnyk, O.O. Voloshynskyi. Edited by V.V. Shostak. Kyiv: Znannia, 2007. – 279 p. – ISBN 966-346-306-6.
2. Shostak V.V. Fundamentals of Calculation and Design of Woodworking Equipment. [Text] / V.V. Shostak, Y. I. Savchuk, H. M. Kovalchuk, Y. I. Ozymok, M.M. Savych, edited by Shostak V. V.: Textbook – Lviv. 2012 – 391 p. – ISBN 978-717-607-254-4
3. Patent for invention No. 941179 "Sectional Roller of a Planer Machine". No. 2348513, B27 33/08. 27.11.1976 – 3 p.

4. Patent for invention No. 121282 "Table of a Planer Machine". No. 2348513, B27 33/08. 27.11.1987 – 3 p.
5. Planer JET JWP-209HH T 45N. [Text]: Operating Instructions – Berlin. 2020 – 31 p.
6. JET Tools Ukraine. Website - <https://jet-ukraine.com.ua/ua/reysmusovyy-verstat-iz-valom-helical-powermatic-201hh>

Рецензент: Поберейко Б. П., завідувач кафедри автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій, доктор технічних наук, професор національного лісотехнічного університету України

Р.В. Росул¹, О.В. Максютова¹, Ю.Б. Жигуц²Мукачівський державний університет¹
ДВНЗ «Ужгородський національний університет»²**ПОРІВНЯННЯ РЕСУРСОЗБЕРЕЖНИХ ПОКАЗНИКІВ МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ
МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОЇ УСТАНОВКИ ТА ІСНУЮЧОГО ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНОГО
ПРЕСОВОГО ОБЛАДНАННЯ ПРИ ВИРУБАННІ ДЕТАЛЕЙ З ТЕКСТИЛЬНИХ
МАТЕРІАЛІВ**

У статті розглянуто порівняння техніко-економічних показників магнітно-імпульсної установки та існуючого електрогидравлічного пресового обладнання. З урахуванням результатів досліджень розроблено і спроектовано магнітно-імпульсне пресове обладнання для виконання технологічних операцій легкої промисловості. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що при швидкостях 4...7 м/с можна досягти занурення різаків в матеріал на глибину 0,7...0,9 його товщини. В результаті проведеного огляду технічної та патентної літератури встановлено, що серед вчених не існує єдиної думки щодо впливу швидкості інструменту на технологічне зусилля вирубування. Даних швидкостей можна досягти використовуючи пресове обладнання з електромагнітним двигуном та на магнітно-імпульсних установках. З метою визначення техніко-економічних показників магнітно-імпульсної установки було проведено вирубування деталі з натуральної м'якої шкіри товщиною 0,8 мм. різаків з максимально можливим периметром $L=150$ мм.

Для оцінки досягнутого технічного рівня магнітно-імпульсного пресу, а також порівняння його техніко-економічних показників з гідравлічним пресовим обладнанням, було використано систему загальновідомих об'єктивних критеріїв. Розрахунок коефіцієнта, який враховує енерговитрати преса на 1 погонний мм деталі, що вирубується проводиться експериментальним шляхом. Суть даного коефіцієнта полягала в тому, що електрична енергія, яка споживається пресовим обладнанням, визначалася експериментальним шляхом за допомогою лічильника електричної енергії і порівняти з електроспоживанням магнітно-імпульсної установки.

В результаті розрахунків енерговитрати в кожному випадку склали: для преса ПВГ-8-2-0 – $1,1 \cdot 10^6$ Дж; для МІУ- $1,22 \cdot 10^4$ Дж. Тоді коефіцієнт енерговитрат склав відповідно 6,5 та 0,22. Окрім приведених загальновідомих об'єктивних критеріїв оцінки техніко-економічної ефективності слід проаналізувати технологічний цикл виконання операцій, що розглядаються в даній роботі для порівняння показників продуктивності використання магнітно-імпульсного пресового обладнання та електрогидравлічного преса ПВГ-8-2-0. Встановлено, що при виконанні технологічних операцій (ТО) вирубування деталей з текстильних матеріалів на пресовому обладнанні з магнітно-імпульсною установкою (МІУ) необхідно досягти як можна більшої відповідності зусилля, що створює МІУ, технологічному зусиллю виконання ТО, що призведе до значної економії електроенергії за рахунок дискретного її споживання.

Ключові слова: різання; текстильні матеріал; корисна робота; ударник; мікропроцесорна магнітно-імпульсна установка; зусилля; цикл, енергія, пресове обладнання; технологічні властивості.

R. Rosul, O. Maksyutova, Y. Zhiguts

**COMPARISON OF RESOURCE-SAVING INDICATORS OF THE MICROPROCESSOR
BASED MAGNETIC- PULSE UNIT AND EXISTING ELECTROHYDRAULIC PRESS
EQUIPMENT WHEN CUTTING PARTS FROM TEXTILE MATERIALS**

The article deals with the comparison of the technical and economic indicators of the magnetic pulse installation and the existing electro-hydraulic press equipment. Taking into account the results of the research, magnetic pulse press equipment was developed and designed to perform technological operations in light industry. According to the results of experimental studies, it was established that at speeds of 4...7 m/s, the cutter can be immersed in the material to a depth of 0.7...0.9 of its thickness. As a result of the review of technical and patent literature, it was established that there is no consensus among scientists regarding the impact of tool speed on the cutting effort. These speeds can be achieved using press equipment with an electromagnetic motor and on magnetic pulse installations. In order to determine the technical and economic indicators of the magnetic pulse installation, a part made of natural soft leather with a thickness of 0.8 mm was cut. cutter with the maximum possible perimeter $L=150$ mm.

A system of well-known objective criteria was used to assess the achieved technical level of the magnetic pulse press, as well as to compare its technical and economic indicators with hydraulic press equipment. Calculation of the coefficient, which takes into account the energy consumption of the press per 1 linear mm of the cut part, was carried out experimentally.

The essence of this coefficient was that the electrical energy consumed by the press equipment was determined experimentally using an electrical energy meter and compared with the electrical energy consumption of the magnetic pulse installation. As a result of the calculations, the energy consumption in each case was: for the PVG-8-2-0 press – $1.1 \cdot 10^6$ J; for MIU- $1.22 \cdot 10^4$ J. Then the energy consumption coefficient was 6.5 and 0.22, respectively. In addition to the given well-known objective criteria for assessing technical and economic efficiency, the technological cycle of the operations considered in this work should be analyzed to compare the performance indicators of the use of magnetic-pulse press equipment and electro-hydraulic press PVG-8-2-0. It has been established that when performing technological operations (TO) of cutting parts from textile materials on press equipment with a magnetic pulse unit (MIU), it is necessary to achieve the greatest possible correspondence between the effort created by the MIU and the technological effort of performing maintenance, which will lead to a significant saving of electricity by account of its discrete consumption.

© Р.В. Росул, О.В. Максютова, Ю.Б. Жигуц

Key words: cutting; textile material; yield; percussionist; microprocessor magnetic pulse installation; effort; cycle, energy, press equipment; technological properties.

Актуальність теми дослідження. Закономірності, що характеризують процес різання анізотропних матеріалів, ще мало досліджені. Такі характеристики, як технологічне зусилля, стійкість інструменту та режими виконання технологічних операцій, входять в число основних параметрів, які визначають потужність, габарити, продуктивність та енергоощадність вирубного пресу. Особливо великий вплив має технологічне зусилля співставлене із зусиллям, яке необхідне для занурення різаків в матеріал плити на 0,5 мм, що забезпечує гарантоване вирубання. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що при виконанні технологічних операцій вирубання деталей з текстильних матеріалів, як правило виникає випереджаючий розрив матеріалу. Глибина занурення різаків в матеріал залежить від наступних факторів: швидкості ударника та інструменту, матеріалу вирубної плити, коефіцієнтів тертя в системі «різак-матеріал-плита», геометричних параметрів інструменту. Встановлено, що при швидкостях 4...7 м/с можна досягти занурення різаків в матеріал на глибину 0,7...0,9 його товщини. Даних швидкостей можна досягти використовуючи пресове обладнання з електромагнітним двигуном оснащеного запропонованою енергоощадною мікропроцесорною магнітно-імпульсною установкою.

Постановка проблеми. З урахуванням результатів досліджень розроблене і спроектовано магнітно-імпульсне пресове обладнання для виконання технологічних операцій легкої промисловості. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що при швидкостях 4...7 м/с можна досягти занурення різаків в матеріал на глибину 0,7...0,9 його товщини. Даних швидкостей можна досягти використовуючи пресове обладнання з електромагнітним двигуном та на магнітно-імпульсних установках.

Окрім приведених загальновідомих об'єктивних критеріїв оцінки техніко-економічної ефективності слід проаналізувати технологічний цикл виконання операцій, що розглядаються в даній роботі для порівняння показників продуктивності використання магнітно-імпульсного пресового обладнання та електрогідравлічного пресу ПВГ-8-2-0

Розрахунок коефіцієнта, який враховує енерговитрати преса на 1 погонний мм деталі, що вирубється проводився експериментальним шляхом. Суть даного коефіцієнта полягала в тому, що електрична енергія, яка споживається пресовим обладнанням, визначалася експериментальним шляхом за допомогою лічильника електричної енергії і порівняти з електроспоживанням магнітно-імпульсної установки.

Для оцінки досягнутого технічного рівня магнітно-імпульсного пресу, а також порівняння його техніко-економічних показників з гідравлічним пресовим обладнанням, було використано систему загальновідомих об'єктивних критеріїв.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Перші праці по дослідженню процесу різання шкіри, текстилю, картону, гуми належать Л.Я. Шуранову, Г.Ф. Гебелю, К.М. Платунову, Д.М. Сидорову, С.А. Черкудінову, І.Є. Антонечко, І.В. Можаяєву, І.І. Капустіну. К.М. Платунов і Д.М. Сидоров вперше використали осцилограф при проведенні експериментальних досліджень, визначивши при цьому зусилля, діючі при вирубванні шкіри. Досліди проводились з різними матеріалами з використанням набору різаків з різними кутами загострення та величиною притуплення.

В подальшому у вивченні проблеми різання матеріалів належать роботи вчених Ю.П. Зибіна, В.П. Зибіна, В.С. Лебедева, І.І. Архіпова, В.Н. Гарбарука, В.І. Толочко, А.І. Комісарова, В.П. Корнілова, К.П. Васильєва, М.І. Чобітько, Г.П. Базюка та інших [1]. Роботи цих авторів присвячені вивченню процесу різання методом вирубання. В основному дані роботи проводились в напрямках вивчення деформації матеріалів, знаходження зусиль різання, знаходження оптимальних параметрів ріжучого інструменту, а також економічного використання матеріалів.

Пресове електрогідравлічне обладнання, що використовувалось і використовується в теперішній час для виконання технологічних операцій легкої промисловості має порівняно невелику швидкість переміщення робочого органу (до 0,5 м/с) [2]. Так як процес вирубання матеріалів на даному обладнанні протікає з відносно малою швидкістю, в своїх дослідженнях автори виводять залежності для визначення статичного зусилля вирубання, нехтуючи при цьому динамічними явищами, що виникають. Що стосується впливу швидкості на технологічне зусилля при вирубванні в динамічному режимі, встановлено, що загальної точки зору серед вчених не існує. Поділ на статичний і динамічний режими умовний і по суті відображає лише діапазон швидкостей переміщення робочого органу.

В своїй монографії І.І. Капустін виводить лінійну залежність для визначення динамічного зусилля вирубування. Автор стверджує, що найбільший вплив на зусилля вирубування чинить величина притуплення різаків і кут загострення різаків. В межах швидкостей вирубування на електрогідравлічних пресах зусилля змінюється незначно. Відповідно можливе використання швидкісних режимів, що можна досягнути на існуючих конструкціях пресів для підвищення їх продуктивності.

В результаті проведеного огляду технічної та патентної літератури встановлено, що серед вчених не існує єдиної думки щодо впливу швидкості інструменту на технологічне зусилля вирубування.

Мета дослідження. Визначення ефективності застосування магнітно-імпульсного пресового обладнання, призначеного для виконання операції вирубування і проведення порівняння його техніко-економічних показників з гідравлічним пресом ПВГ-8-2-0.

Виклад основного матеріалу.

Розроблене магнітно-імпульсне пресове обладнання дає змогу виконувати операції вирубування та перфорування деталей з текстильного матеріалу.

Загальний вигляд магнітно-імпульсної установки, що призначена для виконання операції вирубування, представлено на рис. 4.4.

На рис. 1. представлена конструктивна схема магнітно-імпульсної установки [3,6]. Вона включає в себе закріплену на консолі 1 індукторну систему, що містить плоский індуктор 2, рухомий супутник 3, що продубльований технологічною прокладкою 4, а також направляючі шпильки 5.



Рис.1. Загальний вигляд магнітно-імпульсної установки: 1 – розрядник, 2 – корпус установки, 3 – індуктор, 4 – супутник, 5 – блок живлення.

Як відомо, продуктивність пресового обладнання при виконанні технологічних операцій вирубування та перфорування в основному залежить від швидкості робочого встановлювати і забирати деталь, що обробляється. З використанням автоматизації процесу завантаження і розвантаження деталей, що вирубуються, можна суттєво покращити продуктивність магнітно-імпульсного пресового обладнання. Це можна зробити за рахунок того, що повний час руху ударника (час холостого та робочого ходу) при виконанні одного вирубування на магнітно-імпульсній установці складає менше 1 с. Поліпшення даних показників в цілому приведе до зменшення собівартості виготовлення пресового обладнання.

З метою визначення техніко-економічних показників магнітно- імпульсної установки було проведено вирубування деталі з натуральної м'якої шкіри товщиною 0,8 мм різаків з максимально можливим периметром $L = 150$ мм.

Знаючи залежності $I=f(t)$, $U_{ком}=f(t)$, $\Delta h_B=f(t)$, $Q_2=f(t)$ можна знайти інші характеристики, а саме: корисну роботу $W_{кор}$, тобто роботу, яка витрачається на вирубування деталі; витрачену роботу, тобто енергію, що споживається з мережі $W_{сп}$.

Коефіцієнт корисної дії пресового обладнання визначається по формулі (1):

$$\eta = \frac{W_{кор}}{W_{сп}} 100\% \quad (1)$$

В свою чергу корисна робота, при виконанні операції вирубування, визначається (2):

© Р.В. Росул, О.В. Максютіна, Ю.Б. Жигуц

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot Q_2 \cdot t_M \quad (2)$$

Енергія, що споживається пресовим обладнанням від джерела живлення за один цикл, вимірюється величиною площі, яка обмежена кривою потужності, що споживається $P(t)$ та віссю t (3):

$$W_{\text{сп}} = \int_{t_1}^{t_3} U_{\text{ком}}(t) I(t) dt = \int_{t_1}^{t_3} P(t) dt \quad (3)$$

Залежність $P(t)$ була отримана шляхом перемножування миттєвих значень величини струму в обмотці і напруги з залежностей $I=f(t)$, $U_{\text{ком}}=f(t)$.

Визначення корисної та витраченої робіт (табл.1) дало змогу знайти коефіцієнт корисної дії магнітно-імпульсної установки. В результаті розрахунків він склав 23,5 %.

З метою визначення ефективності застосування магнітно-імпульсного пресового обладнання, призначеного для виконання операції вирубання, було проведено порівняння його техніко-економічних показників з гідравлічним пресом ПВГ-8-2-0.

Технічні показники експериментального магнітно-імпульсного пресу та гідравлічного пресу ПВГ-8-2-0 приведені в табл.1 [120].

Табл. 1

Технічні показники магнітно-імпульсної установки та преса ПВГ-8-2-0

№ п/п	Показник	МІУ	ПВГ-8-2-0
1	Максимальна сила вирубання, кН:	20	80
2	Максимальний хід ударника, мм	0-20	0-30
3	Максимальний периметр деталі, що вирубється (з м'якої шкіри верху), мм:	150	826,4
4	Продуктивність, деталей в час	345	285
5	Корисна робота, Дж	8	—
6	Енергія, що споживається за 1 удар, Вт	34	—
7	Максимальна потужність, що споживається за год, Вт	$1,22 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 106$
8	ККД, %	23,5	—
9	Розмір по фронту, мм	350	1280
10	Глибина, мм	535	1050
11	Висота, мм	780	1470
12	Маса, кг	87,5	1100

Для оцінки досягнутого технічного рівня магнітно-імпульсного пресу, а також порівняння його техніко-економічних показників з гідравлічним пресовим обладнанням, було використано систему загальновідомих об'єктивних критеріїв (табл.2) [4].

Табл. 2

Техніко-економічні показники пресового обладнання

№ п/п	Критерій порівняння пресового обладнання	ПВГ-8-2-0	МІУ
1	Коефіцієнт відносної маси k_M , $\text{кг}/\text{кН}$	13,75	0,94
2	Коефіцієнт відносної площі $k_{\text{пл}}$, $\text{м}^2/\text{кН}$.	0,02	0,009
3	Коефіцієнт енерговитрат k_e , $\text{Дж}/\text{мм}$.	6,38	0,22

Перший критерій – це коефіцієнт відносної маси машини k_M . Найбільш ефективним пресовим обладнанням є те обладнання, в якого цей коефіцієнт менший [5].

Коефіцієнт відносної маси машини визначається за формулою (4):

$$k_M = \frac{G_M}{Q_2} \quad (4)$$

де G_M - загальна маса машини.

Другий критерій-це коефіцієнт відносної площі $k_{\text{пл}}$. Найбільш ефективним пресовим обладнанням, як і в першому випадку, є пресове обладнання, в якого даний коефіцієнт менший [5].

Коефіцієнт відносної площі визначається за формулою (5):

$$k_{\text{пл}} = \frac{S_n}{Q_2} \quad (5)$$

де S_n -площа, яку займає пресове обладнання.

Для порівняння енергетичних витрат даних пресів було введено коефіцієнт енерговитрат k_e . Енергетичні витрати пресового обладнання були визначенні виходячи з того, скільки споживається електричної енергії на 1 погонний мм деталі, що вирубуеться.

Коефіцієнт k_e , який враховує енерговитрати преса на 1 пог. мм деталі, що вирубуеться, визначається за формулою (6):

$$k_e = \frac{W_1}{n_1 L} \quad (6)$$

де W_1 - кількість електричної енергії, яку споживає пресове обладнання;

n_1 - кількість деталей, що були вирубані.

Розрахунок даного коефіцієнта проводився експериментальним шляхом. Суть його полягала в тому, що електрична енергія, яка споживається пресовим обладнанням, визначалася експериментальним шляхом за допомогою лічильника електричної енергії. Споживана електрична енергія для гідравлічного преса ПВГ-8-2-0 визначалася за одну годину роботи при вирубванні 570 деталей. При вирубванні на магнітно-імпульсному пресовому обладнанні електрична енергія споживається тільки під час виконання даної операції. Тому вона визначалася при вирубванні такої ж кількості деталей, як і на гідравлічному пресі. Параметри різаків і деталі в кожному випадку були однаковими. В результаті розрахунків енерговитрати в кожному випадку склали: для преса ПВГ-8-2-0 – $1,1 \cdot 10^6$ Дж; для МІУ – $1,22 \cdot 10^4$ Дж. Тоді коефіцієнт енерговитрат склав відповідно 6,5 та 0,22.

Окрім приведених загальновідомих об'єктивних критеріїв оцінки техніко-економічної ефективності слід проаналізувати технологічний цикл виконання операцій, що розглядаються в даній роботі для порівняння показників продуктивності використання магнітно-імпульсного пресового обладнання та електрогідравлічного преса ПВГ-8-2-0 (рис. 2).

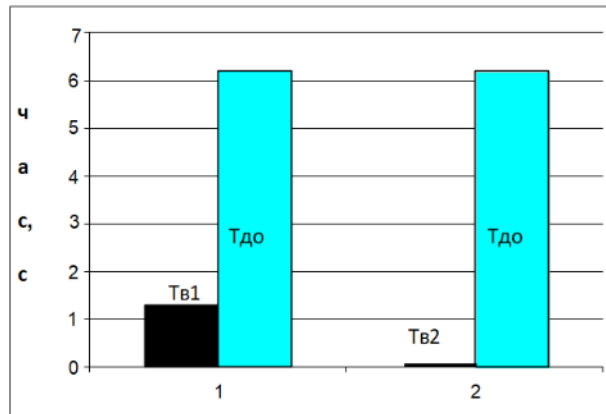


Рис. 2. Гістограма технологічного циклу вирубання 1 деталі: 1 – на пресі ПВГ – 8–2–0; 2 – на магнітно-імпульсному обладнанні, де Тв1, Тв2 – час, що витрачається на безпосереднє вирубання деталі, Тдо – час на виконання допоміжних операцій.

Проаналізуємо рис.2, де Тв1, Тв2 – час, що витрачається на безпосереднє вирубання відповідно на електрогідравлічному та магнітно-імпульсному обладнанні, с; Тдо – час на виконання допоміжних операцій, с. При вирубванні одного і того ж виду матеріалу час допоміжних операцій як на електрогідравлічному так і на магнітно-імпульсному пресовому обладнанні буде однаковим. Враховуючи те, що швидкість руху ударника магнітно- імпульсної установки, як мінімум, на порядок вище преса ПВГ –8–2–0, то час, що витрачається на безпосереднє вирубання відповідно на порядок менший.

В результаті виробничих спостережень та хронометражу робочого часу оператора преса ПВГ–8–2–0 встановлено, що технологічний цикл вирубання 1 деталі в середньому складає 7,5 сек., а час, що витрачається на безпосереднє вирубання 1,3 сек. Протягом зміни на одній машині здійснюється 3000 – 3200 циклів вирубвань. Результати виробничих спостережень зведено в табл.3.

При використанні запропонованого типу магнітно-імпульсного обладнання час, що витрачається на безпосереднє вирубання залежить від швидкості робочого органу, і лежить в межах 0,004...0,0002 сек. В табл. 3 приведено максимальне значення часу, що витрачається на безпосереднє вирубання. Проаналізувавши результати приведені в табл. 3, можна зробити наступний висновок: збільшення швидкості ударника магнітно-імпульсної установки, яка є регульованою в запропонованій конструкції, не призведе до подальшого підвищення продуктивності праці. Проте таке збільшення призводить до значного покращення якості виконання технологічних операцій вирубання та перфорування, а саме чистоти зрізу.

Хронометраж технологічної операції вирубання деталей верху взуття з натуральних шкір

Найменування обладнання	Тривалість технологічного циклу, с.	Час, що витрачається на безпосереднє вирубання, с.	Середня кількість циклів протягом зміни, шт.	Підвищення продуктивності праці в результаті впровадження нового МПО, %
ПВГ –8 –2–0	7,5	1,3	3100	21
Магнітно-імпульсне ПО (МПО)	6,2	0,004 (при $V_{y\partial}=5\text{ м/с}$)	3750	

Висновки.

Встановлено, що при виконанні технологічних операцій (ТО) вирубання деталей з текстильних матеріалів на пресовому обладнанні з магнітно-імпульсною установкою (МІУ) необхідно досягти як можна більшої відповідності зусилля, що створює МІУ, технологічному зусиллю виконання ТО, що призведе до значної економії електроенергії за рахунок дискретного її споживання.

Визначено, що циклові витрати електроенергії при виконанні технологічної операції вирубання на магнітно-імпульсній установці в 29 разів менші в порівнянні з енерговитратами при використанні пресу ПВГ –8–2–0, на що вказують коефіцієнти.

Встановлено, що збільшення швидкості вирубання, яке досягається за допомогою оснащення пресового обладнання МІУ, призводить до покращення чистоти торцевої поверхні деталі та до збільшення технологічного зусилля

В подальших дослідженнях передбачається оснащення розглянутого устаткування пристроєм для регулювання положення ударника відносно плити та передбачити в конструкції обладнання наявність спеціальних „стопів”.

Список використаних джерел

1. Прибега Д. В. Удосконалення процесу розкроювання та перфорування деталей верху взуття: Дис.... канд. техн. наук: 05.19.06. – Х., 2006. – 16 с
2. Поліщук О.С. Підвищення ефективності застосування пресового обладнання в легкій промисловості: Дис. ... канд. техн. наук: 05.05.10 / КНУТД.– К., 2001. – 155 с.
3. Пат. 9927 Україна, МКИ А 43 D 8/04. Прес для вирубання деталей з листового матеріалу та натуральної шкіри / Д.В. Прибега, А.К. Кармаліта, О.С.Поліщук – № u200503939; Заявл. 25.04.05; Опубл. 17.10.05, Бюл. №10. – 3 с.
4. В. А. Стародубів Розрахунок параметрів магнітно-імпульсної системи // Ковально-штампувальне виробництво. – 1994. – №3 – С. 95 – 98.
5. Поліщук О.С. Підвищення ефективності застосування пресового обладнання в легкій промисловості: Дис. канд. техн. наук: 05.05.10 / КНУТД.– К., 2001. – 155 с.
6. James Clerk (1881), A treatise on electricity and magnetism, Vol.II, Chapter III, § 530, p. 178. Oxford, UK: Clarendon Press.ISBN 0-486-60637-6.

О.В. Талько, А.М. Колесников, А.М. Висоцький, Н.Д. Ткачук, М.О. Пінчук,
О.В. Вдовиченко, М.П. Гадзира

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України

ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХІДНИХ ПОРОШКІВ НА ШВИДКОСТІ ПОШИРЕННЯ ПРУЖНИХ ХВИЛЬ В РЕАКЦІЙНО СПЕЧЕНИХ КОМПОЗИТАХ SiC-Cr₃C₂

За технологією реакційного спікання порошків отримані композитні керамічні матеріали на основі карбіду кремнію двох модифікацій з середнім розміром частинок 70 нм та 28 мкм, що містили в шихті від 3 до 10% (мас.) частинок порошку Cr₃C₂ з середнім розміром частинок ~0,2 мкм. Досліджено вплив вмісту Cr₃C₂ та розміру частинок карбіду кремнію на закономірності зміни швидкості поширення поздовжньої та поперечної пружних хвиль, збурених імпульсними акустичними методами.

Ключові слова: реакційне спікання, карбід кремнію, карбід хрому, пружні хвилі.

O.V. Talko, A.M. Kolesnykov, A.M. Vysotsky, N.D. Tkachuk, M.O. Pinchuk,
O.V. Vdovychenko, M.Ph. Gadzyra

EFFECT OF CHARACTERISTICS OF INITIAL POWDERS ON VELOCITIES OF ELASTIC WAVES PROPAGATION IN REACTION-SINTERED SiC-Cr₃C₂ COMPOSITES

Using the technology of reactive sintering of powders, composite ceramic materials based on silicon carbide of two modifications with an average particle size of 70 nm and 28 μm were obtained, containing in the charge from 3 to 10% (wt.) of Cr₃C₂ powder particles with an average particle size of ~0.2 μm. The influence of the Cr₃C₂ content and the size of silicon carbide particles on the regularities of change in the propagation velocities of longitudinal and transverse elastic waves, disturbed by pulse acoustic techniques, were studied.

Key words: reaction sintering, silicon carbide, chromium carbide, elastic waves.

Вступ. Карбід кремнію (SiC) вважається винятково перспективним конструктивним керамічним матеріалом внаслідок своїх непересічних властивостей, до яких належать низька густина (3100 кг/м³), високі твердість (2800 кг/мм²), теплопровідність (120 Вт/м К), стійкість до окиснення, та міцність (550 МПа) [1]. Як α-SiC, так і β-SiC можуть бути ущільнені практично до теоретичної густини завдяки додаванню модифікаторів і за умови надлишку карбону. Проте кераміка на основі SiC має невелику в'язкість руйнування, що обмежує її застосування у виробках, які в процесі експлуатації піддаються динамічним навантаженням. Покращення механічних характеристик карбіду кремнію можна досягти введенням до його структури частинок дисперсної твердої фази [2]. Огляд літератури засвідчив, що була проведена ціла низка досліджень, спрямованих на покращення ущільнення та підвищення механічних характеристик SiC шляхом додавання оксидів, боридів, нітридів та карбідів, але дослідження присвячені вивченню впливу Cr₃C₂ вкрай обмежені [2].

Мета роботи. Робота була присвячена дослідженню швидкості поширення пружних хвиль в композитах, що утворювались в результаті реакційного спікання порошку карбіду кремнію, який характеризується зменшеним параметром ґратки ($a = 0,43528$ нм), зумовленим наявністю в структурі розчинених атомів карбону [3, 4], і порошку Cr₃C₂ в залежності від розміру частинок порошку SiC і вмісту частинок Cr₃C₂ в початковій шихті.

Матеріали і методи досліджень

Композити виготовляли за технологією реакційного спікання, детально описаного в роботі [5]. Досліджували п'яти груп зразків карбіду кремнію і композитів на його основі, які відрізнялись розмірами порошків SiC: близько 70 нм і 28 мкм. Вихідними порошками були нанорозмірний твердий розчин вуглецю в карбіді кремнію [5], карбід кремнію з середніми розмірами частинок 28 мкм (Запорізький абразивний завод, ТУ У 26.8-00222226-016:2006), вуглець (ГК-1, ГОСТ 4404–78) і карбід хрому. Середній розмір частинок Cr₃C₂ обох партій був однаковим і становив 0,2 мкм. Вміст частинок Cr₃C₂ змінювали від 3 до 10% (мас.). Питома поверхня нанорозмірного порошку SiC становила 18–25 м²/г, що відповідає середньому розміру частинок 50...80 нм. Карбід хрому синтезували в індукційній печі в атмосфері аргону за температури 1773°K з порошків оксиду хрому (Cr₂O₃) і терморозширеного графіту (ТЕГ) [6]. Зразки одержували реакційним спіканням шляхом просочення кремнієм (КР-0, ГОСТ 2169–69) в індукційній печі в атмосфері аргону за температури 2273°K.

© О.В. Талько, А.М. Колесников, А.М. Висоцький, Н.Д. Ткачук, М.О. Пінчук,
О.В. Вдовиченко, М.П. Гадзира

Ультразвукові вимірювання здійснювали за кімнатної температури. Зразки для досліджень мали форму прямокутних паралелепіпедів з шліфованими плоскопаралельними гранями, лінійні розміри яких були в діапазонах: $l = (4,5 \dots 5,3) \cdot 10^{-2}$ м, $b = (3,0 \dots 3,3) \cdot 10^{-2}$ м і $h = (0,9 \dots 1,5) \cdot 10^{-2}$ м. Лінійні розміри зразків були виміряні за допомогою цифрового мікрометра з одиницею молодшого розряду 10^{-6} м, густину ρ одержаних композитів визначали методом гідростатичного зважування з використанням аналітичних ваг і дистильованої води як імерсійного середовища.

Вимірювання швидкості поширення пружних хвиль проводили за методикою наскрізного проходження ультразвукового імпульсу. Для цього пару акустичних перетворювачів поздовжньої або зсувної хвилі резонансного типу з центральною частотою 5 МГц вводили в акустичний контакт з протилежними гранями зразка. Один з перетворювачів працював як випромінювач, а протилежний – як приймач. Зондування проводили прямокутними імпульсами ударного збурення тривалістю 3 мкс і періодом 1 мс. Відповідний випромінювач збурював в матеріалі зразка поздовжню або поперечну ультразвукову хвилю, а приймач – трансформував акустичний сигнал, що пройшов крізь зразок в електричний, який після підсилення надходив для візуалізації на осцилограф. Інтервал часу Δt між моментами випромінювання та реєстрації ультразвукового імпульсу вимірювали з точністю 1 нс.

Вимірювання проводили в напрямку (розмір h) та в площині (розмір b) прикладання тиску в процесі виготовлення. Швидкості поширення поздовжньої V_l та поперечної V_t хвиль розраховували за виміряним часом проходження відповідним імпульсом шляху b чи h . Наведені далі дані є результатом осереднення не менш ніж 4 незалежних вимірювань на точку.

Результати досліджень та їх обговорення

Результати, наведені на Рис.1 свідчать, що зі збільшенням масового вмісту Cr_3C_2 в шихті до 10% розсіювання густини відносно середнього значення 2940 кг/м^3 не перевищує $\pm 3,5\%$. Це загалом узгоджується з результатами роботи [5], в якій показано, що хоча до складу композитів, утворених внаслідок реакційного спікання порошку Cr_3C_2 і порошку SiC з середнім розміром частинок 70 нм, входить в основному наноструктурний карбід кремнію кубічної структури (84,6% для SiC-5% Cr_3C_2), а до складу композитів, модифікованих частинками Cr_3C_2 розміру 28 мкм – вторинний карбід кремнію гексагональної структури (93% для SiC-5% Cr_3C_2), густина цих модифікацій карбіду кремнію практично не відрізняється. Той факт, що до складу композита з підвищеним вмістом модифікатора і розміром частинок Cr_3C_2 28 мкм крім вільного кремнію і двох модифікацій (кубічної та гексагональної) SiC можуть входити одиниці відсотків твердого розчину кремнію в карбіді хрому $(\text{Cr},\text{Si})_7\text{C}_3$ [5], на густину одержаних зразків, як і очікувалось, не вплинув.

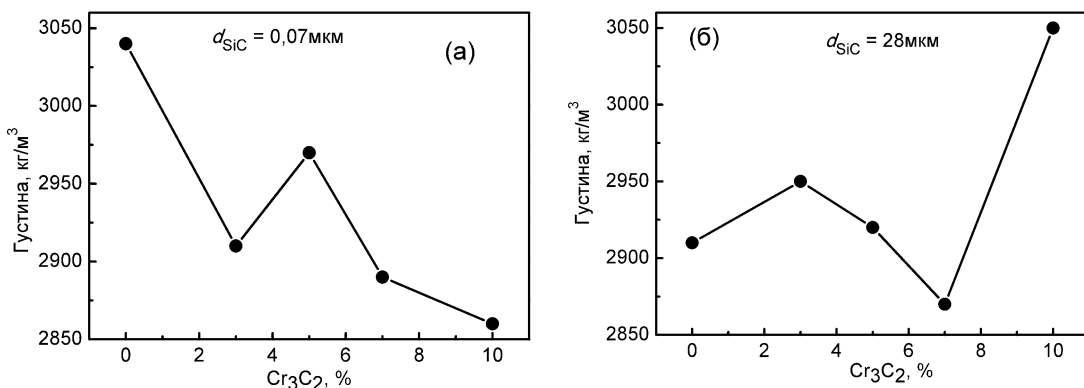


Рис 1. Густина зразків композитів SiC- Cr_3C_2 з початковим середнім розміром частинок SiC: (а) 0,07 мкм та (б) 28 мкм в залежності від масового вмісту в шихті Cr_3C_2

Натомість результати, наведені на Рис.2, засвідчили відмінність тенденцій зміни швидкостей поширення пружних хвиль обох типів у композитах, синтезованих на основі різних порошків SiC.

Для композитів, виготовлених з порошків SiC середнім розміром 28 мкм, швидкість поширення поздовжньої пружної хвилі в напрямку пресування V_{lh} практично збігається з такою в площині пресування V_{lb} і значення цих швидкостей мають слабку тенденцію до зменшення із збільшенням вмісту модифікатора Cr_3C_2 в початковій шихті (Рис.2, б). Однак, у матеріалі SiC-5%(мас.) Cr_3C_2 спостерігається незначний локальний максимум як V_{lh} так і V_{lb} . На графіку

залежностей швидкостей поширення зсувних хвиль V_{th} і V_{tb} у цьому матеріалі від вмісту Cr_3C_2 у початковій шихті теж спостерігається локальний максимум для 5% Cr_3C_2 (Рис2,г), однак для матеріалів з вмістом 3...7% Cr_3C_2 відзначається суттєва анізотропія V_t – швидкість V_{th} у напрямку пресування перевищує швидкість V_{tb} у перпендикулярному напрямку більш як на 5%, що явно перевищує похибку визначення.

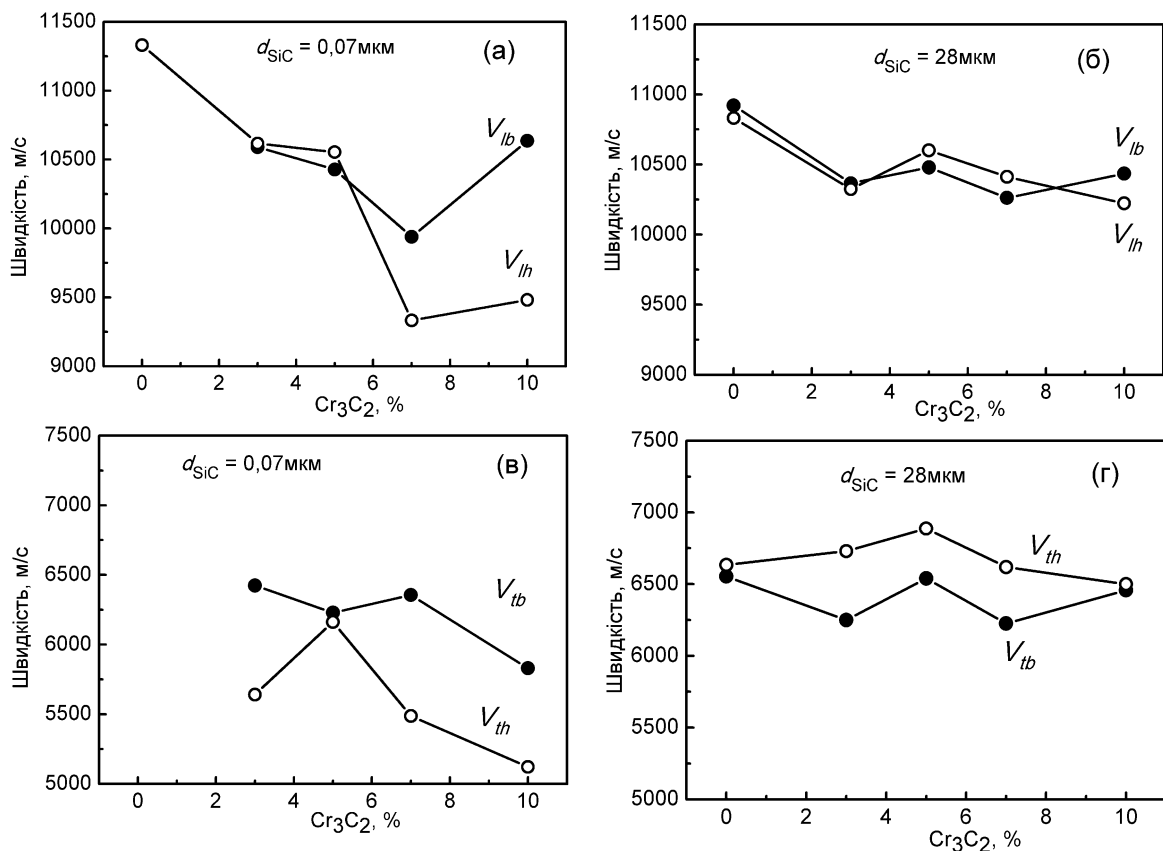


Рис. 2. Залежності швидкостей поздовжньої (а, б) і поперечної (в, г) пружних хвиль в композитах SiC- Cr_3C_2 з початковим розміром частинок SiC 0,07 мкм (а, в) та 28 мкм (б, г) від масового вмісту в шихті модифікатора Cr_3C_2

Для композитів, виготовлених з порошків SiC середнім розміром 70 нм, загальне зменшення швидкостей поширення пружних хвиль обох типів із збільшенням вмісту в шихті Cr_3C_2 є більш вираженим і сягає 18 % для поздовжніх (з локальним мінімумом у композиті з 7% Cr_3C_2) і до 23 % для зсувних хвиль. Анізотропія швидкостей поширення пружних хвиль в матеріалах, що містять більш як 5 % Cr_3C_2 також є суттєво більшою, але на відміну від композитів, виготовлених з використанням порошків SiC середнім розміром 28 мкм, така анізотропія швидкостей відзначається як у поздовжніх, так і у зсувних хвиль. Проте головною відмінністю є те, що у композитів з порошків SiC середнім розміром 70 нм швидкості як V_{lh} так і V_{th} в напрямку пресування менші за такі в площині прикладання тиску (V_{lb} та V_{tb}).

Анізотропію властивостей пружності (незначну у монофазних керамічних матеріалів і більш суттєву у композитів), викликану особливостями технологічного процесу консолідації спостерігали і раніше [7, 8]. Зміну знаку параметру анізотропії

$$A = 1 - \frac{V_{lh}}{V_{lb}}$$

(інверсію анізотропії) внаслідок зміни температури спікання, а отже зміни стану меж між елементами структури порошкового титану досліджували, зокрема, автори роботи [9]. Для досліджуваних в даній роботі матеріалів як саме явище анізотропії, так і її інверсія теж, ймовірно, пов'язане з станом меж між фазами. Ймовірно, особливості формування стану цих меж, як і кінцевий фазовий склад загалом, пов'язані з енергією поверхні частинок SiC, а також початковим розподілом частинок модифікатора Cr_3C_2 по об'єму шихти. Наведені в роботі [5] результати дослідження мікроструктури підтверджують, композит SiC-5% Cr_3C_2 , виготовлений з частинок SiC середнім

розміром 70 нм, містить істотно менше областей, що містять хром, ніж такий самий композит, виготовлений з частинок SiC розміром 28 мкм.

В роботі [8] також спостерігали локальний максимум модулів Юнга та зсуву у реакційно спечених наноструктурних композитів SiC-TiC в діапазоні 4...5% (мас.) вмісту модифікатора TiC. Ймовірною причиною зміни характеристик пружності композитів можуть бути залишкові напруження між фазами, що утворюються в процесі виготовлення і можуть викликати внутрішні пошкодження структури.

Висновки

Методом реакційного спікання було одержано композити на основі частинок SiC середнім розміром 0,07 мкм та 28 мкм, що містили в шихті від 0 до 10% (мас.) карбіду хрому. Встановлено, що середня густина усіх композитів становить близько 2950 кг/м з деякою тенденцією до зменшення зі збільшенням вмісту Cr_3C_2 .

Швидкості поширення поздовжньої та зсувної пружних хвиль в композитах залежать від характеристик вихідного порошку SiC: для композитів, виготовлених з частинок SiC розміром 28 мкм, збільшення вмісту Cr_3C_2 має наслідком лише незначне зменшення цих швидкостей, натомість для композитів з частинок SiC розміром 0,07 мкм зменшення швидкостей поширення пружних хвиль зі збільшенням вмісту карбіду хрому сягає 20% і більше.

Список використаних джерел:

1. Khodaei M., Yaghobizadeh O., Alhosseini S. H. N., Esmaeeli S., Mousavi S. R. The effect of oxide, carbide, nitride and boride additives on properties of pressureless sintered SiC: A review, J. Eur. Ceram. Soc. 39 (2019) 2215-2231. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2019.02.042
2. Oguntuyi S.D., Nyembwe K., Shongwe M.B., Johnson O.T., Adewumi J.R., Malatji N., Olubambi P.A. Improvement on the fabrication of SiC materials: Processing, reinforcing phase, fabricating routed - A review, Int. J. Lightweight Mater. Manuf. 6 (2023) 225-237. doi: 10.1016/j.ijlmm.2022.10.005
3. Gadzira M., Gnesin G., Mykhaylyk O., Britun V., Andreyev O. Solid solution of carbon in β -SiC, Mater. Lett. 35 (1998) 277-282. doi:10.1016/S0167-577X(97)00263-2
4. Gadzyra N.F., Gnesin G.G., Mykhaylyk A.A. Mechanism for the formation of a solid solution of carbon in silicon carbide. Powder Metall. Met. Ceram., 40 (2001) 519-525. doi: 10.1023/A:1014352009750.
5. Пінчук М.О., Гадзира М.П. Дослідження мікроструктури реакційно спеченого карбіду кремнію, модифікованого карбідом хрому. Порошкова металургія, № 11/12, (2019) 57-62. doi: 10.1007/s11106-020-00123-y
6. Пінчук М.О., Гадзира М.П., Гнилиця І.Д. Особливості синтезу карбіду хрому з використанням різних форм вуглецю, Порошкова металургія, №9-10 (2017) 34 – 39. doi:10.1007/s11106-018-9923-y
7. Zhu X., Sakka Y. Textured silicon nitride: processing and anisotropic properties, Sci. Technol. Adv. Mater. 9 (2008) 033001. doi:10.1088/1468-6996/9/3/033001
8. Вдовиченко О.В., Гадзира М.П., Колесников А.М., Ткачук Н.Д., Гнилиця І.Д. Динамічна пружність та електричний опір реакційно спеченої нанорозмірної кераміки SiC – TiC, Успіхи матеріалознавства 10/11 (2025) 30-36.
9. Вдовиченко О.В., Мосолаб О.О., Назаренко В.А. Оцінка дефектності пористого титану неруйнівними ультразвуковими методами, Електронна мікроскопія та міцність матеріалів, 16 (2009) 80 – 87.

В.М. Франчук, Л.М. Самчук

Луцький національний технічний університет

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ТА ВИБІР НАЙБІЛЬШ ЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МЕХАНООБРОБНОГО ВИРОБНИЦТВА

У статті досліджено сучасні підходи до управління якістю у механообробному виробництві, зокрема методології Six Sigma, 5S та Total Quality Management (TQM). Проаналізовано їхню ефективність у підвищенні точності, надійності та продуктивності виробничих процесів, а також вплив на зниження рівня дефектів і оптимізацію витрат. Розглянуто практичний досвід впровадження цих методик у провідних компаніях, таких як Toyota, General Electric та Motorola. Визначено, що поєднання TQM, Six Sigma та 5S забезпечує системний підхід до вдосконалення якості, підвищує ефективність виробництва та сприяє довгостроковому успіху підприємств.

Ключові слова: Якість, системи управління, контроль, продуктивність, управління якістю продукції

V.M. Franchuk, L.M. Samchuk

COMPARATIVE ANALYSIS OF QUALITY MANAGEMENT SYSTEMS AND SELECTION OF THE MOST EFFECTIVE SYSTEM FOR MACHINING PRODUCTION

The article examines modern approaches to quality management in the mechanical engineering industry, in particular, Six Sigma, 5S and Total Quality Management (TQM) methodologies. The article analyses their effectiveness in improving the accuracy, reliability and productivity of production processes, as well as their impact on reducing the level of defects and optimizing costs. The practical experience of implementing these methods in leading companies such as Toyota, General Electric and Motorola is considered. It is determined that the combination of TQM, Six Sigma and 5S provides a systematic approach to quality improvement, increases production efficiency and contributes to the long-term success of enterprises.

Keywords: Quality, management systems, control, productivity, total quality management.

Постановка проблем. У сучасному механообробному виробництві контроль якості відіграє ключову роль у забезпеченні високої точності, надійності та ефективності виробничих процесів. Системи управління якістю спрямовані на мінімізацію дефектів, оптимізацію витрат і підвищення конкурентоспроможності підприємств. Впровадження ефективної системи контролю якості стає особливо актуальним у зв'язку зі зростанням вимог до точності деталей, автоматизацією виробничих процесів та необхідністю зниження витрат. Водночас вибір найбільш ефективної системи управління якістю є складним завданням, що потребує детального аналізу сучасних методологій та їх практичної ефективності. Недостатня увага до цього аспекту, може призвести до збільшення виробничих витрат, зниження продуктивності та погіршення репутації підприємства. Таким чином, порівняльний аналіз існуючих систем управління якістю та визначення найбільш ефективної методики для механообробного виробництва є важливим етапом на шляху до вдосконалення виробничих процесів і забезпечення високих стандартів якості продукції.

Метою роботи – є порівняння актуальних методологій підвищення якості у машинобудівному виробництві, аналіз їх результативності та визначення найефективніших підходів для впровадження на сучасних технологічних підприємствах.

У статті [1] досліджується еволюція концепцій управління якістю на підприємствах. Автор проаналізував різні трактування поняття «якість» і підкреслив позитивний вплив запровадження систем управління якістю на продуктивність підприємств. У матеріалі розглядаються основні принципи менеджменту, що лежать в основі системного управління якістю, а також етапи впровадження таких систем у різних регіонах. Окрема увага приділена стандартам серії ISO 9000, національним нормативам та застосуванню інтегрованих систем управління якістю. У роботі [2] досліджується, вплив практик загального управління якістю (TQM) на стійкість компаній (CS), враховуючи роль управління знаннями (KM) як посередника. Автор застосовує модель Малкольма Болдріджа (MBNQA) для аналізу TQM і вивчає його вплив на екологічну, соціальну та економічну стійкість підприємств. TQM позитивно впливає на корпоративну стійкість, а KM відіграє ключову роль у посиленні цього впливу, підкреслюючи важливість інтеграції управління знаннями для досягнення цілей сталого розвитку. У статті [3] проаналізовано використання методології Lean Six Sigma (LSS) для підвищення ефективності виробництва зварювального дроту. Автор застосовує підхід DMAIC і аналітичний ієрархічний процес (АНР) для ідентифікації та усунення основних причин відходів, демонструючи значне покращення продуктивності та якості виробництва. Дослідження демонструє, як

інтеграція LSS може призвести до зменшення дефектів, підвищення продуктивності та покращення загальної ефективності виробництва.

У статті [4] було описано процес проектування та виробництва зубчатого валу. Дизайн був створений у Solidworks, а виробничий процес розроблений за допомогою Edgcam. Аналіз методом скінченних елементів (FEA) проводився у ANSYSWorkbench і включав моделювання напружень, деформацій та поведінки під впливом зовнішніх навантажень. Через складність конструкції дизайн для виробництва розділили на дві частини: окремо розробили параметри для обробки кожного кінця валу. Це дозволило використовувати два різних коди ЧПК, які виконуються послідовно під час обробки. У ході роботи визначили загальний час обробки одного або обох кінців валу, а також забезпечили відповідність процесу умовам безпеки.

Стаття [5] присвячена оцінці якості процесів у виробництві сталевих валів за допомогою показників ефективності. Автор розглядає ключові фактори, такі як якість продукції, час доставки, гнучкість виробництва та обслуговування, які впливають на загальну ефективність виробничого процесу та ланцюга постачання. Особлива увага приділяється ролі постачальників: їх оцінюють за здатністю забезпечувати якісну сировину, яка відповідає специфікаціям. Також підкреслюється важливість статистичного контролю процесів для виявлення відхилень та забезпечення стабільності виробництва. Автор зазначає, що відхилення можуть бути викликані проблемами в дизайні процесу, постачанні або контролі якості, і пропонує підходи для їх мінімізації.

У статті [6] автор досліджує вплив управлінських ідей на організації. Вона висвітлює 14 принципів управління, які акцентують увагу на постійному вдосконаленні процесів, системному мисленні та залученні співробітників для отримання високої якості продукції та послуг. Автор також підкреслив важливість усунення внутрішніх бар'єрів у компанії та створення культури довіри й співпраці. Застосування цих підходів сприяє зниженню витрат, зростанню продуктивності й підвищенню конкурентоспроможності організацій.

У статті [7] розглядається застосування системи 5S на підприємствах, яка спрямована на оптимізацію робочих місць, підвищення продуктивності та покращення якості роботи. Описуються основні етапи 5S (сортування, систематизація, стандартизація, удосконалення) та їхні переваги, такі як підвищення ефективності, зменшення витрат і покращення умов праці. Автор наводить приклади впровадження методології в Україні та відзначає її позитивний вплив на конкурентоспроможність і безпеку підприємств.

Викладення основного матеріалу. У сучасних умовах глобальної конкуренції та швидкого розвитку технологій підприємства, що займаються металообробним виробництвом, стикаються з необхідністю постійного покращення якості продукції. Ці виклики обумовлені як вимогами споживачів до точності та надійності виробів, так і необхідністю зниження витрат і збільшенні ефективності виробничих процесів. Методології покращення якості, що базуються на принципах системного підходу, набувають популярності завдяки своїй здатності інтегрувати сучасні технології, автоматизацію та інструменти контролю. У цьому контексті важливим є аналіз існуючих підходів до забезпечення якості на технологічному виробництві деталей типу вал, які є одними з найважливіших елементів у машинобудуванні, авіаційній та автомобільній галузях.

Однією з таких методик покращення якості є Six Sigma. SixSigma — це ефективна методологія, орієнтована на підвищення якості та продуктивності в різних галузях. Завдяки цьому підходу не лише покращуються показники проєктів, а й формується культура безперервного вдосконалення в робочих командах. Впровадження її сприяє ефективному використанню ресурсів, підвищенню задоволеності клієнтів і зниженню ризиків. Організації, які дотримуються цього підходу, досягають значних конкурентних переваг і створюють стійку основу для довготривалого розвитку. Методологія ґрунтується на п'яти ключових принципах: визначення, вимірювання, аналіз, удосконалення та контроль. Вони формують циклічний процес, який забезпечує постійне вдосконалення та відповідальність. Крім того, методологія наголошує на важливості задоволеності клієнтів, точності даних і залученості співробітників, що робить її всебічним підходом до підвищення ефективності управління проєктами. Дотримуючись цих принципів, організації можуть значно покращити ефективність, якість та результати проєктів. Численні компанії успішно впровадили цей підхід у своє управління проєктами, що допомогло їм досягти суттєвих покращень. Одним із прикладів є компанія GeneralElectric (GE), яка впровадила "SixSigma" у свою корпоративну стратегію в 1990-х роках. GE звітувала про багато-мільярдні заощадження завдяки підвищенню ефективності та зниженню дефектів. Інший успішний приклад належить компанії Motorola, засновнику "Six Sigma", яка досягла суттєвого скорочення виробничих дефектів та витрат. Крім того, компанії у фінансовій сфері застосовують "Six Sigma" для оптимізації обробки транзакцій, що дозволяє надавати послуги швидше і точніше. Ці

приклади успішного застосування підтверджують універсальність та результативність "Six Sigma" у різних галузях.

Метод 5S — багатофункціональний інструмент, який можна ефективно використовувати як у виробничому, так і в офісному середовищі та сприяє досягненню важливих цілей компанії.

Метод «5S» — підхід до організації робочого місця, заснований на п'яти основних принципах: організованість, порядок, стандартизація та самодисципліна. Такий підхід не тільки підвищує цінність робочого місця, але також допомагає розвинути почуття власності та відданості спільній меті серед працівників. Метод «5S» не тільки сприяє створенню впорядкованого робочого середовища, але й значно підвищує ефективність і продуктивність праці. Впровадження чітких послідовностей і стандартизованих процесів зменшує кількість помилок, зменшуючи втрачений час і ресурси. Крім того, організованість мотивує співробітників шукати нові способи оптимізації своєї роботи, а технології стимулюють постійний розвиток. Важливим аспектом методології «5S» є підвищення безпеки на робочому місці. Зрештою, метод 5S стає невід'ємною частиною культури компанії, створюючи гармонійне робоче середовище, яке підтримує продуктивну співпрацю, сприяє інноваціям і забезпечує стабільний успіх організації. Toyota є одним із найвідоміших прикладів компанії, яка впровадила методологію 5S як частину своєї виробничої системи (Toyota Production System). Завдяки «5S» Toyota оптимізувала своє робоче місце, значно скоротила час виконання завдань, зменшила кількість помилок і знизила витрати на виробництво. Категоризація та систематизація інструментів дозволяє швидко отримати доступ до необхідного обладнання та дозволяє уникнути непотрібних затримок. Підтримання чистоти та стандартизації робочого місця забезпечує стабільність процесу та знижує ризик помилок. Самодисципліна співробітників, яка культивується за допомогою практики 5S, сприяє високій якості продукції та культурі постійного вдосконалення.

Total Quality Management (TQM) — це всебічний підхід до управління якістю, орієнтований на підвищення ефективності всіх процесів у технологічному машинобудівному виробництві. Головною метою TQM у цій галузі є досягнення високої якості деталей та вузлів, зокрема таких важливих компонентів, як вали, які повинні відповідати суворим вимогам щодо точності, надійності та довговічності. Методологія TQM у машинобудуванні базується на принципах орієнтації на клієнта, безперервного удосконалення процесів, залучення всіх співробітників та використання процесного підходу. Це забезпечує постійний контроль на всіх етапах виробництва — від проектування деталей до тестування. Впровадження стандартів і постійний моніторинг ефективності дозволяють зменшити дефекти, підвищити продуктивність і оптимізувати використання ресурсів. Однією з головних переваг TQM у машинобудуванні є інтеграція інноваційних підходів у виробничі процеси, що сприяє підвищенню конкурентоспроможності. Активна участь працівників у процесах управління якістю допомагає формувати культуру відповідальності та безперервного вдосконалення виробничого середовища.

Важливим інструментом у TQM є діаграма Ісікави (Рис 1.), яка сприяє виявленню ключових чинників впливу на якість продукції чи процесів. Використання цього інструменту дозволяє ідентифікувати потенційні проблеми, аналізувати їх причини та розробляти заходи для їх усунення, що є ключовим елементом у створенні ефективної системи управління якістю.

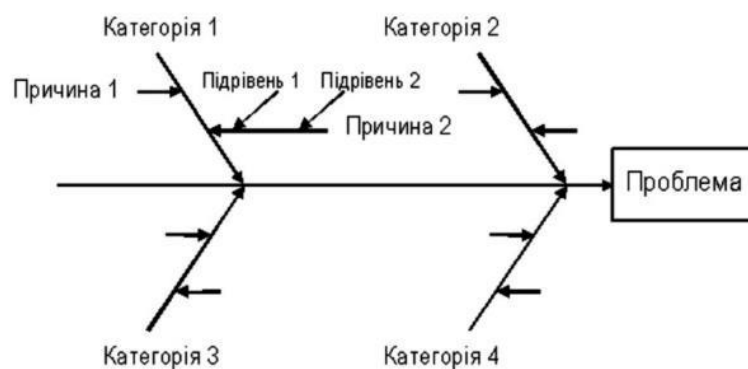


Рис. 1. Діаграма Ісікави

Відомим прикладом TQM є впровадження компанією Toyota є системи Канбан, яка стала основою її виробничої стратегії. Канбан регулює потоки матеріалів за принципом "точно вчасно", зменшуючи

витрати на зберігання та уникнення перевиробництва. Ця система інтегрує контроль якості на всіх етапах виробництва, дозволяючи вчасно виявляти й усувати дефекти. Завдяки Kanban Toyota досягла високої ефективності, мінімізації дефектів і задоволеності клієнтів, що зробило її лідером у галузі.

У таблиці 1 подано детальний аналіз ключових переваг та недоліків кожної із трьох методик управління якістю – SixSigma, 5S та TQM – у контексті їхнього впровадження у механообробному виробництві. Аналіз дає змогу оцінити, наскільки кожна з цих систем відповідає вимогам галузі.

Табл. 1

Порівняння методологій управління якістю

Критерій	Six Sigma	5S	TQM	Найкращий вибір
Мета	Зменшення дефектів до мінімуму за допомогою статистичного контролю.	Організація робочого простору для підвищення ефективності.	Забезпечення загальної якості на всіх етапах.	TQM забезпечує комплексний підхід до якості.
Основний підхід	Аналіз даних, оптимізація процесів через DMAIC.	Впорядкування робочого простору за п'ятьма принципами.	Впровадження культури якості на всіх рівнях.	TQM охоплює всі аспекти виробничих процесів.
Галузь застосування	Високоточні галузі, наприклад, аерокосмічна, медицина.	Виробництво, офіси, склади.	Універсальна методологія для всіх галузей.	TQM, Six Sigma, 5S
Залученість працівників	Спеціалізовані ролі, наприклад, Black Belt, Green Belt.	Участь усіх працівників у підтриманні порядку.	Участь усіх працівників у процесах покращення.	TQM та 5S стимулює колективну відповідальність.
Час впровадження	Середній/довгий.	Швидкий, результати помітні одразу.	Довгий, але результати стійкі.	TQM підходить для довгострокової стратегії, 5S для швидкого результату
Результати для виробництва	Скорочення дефектів, оптимізація операцій.	Підвищення чистоти, зменшення втрат часу.	Висока якість продукції, інтеграція процесів.	TQM забезпечує найкращу якість і контроль.

Рисунок 1 демонструє покращення ключових показників ефективності після впровадження методологій управління якістю, таких як SixSigma, 5S і TQM, у металообробному виробництві. Оцінка відсоткових змін у важливих аспектах, таких як зниження рівня дефектів, збільшення продуктивності, оптимізація операційних витрат, поліпшення безпеки на робочому місці та підвищення адаптивності виробничих процесів, дозволяє визначити вплив кожного підходу. Така візуалізація дає можливість провести порівняння ефективності різних систем управління якістю, що допомагає підприємству обрати найбільш результативну стратегію для досягнення довгострокових цілей та зміцнення конкурентоспроможності.

Для металообробного виробництва найбільш ефективним підходом є TQM (Total Quality Management), оскільки він забезпечує всебічне покращення всіх ключових аспектів діяльності підприємства. Завдяки інтеграції принципів безперервного вдосконалення, орієнтації на споживача та залученню персоналу, TQM дозволяє:

1. Оптимізувати витрати за рахунок зменшення дефектів та неефективних операцій.
2. Підвищити ефективність шляхом усунення вузьких місць у виробництві.
3. Забезпечити стабільну якість продукції, що важливо для виробів із високими вимогами до точності, таких як деталі для автомобільної чи аерокосмічної галузі.
4. Підвищити можливість швидко адаптуватися до змін у специфікаціях замовників або ринкових умов.

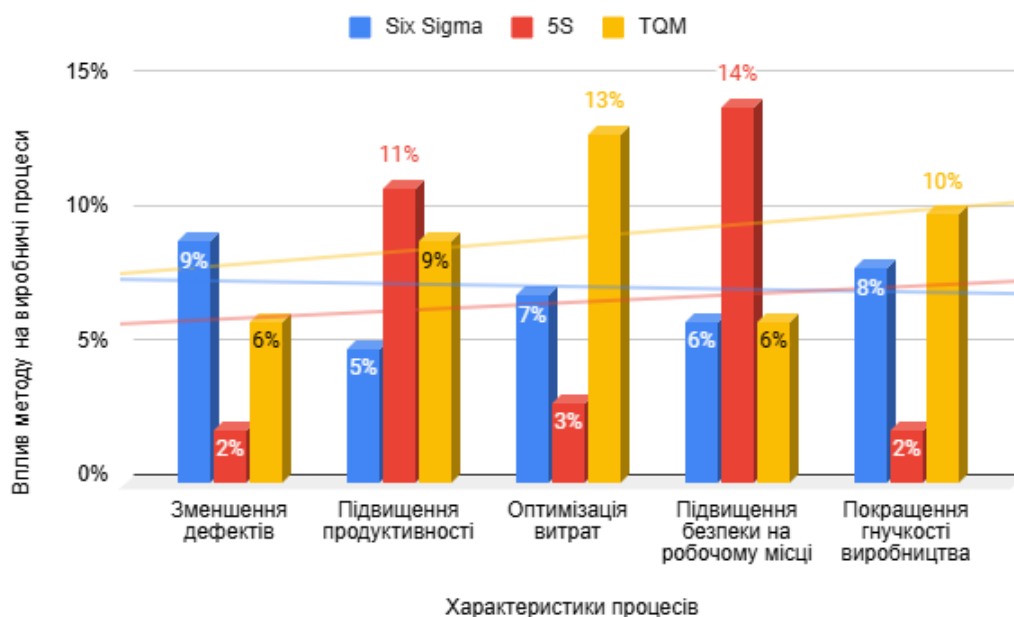


Рис. 2. Приріст показників після впровадження SixSigma, 5S, TQM

Разом із TQM доцільно впроваджувати SixSigma, яка допомагає зменшити дефекти та мінімізувати відхилення у виробничих процесах завдяки застосуванню статистичних методів моніторингу якості. Наприклад, впровадження SixSigma на металообробних підприємствах дозволяє:

1. Знизити рівень дефекту, що суттєво покращує вихід придатної продукції.
2. Мінімізувати варіативність у виробництві, забезпечуючи стабільність розмірів, механічних властивостей і точності обробки деталей.
3. Зменшити витрати на доопрацювання та переробку, що особливо важливо для складних високоточних деталей у машинобудуванні.

Доповненням до цих підходів може бути 5S, яка фокусується на організації робочого простору, підвищенні безпеки та покращенні продуктивності за рахунок системного управління робочими місцями. Впровадження 5S на металообробних підприємствах дозволяє:

1. Зменшити час на пошук інструментів та матеріалів на 20–30%, завдяки чіткій організації робочого місця.
2. Знизити рівень виробничого травматизму через усунення зайвих предметів та небезпечних зон.
3. Підвищити термін експлуатації обладнання, запроваджуючи регулярне прибирання та обслуговування (Seiso – "систематичне очищення").

Таким чином, комплексне впровадження TQM у поєднанні з SixSigma та 5S дозволяє металообробним підприємствам:

1. Знизити рівень дефектності продукції до 1%.
2. Скоротити виробничі витрати на 10–25% завдяки зменшенню витрат та оптимізації процесів.
3. Підвищити продуктивність на 15–30% за рахунок ефективного використання ресурсів.
4. Покращити терміни виконання замовлень, що підвищує задоволеність клієнтів та конкурентоспроможність підприємства.

У результаті, така стратегія забезпечує сталий розвиток виробництва, підвищення рентабельності та довгострокове зростання на ринку.

Висновки. Аналіз методів управління якістю дозволив визначити найбільш ефективну та відповідну методологію, яка найкраще відповідає вимогам та характеристикам металообробного виробництва. Це дає можливість забезпечити високий рівень стандартизації продукції, підвищити продуктивність виробничих процесів та мінімізувати ризики, пов'язані з дефектами та витратами. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оцінку результативності окремих методологій управління якістю, вивчення їх взаємодії та можливостей синергії. Слід впроваджувати цифрові рішення для автоматизації процесів, аналізу довгострокових наслідків змін та підвищення зацікавленості працівників через професійне навчання та мотивацію. Крім того, слід оцінювати

фінансову доцільність впроваджуваних рішень і застосовувати підходи Lean з метою підвищення ефективності виробництва та зменшення витрат.

Список використаних джерел:

1. Баєва О.І. Про еволюцію підходів до управління якістю. Управління якістю у фармації: матеріали XVI наук. - практ. конф., м. Харків, 20 травня 2022 р. Харків: НФаУ, 2022. С. 15–18.
2. Impact of total quality management on corporate sustainability through the mediating effect of knowledge management. *Journal of Cleaner Production*, Volume 244, 20 January 2020, 118806
3. Applying Lean Six Sigma for Waste Reduction in a Manufacturing Environment. *American Journal of Industrial Engineering*, 2013, Vol. 1, No. 2, 28-35
4. Sándor Bodzás, Israel O. Okonokhua. Manufacturing design and static analysis of a gear shaft. *Journal of Production Engineering*. 2024. P. 6.
5. John J. Thambirajah. Application of Performance Indicators for the Evaluation of Process Quality and Supply Chain Metrics of a Steel Shaft Manufacturing Process. *London Journal of Research in Management and Business*. 2022. P. 1–28.
6. Umble E.J. (2019) Quality: The Implications of Deming's Approach. In: Swamidass P.M. (eds) *Encyclopedia of Production and Manufacturing Management*. Springer, Boston, MA.
7. С. Бондаренко. Використання системи „Упорядкування” (5S) на підприємстві. м. Київ. 2017. С. 38–39.

З.С. Сірко¹, Г.В. Сушкова¹, М.М. Толстушко², Н.О. Толстушко², Ю.Р. Бродович³
 Український державний науково-дослідний інститут "Ресурс"¹
 Луцький національний технічний університет²
 Мукачівський державний університет³

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗОК ЖОРСТКОСТІ ЗУБА ТА ПОДАЧІ НА ЗУБ РАМНОЇ ПИЛИ

Точність та якість пиломатеріалів вимагає застосування сучасного устаткування з дереворізальним інструментом необхідної жорсткості. На жорсткість зуба пили та пили в цілому впливають сили різання, особливо бокова сила різання, яка старається відігнути зуб і цим самим знизити точність та якість оброблення. В свою чергу сили різання залежать від подачі на зуб і чим більша подача на зуб тим більші сили різання. Тому дуже важливо встановити взаємозв'язок жорсткості зуба та подачі на зуб пили, щоб забезпечити високу продуктивність процесу пиляння та належну точність і якість оброблених поверхонь.

Ключові слова: рамна пила, жорсткість, подача на зуб, сили різання, взаємозв'язок.

Z. Sirko, H. Sushkova, M. Tolstushko, N. Tolstushko, Y. Brodovych

INTERRELATION BETWEEN TOOTH STIFFNESS AND FEED RATE OF A FRAME SAW TOOTH

The accuracy and quality of lumber requires the use of modern equipment with wood-cutting tools of the required rigidity. The stability of the tool in the cut depends on the stiffness of the saw blade, which directly affects the quality of the machined surfaces. That's why wood cutting tools are made of special tool steels, in which alloying elements affect the physical and mechanical properties of the steels, in particular their stiffness. The stiffness of the saw tooth and the saw as a whole is influenced by the cutting forces, especially the lateral cutting force, which tends to bend the tooth and thus reduce the accuracy and quality of the cut. In turn, the cutting forces depend on the feed to the tooth, and the higher the feed to the tooth, the higher the cutting forces. Therefore, it is very important to establish the relationship between tooth stiffness and tooth feed to ensure high productivity of the sawing process and proper accuracy and quality of the machined surfaces.

Keywords: frame saw, stiffness, tooth feed, cutting forces, interrelation.

Постановка проблеми. Під час виробництва пилопродукції на сучасному устаткуванні висувають високі вимоги до точності та якості оброблення поверхонь. Для досягнення зазначених умов необхідно забезпечити виробництво якісним та зносостійким різальним інструментом [1]. З метою підвищення зносостійкості інструменту та його жорсткості використовують різні тверді сплави: литі тверді сплави, вольфрамокобальтові металокерамічні тверді сплави, надтверді матеріали [2]. Із литих твердих сплавів найбільше використовують стеліт, яким оснащують зуби різального інструменту. Сплави вольфрамокобальтові металокерамічні складаються із карбідів вольфраму та кобальту. У деревообробляльному виробництві використовують вольфрамокобальтові сплави марок ВК6, ВК8 та ВК15. Для механічного оброблення деревини твердих листяних порід рекомендують застосовувати твердий сплав марки ВК15. Для оброблення деревинних матеріалів доцільно використовувати тверді сплави марок ВК6 та ВК8. До надтвердих матеріалів відносять синтетичні алмази та кубічний нітрид бору. Однією із позитивних якостей зазначених твердих сплавів є висока жорсткість зубів інструменту, що забезпечує високу стабільність його роботи в пропили та високу точність і якість оброблених поверхонь [3]. Дещо нижчу але у деяких випадках достатню жорсткість зубів забезпечують інструментальні сталі, із яких безпосередньо виготовляють інструмент (рамні пили, пласкі сталеві пили і т.і.) [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Від жорсткості зубів інструменту безпосередньо залежить його зносостійкість. Дуже важливою умовою для продуктивної роботи інструменту є взаємозв'язок жорсткості зуба та подачі на зуб пили. За такою проблематикою працювали багато дослідників, але ряд важливих питань залишились поза увагою [1-4].

Постановка завдань. Мета дослідження – встановити взаємозв'язок жорсткості зубів з подачею на зуб рамної пили.

Викладення основного матеріалу. Для досліджень використовували рамні пили довжиною 1600 мм, товщиною 2,2 мм, які виготовлені із інструментальної сталі 7ХНМФБ. Сили, що діють на зуб пили, поперечну деформацію зуба визначали аналітичним шляхом. Жорсткість зуба рамної пили характеризується відношенням бокової сили P_b , що діє на зуб, до його поперечної деформації f , яка безпосередньо відображається на якості оброблення поверхонь та точності розпилювання.

Для розрахунків вибрана спрощена схема, яка показана на рис. 1.

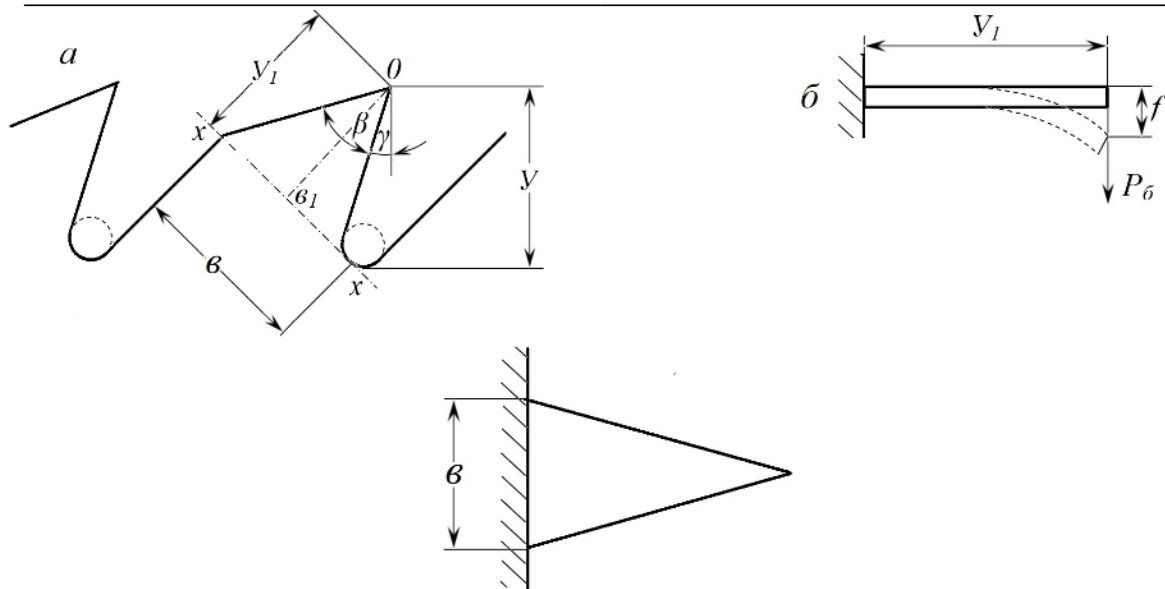


Рис. 1. Схема розрахунку зуба пили на поперечний вигин: а – параметри зуба пили; б – жорстке закріплення зуба пили у вигляді трикутної балки

На схемі зображені позначення: β - кут загострення; γ - передній кут; y - висота зуба; b_1 - ширина основи зуба за лінією вигину $x-x$, за припущення жорсткого закріплення зуба у вигляді трикутної балки.

Величину прогину зуба визначають за формулою:

$$f = \frac{8P_b}{Eb_1} \left(\frac{y_1}{S} \right)^3, \quad (1)$$

де E - модуль пружності інструментальної сталі;

S - товщина зуба пили;

P_b - бокова сила, що діє на зуб пили.

Скориставшись схемою знайдемо величини y_1 і b_1 :

$$y = \frac{Ox}{\cos \beta / 2} = \frac{y}{\cos \gamma \cos \beta / 2}; \quad b_1 = 2y_1 \tan \beta / 2,$$

де β - кут загострення;

γ - передній кут;

y - висота зуба;

y_1 - задня поверхня зуба;

b_1 - основа зуба.

Якщо підставити значення y_1 отримаємо:

$$b_1 = \frac{2y \tan \beta / 2}{\cos \gamma \cos \beta / 2}. \quad (2)$$

Із врахуванням викладеного та відповідних перетворень формула (2) буде мати вигляд:

$$f = \frac{8P_b y^2 (1 + \tan^2 \gamma)}{ES^3 \sin \beta}. \quad (3)$$

Із формули (3) видно, що величина прогину вершини зуба пропорційна величині бокової сили, висоті зуба та величині переднього кута і зворотно пропорційна величині кута загострення та товщині зуба пили.

Якщо припустити, що $P_b \approx 0,33P = 0,33KS_z$, де K - питомий опір різанню, отримаємо:

$$f = \frac{80,33KS_z(1+tg^2\gamma)}{E \sin \beta} \left(\frac{y}{S}\right)^2, \quad (4)$$

де S_z - подача на зуб пили.

Якщо позначити постійні величини буквою, наприклад «C», отримаємо

$$f = CKS_z \frac{1+tg^2\gamma}{\sin \delta} \left(\frac{y}{S}\right)^2. \quad (5)$$

Звідси

$$KS_z = \frac{f \sin \beta}{C(1+tg^2\gamma)} \left(\frac{S}{y}\right)^2. \quad (6)$$

Якщо позначити

$$\frac{f \sin \beta}{C(1+tg^2\gamma)} = C_1 \quad (7)$$

тоді

$$KS_z = C_1 \left(\frac{S}{y}\right)^2 \quad (8)$$

або

$$\frac{S}{y} = \sqrt{\frac{KS_z}{C_1}}. \quad (9)$$

Із формули (9) видно, що співвідношення параметрів зубів пили залежить від факторів, що характеризують породу деревини, яку розпилюють (від питомого опору різання K). Зокрема під час пиляння твердої породи деревини, яка має підвищений опір різанню, у порівнянні із сосною, необхідно за однакової товщини пили знизити висоту зубів та подачу на зуб пили.

Висновки.

1. Від жорсткості зубів пили залежить продуктивність процесу розпилювання деревини, точність та якість оброблених поверхонь.
2. Величина прогину вершини зуба пропорційна величині бокової сили, висоті зуба та величині переднього кута і зворотно пропорційна величині кута загострення та товщині зуба пили.
3. Співвідношення параметрів зубів пили залежить від факторів, які характеризують породу деревини, що розпилюють.
4. Під час пиляння твердих листяних порід деревини необхідно за однакової товщини пили знижувати висоту зубів та подачу на зуб пили.

Список використаних джерел

1. Кірик М.Д. Інструмент для обробляння деревини та деревних матеріалів. Коломия: ТМЦ Коломийського механіко-технологічного коледжу, 1999. 190 с.
2. Кірик М.Д. Механічне оброблення деревини та деревних матеріалів. Львів: ТзОВ «Кольорове небо», 2006. 412 с.
3. Сірко З.С. Експлуатація лісопиляльних рам: Монографія. Київ: Центр учбової літератури, 2017. 208 с.
4. Сірко З.С. Лісопиляльні рами: Монографія. Київ: Центр учбової літератури, 2016. 260 с.

Рецензент: Дідух Володимир Федорович, доктор технічних наук, професор кафедри аграрної інженерії імені професора Г.А. Хайліса Луцького національного технічного університету, Заслужений діяч науки і техніки України.

О.В. Вдовиченко¹, М.П. Гадзира¹, А.М. Колесников¹, Н.Д. Ткачук¹, І.Д. Гнилиця²

*Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України¹
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу²*

ДИНАМІЧНА ПРУЖНІСТЬ ТА ЕЛЕКТРИЧНИЙ ОПІР РЕАКЦІЙНО СПЕЧЕНОЇ НАНОРОЗМІРНОЇ КЕРАМІКИ SiC-TiC

За технологією реакційного спікання нанорозмірних порошків отримані композиційні матеріали на основі карбіду кремнію, що містили в шихті від 1 до 8% (мас.) частинок порошку карбіду титану. Досліджено вплив вмісту TiC на закономірності зміни питомого електричного опору та динамічних модулів пружності композитів, визначених за результатами акустичних вимірювань швидкостей поширення пружних хвиль різних типів імпульсним та резонансним методам.

Ключові слова: реакційне спікання, наноккомпозити, карбіди, пружність, електричний опір.

O.V. Vdovychenko, M.Ph. Gadzyra, A.M. Kolesnykov, N.D. Tkachuk, I.D. Hnylytsia

DYNAMIC ELASTICITY AND ELECTRICAL RESISTIVITY OF REACTION-SINTERED NANOSIZED CERAMICS SiC-TiC

Using the technology of reactive sintering of nanosized powders, composite materials based on silicon carbide, containing in the charge from 1 to 8% (wt.) of titanium carbide powder particles were fabricated. The influence of the TiC content in the charge on the regularities of changes in the electrical resistivity and dynamic elastic moduli of composites, determined from the results of acoustic measurements of the propagation velocities of elastic waves of various types using pulsed and resonant methods, was investigated.

Key words: reaction sintering, nanocomposites, carbides, elasticity, electrical resistivity

Вступ. Карбід кремнію є одним з найбільш важливих керамічних матеріалів завдяки його високим теплопровідності, стійкості до окиснення і корозії, та низькому коефіцієнту термічного розширення. Модуль Юнга SiC за кімнатної температури сягає 460, а модуль зсуву – 200 ГПа [1]. Висока пружність у поєднанні зі стабільністю механічних властивостей SiC за температур до ~1600 К, дозволяє розглядати його як перспективний матеріал для виготовлення деталей, які експлуатуються в умовах високотемпературних термоциклічних навантажень [2, 3], а також в електронних приладах, які піддаються дії ударних циклічних навантажень. Це визначає необхідність вивчення комплексу електричних і механічних властивостей матеріалів на основі SiC.

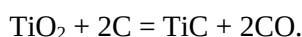
Відомо, що технічно чистий карбід кремнію демонструє високий електричний опір, який суттєво залежить від технології виготовлення, і який можна зменшити формуванням електропровідних фаз, додаючи карбіди, бориди та нітриди перехідних металів серед яких перспективним видається карбід титану [3]. Сам TiC, а також більшість силіцидів титану, що утворюються під час реакційного спікання, мають малий питомий електричний опір (порядку 10^{-7} Ом·м за температури 297 К) [4-6].

Для виготовлення композитів на основі SiC, модифікованих TiC, було запропоновано низку технологічних процесів. На відміну від високо вартісного гарячого пресування, спікання без прикладання тиску та спікання з утворенням рідкої фази забезпечують отримання відносно дешевих виробів на основі SiC, складної форми з високими механічними характеристиками [7].

Мета роботи. Метою цієї роботи є дослідження впливу вмісту TiC в шихті на характеристики пружності та електричний опір реакційно спечених матеріалів на основі нанорозмірних порошків твердого розчину карбону в карбіді кремнію, технологія виготовлення яких розроблена в ПІМ НАН України та описана в [8, 9].

Матеріали і методи досліджень

За вихідні були обрані нанорозмірні порошки твердого розчину карбону в карбіді кремнію та карбіду титану. Нанорозмірний порошок карбіду кремнію характеризується зменшеним параметром ґратки ($a = 0,43528$ нм), питома площа поверхні становить 18-25 м²/г, що відповідає середньому розміру частинки 70-100 нм [8]. Порошок карбіду титану синтезували в атмосфері аргону в індукційній печі за температури 1773 К з оксиду титану і термічно розширеного графіту відповідно до рівняння



Отже, вихідна шихта мала склад (SiC-TiC-C). Як зв'язку використовували фенолформальдегідну смолу. Були виготовлені зразки не модифікованого твердого розчину карбону в карбіді кремнію (далі позначаються як SiC), а також зразки які містили в шихті від 1 до 8 % (мас.) (через 1%) карбіду титану. Процес інфільтрації рідкої фази в пористу заготовку проводили в індукційній печі за температури 2273К. Внаслідок реакційного спікання були одержані зразки композитної кераміки SiC-Si (Ti, C), в яких карбід титану повністю прореагував з утворенням фаз SiC, Ti₃SiC₂, TiSi₂, Ti₅Si₃ у різній концентрації в залежності від вмісту складових і шихті.

Усі дослідження проводили за кімнатної температури з використанням шліфованих зразків у формі прямокутних паралелепіпедів довжиною близько $5,5 \cdot 10^{-2}$ м і поперечними розмірами близько $1 \cdot 10^{-2}$ м. Лінійні розміри зразків вимірювали за допомогою цифрового мікрометра з одиницею молодшого розряду 10^{-6} м, густину ρ одержаних композитів визначали методом гідростатичного зважування.

Електричні вимірювання проводили за допомогою цифрового мікроомметра UNI-T.UT620b.

Модулі пружності визначали двома методами: 1) імпульсним, за швидкостями поширення різних типів пружних хвиль, та 2) резонансним, за резонансними частотами коливань зразків. Перший метод реалізовувався таким чином. Протилежні грані зразка послідовно вводили в акустичний контакт з двома парами п'єзоелектричних перетворювачів поздовжньої або зсувної хвилі резонансного типу з центральною частотою 5 МГц. Як контактне середовище між зразком і перетворювачами застосовували дистильовану воду. На один з перетворювачів, який відігравав роль випромінювача, з генератора надходив електричний імпульс тривалістю 4 мкс і періодом 1 мс. Перетворювач збурював в матеріалі зразка поздовжню або поперечну ультразвукову хвилю. Перетворювач, розташований на протилежній грані зразка, трансформувал акустичний сигнал, що пройшов крізь зразок, знову в електричний, який після підсилення надходив для візуалізації на осцилограф. Інтервал часу Δt між моментами випромінювання та реєстрації ультразвукового імпульсу вимірювали з точністю 1 нс.

Швидкість поширення поздовжньої V_l та поперечної V_t ультразвукових хвиль визначали як відношення шляху, на який поширювався імпульс відповідної хвилі, до часу його поширення. Модулі Юнга E , зсуву G та коефіцієнт Пуассона ν визначали з співвідношень теорії пружності за формулами

$$E = \frac{\rho \cdot V_l^2 (3V_l^2 - 4V_t^2)}{V_l^2 - V_t^2}; \quad (1)$$

$$G = \rho V_t^2; \quad (2)$$

$$\nu = \frac{1}{2} \frac{V_l^2 - 2V_t^2}{V_l^2 - V_t^2}, \quad (3)$$

де ρ – експериментально визначена густина матеріалу зразка.

Швидкості поширення V_l та V_t вимірювали вздовж коротких граней, щоб забезпечити умови формування відповідних хвиль в пружному середовищі. Розсіювання результатів ультразвукових вимірювань імпульсним методом не перевищувало 0,5%. Вимірювання проводили вздовж поперечних розмірів зразків. Результати одержували осередненням 4 незалежних вимірювань.

Другий, резонансний, метод, докладно описаний в роботі [10], реалізовували на обладнанні для резонансної ультразвукової спектроскопії у такий спосіб. Зразок розташовували між двома ширококутовими п'єзоелектричними перетворювачами обраними так, щоб нижні резонансні частоти зразка потрапляли в частотну смугу перетворювачів. У нашому випадку діапазон вимірюваних частот перетворювачів становив 20...200 кГц. Для того, щоб мінімізувати вплив накладених на зразок зв'язків на форми і частоти власних коливань, зразок встановлювали так, щоб в механічному контакті з перетворювачами були лише дві точки - кути, розташовані на найдовшій діагоналі. Для покращення акустичного контакту між поверхнями зразка і перетворювачів вводили контактну рідину. Електричний сигнал синусоїдальної форми надходив з цифрового генератора PCG10-8016 (Velleman) на один з акустичних перетворювачів, який через акустичний контакт збурював механічні коливання зразка в околі власної частоти зразка. Протилежний акустичний перетворювач трансформувал механічні коливання зразка в електричний сигнал, який після підсилення надходив на числовий осцилоскоп PCS500 (Velleman) і далі на комп'ютер для реєстрації і подальшого аналізу. Частоту сигналу збурення поступово змінювали і будували амплітудно-частотну характеристику (резонансний спектр) коливань зразка, за яким визначали його резонансні частоти. Модуль Юнга зразка в напрямку поздовжньої осі стрижня розраховували за виміряною

резонансною частотою першої моди поздовжніх коливань стрижневого зразка f_r , використовуючи формулу

$$E = 4 \cdot \rho \cdot l^2 \cdot f_r^2, \quad (4)$$

де ρ – як і раніше, густина матеріалу, а l – довжина зразка.

Амплітуди відносних максимальних циклічних деформації, що виникали в зразках під час вимірювань, мали порядок $10^{-8} \dots 10^{-6}$.

Результати досліджень та їх обговорення

Густина. Рис.1,а демонструє відсутність однозначної залежності ρ від вмісту TiC. Густина матеріалу з вихідного порошку твердого розчину карбону в карбіді кремнію становила 3050 кг/м^3 , густина композитів, модифікованих TiC відхилялась від середнього значення $\sim 3032 \text{ кг/м}^3$ в діапазоні $\Delta = \pm 1\%$. Ці значення дещо нижчі за відомі з літератури значення густини SiC α - та β -модифікацій $\rho = 3215 \text{ кг/м}^3$ [1], що може бути пов'язано з особливостями технології отримання та структури вихідних порошків.

Питомий електричний опір. Результати визначення електричних характеристик досліджуваних композитів, наведені на Рис.1,б, свідчать, що збільшення вмісту карбіду титану має наслідком зменшення питомого електричного опору ρ^* . Стрімке падіння ρ^* відбувається вже внаслідок додавання в шихту 1% (мас.) карбіду титану – від $55 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ у не модифікованого нанорозмірного твердого розчину карбону в карбіді титану до $49,4 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ у матеріалу на основі SiC, модифікованого 1%(мас.) TiC. З подальшим зростанням концентрації TiC в шихті електричний опір продовжує зменшуватись, проте більш помірно - до $5,8 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ у матеріалу, що містив 8% TiC в шихті. Слід відзначити, що питомий електричний опір матеріалу, виготовленого з порошків твердого розчину карбону в карбіді титану з середнім розміром частинок порядку 100 мкм без модифікатора, становив близько $23 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Це може свідчити про значний вплив на електричний опір контактів між частинками.

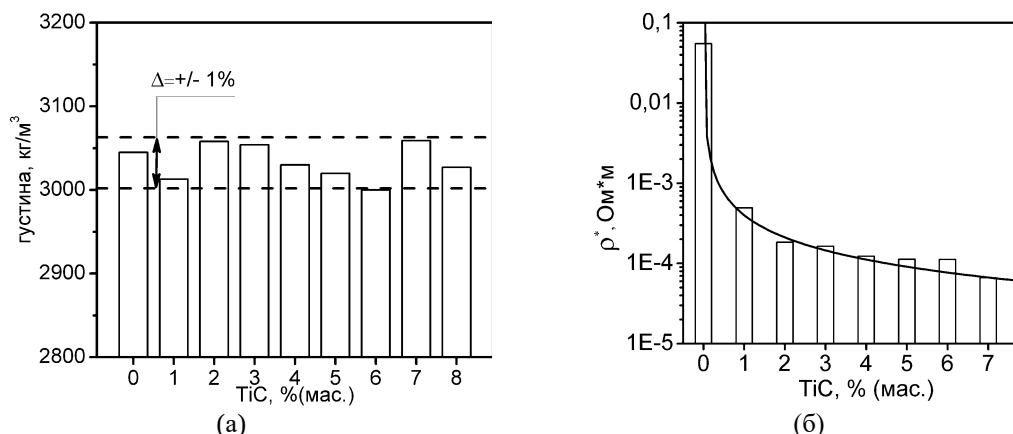


Рис.1 Залежності (а) - густини ρ та (б) - питомого електричного опору ρ^* матеріалів на основі SiC, модифікованих TiC від масового вмісту карбіду титану в шихті

З літератури відомо, що питомий електричний опір стехіометричних і нестехіометричних силіцидів титану за кімнатної температури може становити $1,4 \cdot 10^{-7} - 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ [11], а полікристалічного карбіду кремнію – між $3,5 \cdot 10^{-5}$ і $3 \cdot 10^{11} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ в залежності від хімічного складу модифікаторів і технологічного процесу [2], а отже одержані нами значення не суперечать відомим даним. Втім, фізичні механізми, які контролюють електричний опір досліджуваних реакційно спечених матеріалів на основі нанорозмірних порошків SiC та TiC вимагають окремого дослідження.

Модулі пружності. Результати визначення модулів Юнга E , зсуву G та коефіцієнту Пуассона ν композитів наведені на Рис.2.

Модулі пружності були розраховані за результатами імпульсних (Рис.2, а, б, г) та резонансних (в) акустичних вимірювань за формулами (1-3) та (4), відповідно. Було встановлено, що значення модуля Юнга, визначені обома методами, та модуля зсуву, визначеного імпульсним методом, мають однакову тенденцію зміни зі збільшенням вмісту карбіду титану, а саме мають максимум за концентрації TiC в шихті 4...5% (мас.).

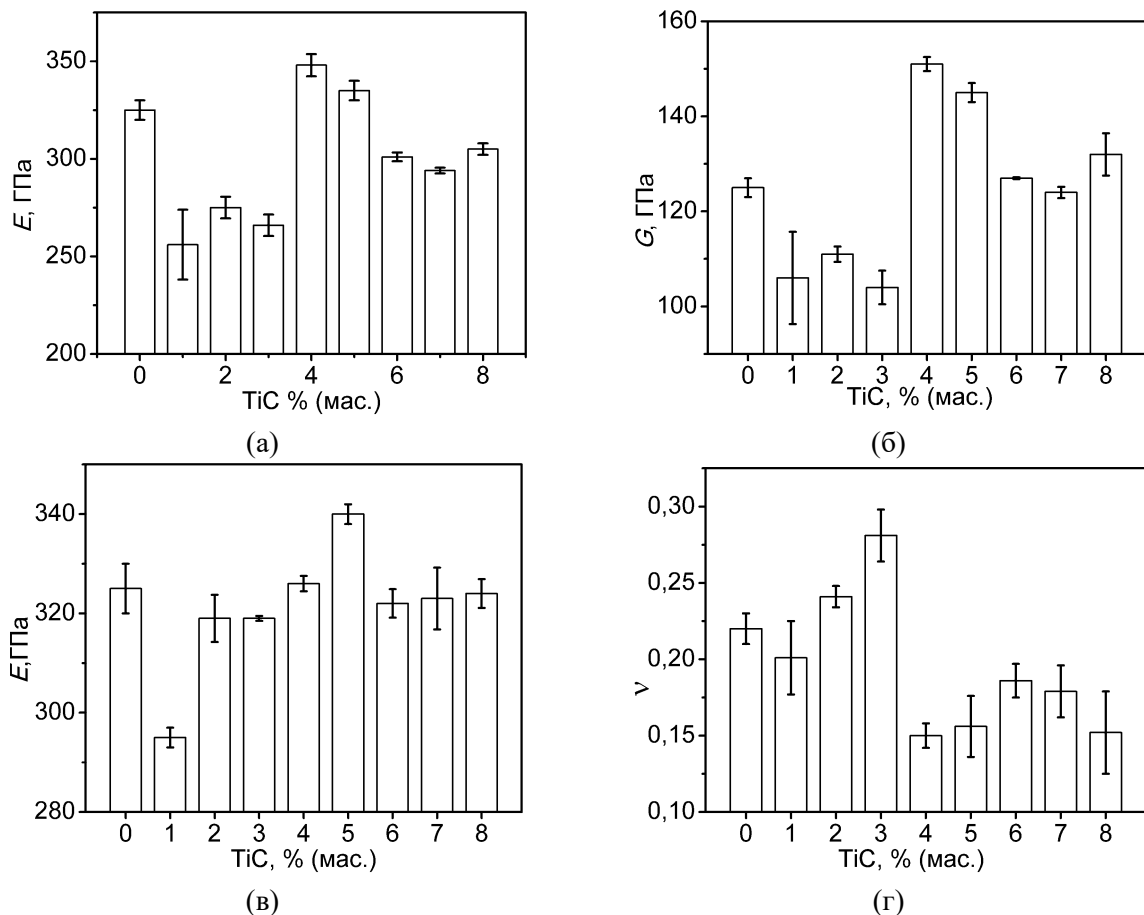


Рис.2. Залежності модуля Юнга E (а, в), модуля зсуву G (б) та коефіцієнта Пуассона (г) композитів в напрямку (а, б, г) та в площині (в) пресування від масового вмісту TiC в шихті

Зміна характеристик пружності є істотною і не може бути викликана простим статистичним розсіюванням результатів. Значення E та G , розраховані за результатами незалежних вимірювань швидкостей поширення акустичних хвиль трьох різних типів змінюються узгоджено. Різниця між абсолютними значеннями модуля Юнга E , одержаними різними методами (Рис.2 а і в), ймовірно, викликана тим, що модуль Юнга вимірювався в різних напрямках: імпульсним методом – в напрямку пресування, а резонансним – вздовж його довгої сторони, тобто в площині пресування, і може свідчити про анізотропію пружності композитів. Така анізотропія пружності вочевидь є наслідком анізотропії структури фаз композитів, яка зумовлена власне процесом просочування впродовж реакційного спікання, що суттєво впливає на орієнтацію кристалів.

Хід залежності коефіцієнта Пуассона відрізняється, а саме значення ν зростає із вмістом TiC від 0,20 у SiC-1%(мас.)TiC до 0,28 у SiC-3%(мас.)TiC, а далі стрімко падає до 0,15 (Рис.2, г).

Автори роботи [12] спостерігали схожу екстремальну залежність модуля Юнга композитів системи SiC-4,3%Al₂O₃-5,7%Y₂O₃-TiC, одержаних рідкофазним спіканням, від масового вмісту TiC. Значення модуля Юнга зростали від $E = 350$ ГПа у композита, що не містив TiC до максимального значення $E = 390$ ГПа у композита з SiC-4,3%Al₂O₃-5,7%Y₂O₃-5%TiC (скрізь наведено проценти за масою) і надалі зменшувалися. Автори вважали, що такий характер залежностей обумовлений пористістю, яка була мінімальною (0,01) у композита, що містив 10%(мас.)TiC. Наші дослідження, однак, показали, що варіації густини (Рис.1, а) лише частково можуть пояснити зміну модулів пружності (Рис.2). Більш важливою ймовірною причиною зміни характеристик пружності композитів можуть бути залишкові напруження між фазами, що утворюються в процесі виготовлення і можуть викликати внутрішні пошкодження структури. Різниця числових значень модулів Юнга в різних напрямках свідчить про анізотропію структури композитів, що формується в процесі реакційного спікання.

Висновки

Методом реакційного спікання було одержано наноструктурні композити на основі SiC, що містили в шихті від 1 до 8%(мас.) карбіду титану. Встановлено, що густина усіх композитів становить близько 3000 кг/м, що свідчить про деяке загальне зменшення відносної густини композитів зі збільшенням вмісту TiC.

Модифікація шихти вже 1% (мас.) TiC дозволила на два порядки зменшити питомий електричний опір одержаного матеріалу – від $55 \cdot 10^{-3}$ до $49,4 \cdot 10^{-5}$ Ом·м. Подальше підвищення вмісту TiC в шихті до 8% (мас.) зменшило опір ще на порядок - до $5,8 \cdot 10^{-5}$ Ом·м.

Водночас, така модифікація дозволила дещо збільшити характеристики пружності одержаних нанорозмірних матеріалів. Динамічні модулі Юнга та зсуву, визначені імпульсним та резонансним акустичними методами, демонструють екстремум у матеріалів, які містять 4-5% (мас.) TiC у шихті. Причиною такого ходу залежностей характеристик пружності може бути утворення фаз з відмінними значеннями фізичних характеристик (густини, пружності, коефіцієнту термічного розширення тощо), які можуть спричиняти виникнення внутрішніх напружень і навіть викликати утворення тріщин, які у свою чергу впливають на згадані характеристики.

Одержані результати відкривають напрямок для одержання нанорозмірних композитів на основі твердого розчину карбону в карбіді кремнію з покращеними експлуатаційними властивостями.

Список використаних джерел:

1. Францевич И.Н., Воронов Ф.Ф., Бакута С.А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов / Под ред. И.Н. Францевича. К.: Наук. думка, (1982) 288 с.
2. Kim Y.-W., Kim Y.-H., Kim K. J. Electrical properties of liquid-phase sintered silicon carbide ceramics: a review. Crit. Rev. Solid States Mater. Sci. 45 (2020) 66-84. doi: 10.1080/10408436.2018.1532394
3. Kultayeva S., Kim Y.-W., Song I.-H. Effects of dopants on electrical, thermal, and mechanical properties of porous SiC ceramics, J. Eur. Ceram. Soc. 41 (2021) 4006-4015. doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2021.01.049.
4. Zheng J., Lu K. Electrically conductive and thermally stable SiC-TiC containing nanocomposites via flash pyrolysis. J. Am. Ceram. Soc. 104 (2021) 2460-2471. doi: 10.1111/JASE.17663.
5. Nava F., Mazzega E., Michelini M., Laborde O., Thomas O., Senateur J.P., Madar R. Analysis of the electrical resistivity of Ti, Mo, Ta, and W monocrystalline disilicides, J. Appl. Phys. 65 (1989) 1584-1590. doi: 10.1063/1.342949.
6. Barsoum M.W., Yo H.-I., Polushina I., Rud V.Y., Rud Y.V., El-Raghy T. Electrical conductivity, thermopower, and Hall effect of Ti_3AlC_2 , Ti_4AlN_3 , and Ti_3SiC_2 . Phys. Rev. B 62 (2000) 10194-10198. doi: 10.1103/PhysRevB.62.10194.
7. Ahmoye D., Bucevac D., Krstic V.D. Mechanical properties of reaction sintered SiC-TiC composite, Ceram. Int. 44 (2018) 14401-14407. doi: 10.1016/j.ceramint.2018.05.050.
8. Gadzyra N.F., Gnesin G.G., Mykhaylyk A.A. Mechanism for the formation of a solid solution of carbon in silicon carbide. Powder Metall. Met. Ceram. 40 No. 9–10 (2001) 519–525. doi: 10.1023/A:1014352009750.
9. Пінчук М.О., Гадзира М.П. Дослідження мікроструктури реакційно спеченого карбіду кремнію, модифікованого карбідом хрому. Порошкова металургія (2019) № 11/12 С. 57-62. doi: 10.1007/s11106-020-00123-y
10. Вдовиченко О.В. Вплив макродефектів структури оксиду алюмінію на нелінійність резонансних механічних коливань. Сучасні проблеми фізичного матеріалознавства. Вип. 21 (2012) Пр. Ін-та проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України С.89-100.
11. Nassiopoulous G., Tambouris D., Frangis N., Logothetidis S., Georga S., Krontiras Ch., Xanthopoulos N. Titanium disilicide on silicon by interdiffusion of titanium and amorphous silicon multilayers: transmission electron microscopy, spectroscopic ellipsometry and resistivity measurements. Thin Solid Films 247 (1994) 44-50. doi:10.1016/0040-6090(94)90474-X.
12. Khodaei M., Yaghobizadeh O., Safavi S.A., Ehsani N., Baharvandi H.R., Esmaeeli S. The effect of TiC additive with Al_2O_3 - Y_2O_3 on the microstructure and mechanical properties of SiC matrix composites. Adv. Ceram. Progr. 6 (2020) 15 – 24. doi: 10.30501/acp.2020.109546.

Рецензент: Штерн Михайло Борисович, завідувач відділу, д.т.н., чл.-кор. НАН України, Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України

З.С. Сірко¹, В.В. Ващенко¹, М.Є. Носов¹, М.М. Толстушко², Н.О. Толстушко²

Український державний науково-дослідний інститут "Ресурс"¹

Луцький національний технічний університет²

СИСТЕМА ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ НА ПІДПРИЄМСТВІ

У статті висвітлені питання, пов'язані із актуальною проблемою для України – з енергоефективністю. Показано, що на теперішній час в Україні гостро стоїть питання стабільного енергозабезпечення та ефективного використання енергоресурсів. Підвищення цін на паливно-енергетичні ресурси зумовило пошук шляхів їхнього економного використання або заміщення на альтернативні джерела енергії. Енергонезалежність та енергоефективність підприємства є ключовим фактором досягнення його успішного функціонування. Наразі потрібні нові підходи до реалізації політики у сфері енергоефективності і одним із шляхів якої є енергетичний менеджмент на підприємстві.

Ключові слова: енергоефективність, енергозбереження, енергонезалежність, державний резерв, енергетичний менеджмент, підприємство.

Z. Sirko, V. Vashchenko, M. Nosov, M. Tolstushko, N. Tolstushko

ENERGY MANAGEMENT IMPLEMENTATION SYSTEM AT THE ENTERPRISE

The article highlights the issues related to energy efficiency, which is an urgent problem for Ukraine. The author shows that Ukraine is currently facing the issue of stable energy supply and efficient use of energy resources. The rise in prices for fuel and energy resources has led to the search for ways to use them economically or replace them with alternative energy sources. Energy independence and energy efficiency of an enterprise is a key factor in achieving its successful operation. New approaches to the implementation of energy efficiency policy are now needed, and one of the ways to achieve this is through energy management at the enterprise. In today's business environment, energy management will provide a practical solution to the company's problems, a certain balance in the supply of fuel and energy and other material resources.

Keywords: energy efficiency, energy saving, energy independence, state reserve, energy management, enterprise.

Постановка проблеми. На сучасному етапі в Україні гостро стоїть проблема стабільного енергозабезпечення та ефективного використання енергоресурсів. Від вирішення цих питань значною мірою залежить рівень економічного та соціального розвитку суспільства. Питання енергоефективності та енергонезалежності є актуальним для різного рода підприємств і зокрема для підприємств системи державного резерву України. Підвищення цін на паливно-енергетичні ресурси зумовило пошук шляхів їхнього економного використання або заміщення на альтернативні джерела енергії. Енергонезалежність та енергоефективність підприємства – це взаємопов'язані фактори, оскільки ефективність використання паливно-енергетичних ресурсів є ключовим фактором досягнення енергонезалежності. Світові технології зробили якісний стрибок в енергозбереженні, а рівень вітчизняних промислових підприємств залишається одним із найнижчих в Європі [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема ефективного використання енергетичних ресурсів в Україні перетворилась в одне з найважливіших завдань [2]. На теперішній час виникла потреба нових підходів до реалізації державної політики у сфері енергоефективності [3], одним із шляхів якої є енергетичний менеджмент на підприємстві. У цьому напрямку працювали багато вчених, але ряд питань залишилися поза увагою [1-3].

Постановка завдань. Мета дослідження – організація системи енергетичного менеджменту на підприємстві.

Викладення основного матеріалу. В процесі досліджень використовували вивчення фактичного стану енергоефективності на підприємствах, узагальнення та систематизацію отриманих даних.

Раціональне та економне використання паливно-енергетичних і трудових ресурсів спрямоване на зниження витрат у виробництві, що дозволяє підвищити ефективність виробництва в цілому без додаткових інвестицій. Вирішення даного питання є одним із найважливіших завдань системи енергетичного менеджменту. Раціональне використання матеріально-технічних, паливно-енергетичних та трудових ресурсів – це сукупність методів, заходів, принципів і факторів, які повинні забезпечити зниження витрат на виробництва продукції (табл. 1).

Застосування ресурсозберігаючих технологій дозволить забезпечити економне використання матеріально-технічних, паливно-енергетичних та трудових ресурсів і буде запорукою досягнення цілей енергоефективності. У таблиці 2 наведені фактори ресурсозберігаючих технологій.

Табл. 1

Заходи щодо раціонального використання матеріально-технічних, паливно-енергетичних та трудових ресурсів

Перелік заходів щодо раціонального використання матеріально-технічних, паливно-енергетичних та трудових ресурсів	
Виробничо-технічні	Організаційно-економічні
- застосування ресурсозберігаючих технологій; - впровадження безвідходних та маловідходних технологій; - заміна морально та фізично застарілого устаткування; - механізація та автоматизація трудомістких процесів; - впровадження нормативних матеріалів з організації праці; - відповідальне зберігання матеріально-технічних ресурсів та сировини; - ощадливе використання паливно-енергетичних ресурсів.	- удосконалення нормативно-технічної бази щодо визначення оптимальної кількості працівників, матеріалів і сировини; - удосконалення організації процесу матеріально-технічного забезпечення; - організація та впорядкування системи ціноутворення; - впровадження системи економічного стимулювання працівників за раціональне використання матеріально-технічних та паливно-енергетичних ресурсів; - застосування матеріального заохочення менеджерів виробництва за економне використання матеріальних та паливно-енергетичних ресурсів; - здійснення функцій контролю за економним використанням матеріально-технічних та паливно-енергетичних ресурсів.

Табл. 2

Фактори ресурсозберігаючих технологій

Перелік факторів ресурсозберігаючих технологій		
Технічні	Організаційні	Соціально-економічні
- застосування технологічних процесів, які здатні забезпечити мінімальні втрати сировини; - застосування устаткування з високою точністю оброблення та мінімальними втратами сировини; - покращення якості матеріальних ресурсів, що використовуються у виробництві; - удосконалення технічної та технологічної баз, транспортування та зберігання матеріально-технічних ресурсів; - удосконалення технологічних режимів оброблення сировини.	- удосконалення системи обліку та контролю за використанням матеріально-технічних ресурсів; - скорочення циклу перероблення сировини; - підвищення якості технічного обслуговування устаткування; - удосконалення організації відповідального зберігання продукції; - організація вторинного використання сировинних ресурсів.	- вивчення та аналіз використання матеріально-технічних, паливно-енергетичних та трудових ресурсів; - застосування наукових основ менеджменту та організації праці; - покращення умов праці та відпочинку працівників; - застосування науково обґрунтованих заходів щодо стимулювання та відповідальності; - здійснення соціально-психологічних заходів щодо економного використання матеріально-технічних, паливно-енергетичних та трудових ресурсів.

Завдання менеджменту полягає у відслідковуванні можливостей щодо використання промислових відходів виробництва та оперативному плануванні окремих складових матеріально-технічних та паливно-енергетичних ресурсів.

Менеджмент забезпечить раціональне використання ресурсів, буде сприяти впровадженню наукової організації праці підприємства із врахуванням його особливостей виробничої діяльності.

Належне зберігання сировинних ресурсів та засобів матеріально-технічного призначення впливає не лише на економічну ефективність виробництва, але і на якість виготовленої продукції.

Для безперебійної роботи підприємства необхідно створити запаси сировини та напівфабрикатів. За призначенням запаси бувають поточні, підготовчі та страхові. Поточні запаси забезпечують роботу підприємства в період між черговими надходженнями сировини та матеріалів. Підготовчі запаси створюються за необхідності спеціальної підготовки сировини до використання (пропарювання, антисептичне або вогнезахисне оброблення і т.і.). Страховий запас необхідний для запобігання невчасному надходженні сировини та напівфабрикатів.

Менеджмент повинен забезпечити мінімальну кількість запасів:

- запасу для забезпечення функціонування виробництва від початку процесу постачання до складування готової продукції;

- запасу для складування, що вимагає зберігання сировини за певних визначених умов (температура, вологість і т.і.);

- запасу для виконання технологічного процесу виробництва протягом доби;

- запасу, який повинен страхувати підприємство від непередбачуваних змін у постачанні, а також у разі втрат сировини та напівфабрикатів під час транспортування та зберігання.

Для економічної раціональності виробництва слід прагнути мінімального запасу сировини, а постачання необхідно забезпечити безперебійним.

Позитивний аспект запасів полягає у тому, що вони забезпечують гарантований ритм роботи підприємства.

Негативні аспекти значних запасів сировини, напівфабрикатів, паливно-енергетичних ресурсів полягають у зниженні якості цих ресурсів, збільшенні витрат на зберігання та зниженні швидкості обігу коштів.

Енергетичний менеджмент сприяє економному використанню матеріально-технічних і паливно-енергетичних ресурсів, що справляє вирішальний вплив на зниження витрат виробництва, собівартості продукції, підвищенню прибутковості та рентабельності підприємства. Доведення матеріально-технічних та паливно-енергетичних запасів до реально необхідного рівня сприяє вивільненню обігових коштів, залученню додаткових матеріальних і паливно-енергетичних ресурсів у виробництво та створює умови для виготовлення додаткового об'єму продукції.

Наявність на підприємстві сучасних комп'ютерних систем обліку матеріально-технічних та паливно-енергетичних ресурсів і даних нормативної бази дозволить менеджерам володіти ситуацією щодо наявності, використання й руху матеріально-технічних та паливно-енергетичних ресурсів у виробничому процесі, що зумовить мінімізацію витрат виробництва та оптимізацію використання і управління матеріальними ресурсами в цілому.

В сучасних умовах господарювання енергетичний менеджмент дає можливість забезпечити практичне вирішення проблем підприємства, певну збалансованість у постачанні його паливно-енергетичними та іншими матеріальними ресурсами, а також створить певні економічні передумови для пошуку шляхів найефективнішого застосування енергозощаджувальних технологій та активного впровадження науково-технічного прогресу в енергонезалежність підприємства.

Висновки.

1. Енергетичний менеджмент сприяє раціональному та економному використанню паливно-енергетичних, матеріально-технічних та трудових ресурсів, що дозволяє підвищити ефективність виробництва в цілому без додаткових інвестицій.

2. Доведення на основі менеджменту паливно-енергетичних та матеріально-технічних запасів до реально необхідного рівня сприяє вивільненню обігових коштів, залученню додаткових паливно-енергетичних і матеріальних ресурсів у виробництва та створює умови для виготовлення додаткового об'єму продукції.

3. В сучасних умовах господарювання енергетичний менеджмент забезпечить практичне вирішення проблем підприємства, певну збалансованість у постачанні його паливно-енергетичними та іншими матеріальними ресурсами, створить певні економічні передумови для пошуку шляхів найефективнішого застосування енергозощаджувальних технологій та активного впровадження науково-технічного прогресу в енергонезалежність підприємства.

Список використаних джерел

1. Коренда В.А., Чернявський А.В., Протасов О.С., Вишняков І.Ю., Охріменко С.М., Заїка Ю.І. та інші. Підвищення енергоефективності на підприємствах системи Державного резерву України: Монографія. Одеса: ОЛДІ-ПЛЮС, 2020. 280 с.
2. Відроджувальні джерела енергії. Методичні вказівки. 2012. URL:https://tntu.org.ua/download/mv_prakroby_vde.pdf. (дата звернення: 18. 01. 2024).
3. Програма енергоефективності та енергозбереження Закарпатської області на 2016 – 2020 роки. 2015. URL:<https://www.uzhnu.edu.ua/uk/infocentre/get/61984>. (дата звернення: 18. 01. 2024).

Рецензент: Дідух Володимир Федорович, доктор технічних наук, професор кафедри аграрної інженерії імені професора Г.А. Хайліса Луцького національного технічного університету, Заслужений діяч науки і техніки України.

Т. Г. Войтік

Одеський національний морський університет

РІВНЯННЯ СПОРІДНЕНЕ ІЗ ЗАДАЧЕЮ РІМАНА З РАЦІОНАЛЬНИМ КОЕФІЦІЄНТОМ, ОБОРОТНИМ В ОДНОМУ З ПІДКІЛЕЦЬ ФАКТОРИЗАЦІЙНОЇ ПАРИ

Повідомляється про результат продовження дослідження розв'язності абстрактного рівняння щодо двох раціональних функцій із підкілець. Реалізації рівняння можуть виражати крайові умови задачі, спорідненої для крайової задачі Рімана (Рімана-Гільберта, Рімана-Гільберта-Привалова) з теорії аналітичних функцій. Розглянуто випадок, коли коефіцієнт є раціональною функцією, що належить одному з підкілець факторизаційної пари кільця та оборотна в цьому підкільці. Рівняння задається у всій комплексній площині, а крайова умова виявляється його звуженням на зімкнуту дійсну вісь. Застосовується відрізняючийся алгебраїчністю підхід, що спрощує докази. У підході поєднуються основні положення теорії кілець та функціонального аналізу, теорії лінійних операторів, рівнянь у кільцях із факторизаційними парами. Встановлено теорему існування та єдності із загальними формулами шуканих рішень. Наведено ілюстративний приклад. Використовуваний апарат вільний від теорії інтегралів типу Коші та Фур'є, вимоги гельдеровості функцій, поняття індексу.

Ключові слова: задача Рімана, рівняння, кільце, проектор, факторизаційна пара, споріднена задача.

T.G. Voytik

AN EQUATION RELATED TO THE RIEMANN PROBLEM WITH A RATIONAL COEFFICIENT THAT IS INVERTIBLE IN ONE OF THE SUBRINGS OF A FACTORIZATION PAIR

We report the results of a continuation of the study on the solvability of an abstract equation involving two rational functions from subrings. By the equation can be describe the boundary conditions of a problem related to the Riemann (Riemann-Hilbert, Riemann-Hilbert-Privalov) boundary value problem in the theory of analytic functions. We consider the case when the coefficient is a rational function belonging to one of the subrings of a factorization pair of the ring and is invertible in this subring. The equation is solved in the entire complex plane, and the boundary condition is obtained by restricting it to the closed real axis. We employ an approach that is distinguished by its algebraicity and simplifies the proof. This approach combines fundamental principles of ring theory and functional analysis, the theory of linear operators, and equations in rings with factorization pairs. A theorem on existence and uniqueness is established, along with general formulas for the desired solutions. An illustrative example is provided. The method used avoids the theory of Cauchy and Fourier-type integrals, the requirement of function Holder's and the concept of index.

Keywords: Riemann problem, equation, ring, projector, factorization pair, related problem.

Постановка проблеми. Відома важливість розвитку теорії рівнянь нових класів, видів рівнянь, у тому числі, що виражають крайові умови із задачі Рімана (Рімана-Гільберта, Рімана-Гільберта-Привалова) для аналітичних функцій. Нагадаємо, що вона виникає або використовується в математиці, механіки, їх додатках. У тому числі, в теорії диференціальних та інтегродиференціальних рівнянь, інтегральних рівнянь типу згортки, при вивченні відповідних диференціальних рівнянь математичної фізики, теорії пружності, задачах про кручення. Зазначені обставини можна виявити у відповідних роботах І.І. Привалова, Ф.Д. Гахова, Ю.І. Черського, М.Г. Крейна, І.М. Рапопорта, Н.І. Мусхелішвілі, С.М. Мхітаряна; Ю.І. Черського, П.В. Керекеші, Д.П. Керекеші; Г.Я. Попова, П.В. Керекеші, В.Є. Круглова та інших. Згадане підтверджує, що актуальними є дослідження загальних положень про розв'язання рівнянь, пов'язаних із задачею Рімана-Гільберта або спорідненими їй. Зокрема, умов розв'язності, загальних формул для побудови рішень, у тому числі, коли коефіцієнт з підколець, кільця раціональних функцій, що розглядається нижче. В статті, у відповідному кільці раціональних функцій, відшукуються рішення для рівнянь:

$$A(z)X^+(z) + Y_-(z) = B(z); z \in C \cup \{\infty\}. \quad (1)$$

Рівняння (1) при $z = x \in \{-\infty, \infty\}$ може виражати крайові умови наступної, званої спорідненої, задачі. Спорідненою, - по відношенню до задачі Рімана-Гільберта. Формулювання її таке.

Задача. "Для заданих раціональних функцій – коефіцієнтів $A(x), B(x)$, $-\infty < x < \infty$ знайти пару раціональних функцій $X^+(z) \in \mathfrak{R}_r^+, Y_-(z) \in \mathfrak{R}_{r-}, z \in C$, всі полюси першої з яких, при існуванні, розташовані тільки в середині нижньої, а другої – тільки в середині верхньої з напівплощин, обмежених зімкнутою дійсною віссю, відповідно, та які задовольняють на цій осі лінійному рівнянню:

$$A(x)X^+(x) + Y_-(x) = B(x); x \in \{-\infty; \infty\}." \quad (2)$$

© Т. Г. Войтік

Тут контуром виступає зімкнута дійсна вісь [1, 3-5].

Аналіз досліджень та публікацій. Розвиток точних методів вивчення задачі Рімана - Гільберта походить, зокрема, до досліджень І.І. Привалова, Ф.Д. Гахова, Ю.І. Черського, М.Г. Крейна та інших. На зв'язок теорії інтегральних рівнянь на напівпрямій з ядром, що залежить від різниці аргументів і цим завданням, вперше звернув увагу І.М. Рапопорт (1948). З огляду на зазначеного в [1, с. 114] з посиланням на книгу Н.І. Мусхелішвілі (1945), можна зробити висновок, що, зазвичай, це завдання вирішували у припущенні виконання для відповідних функцій додаткової умови Гельдера на контурі. Часто використовувався апарат теорії інтеграла типу Коші, поняття індексу. Такі підходи можуть спричинити необхідність подолання значних аналітичних труднощів. Не завжди виправданих. Нові ідеї та можливі шляхи дослідження, в інших припущеннях, без вимоги виконання умови Гельдера функцій, з'явилися в [1]. Серед робіт, пов'язаних із задачею Рімана-Гільберта, інтегральними рівняннями типу згортки, але присвячених абстрактним рівнянням в асоціативних кільцях зі спеціальною парою підкілець, а також реалізаціям їх у конкретних кільцях, вкажемо [2-5]. Відповідні публікації підтверджують збереження актуальності використання положень про задачу Рімана та близьких проблем. Поряд з іншими, важливий випадок, коли у такого типу задачі Рімана-Гільберта-Привалова коефіцієнти є раціональними функціями. Відомо, зокрема, що такий випадок виникає у зв'язку з дослідженням диференціальних рівнянь з кусково-постійними коефіцієнтами на осі. У ситуації, що розглядається нижче, від задачі Рімана-Гільберта-Привалова можна перейти до спорідненої Задачі. Вважаючи при цьому коефіцієнти і шукані функції, які належать відповідним підмножинам раціональних. Споріднена задача і відповідне рівняння, що розглядається нижче, – її крайова – умова, виникли в роботах Г.С. Полетаєва, зокрема, із співавторами Т.Г. Войтік та С.А. Яценка. Вільних від використання апарату інтегралів типу Коші, досить простих і вичерпних, суворо викладених методів дослідження такої Задачі, до їх публікацій, не було відомо. До теперішнього часу не вичерпана необхідність, врахування специфіки випадків, коли коефіцієнт спорідненої задачі і рівняння, що розглядається, разом з його зворотним належать одному з підкілець, що утворюють факторизаційну пару кільця, в якому йде вивчення. Тому актуальними є **пошуки** рішень рівнянь (1) у такій ситуації.

Постановкою задачі та метою статті є встановлення виду загальних формул рішень абстрактних рівнянь (1) у випадках, коли коефіцієнт $A(z)$ разом із його зворотним є функціями підкілля $\mathcal{R}_r^+$ розглянутого кільця раціональних, всі полюси яких, при існуванні, кінцеві і недійсні [1]. Мета досягається використанням відповідних положень та підходів, теорем, формул рішень, встановлених, наприклад, в [1-5].

Виклад основного матеріалу дослідження

1. Будем використовувати позначення та положення з [2-5].

1.1. Через R позначимо довільне комутативне асоціативне кільце з одиницею e . Нехай p^+, p^- - комутуючі проектори, тобто адитивні та ідемпотентні відображення $R \rightarrow R$ [2]. Нехай: $p^0 := p^+ p^- (= p^- p^+)$, $p_{\mp} := p^{\mp} - p^0$, $p_* := p_+ - p_-$. Для будь-якої підмножини $B \subseteq R$ позначимо $B^{\mp,0} := p^{\mp,0} B$; $B_{\mp} := p_{\mp} B$; $B^* = B^+ + B^-$; $B_* = B_+ + B_-$. Для будь-якого елемента $x \in R$ вважаємо $x^{\mp,0} := p^{\mp,0} x$; $x_{\mp} := p_{\mp} x$, $x_* := p_* x$.

Визначення 1. Пару підколень (R^+, R^-) комутативного кільця R з одиницею e називатимемо його факторизаційною парою (ФП), якщо вона породжена діючими в R комутуючими проекторами $p^+, p^- : R^{\mp} = p^{\mp}(R)$, і виконуються такі аксіоми (пор. [2]):

$$e \in R^0 (= R^{\mp} \cap R^{\pm}); \quad (*)$$

$$p^0 (= p^{\mp} p^{\pm}) - \text{кільцевий гомоморфізм } R^+ \text{ і } R^- \text{ в } R^0 \quad (**)$$

$$R^+ R^- \subseteq R^+ + R^- \quad (:= R^*). \quad (***)$$

Визначення 2. Будь-яке кільце R з одиницею e , що розглядається разом з фіксованою ФП підкілля $(R^+, R^-) [\equiv (R^-, R^+)]$, тобто, підкілля, що мають аксіоматично задані властивості (*), (**), (***), називатимемо «кільцем з факторизаційною парою». Коротко, кільцем із ФП.

1.2. Будемо говорити, що елемент $a \in R$ допускає у комутативному кільці R факторизацію по факторизаційній парі (R^+, R^-) (- по ФП (R^+, R^-)), якщо існують елементи $r^+ \in R^+$, $s^0 \in R^0$, $t^- \in R^-$ такі, що: $a = r^+ s^0 t^-$. Ця факторизація називається: правильною факторизацією (п.ф.),

© Т. Г. Войтік

якщо $r^+ \in R^+, s^0 \in R^0$ – оборотні у своїх підкільцях; - нормованою факторизацією (н.ф.), якщо $t^0 = r^0 = e$; - нормованою правильною факторизацією (н.п.ф.), якщо вона є (п.ф.) та $t^0 = r^0 = e$. Правильну факторизацію елемента кільця R з ФП (R^+, R^-) можна нормувати [2].

Нормована правильна факторизація є єдина.

2. Кільце $\mathfrak{R}_r$

2.1. Позначимо через $\mathfrak{R}_r$ сукупність всіх раціональних функцій, взагалі, комплексного змінного $z \in C$, всі полюси яких, при існуванні, кінцеві та нематеріальні. Границі функцій з $\mathfrak{R}_r$ на нескінченності існують і кінцеві. Нехай $\mathfrak{R}_r^+ (\mathfrak{R}_r^-)$ - сукупності функцій з $\mathfrak{R}_r$, всі полюси яких, при існуванні, розташовані всередині нижньої (верхньої) напівплощини $\Pi_- (\Pi_+)$ відповідно (пор. [1]; с.14,15). Перевіряється, що $\mathfrak{R}_r$ - асоціативне комутативне кільце з мультиплікативною одиницею $e = f(z) := 1, z \in C$ щодо звичайних операцій складання та множення функцій, а $\mathfrak{R}_r^+, \mathfrak{R}_r^-$ - його підкільця з одиницею. Проектори на ці під кільця: $\mathfrak{R}_r \rightarrow \mathfrak{R}_r^\mp$. Позначимо $p^\mp$, відповідно. Ці проектори комутують. Проектор p^+ (Проектор p^-) кожної функції з $\mathfrak{R}_r$ ставить у відповідність частину її, що залишилася після видалення з розкладання цієї функції у суму константи і найпростіших дробів першого і другого типів всіх доданків із полюсами з Π_+ , (з Π_-), відповідно. Вважаємо: $p^0 (= p^+ p^-)$, $p_+ := p^+ - p^0$, $p_- := p^- - p^0$, $p_* := p_+ - p_-$, $\mathfrak{R}_r^{\pm,0} = p^{\pm,0}(\mathfrak{R}_r)$, де $\mathfrak{R}_r^0 = \mathfrak{R}_r^+ \cap \mathfrak{R}_r^-$. Можна показати, що $\mathfrak{R}_r$ - кільце з ФП $(\mathfrak{R}_r^+, \mathfrak{R}_r^-)$. Для будь-якої функції $A(z) \in \mathfrak{R}_r$ справедливе розкладання: $A(z) := A^0 + A_+(z) + A_-(z)$.

Встановимо формули рішень для (1) за відповідних цілей статті припущеннях.

3. Головний результат

3.1. З огляду на результатів Г.С. Полетаєва із співавторами, зокрема з [4, 5], має місце таке твердження.

Теорема 1. Нехай функція $A(z) \in \mathfrak{R}_r$ не має дійсних нулів і $\lim_{z \rightarrow \infty} A(z) = \text{const} \neq 0$.

Якщо, при цьому, $A^{-1}(z)$ допускає нормовану правильну факторизацію: $A^{-1}(z) = \Gamma^+(z)S^0(z)T^-(z)$, $z \in C$ по факторизаційній парі $(\mathfrak{R}_r^+, \mathfrak{R}_r^-)$, тоді абстрактне рівняння (1) та задача, що до $X^+(z) \in \mathfrak{R}_r^+, Y_-(z) \in \mathfrak{R}_r^-$, за будь-якої правої частини $B(z) \in \mathfrak{R}_r$, в $\mathfrak{R}_r$ можна, однозначно, розв'язати. За будь-якої правої частини $B(z) \in \mathfrak{R}_r$, шукане рішення можна знайти за формулами:

$$X^+(z) = \Gamma^+(z)S^0[T^-(z)B^+(z)]^+, Y_-(z) = B_-(z) + (T^-(z))^{-1}[T^-(z)B^+(z)], \quad (3)$$

де

$$S^0 := S^0(z) = \text{const}.$$

3.2. Припустим, що мають місце загальні припущення попередньої теореми, а коефіцієнт $A(z) \in \mathfrak{R}_r^+$ і оборотний у своєму підкільці. Тоді формулювання умов та результату з теореми 1 можливо спростити. Покажемо це безпосередньо в наступному твердженні.

Теорема 2. Нехай коефіцієнт рівняння (1) є функцією $A(z) \in \mathfrak{R}_r$, яка не має дійсних нулів і $\lim_{z \rightarrow \infty} A(z) = \text{const} \neq 0$. Якщо, крім того, $A(z) \in \mathfrak{R}_r^+$ і має в підкільці $\mathfrak{R}_r^+$ зворотний $A^{-1}(z) \in \mathfrak{R}_r^+$ тоді, за будь-якої правої частини $B(z) \in \mathfrak{R}_r$, абстрактне рівняння (1) щодо невідомих функцій $X^+(z) \in \mathfrak{R}_r^+, Y_-(z) \in \mathfrak{R}_r^-$ має в $\mathfrak{R}_r$ одне та тільки одне рішення. Це рішення можна знайти за формулами:

$$X^+(z) = A^{-1}(z)B^+(z), Y_-(z) = B_-(z); z \in C \cup \{\infty\}. \quad (4)$$

Доказ. Нехай виконані припущення теореми 2 та функції $X^+(z) \in \mathfrak{R}_r^+, Y_-(z) \in \mathfrak{R}_r^-$ становлять деяке рішення в $\mathfrak{R}_r$ рівняння (1), за його існування. Тоді має місце рівність (1). Застосовуючи до рівності (1), послідовно, проектори p^+, p_- , з урахуванням їх визначень,

властивостей адитивності та ідемпотентності, властивостей підколець $\mathfrak{R}_r^+, \mathfrak{R}_r^-$, відповідно, отримуємо:

$$A(z)X^+(z) = B^+(z), p_-(Y_-(z)) = p_-(B(z)); z \in C \cup \{\infty\}.$$

З останніх рівностей, при зроблених припущеннях, випливає, що формули (4), необхідно, мають місце. З іншого боку, за загальних умов теореми 2 та будь-якої фіксованої функції $B(z) \in \mathfrak{R}_r$ з рівняння (1), праві частини формул (4) існують та визначають деякі функції $X^+(z) \in \mathfrak{R}_r^+$, $Y_-(z) \in \mathfrak{R}_{r-}$ відповідні цій $B(z) \in \mathfrak{R}_r$. Підстановкою в ліву частину рівняння (1) правих частин уявлень (4), можна переконатися в наступному:

$$A(z)X^+(z) + Y_-(z) = A(z)[A^{-1}(z)B^+(z)] + B_-(z) = [A(z)A^{-1}(z)]B^+(z) + B_-(z) = B^+(z) + B_-(z) = B(z); z \in C \cup \{\infty\}.$$

Отже, формулами (4), у припущеннях, що розглядаються, дійсно, визначається рішення в $\mathfrak{R}_r$ рівняння (1) з обраною правою частиною $B(z)$.

Встановимо єдиність рішення, вирушаючи від протилежного. Нехай за умов теореми та фіксованої правої частини $B(z) \in \mathfrak{R}_r$ існують два рішення рівняння (1):

$$X_1^+(z) \in \mathfrak{R}_r^+, Y_{1-}(z) \in \mathfrak{R}_{r-} \text{ і } X_2^+(z) \in \mathfrak{R}_r^+, Y_{2-}(z) \in \mathfrak{R}_{r-}.$$

Тоді:

$$A(z)X_1^+(z) + Y_{1-}(z) = B(z); A(z)X_2^+(z) + Y_{2-}(z) = B(z); z \in C \cup \{\infty\}.$$

Віднімаючи відповідні частини останніх рівностей та спрощуючи результати, отримаємо:

$$A(z)(X_1^+(z) - X_2^+(z)) = Y_{2-}(z) - Y_{1-}(z); z \in C \cup \{\infty\}.$$

У зв'язку з припущеннями і властивостями операцій у кільцях, що розглядаються, ліва частина останньої рівності належить підкільцю $\mathfrak{R}_r^+$, а права підкільцю $\mathfrak{R}_{r-}$. Тому обидві вони дорівнюють нулю:

$$A(z)(X_1^+(z) - X_2^+(z)) = 0, Y_{2-}(z) - Y_{1-}(z) = 0; z \in C \cup \{\infty\}.$$

Отже,

$$X_1^+(z) - X_2^+(z) = (A^{-1}(z)) \cdot 0 = 0, X_1^+(z) = X_2^+(z), Y_{1-}(z) = Y_{2-}(z); z \in C \cup \{\infty\}.$$

Єдиність рішення, та з нею і теорема повністю, доведено.

Зазначимо, що теорему 2 можна встановити також, спираючись на теорему 1.

3.3. Наслідок. Якщо, за умов теореми 2, $B(z) = 1$, тоді відповідне рішення рівняння (1) $\mathfrak{R}_r$ можна знайти за формулами:

$$X_e^+(z) = A^{-1}(z), Y_{e-}(z) = 0; z \in C \cup \{\infty\}. \quad (5)$$

3.4. Ілюстративний приклад. *Приклад.* Нехай для рівняння виду (1) потрібно знайти рішення $\mathfrak{R}_r$ при:

$$A(z) = \frac{5z^2 + 15iz - 10}{3z^2 + 24iz - 45}; \quad B(z) = \frac{11z + 11i}{z^2 + 22iz - 120} + \frac{1}{2(z - 5i)}.$$

Тоді

$$A^0 = \frac{5}{3}; A(z) = \frac{5(z+i)(z+2i)}{3(z+3i)(z+5i)}; A^{-1}(z) = \frac{3z^2 + 24iz - 45}{5z^2 + 15iz - 10} = \frac{3(z+3i)(z+5i)}{5(z+i)(z+2i)};$$

$$B(z) = \frac{11(z+i)}{(z+10i)(z+12i)} + \frac{1}{2(z-5i)}; B(z) = B^+(z) + B_-(z),$$

$$B^+(z) = B_+(z) = \frac{11(z+i)}{(z+10i)(z+12i)}, B^-(z) = B_-(z) = \frac{1}{2(z-5i)}.$$

З наведених виразів ясно, що у цьому прикладі $A(z), A^{-1}(z) \in \mathfrak{R}_r^+$. Отже, через теорему 2, можна використовувати формули (4). За цими формулами обчислюємо шукане рішення в $\mathfrak{R}_r^+$ рівняння (1) із заданими $A(z)$ та правою частиною $B(z)$ у формі:

$$X^+(z) = \frac{3(z+3i)(z+5i)}{5(z+i)(z+2i)} \cdot \frac{11(z+i)}{(z+10i)(z+12i)} = \frac{33(z^2 + 8iz - 15)}{5(z^3 + 24iz^2 - 164z - 240i)}, Y_-(z) = \frac{1}{2(z-5i)}.$$

Таким чином, знайдено шукане єдине рішення:

$$X^+(z) = \frac{33}{5} \cdot \frac{z^2 + 8iz - 15}{z^3 + 24iz^2 - 164z - 240i}, Y_-(z) = \frac{1}{2(z-5i)}; z \in C \cup \{\infty\}.$$

Висновки. За умов теореми 2, вивчено рівняння (1), а отже і Задача з коефіцієнтом та його зворотним, одночасно, з підкільця $\mathfrak{R}_r^+$. Вказано ознаку існування та єдиності рішення рівняння (1) в $\mathfrak{R}_r^+$. Встановлено загальні формули рішень у $\mathfrak{R}_r^+$ цього рівняння. Вони простіші і зручніші за отримані раніше [4]. Остання обставина є наслідком обліку специфіки. Отримані результати можуть використовуватися при вирішенні конкретних рівнянь виду (1). Можуть служити схемою дослідження рівнянь, а також відповідних їм подібних задач, що моделюються аналогічно. У перспективі залишаються ситуації, коли коефіцієнт $A(z)$ та його зворотний з другого підкільця факторизаційної пари кільця раціональних функцій, що розглядається, а також з різних підкільць; - коли факторизація для $A^{-1}(z)$ відрізняється від правильної. Цікавими є і розширення класів рівнянь, прикладні аспекти.

Список використаних джерел

1. Krejn M.G. Integral equations on a half-line with kernels dependent on the difference of the arguments. Uspechi Math. Nauk 13 (1958), no. 5(83), 3-120; Transl. Amer. Math. Soc. Ser. 2, 22(1962), 163-288.
2. McNabb A., Schumitzky A. Factorization of Operators I: Algebraic Theory and Examples. J. Functional Analysis. 1972. Vol. 9. № 3. P. 262-295.
3. Poletaev G.S. The abstract analogue paired equations of convolution type in a ring with factorization pair. Ukraine Math. J. 43 (1991), no. 9, 1201-1213.
4. Voytik T.G., Poletaev G.S., Yatsenko S.A. Projector approach to the general linear equation with variables from the subring of the rational functions and a factorable coefficient. J. of Physics: Conf. Series. 2017. Vol. 918 (2017) 012032 doi:10.1088/1742-6596/918/1/012032 Scopus. - P. 1-5.
5. Полетаев Г.С. Про метод розв'язування абстрактних рівнянь з двома невідомими. Механіка та математичні методи. Одеса: ОДАБА, 2020. II №1.С. 81- 88.

З.С. Сірко¹, В.М. Грицун¹, М.М. Толстушко², Н.О. Толстушко², А.В. Хомич³

Український державний науково-дослідний інститут "Ресурс"¹

Луцький національний технічний університет²

Любешівський технічний фаховий коледж Луцького національного технічного університету³

СПОСІБ ОТРИМАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З ДЕРЕВ ТА СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

У статті висвітлені питання, пов'язані з отриманням електроенергії із дерев та сонячного випромінювання. Акцентовується увага на тому, що дана тематика ще мало вивчена, але має великі перспективи, оскільки є альтернативним джерелом відновлювальної енергії. Показано, що на даному етапі дуже важливого значення набуває енергоефективність підприємств. Зазначено, що підвищення енергоефективності підприємств доцільно проводити за рахунок впровадження альтернативних джерел відновлювальної енергії, одним із яких є спосіб отримання електроенергії із дерев та сонячного випромінювання.

Ключові слова: дерево, сонячне випромінювання, електроенергія, пристрій отримання електроенергії.

Z. Sirko, V. Hrytsun, M. Tolstushko, N. Tolstushko, A. Khomych

A WAY TO GENERATE ELECTRICITY FROM TREES AND SOLAR RADIATION

The article highlights issues related to generating electricity from trees and solar radiation. It is emphasized that this topic is still poorly understood, but has great prospects as an alternative source of renewable energy. It is shown that at this stage, the energy efficiency of enterprises is of great importance. Rising prices for fuel and energy resources determine the ways to save them or replace them with other alternative sources. In order to select and implement energy efficiency measures at an enterprise, it is necessary to thoroughly study the actual state of use of fuel and energy resources and determine the potential for energy saving measures based on the main technological facilities available at the enterprise. It is noted that it is advisable to improve the energy efficiency of enterprises by introducing alternative sources of renewable energy, one of which is a method of generating electricity from trees and solar radiation.

Keywords: tree, solar radiation, electricity, device for generating electricity.

Постановка проблеми. На теперішній час дуже важливого значення набуває енергоефективність підприємств. Зростаючі ціни на паливно-енергетичні ресурси зумовлюють шляхи їх економії або заміщення на інші альтернативні джерела. З метою вибору та впровадження енергоефективних заходів на підприємстві необхідно досконало вивчити фактичний стан використання паливно-енергетичних ресурсів та визначити потенціал з енергозберігаючих заходів, виходячи із основних технологічних об'єктів, що мають місце на підприємстві. Стратегія підвищення енергоефективності полягає в структурно-технологічній перебудові підприємства [1]. Ця стратегія передбачає виведення морально-застарілого та фізично зношеного устаткування, відмову від випуску продукції, яка має низьку енергоефективність, впровадження на підприємстві новітнього устаткування, технологій та приладів, які спроможні позитивно вирішити підвищення енергоефективності та енергонезалежності підприємства. Підвищити рівень енергоефективності підприємства можна також за рахунок впровадження правових, економічних та технологічних заходів, які зможуть поетапно покращити роботу систем споживання паливно-енергетичних ресурсів, зменшити обсяг їх споживання без зниження корисного ефекту від їх використання [2, 3]. Підвищення енергоефективності підприємств доцільно проводити за рахунок впровадження альтернативних джерел відновлювальної енергії [1-4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До перспективних відновлювальних альтернативних джерел енергії можна віднести біоенергетику, сонячну енергетику, вітроенергетику та енергію доквілля. Одним із цікавих і мало вивчених є спосіб отримання електроенергії з дерев та сонячного випромінювання. У цьому напрямку проводили дослідження багато вчених, але окремі питання залишились поза їх увагою [1-4].

Постановка завдань. Мета дослідження – вивчити можливість підвищення ефективності отримання електроенергії з дерев та сонячного випромінювання.

Викладення основного матеріалу. Для досліджень було обрано дерево сосни віком приблизно 50-70 років. У якості електродів використовували шурупи довжиною 70 мм, діаметром 5 мм, анодовані залізом і міддю. Безумовно, досягнути кращих результатів можна з використанням електродів із суцільного заліза і міді. Величину струму та напруги вимірювали за допомогою мультиметра цифрового марки Kaisi K-890 з функцією Auto Off з діапазоном вимірювання струму від 0 до 10 А і напруги від 0 до 1000 В.

В процесі досліджень була поставлена задача здійснити відбір енергії з дерева на час сонячного випромінювання для можливості відновлювання нормального функціонування біологічних процесів у дереві, виключення провідників біля дерева та залежності величини струму під час отримання електроенергії з дерева від вологості землі.

З цією метою розроблений пристрій (рис. 1) для отримання електричної енергії з дерев та сонячного випромінювання [4].

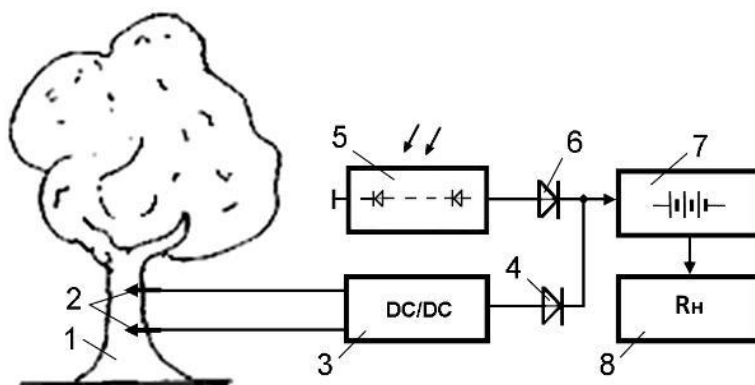


Рис. 1. Пристрій отримання електроенергії з дерев та сонячного випромінювання

Для роботи пристрою використовують стовбур дерева 1, два електроди 2 з різномірних металів, наприклад з міді й заліза, підвищувальний перетворювач напруги 3, діоди 4 та 6, сонячну батарею 5, накопичувач енергії (акумулятор) 7, електричне навантаження (світлодіод) 8.

Для отримання електроенергії електроди 2 електрично з'єднують з підвищувальним перетворювачем напруги 3. Виходи перетворювача 3 та сонячної батареї 5 відповідно через діоди 4 і 6 послідовно з'єднують з накопичувачем енергії 7 та електричним навантаженням 8. За відсутності освітлення, наприклад вночі, напруга від сонячної батареї 5 буде відсутня, діод 6 буде закритий, а діод 4 – відкритий і на навантаження 8 через накопичувач енергії 7, діод 4, перетворювач 3 буде надходити напруга від дерева 1 з електродів 2.

Під час появи сонячного випромінювання на виході сонячної батареї 5 з'явиться напруга і коли вона перевищить напругу на виході перетворювача 3 напруга на катоді діода 6 закриє діод 4 і на накопичувач енергії 7 буде надходити напруга тільки від сонячної батареї 5. В цей час відбір електроенергії з дерева буде припинено і в ньому будуть відбуватися процеси відновлення нормального функціонування біологічних процесів, а навантаження 8 буде живитись від накопичувача 7, який в цей час буде заряджатися через діод 6 від сонячної батареї 5.

В подальшому в процесі досліджень була поставлена задача вивчити, як величина напруги та струму буде залежати від відстані між електродом. З цієї метою в стовбур дерева занурили п'ять електродів, один із яких залізний, а інші – мідні (рис. 2).

Відстань між електродом встановили 150 мм. Величину напруги та струму вимірювали між електродом 1 і 2, 1 і 3, 1 і 4, 1 і 5. Дані вимірювань наведені в таблиці 1.

Табл. 1

Величина напруги та струму в залежності від відстані між електродом

№ п/п	Відстань між електродом	Величина напруги, В	Величина струму, мА
1	150 мм, електроди 1-2	0,8	0,50
2	300 мм, електроди 1-3	0,8	0,55
3	400 мм, електроди 1-4	0,8	0,58
4	500 мм, електроди 1-4	0,8	0,62

Величина струму залежить від відстані між електродом, а напруга при цьому залишається практично не змінною.

Також провели замірювання величини напруги та струму в залежності від площі (діаметра) електродів. Встановлено, що із збільшенням площі контакту електроду з деревом величина струму збільшується, при цьому величина напруги практично не змінюється.

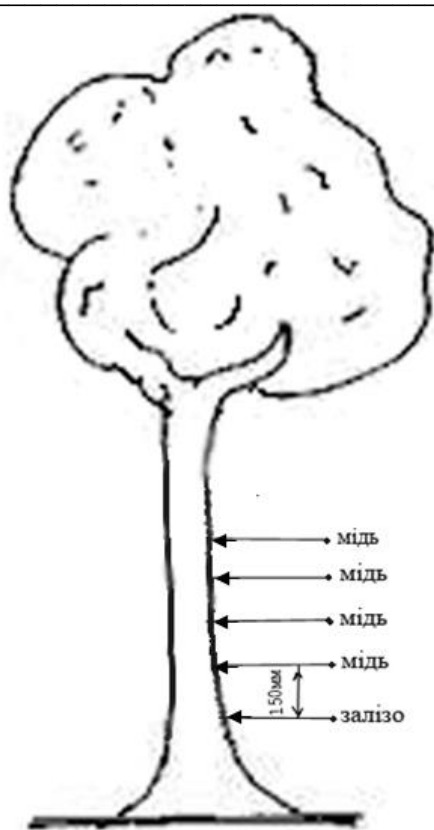


Рис. 2. Розміщення електродів на стовбурі дерева

Висновки.

1. Вивчена та доведена можливість підвищення ефективності отримання електричної енергії із дерев та сонячного випромінювання.
2. Розроблений пристрій для отримання електричної енергії з дерев та сонячного випромінювання.
3. Розроблений пристрій передбачає зменшення навантаження на дерево при отриманні з нього електричної енергії, виключення проводу біля дерева та залежності струму з дерева від вологості землі, збільшення, за рахунок застосування сонячної батареї, електричної енергії для живлення електричного навантаження.
4. Величина струму залежить від відстані між електродами і площі (діаметра) електродів, а напруга при цьому залишається практично не змінною.

Список використаних джерел

1. Коренда В.А., Чернявський А.В., Протасов О.С., Вишняков І.Ю., Заїка Ю.І., Колядюк М.Ж. та інші. Підвищення енергоефективності на підприємствах системи Державного агентства резерву України: Монографія. Київ: ОЛДІ-ПЛЮС, 2020. 278 с.
2. Про енергозбереження: Закон України від 01.07.1994 р. № 74/94-ВР. Дата оновлення: 20.09.2019. URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/74-94> (дата звернення 01.11.2023).
3. Національний план дій з відновлювальної енергетики на період до 2020 року. Розпорядження Кабінету міністрів України від 01.10.2014 р. № 902-р. URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/902-2014> (дата звернення 01.11.2023).
4. Головач В.М., Сірко З.С., винахідники. Пристрій отримання електроенергії з дерева та сонячного випромінювання. Український патент № 132071, 2019.

Рецензент Дідух Володимир Федорович, доктор технічних наук, професор кафедри аграрної інженерії імені професора Г.А. Хайліса Луцького національного технічного університету, Заслужений діяч науки і техніки України.

З.С. Сірко¹, В.К. Д'яконов¹, Є.А. Стариш¹, М.М. Толстушко², Н.О. Толстушко²

¹Український державний науково-дослідний інститут "Ресурс"

²Луцький національний технічний університет

ФОРМУВАННЯ РЕЙТИНГУ ПИЛ ЗА ЯКІСТЮ ТА ТОЧНІСТЮ ВИГОТОВЛЕННЯ НА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

У статті висвітлені питання, що стосуються властивостей дискових пил, зокрема точності їх виготовлення та подальшого заточування. Дереворізальний інструмент повинен забезпечувати високу продуктивність праці та якість продукції, які залежать від його тривкості та стійкості до зношення. Властивості дискових пил відомих зарубіжних виробників оцінювали на відповідність їх нормативно-технічній документації. У новій дисковій пилі пластини твердого сплаву повинні мати однаковий звис вліво і вправо від диска. Якщо це правило порушене за різних причин, то під час пиляння знижується точність та якість пропилю, спостерігається наявність сколів та інших дефектів, що у кінцевому результаті негативно впливає на властивість інструменту.

Ключові слова: дискова пила, твердий сплав, точність виготовлення, технічні та економічні показники, інтегральний показник.

Z. Sirko, V. Diakonov, Y. Starysh, M. Tolstushko, N. Tolstushko

RATING OF SAWS BY QUALITY AND MANUFACTURING ACCURACY BASED ON STATISTICAL CHARACTERISTICS

The article highlights the issues related to the properties of circular saws, in particular the accuracy of their manufacture and subsequent sharpening. Wood-cutting tools must ensure high labor productivity and product quality, which depend on their durability and resistance to wear. The properties of circular saws from well-known foreign manufacturers were evaluated for compliance with their regulatory and technical documentation, the accuracy of manufacturing and sharpening of flat and trapezoidal teeth, composite technical and economic indices, and ultimately an integral indicator that combines all of the above technical and economic indicators. In a new circular saw, the carbide blades must have the same overhang to the left and right of the blade. If this rule is violated for various reasons, the accuracy and quality of the cut decreases during sawing, chips and other defects are observed, which ultimately negatively affects the tool's properties.

Keywords: circular saw, hard alloy, manufacturing accuracy, technical and economic indicators, integral indicator.

Постановка проблеми. Дереворізальний інструмент повинен забезпечувати високу продуктивність праці та якість продукції, які залежать від його протизношувальної тривкості та стійкості [1]. Для розпилювання деревинних матеріалів (деревинностружкових плит, деревинноволокнистих плит, шарованої клеєної деревини, личкованих плит і щитів, а також деревини, що важко обробляється) використовують дискові пили з пластинками твердого сплаву. Для оброблення названих матеріалів у якості пластинок твердого сплаву використовують вольфрамо-кобальтові сплави марок ВК-6, ВК-8 і ВК-15 (цифра за літерою К означає відсотковий вміст кобальту) [2]. Окрім вітчизняного твердого сплаву в Україні масово застосовують дискові пили з пластинками твердого сплаву різних зарубіжних виробників. Шведська фірма SANDVIK використовує пластинки твердого сплаву марок H11C, H11N, H9N, H6N, H5M, H4M, H3F. Італійська фірма FREUD випускає тверді сплави марок H10S, H20S, H30S, HOOS, HOOK, HOOX. Німецька фірма LEUCO виготовляє тверді сплави марок HW₃F₁, W₁S₁, H₂W. Твердий сплав марки ВК-6 є дрібнодисперсним і не викришується за малих кутів загострення [3, 4]. У новій дисковій пилі пластинки твердого сплаву повинні мати однаковий звис вліво і вправо (піднутрення) від диска. Це забезпечується застосуванням сучасного устаткування під час виготовлення пил та загострення зубчастого вінця. У процесі експлуатації така вимога порушується внаслідок високої подачі матеріалу на зуб пили, значного навантаження на пилу під час різання, що спричиняє втрату стійкості пили в пропилі та можливої її деформації, а також значного затуплення пили.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дуже важливим моментом є застосування пили з дотриманням високого ступеня базування. Всі наведені вище відхилення спричиняють неточність під час заточування та зміну звисів пластинок твердого сплаву від диска, а це в свою чергу приводить до різної участі пластинок в процесі різання, їх різного ступеня затуплення, стійкості пили в пропилі. Все це під час пиляння личкованих та ламінованих плитних матеріалів приводить до зниження якості пропилю, наявності сколів та інших дефектів. За подібною тематикою працювали багато вчених, але ряд питань залишились достатньо не розкритими [1-4].

Постановка завдань. Мета дослідження – дослідити порівняльні властивості дискових пил інтегральним показником.

Викладення основного матеріалу. В роботі проводили статистичне оброблення результатів вимірювань (визначали середнє квадратичне відхилення). Ширину зубів пил вимірювали за допомогою мікрометра марки МК-25 з точністю вимірювання 0,01 мм.

На ринку дереворізальних інструментів для оброблення деревини та деревинних матеріалів існує велика кількість пропозицій щодо дискових пил. Складність для споживача полягає у тому, що всі дискові пили візуально однакові без будь-яких відмінностей. Після придбання та експлуатації споживач реально відчуває всі переваги та недоліки моделі пилки. Тому для споживача важливо визначитись з якістю інструменту ще до його придбання. З цією метою для досліджень були відібрані п'ять дискових пилок відомих зарубіжних виробників із зубами, які оснащені пластинками твердого сплаву для роботи на форматно-розкрійних верстатах. На пилах були проведені заміри технічних параметрів, які відображені у табл. 1.

Табл. 1

Техніко-економічні показники пил									
Пилки	Критерії технічні					Критерії економічні			
	Відповідність технічній документації	Форма зубів плоский/трапеція	СКВ плоский	СКВ трапеція	Зведений індекс технічний	Вартість пилки, грн	Вартість перезачування	Зведений індекс	Інтегральний показник
Базовий	1	1	0,005	0,005	1,00	1500	200	1,00	1
E1	0,970	1,01	0,01	0,00	1,066	2000	250	1,31	0,815
R	0,997	1,00	0,01	0,01	0,899	3920	250	2,20	0,408
K	1,014	1,01	0,00	0,01	1,15	3800	250	2,15	0,535
Q	1,006	1,01	0,01	0,00	1,031	3000	180	1,67	0,617
E2	1,006	1,01	0,01	0,00	1,031	1700	180	1,06	0,970
Значимість критерію	0,4	0,3	0,2	0,2	1,0	0,7	0,3	1,0	

Відповідність технічній документації, зокрема параметру ширини зуба, визначали відношенням фактичного середнього значення цього параметру до нормативного, зазначеного у каталозі на інструмент. Вибрані пилки складаються із двох перемінних форм зубів, які розміщені на диску послідовно: трапецієвидних і плоских. Враховуючи те, що дані зуби шліфують із різних налаштувальних установок, то точність ширини зубів може відрізнятися від номінальних значень. Також у таблиці наведені середні квадратичні відхилення ширини зубів (СКВ). Значимість критерію технічного і економічного означає важливість того чи іншого показника для споживача. Якщо споживач вважає, що критерій «відповідність технічній документації» для нього має пріоритетне значення, то значимість критерію він повинен встановити з найбільшим значенням, а сума значимості всіх критеріїв повинна бути рівною одиниці.

Зведений технічний індекс визначається як сума відношень альтернативного варіанту інструменту до базового із врахуванням значимості критеріїв. У якості базового варіанту можна прийняти віртуальну (ідеальну) пилу з найбільш високими технічними характеристиками. Економічні критерії не визивають питань і у цій статті не розглядаються. Інтегральний показник розраховують як відношення зведених індексів технічних до економічних. Чим більше значення інтегрального показника, тим більшу перевагу буде мати альтернативна пила. Рейтинг альтернативних варіантів пил наведений у таблиці 2.

На рис. 1 умовно показано розподілення (рейтинг) пил в залежності від величини пріоритету.

Табл. 2

Рейтинг альтернативних варіантів пил

Позиція	Альтернативи	Інтегральний показник	Коментар
1	Базовий	1,000	Відповідає базовому
2	E2	0,970	Поступається базовому
3	E1	0,815	Поступається базовому
4	Q	0,617	Поступається базовому
5	K	0,535	Поступається базовому
6	R	0,408	Поступається базовому

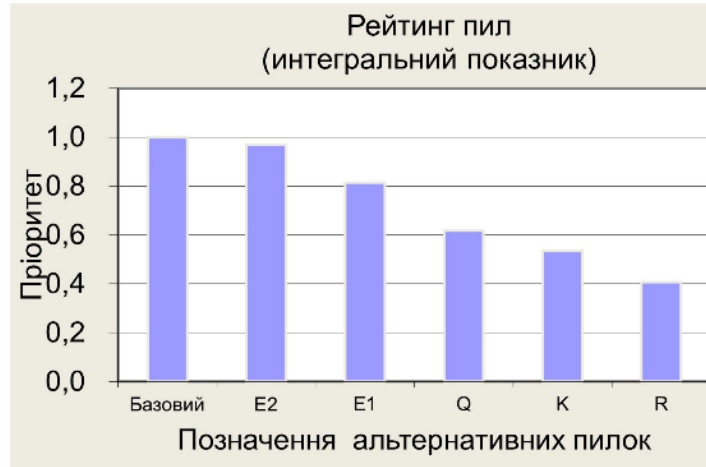


Рис. 1. Розподілення (рейтинг) пил в залежності від пріоритету

Із рисунка видно, що пріоритет кращої пили E2 майже у два рази перевершує пріоритет пили R. Це говорить про те, що якість пил може відрізнятися істотно.

На рис. 2 показана просторова діаграма розподілення інтегрального показника пил в площині «економічний індекс – технічний індекс».

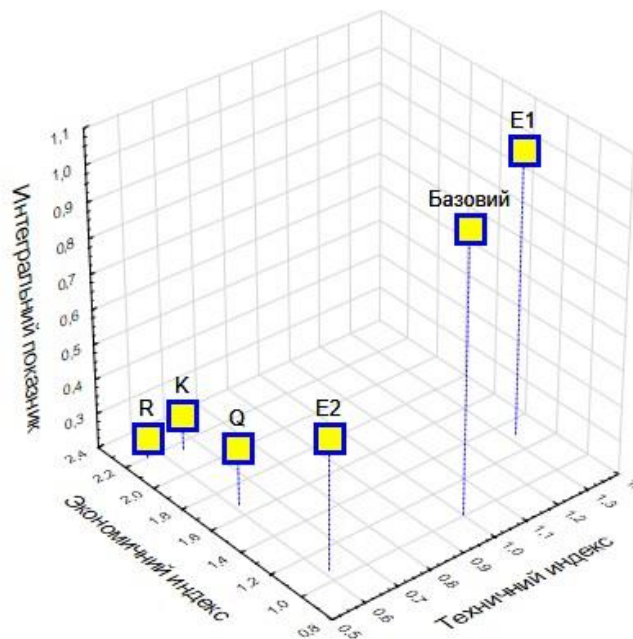


Рис. 2. Просторова діаграма розподілення інтегрального показника пил

Із просторової діаграми можна зробити висновок, яку долю в інтегральному показнику представляє економічний і технічний індекс по відношенню до осей координат.

© З.С. Сірко, В.К. Д'яконов, Є.А. Стариш, М.М. Толстушко, Н.О. Толстушко

Висновки.

1. На ринку дереворізальних інструментів для оброблення деревини та деревинних матеріалів існує велика кількість пропозицій щодо дискових пил, але споживачу візуально важко оцінити якість інструменту.
2. Оцінити якість дискових пил можна інтегральним показником, який поєднує у собі технічні та економічні показники інструменту.
3. В дослідженнях встановлено, що із відібраних п'яти пил відомих зарубіжних виробників якість інструменту може істотно відрізнятись.

Список використаних джерел

1. Кірик М.Д. Інструмент для обробляння деревини та деревних матеріалів. Коломия: ТМЦ Коломийського механіко-технологічного коледжу, 1999. 190 с.
2. Кірик М.Д. Механічне оброблення деревини та деревних матеріалів. Львів: ТзОВ «Кольорове небо», 2006. 412 с.
3. Гургаль В.И., Манжар В.А. Инструмент из сверхтвердых материалов и его применение. Львів: Каменярь, 1984. 233 с.
4. Сірко З.С. Лісопиляльні рами: Монографія. Київ: Центр учбової літератури, 2016. 260 с.

Рецензент **Дідух Володимир Федорович**, доктор технічних наук, професор кафедри аграрної інженерії імені професора Г.А. Хайліса Луцького національного технічного університету, Заслужений діяч науки і техніки України.

С.В. Мисковець, Д.А. Гусачук, В.П. Кашицький, І.О. Парфентьєва

Луцький національний технічний університет

КОРЕКЦІЇ CAD МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ 3D ДРУКУ

В роботі розглянуті питання покращення якості та функціональності виробів, отриманих з використанням технологій FDM друку. На основі досліджень впливу геометричних параметрів цифрових моделей на якість формоутворення деталей запропоновано метод корекції їх конфігурації на стадії їх підготовки.

Ключові слова: адитивне виробництво, 3D друк, CAD модель, 3D сканер, FDM технології, прототип, STL модель, слайсинг

S. Myskovets, D. Husachuk, V. Kashytskyi, I. Parfentyeva

CAD MODEL CORRECTIONS TO OPTIMIZE 3D PRINTING PROCESSES

The paper considers issues of improving the quality and functionality of products obtained using FDM printing technologies. Based on studies of the influence of geometric parameters of digital models on the quality of forming parts, a method of correcting their configuration at the stage of their preparation is proposed.

Key words: additive manufacturing, 3D printing, CAD model, 3D scanner, FDM technologies, prototype, STL model, slicing

Постановка проблеми. Адитивні технології та процеси 3D друку на сьогодні є найбільш актуальними для потреб швидкого прототипування та виготовлення готових виробів у різних галузях промислового виробництва [1]. Потенційні переваги адитивного виробництва включають зменшення матеріальних витрат, прискорення процесу виробництва, можливість децентралізації виробничого процесу та, як наслідок, зниження витрат на логістичні потреби: транспортування, зберігання, реалізацію об'єктів, яких було б важко або неможливо досягти звичайними субтрактивними засобами виробництва.

Ручна робота зі створення та виготовлення прототипів крім збільшення часу на виготовлення продукту, часто обмежує кількість можливих конструктивних змін. Це не дозволяє досягнути достатньої оптимізації продукту, його конструктивної досконалості і, особливо, функціональності. Тут, слід зазначити, що ця стратегія відтворення конструктивних елементів для деталей простої геометрії, активно використовується і зараз, коли за допомогою примітивів у спеціалізованому програмному середовищі будується параметрична 3D модель.

Сучасне адитивне виробництво в його поєднанні з іншими технологіями для формування технологічних ланцюжків може бути використано для значного скорочення термінів розробки та вартості продукції. Останнім часом, деякі з цих технологій були розроблені до такого ступеня досконалості, що результат їх застосування підходить для кінцевого використання. Це пояснює, еволюцію термінології: від «швидкого прототипування» до «адитивного виробництва». Більш того, сучасні 3D технології, що засновані на використанні потужних енергетичних систем, дозволяють зараз виготовляти деталі з різноманітних металів та сплавів, розширюючи їх сферу застосування ще більше.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні технології 3D друку конкурують в багатьох практичних галузях з традиційними методами обробки [1-2]. Успіхи у сучасному матеріалознавстві та виробництві апаратних засобів адитивних виробництв, дозволили ефективно застосовувати технологію 3D друку не лише моделей (прототипів), а і реальних деталей, готових виробів для потреб різних галузей техніки [3].

Процес моделювання наплавлення (FDM) став провідним процесом адитивного виробництва за останні кілька років. Він дає можливість виготовляти фізичні деталі будь-якої геометрії з широким діапазоном інженерних термопластичних матеріалів без необхідності використання спеціальних інструментів. І хоча теперішній стан технології фактично здатний замінити звичайні виробничі процеси, кінцеві властивості виготовлених продуктів, все ж ще недостатньо сильні для різноманітних промислових застосувань. Процес FDM має власні недоліки, пов'язані з точністю деталей, часом обробки та механічними властивостями [4, 5]. Отже, існують певні проблеми щодо якості та функціональності виготовлених деталей. Відомо, що деталь, виготовлена за допомогою процесу FDM, є анізотропною через її залежність від великої кількості суперечливих параметрів процесу [6-8]. Важливо розуміти ключові проблеми та слабкі сторони процесу та вжити заходів для

оптимізації параметрів, що впливають на якість, чіткість геометрії та продуктивність за різних умов виконання.

Постановка завдання та мета дослідження. Метою дослідження було визначення впливу геометрії на якість друку початкових адитивних шарів під час друку пластиковими філаментами (FDM), в умовах нерівномірності робочої платформи, та розробка способу корекції CAD моделей для усунення можливих дефектів друку.

Виклад основного матеріалу. Як відомо адитивне виробництво включає в себе кілька етапів, починаючи з віртуального CAD опису деталі та її функціоналу, отримання цифрових даних процесу, та закінчуючи фізичним результатом її створення. Різноманітні вироби включають в себе процеси адитивного виробництва різними шляхами та в різній мірі. Відносно прості вироби можуть використовувати адитивне виробництво для демонстраційних моделей, в той час як, більш складніші, з великим інженерним наповненням, можуть використовувати адитивне виробництво на багатьох етапах процесу розробки.

Якість FDM виробів та стабільність самого процесу друку методом наплавлення полімерних матеріалів залежать від нанесення початкових шарів матеріалу. Ця обставина особливо актуальна для порівняно недорогого, але найбільш розповсюдженого обладнання, зокрема 3D принтерів без спеціальних апаратних засобів калібрування робочої платформи, стола машини, систем подачі матеріалу. З огляду на це стає важливим ступінь адгезії пластику до столу принтера, адже за умов нерівномірності зазору між соплом екструдера, у випадку перевищення його значення товщини витисненого філаменту, унеможлиблюється контакт з платформою. Слід зазначити, що для деяких матеріалів, в особливості для ABS пластиків, величину зазору свідомо зменшують до критичних значень. Це викликає примусове "втирання" розплавленого пластику в поверхню платформи, для підвищення ступеня адгезії полімеру до матеріалу робочої платформи принтеру.

З метою підвищення ступеня адгезії філаменту до столу FDM принтера часто застосовують спеціальні адгезиви. Їх використання підвищує вартість друку та ускладнює процес, постобробку, вимагає зайвих процедур обслуговування тощо. Тому в роботі пішли шляхом свідомого зменшення товщини першого шару друку, із збереженням типових значень всіх інших параметрів. У цьому випадку перші шари виробу є значно стиснуті по висоті та ступінь їх розтікання в бічні сторони є досить значним. Нажаль, це спотворює геометрію моделей та якість виробів певної категорії, для яких важлива чіткість друку початкових шарів (рис. 1). Таке явище особливо помітне за нерівномірності робочої поверхні столу, що часто зустрічається у більшості доступних за ціною машин для FDM друку.

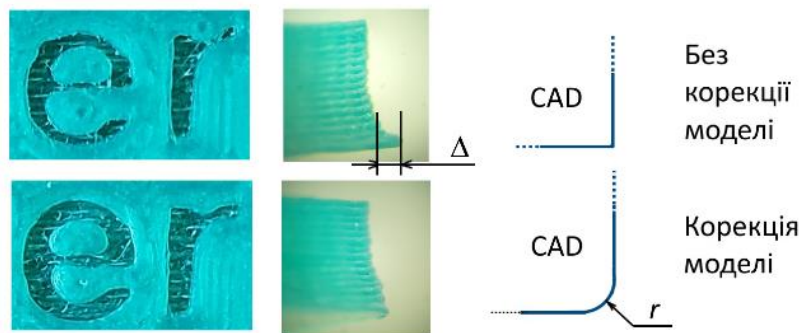


Рис. 1. Результати корекції CAD моделі

Для корекції такого дефекту друку (Δ), зменшення його прояву на виробах, у роботі запропоновано спосіб адаптації початкових CAD моделей. У геометрію опорних поверхонь моделі додавали скруглення чи фаски. Відповідно гострі елементи мали зрізи, призначення яких умовно враховує ступінь розширення першого шару. Слайсинг такої моделі зменшує опорну площу підготовленого до друку виробу, що компенсується під час фізичного нанесення пластику, коли зазор між соплом та столом принтеру критично зменшується. В роботі досліджували залежність між товщиною шару друку, що заданий у слайсері, та радіусом скруглень (табл. 1). Встановлено, що оптимальними значеннями радіусу скруглення є 2...5 шарів друку. Зокрема, для сопла екструдера 0,4 мм, його величину приймали $r=0,5...0,6$ мм.

З отриманих у дослідженнях даних видно, що ступінь прояву дефекту більший для більших значень товщини шару матеріалу, який наноситься на робочу платформу.

Табл. 1.

Значення дефекту друку (Δ) в залежності від параметрів FDM друку

Діаметр сопла екструдера, мм	Товщина перших шарів друку, мм	Прийнятий радіус скруглення (r), мм (корекція CAD моделі)	Величина дефекту друку (Δ), мм		Кількість шарів друку в межах дефекту
			без корекції	з корекцією	
0,2	0,12	0,3	0,5	0,20	5
0,3	0,17	0,4	0,8	0,25	4
0,4	0,20	0,6	1,1	0,30	3
0,5	0,25	0,8	1,4	0,30	3

Таку причину можна пояснити масштабним ефектом: більш масивні шари пластику здатні інтенсивно розтікатись за відсутності просторових обмежень. За зменшення товщини шару матеріал пластику швидше твердне, за однакових умов обдуву кулера робочої головки принтера. Отже, для більшого діаметра сопла застосування запропонованої методики корекції дефекту FDM друку є більш актуальним та важливим для усунення спотворень виробів.

Розглядаючи запропонований спосіб корекції подібного роду дефектів в процесі 3D друку, слід зауважити, що він є досить простим у випадку наявності параметричної CAD моделі. За випадку ж отримання просторових твердотільних полігональних цифрових моделей така корекція може бути ускладненою, особливо для просторово складних фігур. Мова йде про об'єкти, отримані 3D скануванням, з використанням спеціалізованих сканерів. Функціональність моделі з огляду на глобальну корекцію геометрії та конструктивної еволюції виробу, за потреби, є обмеженою, адже модель являє собою полігональне тіло, а не CAD модель з параметричним набором даних. Крім того, отримані полігональні моделі можуть містити надмірно велику множину mesh-даних. Це досить сильно збільшує розмір файлу STL моделі та значно ускладнює подальшу роботу, аж до блокування програмного забезпечення для слайсингу, не говорячи вже про цифрову обробку моделі та її параметризацію, за потреби. Як відомо, більшість програм слайсерів для FDM друку задовільно справляються з файлами твердотільних моделей, розмір яких не перевищує 25 Мб. виправити положення можна безпосередньо у програмах сканування, вибравши функцію спрощення у процесі постобробки моделі. Так можна усунути артефакти на плоских поверхнях моделі, що виникають як наслідок фіксації текстур.

З метою уникнення кропіткого процесу повноцінного реінжинірингу, у роботі використовували редактори твердотільних цифрових STL моделей. Зокрема, використовували програму MeshLab для обробки неструктурованих сіток, що розроблена дослідницьким центром ISTI-CNR [9]. Використовуючи її програмне середовище можна застосовувати програмні методи аналізу та корекції твердотільних моделей (рис. 2).

Отримані у роботі твердотільні моделі обробляли із застосуванням методів так званої mesh-корекції: віднімання, додавання фасет, спрощення поверхні, заповнення розривів, фільтри очищення поверхонь тощо. Для граней з гострими кряями у програмі можна застосувати фільтр, що працює на процесорі з системою лапласівської обробки. Використовуючи вбудований фреймворк, на основі оператора Лапласа, можна визначати диференціальні координати та нові триангуляційні елементи для ефективного представлення геометрії сітки.

Застосовуючи алгоритми згладжування програми MeshLab слід виділяти групу крайових фасет, що утворюють гострий кут, для випадку локального застосування фільтру. Цей процес також може бути досить кропітким для моделей з великою ступенем деталізації, тому доцільним є виділення граней з застосуванням вузлових точок, які є вершинами фасет сітки, що утворюють грань.

Застосування програми MeshLab для твердотільних моделей, отриманих 3D скануванням, дозволяє уникнути складного процесу реконструкції STL сіток, який часто виконується у спеціалізованому дороговартісному програмному забезпеченні. Для розглядуваного в роботі завдання корекція сіток може бути недостатньо точною, оскільки цифрові скани як правило містять шуми, що здатні формувати хибні фасеткові вузли. Цю особливість слід враховувати для конкретних потреб реінжинірингу.

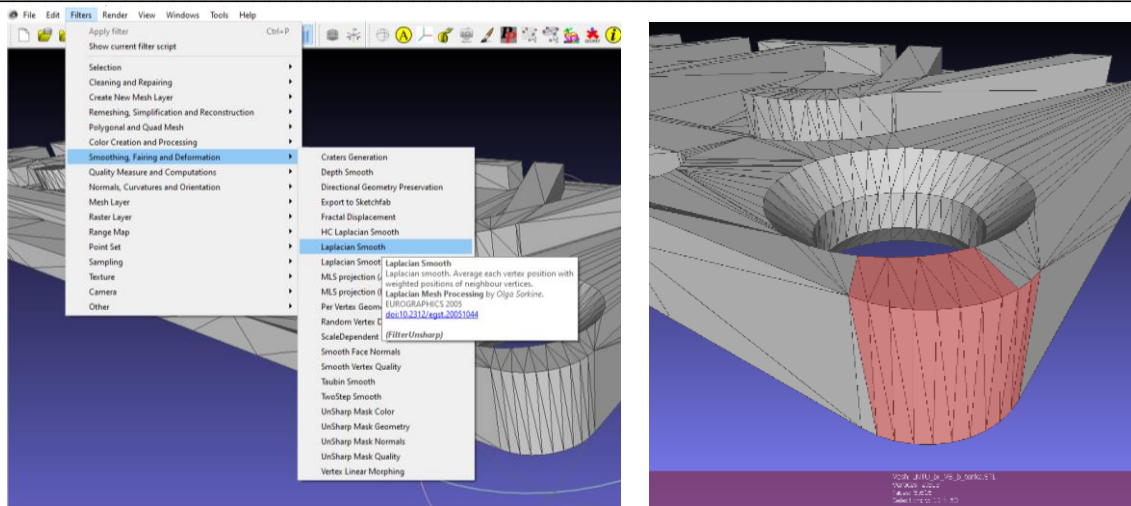


Рис. 2. Корекція STL моделі у програмі MeshLab

Висновок. На основі досліджень впливу геометричних параметрів цифрових моделей на якість формоутворення деталей запропоновано метод корекції їх конфігурації на стадії їх підготовки. Встановлено, що застосування технологічних параметрів під час слайсингу, які сприяють підвищенню адгезії матеріалу FDM друку до робочої поверхні столу принтера, можливі значні спотворення геометрії виробів. Цей негативний ефект може посилюватись за збільшення діаметру сопла екструдера. Величину такого спотворення можна регулювати не лише параметрами друку, а і геометричною корекцією CAD моделей. У випадку застосування ABS пластику встановлено, що для діаметру сопла 0,4 мм доцільно призначати радіус скруглення на краях опорної поверхні моделі до 0,5...0,6 мм. Для твердотільних моделей з тріангуляційним представленням геометрії є доцільним використання спеціальних програм редакторів mesh-об'єктів, зокрема програми MeshLab. Застосування такого програмного забезпечення дозволяє уникнути трудомісткого процесу CAD-реконструкції сканованих цифрових копій зі складною геометрією, що є важливим у експрес-процесах реінжинірингу.

Список використаних джерел

1. Additive Manufacturing Technologies / Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker, Mahyar Khorasani // Springer, Cham, 2021. – p. 675, <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>.
2. Адитивні технології та матеріали: навч. посібник / Д.А. Гусачук, М.Д. Мельничук, В.М. Малець. – Луцьк : ЛНТУ, 2022. – 272 с. ISBN 978-617-8018-36-8.
3. Прототипування та стратегія реверс інжинірингу на прикладі інженерних задач адитивного виробництва / Д.А. Гусачук, М.Д. Мельничук, І.О. Парфентьєва, Т.В. Фурс, І.В. Боярська // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». - 2023 - № 76. - С.75-83. / URL: <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2023.76.82>.
4. F. Yasmin, M. Khan and Q. Peng. "Optimization of Processing Parameters for 3D Printed Product Using Taguchi Method". Computer-Aided Design & Applications, 21(2), 2024, 281-300. <https://doi.org/10.14733/cadaps.2024.281-300>.
5. Zhang, Pengfei, Wang, Zongxing, Li, Junru, Li, Xinlin and Cheng, Lianjun. "From materials to devices using fused deposition modeling: A state-of-art review" Nanotechnology Reviews, vol. 9, no. 1, 2020, pp. 1594-1609. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0101>.
6. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування [Текст] : навч. посіб. / О. Д. Манжілевський, Р. Д. Іскович-Лотоцький ; Вінниц. нац. техн. ун-т. - Вінниця : ВНТУ, 2021. - 104 с.
7. Additive Manufacturing: A Tool for Industrial Revolution 4.0 / Manjaiah, M. Raghavendra, K. Balashanmugam, N. Davim, P.J., Woodhead Publishing Reviews: Mechanical Engineering Series. 2021, p. 324. ISBN: 978-0-12-822057-3.
8. Kumar, M., Ramakrishnan, R. & Omarbekova, A. 3D printed polycarbonate reinforced acrylonitrile–butadiene–styrene composites: Composition effects on mechanical properties, micro-structure and void formation study. J Mech Sci Technol 33, 5219–5226 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12206-019-1011-9>.
9. MeshLab. Url - <https://www.meshlab.net>.

ВІРТУАЛЬНА РЕКОНСТРУКЦІЯ ІСТОРИЧНИХ СПОРУД З ВИКОРИСТАННЯМ 3D КОМП'ЮТЕРНОЇ ГРАФІКИ

Дана робота присвячена розв'язанню науково-практичної проблеми збереження історичної спадщини України. Станом на сьогоднішній день існує багато способів музеєфікації історичних споруд серед, яких зовнішня музеєфікація – це механізм перетворення історичного комплексу в музей під відкритим небом, незалежно від стану збереженості чи наявності музейної експозиції. По суті, пам'ятка виступає як музейний об'єкт та вважається основним, а часто – єдиним експонатом. Віртуальною формою музеєфікації є сучасна інформаційна анімаційна технологія, яка дає змогу створити 3D-моделі історичних будівель, відновити первісний архітектурний вигляд та репрезентувати матеріали про пам'ятку в інтерактивному середовищі, що покращує візуальне сприйняття об'єкту.

Робота є мультидисциплінарною, вона зачіпає історію, мистецтво, архітектуру, будівництво, та найбільш ємнісною її частиною є комп'ютерні, мультимедіа технології та комп'ютерна графіка.

У роботі проаналізовані сучасні види, форми та напрями музеєфікації історичних споруд. Запропоновано комп'ютерну реалізацію 3D зображення Хрестовоздвиженської церкви в м.Луцьку.

Ключові слова: комп'ютерна графіка, CAD-системи, музеєфікація, історичні споруди, віртуальна реконструкція, 3D зображення, CAD модель

I. Burchak

VIRTUAL RECONSTRUCTION OF HISTORICAL BUILDINGS USING 3D COMPUTER GRAPHICS

This work is devoted to solving the scientific and practical problem of preserving the historical heritage of Ukraine. As of today, there are many ways of museification of historical buildings, among which external museification is a mechanism for transforming a historical complex into an open-air museum, regardless of the state of preservation or the presence of a museum exposition. In fact, the monument acts as a museum object and is considered the main, and often the only, exhibit. The virtual form of museification is modern information animation technology, which makes it possible to create 3D models of historical buildings, restore the original architectural appearance and represent materials about the monument in an interactive environment, which improves the visual perception of the object.

The work is multidisciplinary, it affects history, art, architecture, construction, and its most comprehensive part is computer, multimedia technologies and computer graphics.

The paper analyzes modern types, forms and directions of museification of historical buildings. A computer implementation of a 3D image of the Church of the Exaltation of the Holy Cross in Lutsk is proposed.

Key words: computer graphics, CAD-systems, museification, historical buildings, virtual reconstruction, 3D images, CAD model

Постановка проблеми. У наші дні 3D-моделювання все повніше охоплює області, в яких раніше не застосовувалось. На черзі новий простір просування – історична реконструкція архітектурних будівель та споруд.

Серед сучасних світових та вітчизняних тенденцій спостерігається зростання уваги до відновлення об'єктів історико-культурної спадщини. Процеси урбанізації та глобалізації, захоплюючи традиційний культурний простір, загострюють проблему збереження об'єктів історико-культурного надбання та національно-культурної ідентичності. Внаслідок чого видозмінюються архітектурні ансамблі населених пунктів, маєтки, храми та монастирі; іноді об'єкти історико-культурної спадщини повністю або частково зникають в результаті воєн, катаклізмів, стихійних лих або політичних рішень.

Відновлювати зниклі або зруйновані пам'ятки культури у фізичних формах, тобто реставруючи або реконструюючи їх, не завжди вдається через визначені об'єктивні причини. До недавнього часу реконструкція зруйнованих або втрачених історичних об'єктів нерідко проводилася на папері у вигляді малюнків, креслеників або настільних макетів, які з певним ступенем достовірності відображали загальний вигляд досліджуваного зразка. На сьогоднішній день, на заміну консервативним та малоефективним технологіям ручного (фізичного) макетування приходять комп'ютерно-інтегровані, мультимедійні та віртуально спрямовані засоби відтворення об'єктів на екрані монітора. Така форма представлення історичної інформації є більш наочною, точнішою та надійнішою у порівнянні із фізичними макетами або графічними реконструкціями.

Враховуючи світовий досвід у царині збереження культурної спадщини та з огляду на процеси, що відбуваються у вітчизняному суспільстві на теренах державотворення та збереження національної автентичності, на даний час є особливо актуальним вивчення, дослідження, відновлення та збереження пам'яток історико-культурного надбання. Ідея розробки проекту з елементами комп'ютерного моделювання об'єктів та споруд виникла у процесі співпраці істориків та науковців ІТ-технологій.

Використання технологій тривимірного моделювання в історичному дослідженні вимагає чіткої розстановки пріоритетів і завдань дослідження. Вони вимагають від дослідників наявності широкого кругозору в досліджуваній проблематиці. Професійні науково обґрунтовані проекти побудови комп'ютерних реконструкцій повинні мати міждисциплінарний характер. Успішна реалізація проекту передбачає виконання значного обсягу робіт і можлива лише за умови узгодженої плідної співпраці науковців різних напрямів: істориків, археологів, музеєзнавців, філологів, архітекторів та ІТ-спеціалістів.

Як показує досвід, відновлення зруйнованих споруд як в Україні, так і в світі не завжди дає позитивні результати. Деякі відбудовані споруди залишилися лише макетами і не змогли стати достойною заміною оригінальній пам'ятці. Часто під час таких «відбудов» руйнувалися залишки автентичних пам'яток. Вчені зазначають, що відбудова зруйнованих будинків дає негативний досвід, оскільки, відтворюючи архітектурну пам'ятку або весь ансамбль, ми "забуваємо про одну з їхніх основних цінностей – абсолютну неповторність" [1]. Цілісне відтворення втрачених пам'яток негативно оцінив відомий мистецтвознавець І. Грабар. Він зазначив, що під час таких "реставрацій" було безповоротно знищено більше дорогоцінних решток старовини, ніж їх загинуло під час усіх воєн, що пронеслися над Європою з часів Середньовіччя.

Так, хоч відбудована історична частина Варшави (Старе М'ясто) входить у список ЮНЕСКО, а відновлені Золоті Ворота і Михайлівський Золотоверхий собор в Києві вражають сучасників, спеціалісти-архітектори мають низку застережень щодо повного відтворення втрачених пам'яток, оскільки вони – свідки минулого, безцінні історичні документи, які необхідно оберігати від будь-яких переробок, що можуть спотворити їхній вигляд і звести нанівець їх значення.

З цією метою міжнародні організації, зокрема ЮНЕСКО, ІКОМОС, ІКОМ та інші, прийняли низку важливих документів, спрямованих на найефективнішу охорону і використання культурної спадщини людства. У 2000 р. на основі «Венеційської хартії» та низки інших документів прийнято «Ризьку хартію про автентичність та історичну реконструкцію культурної спадщини». У конференції щодо її прийняття брала участь делегація України.

В Україні пам'яткоохоронні питання регулюються такими нормативними актами: Конституція України (статті 54, 66), Закон України "Про основи містобудування" (1992), Закон України "Про відповідальність підприємств, їх об'єднань, установ та організацій за правопорушення у сфері містобудування" (1994), Кримінальний кодекс України (статті 89-91), Основи законодавства України про культуру (1992), Закон України "Про охорону культурної спадщини" (2000).

Оскільки зарубіжні та вітчизняні документи не рекомендують відновлювати втрачені пам'ятки, розглянемо методи відновлення архітектурного образу пам'ятки в історичному ландшафті за допомогою мультимедійних виставкових технологій. Такі технології широко використовуються в Україні та у світі. Наприклад, в Кракові з 2011 р. функціонує Підземний музей Торгової площі міста. Тут зроблено комп'ютерні моделі близько 500 експонатів, котрі можна дослідити в 3D на сенсорному екрані в перспективі з різних сторін. Підземний музей створено з використанням потужних сучасних мультимедійних і виставкових технологій, що застосовуються в процесі представлення зображень, фільмів, звуків і 3D-анімації, для створення яскравих ілюзій середньовічного Кракова. На виставці також працюють голографічні проектори, які застосовуються переважно в процесі тривимірної реконструкції будівель минулого. Сьогодні в Києві існує музей голограм, а у Львові працює голографічна лабораторія при Музеї історії релігії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема реконструкції архітектурних пам'яток актуальна, оскільки відроджується інтерес українського народу до своєї історії і культури. Активне розгортання процесів світової глобалізації потребує цілеспрямованого збереження та охорони української регіональної архітектурно-культурної спадщини. Ефективним механізмом у цьому напрямі, на наш погляд, є музеєфікація, технологічна сутність якої розкривається завдяки перетворенню пам'яток в об'єкти музейного показу, а також надання їм анімаційно-видовищної функції. Однак на сучасному етапі спостерігається значний дефіцит і дисбаланс міждисциплінарних

досліджень з музеєфікації замкових споруд, науково-теоретичного обґрунтування та практичного використання інноваційних механізмів музеєфікації [1, 2].

Аналізуючи відому роботу «Past, present and future of historical information science» [3] авторів Onno Boonstra, Leen Breure, Peter Doorn опубліковану в 2004 році, можна відслідкувати найбільш перспективні на той час напрями історичної інформатики: моделювання даних, їх стандартизація; електронна публікація джерел за допомогою технології XML; комп'ютеризований контент-аналіз тексту та аналіз зображень; використання складних статистичних технологій; розробка спеціальних інформаційно-пошукових систем для роботи з історичними даними; рефлексивне та імітаційне моделювання: ГІС (геоінформаційні системи), 3D-реконструкції, графіка та ін.; електронні публікації історичних досліджень, on-line музейні експозиції. На сьогоднішній день, усі вищенаведені напрями історичної інформатики залишаються актуальними, розвиваються і втілюються повною мірою у міжнародних проектах RomeReborn (рис. 1), Persepolis 3D (рис. 2), KhufuReborn (рис. 3), Paris 3D (рис. 4) та багато інших [4-7], що відображають реконструкції відомих міст або об'єктів, виконані засобами комп'ютерних та мультимедійних технологій.



Рис. 1. Інтерфейс проекту RomeReborn

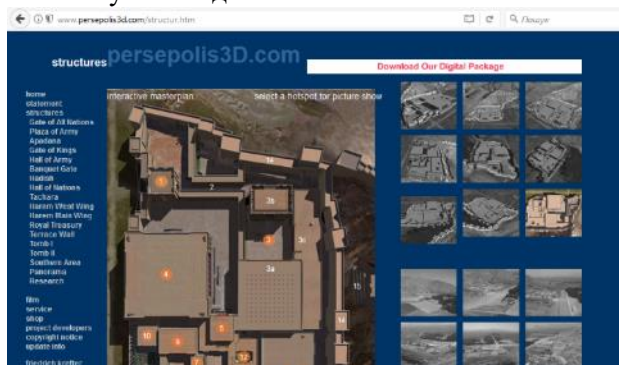


Рис. 2. Інтерфейс проекту Persepolis 3D



Рис. 3. Інтерфейс проекту KhufuReborn



Рис. 4. Інтерфейс проекту Paris 3D



Рис. 5. Фрагмент зображення Тустань-віртуальна

На нашу думку, це чудовий приклад використання можливостей сучасних технологій у галузі віртуальної реконструкції історичних об'єктів.

Однак, вітчизняних розробок у даному напрямі є досить мало. Серед найбільш відомих вітчизняних реконструкцій можна відмітити проект «Тустань_віртуальна» започаткований на основі графічної реконструкції автора М. Рожка, як дослідницький інструмент для вивчення унікального виду середньовічного дерев'яного будівництва [8]. 3D-модель фортеці є продуктом комп'ютерної графіки, що дозволяє математично представити тривимірні поверхні скель і дерев'яної забудови за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

На основі вищенаведеного можна стверджувати, що використання технологій комп'ютерної графіки та зокрема 3D-моделювання є актуальним та перспективним інструментом у історико-археологічних дослідженнях. Процес створення комп'ютерних 3D-макетів (моделей) втрачених або зникаючих об'єктів історико-культурної спадщини за допомогою спеціального програмного забезпечення називають «віртуальною історичною реконструкцією» [9-12].

Постановка завдання та мета дослідження. У 2017 році між науковцями і студентами кафедри Інженерної та комп'ютерної графіки Луцького національного технічного університету та музею історії Луцького Братства та з нагоди відзначення 400-річного ювілею Луцького Братства було заключено угоду. Метою даної угоди було дослідження історичних документів, описів, фотографій і т.п., на основі яких стало би можливим створити 3D моделі об'єктів Луцького Братства. Першу частину зобов'язались виконувати історики та науковці Луцького Братства, за другу – створення геометричних CAD – моделей та комп'ютерну візуалізацію взяли відповідальність науковці та студенти ЛНТУ.

Виклад основного матеріалу. Науково-технічний прогрес у царині комп'ютерних наук сприяв виникненню програм для автоматизованого проектування CAD (англ. Computer-Aided Design). Їх використання дозволяє спростити процес проектування, так як результати роботи у даних програмах представлено у вигляді креслеників, тобто плоских зображень, а також тривимірних моделей, що виступають цифровими макетами реальних або віртуальних об'єктів, тому процес створення комп'ютерних 3D макетів (моделей) втрачених або зникаючих об'єктів історико-культурної спадщини у CAD програмах називають «віртуальною історичною реконструкцією»

Але для початку роз'яснимо поняття віртуальної реконструкції. Вона являється однією із форм музеєфікації:

- фізична (матеріальна) музеєфікація – традиційний спосіб, що потребує значних грошових активів, проведення спектру інженерно-технологічних робіт та забезпечення музейного експозиціонування;
- віртуальна (нематеріальна) музеєфікація – сучасна інформаційна анімаційна технологія, яка дає змогу створити 3D-моделі замків, відновити первісний архітектурний вигляд та репрезентувати матеріали про пам'ятку в інтерактивному плані.

Вибору найоптимальнішого способу музеєфікації пам'яток замкової архітектури передують ревалоризація для визначення історико-культурної, естетико-архітектурної, пізнавальної та атрактивної цінності.

На сьогоднішній день не існує чіткої класифікації або типології віртуальних реконструкцій, проте окремі фахівці у даній галузі, намагаються класифікувати їх для спрощення опису та певного узгодження у діях під час розробки. Так згідно з сучасними публікаціями було прийнято алгоритм побудови, який представлений на рис.6.

3D-модель дозволяє ефективно працювати з нею як з точною копією великих і складних об'єктів реальності, віртуально здійснювати довільні перетворення, що можуть бути руйнівні або неможливі в реальному світі. Використання в процесі побудови віртуальної реконструкції методів 3D-моделювання вимагає нових джерелознавчих підходів, орієнтованих на синтез різнотипних джерел, до того ж представлених у різні періоди часу, протягом яких відбувалася еволюція досліджуваної історичної забудови. Важливим аспектом такої роботи є і забезпечення верифікації створюваної віртуальної реконструкції.

Отже розробники (виконавці) й замовники домовились розпочати цей спільний проект реконструкції "дитинця" – території Луцького Хрестовоздвиженського братства спочатку у спрощеному варіанті. Стадія "екскурсійно-туристичної" реконструкції, яка дасть змогу наближено відтворити та розташувати історичні споруди передуватиме наступній – з обґрунтованим та більш точним моделюванням історичних споруд. Також, незалежно від стадії проекту реконструкцію "дитинця" пропонується розбити на складові частини для 3D-моделювання:

- реконструкція монастиря;
- реконструкція церкви;
- реконструкція муру та дерев'яного паркану;
- реконструкція братського шпиталю;
- реконструкція інших будівель – монастирської трапезної, стайні, возового двору, виноробні та ін.;

– реконструкція рельєфу місцевості та загального розміру території розміщення споруд, як цілісної одиниці.

На нинішньому етапі виконано моделювання Хрестовоздвиженської церкви Братства 16 століття, реконструйованої в 3D за історичними описами (візитаціями). В правій частині скріншота (рис. 7) бачимо CAD модель, а в лівій частині церква з нанесеними матеріалами



Рис. 6. Алгоритм процесу побудови віртуальної реконструкції

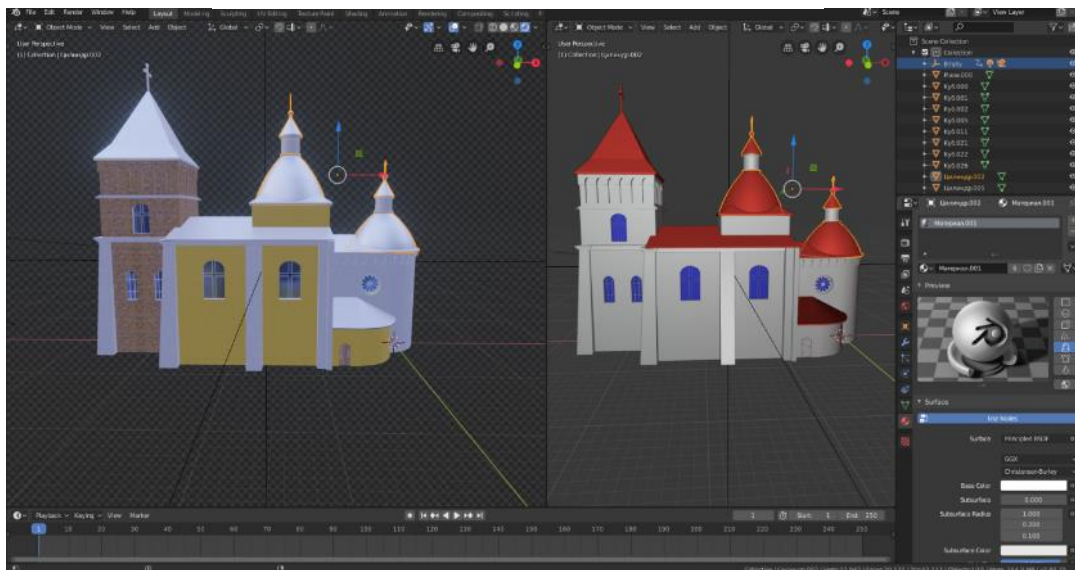


Рис. 7. Хрестовоздвиженська церква в м. Луцьку

На підготовлений в деталях об'єкт накладаються матеріали. Вони характеризуються текстурою, кольором, прозорістю, блиском, та іншими багатьма параметрами фізичних матеріалів і формують карти матеріалів. На рисунках 8 і 9 бачимо процес назначення кольорів та текстур об'єкту, адже цей об'єкт музеєфікації відтворений за описами (візитаціями).

Далі створюється освітлення – розташовуються джерела світла та рух камери і об'єкт „рендериться” (рис.10), тобто комп'ютер прораховує відбиття світла та нанесення світлотіней. У цьому проєкті світло прив'язується до камери, яка рухається навколо „пустишки”. Пуститка це пустий, нульовий об'єкт, який розміщений в центрі моделі. Коли ми обертаємо пуститку навколо осі z – камера зі світлом крутиться кругом моделі. Так відбувається рендерінг і анімація об'єкта.

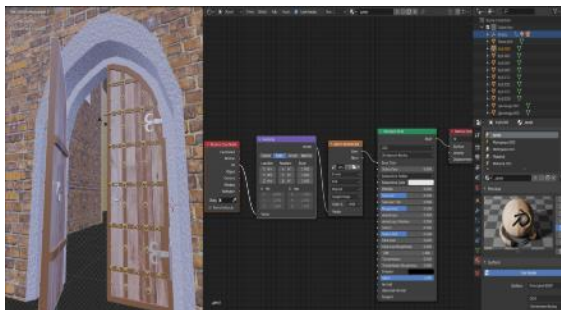


Рис. 8. Нанесення текстур та кольорів

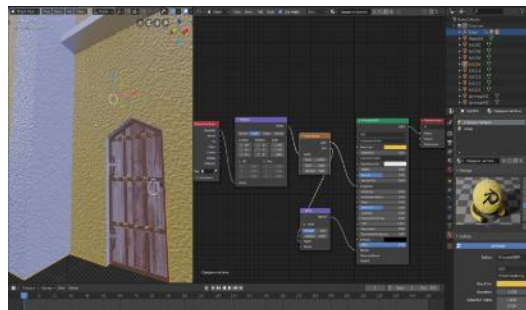


Рис. 9. Нанесення текстур та кольорів

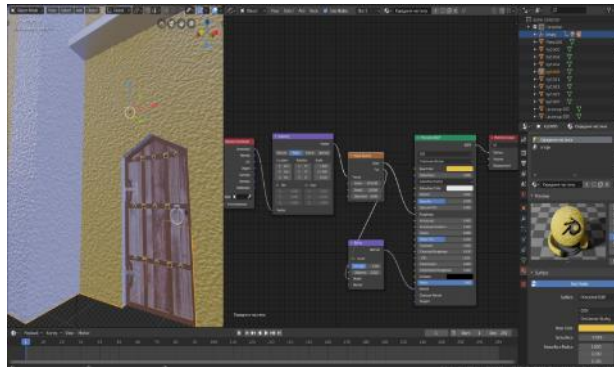
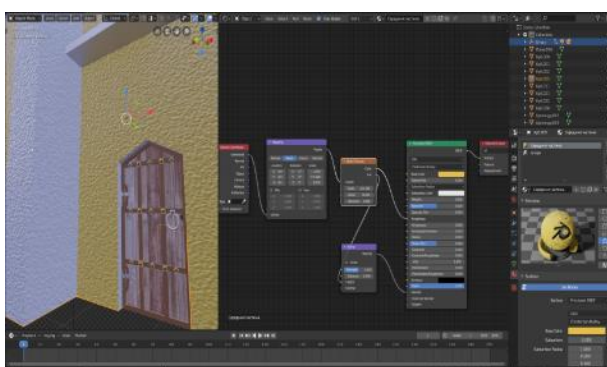
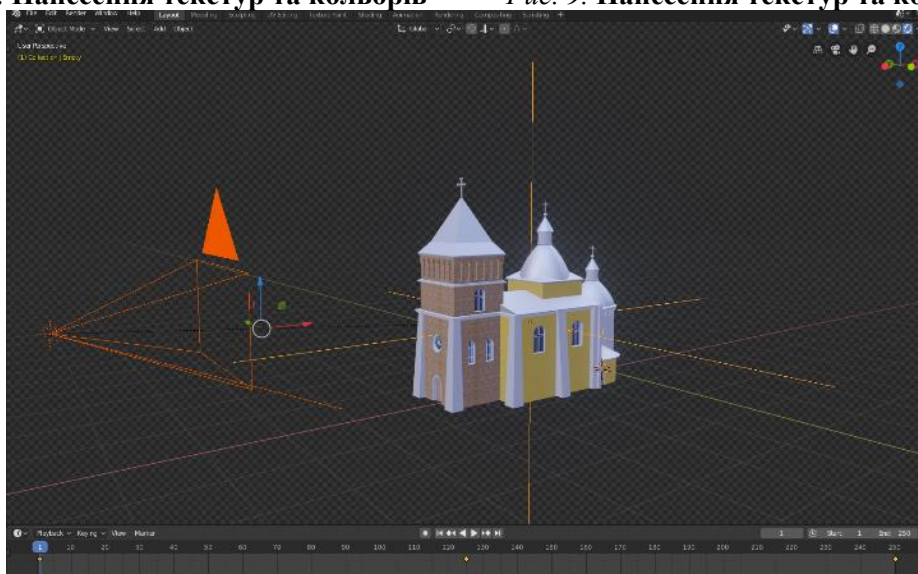


Рис. 10. Підготовка до реалізації анімаційного ролика

Висновок. Оскільки нині інтенсивно розвиваються мультимедійні виставкові медіа-технології, такий спосіб доцільно розглядати як один зі шляхів збереження мистецької спадщини людства.

Фактично віртуальна реконструкція і є форма інтерпретації пам'ятки історії та культури, але обов'язково науково обґрунтована. Це багатогранна модель, яка спирається на історичну реконструкцію як метод історичного дослідження, але виражається у новій формі за допомогою сучасних комп'ютерних технологій. Отримавши розвиток в 90-і роки XX століття і знайшовши

статус самостійного міждисциплінарного напрямку, віртуальні реконструкції стають все більш затребуваними в сучасну музейну справу.

Знищений твір неможливо відтворити, як не можна відтворити минулий час із його матеріальними і духовними атрибутами. Але є способи "відтворити" споруду, створивши замість оригінальної пам'ятки сучасну інженерну конструкцію – архітектурну інсталяцію, яка імітує ті чи інші історичні архітектурні форми. Такі засоби, як і жодні інші, не зможуть відновити втрачене. Але вони зможуть зберегти і донести до нащадків безцінні образи мистецької спадщини України.

В Україні і, зокрема, на «музейні технології», існує безліч зруйнованих чи близьких до знищення архітектурних пам'яток. Необхідно шукати нові способи їх збереження та відновлення з метою відтворення ціннісних автентичних зразків пам'яток, зокрема їх архітектурних образів у історичному ландшафті.

Список використаних джерел

9. Тустань. Місто-фортеця [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://tustan.ua/tustan_3d/#5
10. Логвин Н. Український архітектурний "Діснейленд" // Людина і влада. – 2000.
11. Boonstra O., Breure L., Doorn P. Past, Present and Future of Historical Information Science. — Amsterdam, 2004. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.hist.msu.ru/Departments/Inf/Stud/Heuristics/Reader/PPFofHIS.pdf>.
12. Rome Reborn http://www.academia.edu/17655075/Virtual_Reconstruction_A_Tool_for_the_Future: <http://romereborn.frischerconsulting.com>
13. Persepolis 3D http://www.academia.edu/17655075/Virtual_Reconstruction_A_Tool_for_the_Future: <http://www.persepolis3d.com>
14. Khufu Reborn http://www.academia.edu/17655075/Virtual_Reconstruction_A_Tool_for_the_Future: <http://www.3ds.com/passion-for-innovation/khufu-reborn/khufu-reborn>
15. Paris 3D http://www.academia.edu/17655075/Virtual_Reconstruction_A_Tool_for_the_Future: <http://paris.3ds.com/en-index.html#Heritage>
16. Тріпутіна Н. Розробка технології створення тривимірної моделі історичного центру Харкова / Н. Тріпутіна, А. Онопрієнко. // Актуальні проблеми вітчизняної та всесвітньої історії: Збірник наукових праць. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2010. – Вип. 13. – С. 187–197.
17. N. Garhøj Larsen. Virtual Reconstruction: A Tool for the Future [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.academia.edu/17655075/Virtual_Reconstruction_A_Tool_for_the_Future
18. ЛИСИЙ І. Вектори музеєфікації замків Івано-Франківської області // Музеєфікація фортифікаційних пам'яток – ВІЙСЬКОВО-ІСТОРИЧНИЙ МЕРИДІАН. ЕЛЕКТРОННИЙ НАУКОВИЙ ФАХОВИЙ ЖУРНАЛ. – 2017. – № 16. – С. 75–87.
19. Babylon 3D http://www.academia.edu/17655075/Virtual_Reconstruction_A_Tool_for_the_Future: <http://www.kadingirra.com>.
20. Byzantium 1200 http://www.academia.edu/17655075/Virtual_Reconstruction_A_Tool_for_the_Future

С.В. Мисковець¹, Ю.П. Фещук¹, М.Ю. Фещук², Ю.А.Півоварчук¹*Луцький національний технічний університет¹
Компанія PATON INTERNATIONAL²***ОПТИМІЗАЦІЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ МОДУЛЬНИХ ВИРОБНИЧИХ СТАНЦІЙ
FESTO**

В роботі розглянуті питання створення, впровадження та оптимізації цифрових двійників модульних виробничих станцій FESTO. Шляхом моделювання досліджено роботу програмної та апаратної частини виробничого для центру складання блоку клапана на основі робота FESTO під управлінням PLC Siemens SIMATIC S7-1500.

Ключові слова: цифрові двійники, автоматизація, роботизація, Індустрія 4.0, програмування

S. Myskovets, Yu. Feshchuk, M. Feshchuk, Yu. Pivovarchuk

**OPTIMIZATION OF DIGITAL TWINS OF FESTO MODULAR PRODUCTION
STATIONS**

The paper considers the issues of creation, implementation and optimization of digital twins of FESTO modular production stations. By means of modeling, the operation of the software and hardware part of the production center for the assembly of a valve block based on FESTO work under the control of the Siemens SIMATIC S7-1500 PLC was investigated..

Key words: digital twins, automation, robotics, Industry 4.0, programming

Постановка проблеми. Активний розвиток технологій Індустрії 4.0 та наскрізна цифровізація виробничих процесів призвели до необхідності запровадження цифрових двійників (Digital Twin, DT) стають незамінними для тестування та моделювання нових параметрів і варіантів проектування. Рішення на базі DT створюють 3D-цифрову копію фізичного об'єкта, що дозволяє розробляти кращі продукти, швидше виявляти фізичні проблеми й точніше прогнозувати результати. Останніми роками цифрові двійники значно знизили вартість розробки нових виробничих підходів, підвищили ефективність, скоротили кількість відходів і мінімізували варіабельність між партіями продукції.

Модульні виробничі станції FESTO Didactic широко використовуються у промислових середовищах для відпрацювання навичок автоматизації, роботизації та інтеграції інтелектуальних систем управління. Вони слугують платформою для навчання принципам програмування ПЛК (PLC), робототехніки, управління виробничими процесами та оптимізації операцій.

Проте, існує низка невирішених проблем. Це недостатня інтеграція цифрових двійників у реальні виробничі середовища, потреба в розробці оптимізованих алгоритмів управління, обмеженість використання цифрових двійників для прогнозного обслуговування, проблеми кібербезпеки та збереження даних.

Таким чином, постає необхідність розробки комплексної методики створення, впровадження та оптимізації цифрових двійників модульних виробничих станцій FESTO, що дозволить підвищити продуктивність та забезпечити адаптивне управління виробництвом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Цифровий двійник (DT) відрізняється від цифрової тіні (DS) і цифрової моделі (DM). Ці три технології різняться за архітектурою передачі даних і своїм призначенням. Серед них цифровий двійник є найбільш потужною технологією (рис. 1) [1].

Цифрова модель (DM) – це віртуальне 3D-представлення об'єкта чи продукту, яке можна використовувати для симуляції й аналізу. Цифрова модель є статичною копією фізичного об'єкта без автоматизованого обміну даними між фізичним світом і моделлю.

Цифрова тінь (DS) базується на сканованих лазером даних і є віртуальною моделлю, що представляє фізичну модель лише з односпрямованим потоком даних. У DS також відсутній автоматизований обмін даними між фізичним світом і моделлю. Цифрову тінь створюють для конкретних завдань у різний час, і вона може покращувати цифрову модель, синхронізуючи її з реальним світом. В основному DS використовується після завершення дизайну в контексті Індустрії 4.0. Однак це може бути неповним представленням усієї системи. Цифрові тіні можуть існувати паралельно і створюються за допомогою спеціального програмного забезпечення або лазерного сканування фізичних об'єктів [2-4].

© С.В. Мисковець, Ю.П. Фещук, М.Ю. Фещук, Ю.А.Півоварчук

У цифровому двійнику (DT) фізичні та віртуальні сутності взаємодіють між собою [1] (рис. 1). DT є повним віртуальним представленням об'єкта або системи, де дані передаються від системи до двійника і від двійника назад до системи. Для ініціювання дій на виробничому майданчику повноцінно функціонуючий DT забезпечує двосторонню передачу даних: він отримує дані з фабрики та може передавати їх назад.

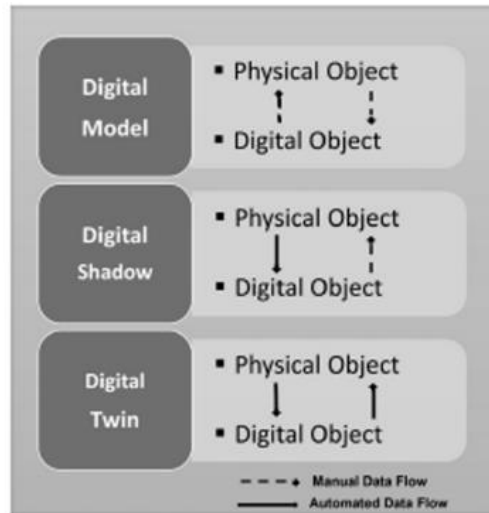


Рис. 1. Порівняння трьох моделей і потоку даних у них [1]

Структура цифрового двійника для виробництва регламентується ISO 23247 (рис. 2).

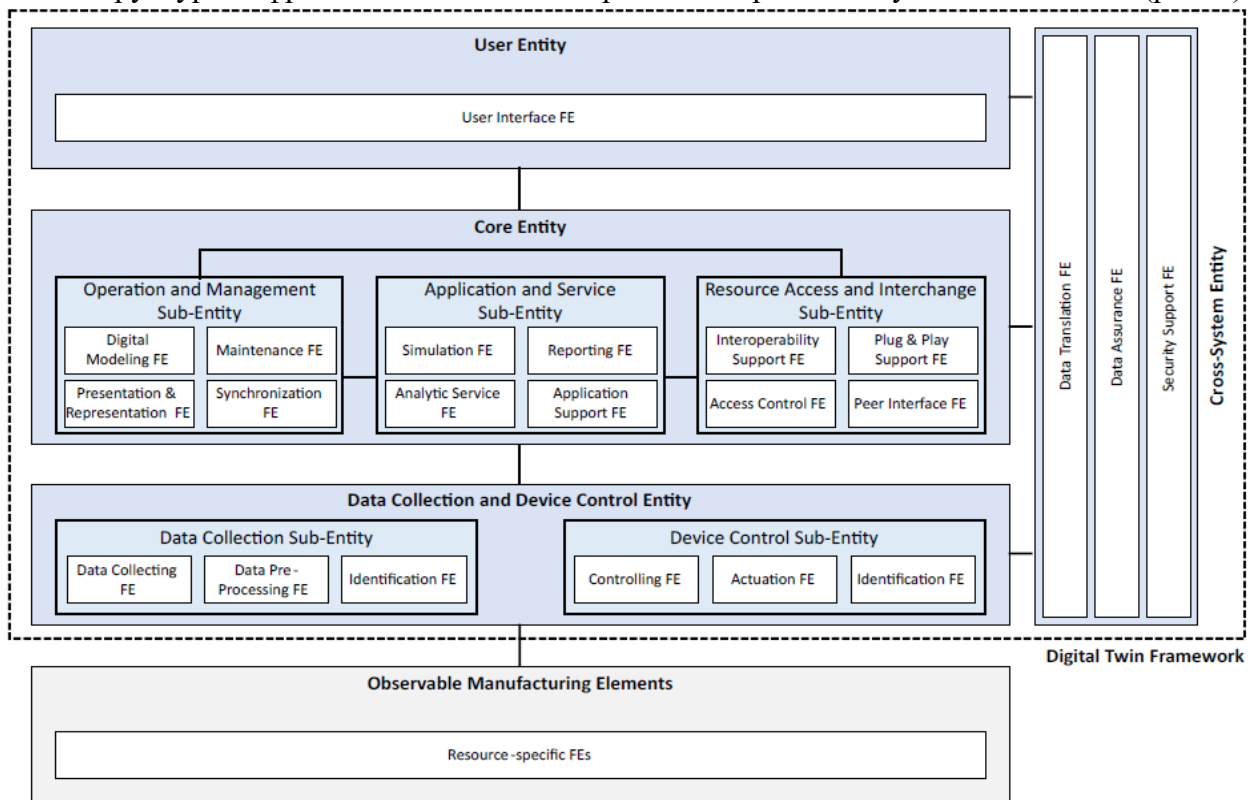


Рис. 2. Структура цифрового двійника для виробництва ISO 23247-1:2021 [5]

Різні галузі виробництва активно використовують усі три технології:

- цифрова модель (DM) корисна для промислового дизайну й розробки концепцій;
- цифрова тінь (DS) є потужною технологією для відстеження виробничих процесів;
- цифровий двійник (DT) є цінним інструментом для оцінки виробничих процесів у реальному часі.

Ці технології є потужними засобами для безперервного аналізу промислових процесів, віддаленого моніторингу на всіх етапах виробництва та прийняття рішень у режимі реального часу. Це призводить до прискорення виробничого циклу, зменшення відходів і збільшення доходів.

Попри схожість із традиційним симуляційним програмним забезпеченням, таким як CAD або програмами для моделювання, цифрові двійники мають низку переваг:

- використання даних у реальному часі завдяки IoT і сенсорам;
- здатність прогнозувати майбутню продуктивність через аналітику та машинне навчання;
- охоплення всього життєвого циклу активу, включаючи проєктування, експлуатацію й обслуговування;
- інтегрований підхід, який охоплює всі аспекти процесів чи систем.

Ці унікальні особливості роблять DT важливим інструментом для оптимізації сучасного виробництва.

Цифрові двійники відіграють важливу роль у процесах інженерного проєктування та розробки нових продуктів. Вони дають змогу створювати високоточні віртуальні моделі, які дозволяють проводити тестування у віртуальному середовищі, що значно знижує витрати на створення фізичних прототипів і скорочує час виходу нових виробів на ринок.

Впровадження ЦД у виробництві забезпечує постійний моніторинг стану обладнання та виробничих процесів у режимі реального часу. Це дозволяє ідентифікувати критичні точки у виробничому циклі, прогнозувати можливі збої та проводити своєчасні коригування з метою підвищення ефективності.

Однією з ключових переваг цифрових двійників є можливість проведення глибокого аналізу даних, отриманих з датчиків, інтегрованих у виробниче обладнання. Це дає змогу реалізувати стратегії прогнозного технічного обслуговування, що дозволяє мінімізувати час простою обладнання та запобігати аварійним ситуаціям.

Цифрові двійники використовуються для синхронізації виробничих процесів з постачальниками та дистриб'юторами, що забезпечує більш ефективне управління запасами, прискорює постачання матеріалів і зменшує витрати.

Постановка завдання та мета дослідження. Мета роботи – запропонувати метод оптимізації цифрового двійника модульної виробничої станції.

Для вирішення поставленої мети можна виділити ряд завдань:

- проаналізувати застосування цифрових двійників у промисловості;
- дослідити структуру та функціональні можливості модульних виробничих станцій FESTO Didactic;
- розробити програмне забезпечення для керування модульною станцією та цифровим двійником;
- використати методи програмування для створення програм станцій на основі PLC;
- розробити та протестувати інтерактивну модель для взаємодії з цифровим двійником в CIROS Education;
- оцінити ефективність використання цифрових двійників у виробничому процесі.

Об'єктом дослідження є цифрові двійники модульних виробничих станцій в контексті Індустрії 4.0.

Предметом дослідження є цифрові навчальні двійники, створені методами CIROS Education [6].

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробці та впровадженні цифрового навчального двійника модульних виробничих станцій з модифікованою структурою.

Практичне значення одержаних результатів полягає в можливості проводити навчання та виявляти несправності в безпечних умовах лабораторії, перевіряти вплив нових компонентів виробничих ліній на їх продуктивність та безпечність без фізичної заміни обладнання, здійснювати оптимізацію виробничих процесів та вести моніторинг стану виробничих систем протягом життєвого циклу.

Виклад основного матеріалу. Модульні навчальні станції FESTO Didactic спрямовані на розвиток практичних навичок і теоретичних знань у галузі автоматизації, мехатроніки, пневматики, електроніки, робототехніки та цифрових технологій. Основна мета впровадження модульних навчальних станцій FESTO Didactic – підготовка кваліфікованих фахівців для роботи у сучасних виробничих системах, що відповідають стандартам Industry 4.0.

Модульні навчальні станції надають змогу здобувати досвід роботи з реальними промисловими компонентами FESTO, Siemens SIMATIC S7 та симуляціями.

Використання модульних навчальних станцій сприяє формування навичок проектування, програмування, управління та обслуговування автоматизованих систем. Дозволяє вивчати основи роботи пневматичних, електричних, електропневматичних та гідравлічних систем.

Підготовка до сучасного виробництва на модульних виробничих станціях дозволяє здійснювати навчання відповідно до стандартів сучасної автоматизації (Industry 4.0, IoT, цифрові двійники) з врахуванням підготовки до інтеграції інтелектуальних виробничих технологій у реальних умовах [7].

Інтеграція теорії та практики проводиться шляхом поєднання фундаментальних знань із практичними завданнями за допомогою симуляційних моделей виробничих станцій і програмованих логічних контролерів: ПЛК (PLC).

Методика створення інтерактивних моделей для взаємодії з цифровими двійниками у 3D-просторі в CIROS Education базується на поєднанні віртуальної симуляції, тривимірного моделювання та інтеграції сенсорних даних для забезпечення їх реалістичної взаємодії.

Використовують спеціалізоване ПЗ (наприклад, SolidWorks, Blender чи Autodesk Inventor) для створення тривимірних моделей об'єктів і середовища.

Модель оптимізують: зменшують складність моделі (наприклад, через зниження кількості полігонів) для швидкої обробки в реальному часі.

Для забезпечення інтерактивності CIROS підтримує інтеграцію з гарнітурами VR (наприклад Oculus Rift, HTC Vive), що дозволяє студентам бачити тривимірне середовище у віртуальній реальності [8].

Для AR використовуються мобільні пристрої чи гарнітури, такі як Microsoft HoloLens, що накладають цифрові моделі на реальне середовище. Студенти можуть взаємодіяти з роботизованим маніпулятором у 3D-просторі, спостерігаючи його рухи з різних кутів.

При програмуванні для створення динамічної взаємодії розробляється сценарій роботи моделі. Наприклад, рухи роботів чи конвеєрів програмуються мовами, які підтримує CIROS [6] (наприклад, Python або спеціалізовані бібліотеки). При встановленні програми CIROS Education 6.4 встановлюється і програма Python 3.7.

Сценарії також враховують реакції на зовнішні дії, такі як рух миші, клавіатури чи сенсорних контролерів.

Датчики, що підключаються до системи (температурні, позиційні, тискові), забезпечують обмін даними між реальним і цифровим середовищем.

Дані передаються в реальному часі через інтерфейси, такі як Modbus, OPC-UA чи спеціальні драйвери. При взаємодії з PLC на основі SIMATIC S7/1500 використовується інтерфейс OPC-UA, оскільки він є природним для даних PLC.

Елемент програми на мові IRL, сумісної з мовою структурованого тексту процесорів SIMATIC S7/1500 для роботи цифрового двійника пристрою для захоплення, розпізнавання та транспортування заготовки представлено в додатку Б.

Візуальні ефекти, такі як освітлення, тіні, текстури, створюються за допомогою сучасних рушіїв (Unity, Unreal Engine).

Написання програмних кодів для моделювання логіки роботи систем та створення віртуального середовища, в тому числі і для реалізації сценаріїв роботи виробничої лінії, де кожен компонент працює відповідно до заздалегідь заданих алгоритмів.

Особливість використання цифрових двійників, створених в CIROS [6], полягає в тестуванні та верифікації поведінки систем перед їхнім реальним впровадженням (рис. 3).

CIROS дозволяє моніторити одночасно і переміщення елементів модулів станції один відносно одного, безпечність роботи (ліва частина вікна програми, наведеного на рис. 3), так і виконання програмного коду для відстеження чіткості виконання логіки, закладеної в PLC (верхня права частина вікна програми).

Переваги використання цифрових двійників у виробничих процесах: підвищення продуктивності (аналіз даних у реальному часі дозволяє оптимізувати виробничі процеси та підвищувати ефективність використання ресурсів), зниження витрат (скорочення потреби у фізичних прототипах та оптимізація процесів значно зменшують фінансові витрати підприємств), гнучкість виробництва (цифрові двійники дозволяють швидко адаптувати виробництво до змін у

попиті та умовах постачання), підвищення якості продукції (постійний моніторинг параметрів виробництва дозволяє вчасно виявляти та усувати дефекти).

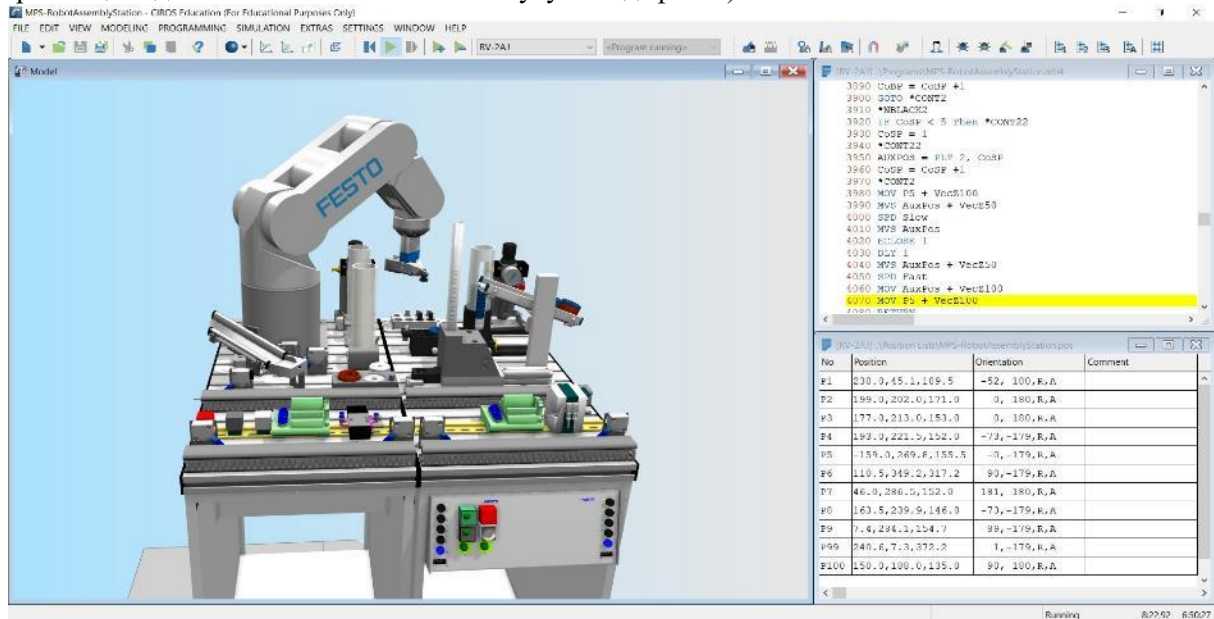


Рис. 3. Хід виконання програми та анімоване відображення роботи виробничого центру на основі робота FESTO під управлінням PLC Siemens SIMATIC S7-1500

Стримуючі фактори впровадження цифрових двійників: висока вартість впровадження (інтеграція цифрових двійників потребує значних капіталовкладень у програмне та апаратне забезпечення), безпека даних (передача великого обсягу інформації між фізичними об'єктами та їхніми цифровими аналогами створює ризики кіберзагроз), необхідність підготовки персоналу (ефективне впровадження цифрових двійників вимагає висококваліфікованих фахівців).

Висновок. Отримана у роботі модель забезпечила оптимізацію цифрових двійників модульних виробничих станцій FESTO, тестування програмного коду керування процесором Siemens SIMATIC S7-1500 на цифровому двійнику перед перевіркою роботи фізичного обладнання, узгодження роботи датчиків, контроль механічного переміщення рухомих органів відносно нерухомих частин цифрового двійника виробничого центру без небезпеки пошкодження обладнання в процесі наладки.

Список використаних джерел

1. Attaran M., Attaran S., Celik, B.G. The impact of digital twins on the evolution of intelligent manufacturing and Industry 4.0. Advances in Computational Intelligence. Vol. 3(11). 2023. URL: <https://doi.org/10.1007/s43674-023-00058-y>.
2. Seegrün A., Kruschke T., Mütge J., Hardinghaus L., Knauf T., Riedelsheimer T., Lindow K. Sustainable product lifecycle management with Digital Twins: A systematic literature review. Procedia CIRP, Volume 119, 2023, Pp. 776-781. URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.03.124>.
3. Jiewu L., Qiang L., Shide Y., Jianbo J., Yan W., Chaoyang Z., Ding Z., Xin C. Digital twin-driven rapid reconfiguration of the automated manufacturing system via an open architecture model. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. Vol. 63. 2020. Pp. 101895, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101895>.
4. Samad M. E. Sepasgozar. Differentiating Digital Twin from Digital Shadow: Elucidating a Paradigm Shift to Expedite a Smart, Sustainable Built Environment. Buildings. Vol. 11. 2021. P. 151 <https://doi.org/10.3390/buildings11040151>.
5. ISO 23247-1:2021 Automation systems and integration — Digital twin framework for manufacturing. Part 1: Overview and general principles. <https://www.iso.org/standard/75066.html>.
6. FESTO. CIROS. <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/CIROS/EN/index.html>.
7. L. Hou, S. Wu, G. Zhang, Y. Tan, X. Wang. Literature review of digital twins applications in construction workforce safety. Appl. Sci., 11 (2020), P. 339. <https://doi.org/10.3390/app11010339>.
8. Geng R., Li M., Hu Z., Han Z., Zheng R. Digital Twin in smart manufacturing: remote control and virtual machining using VR and AR technologies. Structural and Multidisciplinary Optimization. Vol. 65(11). 2022. P. 321, <https://doi.org/10.1007/s00158-022-03426-3>.

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ ЛИСТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ МЕТОДОМ БАГАТОФАКТОРНОГО ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Досліджено вплив технологічних параметрів процесу контактного зварювання листових конструкцій на міцність зварного з'єднання. Визначено граничні умови та варіантність поєднання різних факторів на здатність формування якісного та міцного зварного з'єднання. Розроблено математичну модель для пошуку оптимальних значень міцності на зсув зварного з'єднання листових конструкцій методом градієнтного спуску по поверхні відгуку. Встановлено оптимальний режим процесу контактного зварювання листів сталі визначеної товщини.

Ключові слова: фактор; параметр оптимізації; матриця планування; математична модель; дисперсія.

V. Kashytskyi, V. Rybalchenko

OPTIMIZATION OF THE REGIME OF CONTACT WELDING OF SHEET STRUCTURES BY THE METHOD OF MULTIFACTOR EXPERIMENT PLANNING

The influence of technological parameters of the process of contact welding of sheet structures on the strength of the welded joint was studied. The boundary conditions and the variability of the combination of different factors on the ability to form a high-quality and strong welded joint were determined. A mathematical model for finding the optimal values of the shear strength of the welded joint of sheet structures by the method of gradient descent along the response surface was developed. The optimal mode of the process of contact welding of steel sheets of a certain thickness was established.

Key words: factor; optimization parameter; planning matrix; mathematical model; dispersion.

Постановка проблеми. Точкове контактне зварювання є одним з основних способів зварювання виробів з листової сталі. На практиці отримання зварювальних з'єднань заданої якості залежить від оптимальних параметрів процесу зварювання та використання відповідних засобів контролю протягом тривалого циклу виробництва. Основні фактори, які визначають процес зварювання, це тривалість зварювання, величина зварювального струму та зусилля стиснення електродів. Також важливими є електричні характеристики зварювальної машини, які враховують струм конфігурації трансформатора та час вимкнення струму в непровідній частині. Генерація тепла та розподіл температури в зварному шві визначаються розподілом струму та сили на поверхнях розділу листових конструкцій. Розроблені моделі для опису розподілу температури в зоні зварного шва та зростання розміру ядра мають обмежене застосування через неточні вхідні дані для опису перехідних умов, що існують у зоні зварювання. Вирішення проблеми полягає у застосуванні технологічного підходу з урахуванням різноманітних взаємодій між тепловими, електричними, механічними та металургійними явищами, що розвиваються під час процесу зварювання. Моделі, що описують ці явища, повинні бути взаємопов'язані, щоб оптимізувати технологічний процес формування міцного зварного з'єднання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Контактне зварювання передбачає утворення тепла за рахунок опору зварюваних деталей в результаті протікання локального електричного струму [1-3]. В технологічному процесі застосовується тиск, який забезпечує адекватний контакт між конфігурацією частин. Це передбачає скоординоване застосування електричного струму та механічного тиску в результаті чого через відносно короткий шлях струму в заготовках відбувається нагрівання за низької напруги та відносно високих струмів для отримання необхідної теплової енергії з метою нагріву локальної зони в місці формування зварювального з'єднання. Послідовність операції полягає в створенні достатньої кількості тепла для розплавлення обмеженого об'єму металу з наступним охолодженням під тиском для забезпечення достатньої міцності утримання деталей разом. Щільність струму та тиск мають бути такими, щоб утворилося зварювальне ядро необхідного розміру (діаметру) з врахуванням умови, щоб розплавлений метал не видалявся із зони зварювання. Викидання розплавленого металу із зони розплаву слід завжди уникати, щоб отримати зварні шви без дефектів.

На основі проведених випробувань авторами роботи [4] доведено, що міцність точкового зварного з'єднання визначається характером руйнування у точковому зварному шві (за менший час зварювання) або в листовій конструкції (за більш тривалий час зварювання) за умови використання робочих параметрів технологічного процесу, який рекомендований розробником. Якщо використовувати довший час зварювання, тоді отримуємо зварні шви з вищою міцністю на розрив від 3% до 21 % порівняно з рекомендованими виробником значеннями міцності. Водночас

© В.П. Кашицький, В.С. Рибальченко

використання більш тривалого часу зварювання призводить до більш високого споживання електроенергії та вищих витрат, тому такий режим зварювання доцільно застосовувати за необхідності в особливих випадках.

Основними параметрами процесу зварювання листових конструкцій є зварювальний струм, форма анода, сила електрода, час зварювання, тривалість витримки та тривалість стискання [5]. Витрати часу на точкове зварювання є малими в невеликих масштабах, однак у великих масштабах, таких як автомобілебудування, витрати часу на точкове зварювання є вирішальними для оптимізації галузі. Тому, пошук оптимальних значень для кожного параметра допоможе мінімізувати час виробництва та знизити витрати енергії.

Постановка завдань. Метою роботи є побудова математичної моделі процесу контактного зварювання листових сталевих конструкцій з наступним визначення оптимального режиму формування міцного зварного з'єднання.

Викладення основного матеріалу. Процес контактного точкового зварювання відбувається під одночасним впливом факторів, які визначають якість та міцність зварного з'єднання. Особливістю того впливу є поява екстремуму фізичної характеристики, значення якого може відрізнятися від максимальних значень у випадку дослідження впливу кожного з факторів окремо. За такої умови доцільно використовувати метод багатофакторного планування експерименту, який дозволяє отримати математичну модель у вигляді рівняння регресії другого степеню. Побудова математичної моделі відбувається на основі використання експериментальних результатів визначеної кількості співвідношення варіантів поєднання факторів в межах допустимих значень інтервалу варіювання.

Основними факторами, які визначають механічні характеристики зварного з'єднання, вибрано:

де X_1 – електрична напруга на вторинній обмотці трансформатора, В;

X_2 – тривалість дії струму, с;

X_3 – зусилля стискання, МПа;

X_4 – товщина листа сталі, мм.

Мінімальна кількість експериментальних дослідів, які необхідно провести для побудови математичної моделі, становить $N=16$.

Результати досліджень, які відповідають екстремальним значенням монофакторного експерименту, прийнято за основний рівень факторів. Значення факторів на нижньому, основному і верхньому рівнях, а також інтервали варіювання кожного фактору подано у таблиці 1.

Табл. 1.

Рівні факторів і інтервали варіювання

Фактори	Рівні факторів			Інтервал варіювання
	-1	0	+1	
X_1 , В	1,48	1,5	1,52	0,02
X_2 , с	2,5	3	3,5	0,5
X_3 , МПа	0,37	0,4	0,43	0,03
X_4 , мм	1,4	1,5	1,6	0,1

За параметр оптимізації (y) вибрано межу міцності зварного з'єднання на зсув (σ , МПа), оскільки дана характеристика дозволяє оцінити міцність зварного з'єднання під впливом статичних навантажень.

Умови проведення кожного експериментального дослідів визначено згідно правил варіювання та представлено разом з результатами досліджень в матриці планування (табл. 2). З метою забезпечення високого ступеня достовірності експериментальних результатів дослідження параметра оптимізації проводили за 2-ма паралельними випробуваннями. В процесі паралельних випробувань передбачено використання трьох однакових зразків у вигляді листових конструкцій, які були з'єднані методом контактного зварювання згідно умов, які визначені у матриці планування експерименту. Експериментальні результати визначення межі міцності на зсув піддавали математичній обробці з використанням програми Microsoft Excel та формул для розрахунку коефіцієнтів лінійної та парної взаємодії, критерію Кохрена, Стюдента та Фішера, міжрядної дисперсії та дисперсії відтворюваності, а також параметра оптимізації.

Наступні розрахунки можна проводити у випадку перевірки однорідності дисперсій за допомогою критерію Кохрена. Визначено, що розрахункове значення критерію Кохрена (G_p) становить 0,15, що є допустимим значенням для нашого випадку, оскільки не перевищує табличне значення ($G_r=0,47$). Це дозволяє зробити висновок про однорідність дисперсій та можливість проводити подальші розрахунки. В процесі розрахунків визначено значення дисперсії відтворюваності (S_y^2), яке становить 6,3.

Табл. 2.

Матриця планування і результати експериментальних дослідів

№	X ₁		X ₂		X ₃		X ₄		y ₁	y ₂	$\bar{y}$
	Код	Мас. ч.	Код	Мас. ч.	Код	Мас. ч.	Код	Мас. ч.			
1	+	1,52	+	3,5	+	0,43	+	1,6	212,5	214,4	213,45
2	-	1,48	+	3,5	+	0,43	+	1,6	192,6	198,2	195,4
3	+	1,52	-	2,5	+	0,43	+	1,6	207,3	209,2	208,25
4	-	1,48	-	2,5	+	0,43	+	1,6	168,7	171,6	170,15
5	+	1,52	+	3,5	-	0,37	+	1,6	235,5	232,4	233,95
6	-	1,48	+	3,5	-	0,37	+	1,6	220,2	223,8	222
7	+	1,52	-	2,5	-	0,37	+	1,6	225,6	227,4	226,5
8	-	1,48	-	2,5	-	0,37	+	1,6	180,5	184,8	182,65
9	+	1,52	+	3,5	+	0,43	-	1,4	232,8	228,1	230,45
10	-	1,48	+	3,5	+	0,43	-	1,4	215,9	218,6	217,25
11	+	1,52	-	2,5	+	0,43	-	1,4	218,4	221,3	219,85
12	-	1,48	-	2,5	+	0,43	-	1,4	178,4	175,7	177,05
13	+	1,52	+	3,5	-	0,37	-	1,4	245,3	241,5	243,4
14	-	1,48	+	3,5	-	0,37	-	1,4	237,6	241,2	239,4
15	+	1,52	-	2,5	-	0,37	-	1,4	245,8	240,8	243,3
16	-	1,48	-	2,5	-	0,37	-	1,4	193,4	189,7	191,55

В математичній моделі використовують значимі коефіцієнти, визначення яких проводять з використанням критерію Стюдента (табл. 3).

Табл. 3.

Результати розрахунку коефіцієнтів регресії

b _i	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₁₂	b ₁₃	b ₁₄	b ₂₃	b ₂₄	b ₃₄
	13,98	11	-9,43	-6,87	-8,08	0,037	0,013	-0,844	-1,344	-0,3
t _p	35,85	28,205	24,183	17,61	20,72	0,096	0,032	2,164	3,445	0,769
t _r	2,14									

В результаті розрахунку коефіцієнтів лінійної і парної взаємодії отримано рівняння:

$$y = 213,4 + 13,98X_1 + 11X_2 - 9,43X_3 - 6,87X_4 - 8,08X_1X_2 + 0,037X_1X_3 + 0,013X_1X_4 - 0,844X_2X_3 - 1,344X_2X_4 - 0,3X_3X_4$$

Після перевірки значимості коефіцієнтів згідно $t_p > t_r$, встановлено, що значимими є наступні коефіцієнти лінійної та парної взаємодії:

$$b_1 = 13,98; b_2 = 11; b_3 = -9,43; b_4 = -6,87; b_{12} = -8,08; b_{23} = -0,844; b_{24} = -1,344.$$

Після видалення коефіцієнтів, які не відповідають умові ($t_p < t_r$) отримано наступне рівняння:

$$y = 213,4 + 13,98X_1 + 11X_2 - 9,43X_3 - 6,87X_4 - 8,08X_1X_2 - 0,844X_2X_3 - 1,344X_2X_4$$

Перевірку рівняння на ступінь адекватності проведено за критерієм Фішера (F). Результати розрахунку параметра оптимізації та міжрядної дисперсії представлено у табл. 4.

В результаті розрахунку значення критерію Фішера ($F_p=1,75$) визначено, що розрахункове значення критерію Фішера не перевищує табличне ($F_r=2,4$). Це дозволяє стверджувати, що математична модель є адекватною і її можна використовувати його для пошуку екстремального значення параметра оптимізації.

Табл. 4.

Розрахунок параметра оптимізації та дисперсії адекватності

№	$\bar{y}_\gamma$	$\hat{y}_\gamma$	$\bar{y}_\gamma - \hat{y}_\gamma$	$(\bar{y}_\gamma - \hat{y}_\gamma)^2$
1	213,45	211,58	1,875	3,5156
2	195,4	199,68	-4,275	18,276
3	208,25	210,11	-1,863	3,4689
4	170,15	165,89	4,2625	18,169
5	233,95	232,65	1,3	1,69
6	222	220,9	1,1	1,21
7	226,5	227,81	-1,313	1,7227
8	182,65	183,74	-1,088	1,1827
9	230,45	228,58	1,875	3,5156
10	217,25	216,73	0,525	0,2756
11	219,85	221,74	-1,888	3,5627
12	177,05	177,56	-0,513	0,2627
13	243,4	248,45	-5,05	25,503
14	239,4	236,75	2,65	7,0225
15	243,3	238,24	5,0625	25,629
16	191,55	194,21	-2,662	7,0889
$\sum_{\gamma=1}^N (\bar{y}_\gamma - \hat{y}_\gamma)^2 = 122,09$				

Визначення екстремального значення параметра оптимізації проводять за допомогою методу крутого сходження по поверхні відгуку. Покроковий рух в напрямку градієнта по кожному фактору здійснюють з врахуванням зміни величини, значення якої розраховують згідно методики.

Результати розрахунків натуральних значень вибраних факторів під час використання методики крутого сходження за градієнтом по поверхні відклику представлені у таблиці 5.

Табл. 5.

Результати розрахунку параметра оптимізації

	Натуральні значення факторів				Параметр оптимізації, МПа
	X ₁ , В	X ₂ , с	X ₃ , МПа	X ₄ , мм	
Основний рівень	1,5	3	0,4	1,5	
b _γ	13,98	11,00	-9,43	-6,87	
I _γ	0,02	0,5	0,03	0,1	
b _{γx} I _γ	0,28	5,5	-0,283	-0,687	
Δ _γ	0,01	0,1944	-0,01	-0,024	
Округлення	0,01	0,2	-0,01	-0,02	
Умовний дослід №1	1,51	3,2	0,39	1,48	227,90
– // – № 2	1,52	3,4	0,38	1,46	239,53
– // – №3	1,53	3,6	0,37	1,44	248,32
– // – №4	1,54	3,8	0,36	1,42	254,27
– // – №5	1,55	4	0,35	1,4	257,36
– // – №6	1,56	4,2	0,34	1,38	257,61
– // – №7	1,57	4,4	0,33	1,36	255,01
– // – №8	1,58	4,6	0,32	1,34	249,56

Висновки та перспективи подальших досліджень. В результаті використання отриманої математичної моделі встановлено, що максимальне значення параметра оптимізації (межа міцності на зсув) отримано в умовному досліді №6. В наступному покроковому переміщенні відбувається зниження досліджуваної характеристики, тому отриманий результат (σ= 257,61 МПа) задовольняє

© В.П. Кашицький, В.С. Рибальченко

вимогам поставленої задачі. Оптимальний режим контактного зварювання забезпечить отримання міцного зварного з'єднання у випадку: електричної напруги на вторинній обмотці трансформатора – 1,56 В; тривалість протікання струму – 4,2 с; зусилля стискання – 0,34 МПа за визначеної товщини сталевих листів 1,38 мм, що забезпечує досягнення максимального значення межі міцності на зсув зварного з'єднання листових конструкцій. В майбутньому планується провести серію досліджень з використанням інших марок сталі для перевірки адекватності розробленої математичної моделі.

Список використаних джерел

1. Williams N.T., Parker J. D. (2004). Review of resistance spot welding of steelsheets Part. Modelling and control of weld nuggetformation, International Materials Reviews, 49(2), 45-74.
2. Brozek M. (2014). Working variables optimization of resistance spot welding. Manufacturing Technology, 14(4), 522-527.
3. Kascak L., Spisa E. (2014). Effect of welding parameters on the quality of spot welds combining AHSS steel and HSLA steel. Key Engineering Materials, 586, 162-165.
4. Brozek M., Novakova A., Niedermeier O. (2017). Resistance Spot Welding of Steel Sheets of the Same and Different Thickness, Acta universitatis agriculturae et silviculturae mendelianae brunensis, 65(3):807-814.
5. Khader R., Valappil A., Murad M., Qudeiri J. (2023). Effect of Spot-Welding Parameters on the Strength of the Weld of Metal Sheets. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, 1047-1059.

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 (297х210 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 Cyr 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 Cyr розміром 11 пт з напівжирним виділенням і вирівнюється по центру.
4. **Анотації** українською та англійською мовами набираються з абзацного відступу шрифтом Time New Roman Cyr 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 Cyr, курсив, напівжирний 9 пт.
6. Основний текст розміщується на 1 см нижче анотацій, набирається з абзацного відступу 1 см шрифтом Time New Roman Cyr 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 Cyr; 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 ПБ, 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

Табл. 1.

Назва таблиці

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 № 4 від 3 грудня 2024 р.

Свідоцтво Державної реєстраційної служби України серія КВ, № 15901-4373ПР від 13.11.2019 р.

ISSN: 24-15-39-66

Відділ іміджу та промоції Луцького національного технічного університету
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75

© Луцький національний технічний університет, 2024 р.