

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний
університет

НАУКОВІ НОТАТКИ

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

Випуск 82

Луцьк 2025

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

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

Рік заснування: 1993

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

Періодичність – 4 рази на рік

Мова видання: українська, англійська

Засновник: Луцький національний технічний університет,

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

Редакція: тел. (0332) 26-25-19, E-mail: naukovi_notatki@lutsk-ntu.com.ua; http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky

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

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

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

Головний редактор:

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

Заступники головного редактора:

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

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

Відповідальний секретар:

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

Редакційна рада

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

Редакційна колегія:

Галузь знань G: Інженерія, виробництво та будівництво

Спеціальності: G9 – Прикладна механіка;

G11 – Машинобудування

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

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

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

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

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

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

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

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

G8 Матеріалознавство.

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

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

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

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

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

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

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);

Луцьков 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
С. І. Радкевич Ефективність торцевого фінішного фрезерування чавунів з вермикулярним графітом інструментами з кубічного нітриду бору та з нітридної кераміки	9
Є.О. Коробченко, В.А. Горобець Експериментальне визначення сили корисного опору переміщення матеріалів на швейній машині.....	16
Ю.В. Муравинець, О.О. Івановський, О.П. Козарь Застосування модернізованої технології чорнової обробки деталей при високошвидкісних траєкторіях.....	22
В.В. Отаманський Управління параметрами формоутворення при деформуючому протягування з наскрізною пластичною деформацією.....	25
Ю.В. Муравинець, В.В. Балака, Е.Ю. Гонта Аналіз ресурсних особливостей використовуваних гідроабразивних машин.....	34
С.В. Луньов, П.Ф. Назарчук, О.В. Бурбан Кінетика відпалу радіаційних дефектів в опромінену електронами n-Ge.....	37
В.О. Онукевич, Б.М. Зельман, М.І. Пилипчук, М.Р. Бурдяк Напрями дослідження ортогональних круглопилкових верстатів.....	41
О.П. Чигвінцева, І.В. Рула, Ю.В. Бойко Дослідження властивостей ароматичного поліаміду фенілон С-2.....	46
В.І. Осипенко, М.Р. Прусс Розробка регресійних моделей для розрахунку ефективних режимів різання 12 мм нержавіючої сталі випромінюванням потужного оптоволоконного лазера.....	51
Л. Д. Мисник, Л.М. Мізнік, Б.В. Мисник Науково-методичні аспекти впровадження технологій дистанційного навчання технічних дисциплін	59
Н.В. Шинкарчук Односторонній контакт ортотропної пластинки з круговим отвором і пружного диска.....	66
О. О. Твердохліб, І. Т. Ребезнюк Перспективи застосовування асиметричних органічних каталізаторів для поліпшування показників пиляння деревини стрічковими пилками.....	71
Н.В. Курилко, Р.М. Федоришин Модельно-орієнтоване проектування та міжплатформне впровадження контролерів вітрових електростанцій.....	76
Л. Ю. Федік, Я. В. Борейко, Р. Я. Грудецький САПР у проектуванні розумних електронних пристроїв: аналіз підходів та приклад IoT-термометра.....	84
О.В. Крупський, О.С. Приходько Дослідження еволюційної динаміки генетичних стратегій в умовах змінної доступності ресурсів.....	88
О.В. Дуров, Т.В. Стецюк, В.В. Полуянська, А.І. Євтушенко Оксид цинку та його взаємодія з металами (огляд).....	94
І.С. Ющук, О.С. Приходько Аналіз обмежень машинного навчання у прогнозуванні спортивних результатів.....	107
І.В. Карп Математична модель процесу переміщення зернового матеріалу в пневмошнековому транспортері.....	112
Б. В. Петришин, Ю. І. Озимок Дослідження впливу гостроти ножа на якість струганого шпону.....	121
Б. З. Барабаш, І. Т. Ребезнюк Експериментальне встановлення для визначення раціональних режимів різання в барабанних подрібнювачах деревини.....	128
Л. Ю. Федік, Ю. В. Федорусь Вплив штучного інтелекту на оптимізацію логістичних процесів у харчовій промисловості України.....	135
О.П. Манойленко, Д.М. Безуглий, В.А. Горобець, В.С. Пуць, А.С. Алексєєв Експериментальне визначення значень функцій положення робочих органів машин ланцюгового стібка типу 101 та побудова їх синхрограм	143
С.В. Ягелюк, В.І. Часніков Використання біорозкладних матеріалів із целюлози олійного льону для харчової упаковки.....	152
О.А. Мікуліч, Т.В. Фурс, Н.Ю. Семенишин, О.І. Гулай, В.Я. Шемет Вплив силіконової добавки на структуру і механічні властивості пінополіуретанів	159
І. С. Кондіус, Л. Ю. Федік, Т. Ю. Голіков Апаратні платформи для автоматизованого керування БПЛА: порівняльний аналіз та вибір оптимального рішення.....	165

CONTENTS

Contents.....	8
S.I. Radkevych Efficiency of face finishing milling of cast iron with vermicular graphite by tools made of cubic boron nitride and nitride ceramics.....	9
E.O. Korobchenko, V.A. Horobets Experimental determination of the useful resistance force in material movement on a sewing machine.....	16
Y.V. Muravinets, O.O. Ivanovsky, O.P. Kozar Application of modernized technology of rough processing of details at high-speed trajectories	22
V.V. Otamanskyi Control of forming parameters in deformation broaching with through plastic deformation. 25	
Y.V. Muravinets, V.V. Balaka, E.Y. Honta Analysis of resource characteristics of used hydroabrasive machines.....	34
S.V. Luniov, P.F. Nazarchuk, O.V. Burban Kinetics of annealing of radiation defects in electron-irradiated n-Ge.....	37
V. Onukevych, B. Zelman, M. Pylypchuk, M. Burdiak Directions for improving the designs of planer machines.....	41
O.P. Chigvintseva, I.V. Rula, Ju.V. Boyko Research of the properties of the aromatic polyamide phenylon C-2.....	46
V.I. Osypenko, M.R. Pruss Development of regression models for calculating effective cutting modes of 12 mm stainless steel by high-power fiber optic laser radiation	51
L. D. Mysnyk, L.M. Miznik, B.V. Mysnyk Scientific and methodological aspects of implementing distance learning technologies in technical disciplines.....	59
N.V. Shynkarchuk Unilateral contact of an orthotropic plate with a circular hole and an elastic disk.....	66
O. O. Tverdokhlib, I. T. Rebezniuk Prospects for the use of asymmetric organic catalysts to improve the performance of wood cutting by band saws.....	72
N.V. Kurylko, R.M. Fedoryshyn Model-based design and cross-platform deployment of wind power plant controllers.....	76
L. Yu. Fedik, Ya. V. Boreiko, R. Ya. Grudetskyi CAD in the design of smart electronic devices: analysis of approaches and an example of an IoT thermometer.....	84
O.V. Krupskyi, O.S. Prykhodko Research on the evolutionary dynamics of genetic strategies under conditions of variable resource availability.....	88
O.V. Durov, T.V. Stetsyuk, V.V. Poluyanskaya, A.I. Ievtushenko Zinc oxide and its interaction with metals (review).....	94
I.S. Yushchuk, O.S. Prykhodko Analysis of the limitations of machine learning in predicting sports results.....	107
I. Karp Mathematical model of the process of grain material transportation in a pneumatic conveyor....	112
B. Petryshyn, Yu. Ozymok Study of the impact of blade sharpness on sliced veneer quality.....	121
B. Z. Barabash, I. T. Rebezniuk Experimental equipment for determination of rational cutting modes in drum wood chippers.....	128
L. Y. Fedik, Y. V. Fedorus The impact of artificial intelligence on the optimization of logistics processes in the food industry of Ukraine.....	135
O.P. Manoylenko, D.M. Bezuglyi, V.A. Gorobets, V.S. Puts, A.S. Aliksieievets Experimental determination of the values of the functions of the position of the working bodies of chain stitch machines of type 101 and construction of their synchrograms.....	143
S. Yaheliuk, V. Chasnikov Use of biodegradable materials from oil flax cellulose for food packaging.....	152
O.A. Mikulich, T.V. Furs, N. Yu. Semenishyn, O.I. Hulai, V.Ya. Shemet Influence of silicone additives on structure and mechanical properties of polyurethane foam	159
I.S. Kondius, L. Yu. Fedik, T. Yu. Holikov Hardware platforms for automated uav control: comparative analysis and optimal solution selection.....	165

С. І. Радкевич

Державний університет «Житомирська політехніка»

ЕФЕКТИВНІСТЬ ТОРЦЕВОГО ФІНІШНОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ ЧАВУНІВ З ВЕРМИКУЛЯРНИМ ГРАФІТОМ ІНСТРУМЕНТАМИ З КУБІЧНОГО НІТРИДУ БОРУ ТА З НІТРИДНОЇ КЕРАМІКИ

У статті викладено зведені результати експериментальних досліджень впливу режимів різання та типу інструментального матеріалу на зношування інструменту, параметри якості поверхні та мікроструктуру обробленого шару чавуну з вермикулярним графітом марки CGI450 при фінішному торцевому фрезеруванні. Було застосовано метод Бокса-Бенкена для планування експерименту та підхід з множинними критеріями. Це дозволило дослідити взаємний вплив основних параметрів обробки - швидкості різання, подачі на зуб та глибини різання - на ключові критерії ефективності процесу фінішного торцевого фрезерування. До них відносяться: знос інструменту (VB), шорсткість обробленої поверхні (Ra), продуктивність процесу фрезерування (MRR).

Під час дослідження порівнювали інструменти з кубічного нітриду бору (КНБ) та нітридної кераміки (НТК). Виявилось, що КНБ забезпечує формування зміцненого поверхневого шару з високими залишковими напруженнями стискування (до -166,42 МПа), подрібненою структурою матриці та підвищеними мікрODEФОРМАЦІЯМИ. Це свідчить про інтенсивне поверхнєве зміцнення. Шорсткість поверхні $0,16 < Ra \leq 0,63$ мкм. Інструменти з НК демонструють децю вищу зносостійкість і стійкість при обробці при високих швидкостях різання. Однак вони мають слабше виражене структурне зміцнення і характеризуються не набагато гіршими параметрами Ra. Крім того, була проведена економічна оцінка, у якій врахована вартість інструменту та собівартість обробки одного кілометра шляху різання. В результаті встановлено, що на чистових режимах фрезерування ЧВГ (швидкість різання 400-800 м/хв, подача 0,1-0,15 мм/зуб, глибина різання 0,08-0,15 мм) використання різальних пластин круглої форми з нітридної кераміки є значно рентабельнішим, ніж пластин з КНБ. На основі аналізу отриманих результатів сформульовано рекомендації щодо вибору інструментального матеріалу в залежності від виробничого пріоритету: КНБ - для досягнення максимальної якості поверхні та підвищеної зносостійкості поверхневого шару; Нітридна кераміка - для забезпечення економічної ефективності та стабільності процесу при серійній обробці. Представлені дані можуть бути використані для оптимізації процесу фрезерування чавунів з вермикулярним графітом у відповідальному машинобудівному виробництві.

Ключові слова: чавун з вермикулярним графітом (ЧВГ), зносостійкість, фінішне фрезерування, кубічний нітрид бору (КНБ), нітридна кераміка, метод Бокса-Бенкена

S.I. Radkevych

EFFICIENCY OF FACE FINISHING MILLING OF CAST IRON WITH VERMICULAR GRAPHITE BY TOOLS MADE OF CUBIC BORON NITRIDE AND NITRIDE CERAMICS

The article presents the summary results of experimental studies of the influence of cutting modes and type of tool material on tool wear, surface quality parameters, and microstructure of the machined layer of cast iron with vermicular graphite of CGI450 grade during face finishing milling. The Box-Behnken method was used to plan the experiment and a multiple criteria approach was applied. This made it possible to investigate the mutual influence of the main machining parameters - cutting speed, feed per tooth and depth of cut - on the key performance criteria of the finishing face milling process. These include: tool wear (VB), machined surface roughness (Ra), milling process productivity (MRR).

During the study, tools made of cubic boron nitride (CBN) and nitride ceramics (NC) were compared. It turned out that BNB provides the formation of a hardened surface layer with high residual compressive stresses (up to -166.42 MPa), a crushed matrix structure, and increased microdeformations. This indicates intensive surface hardening. The surface roughness is $0.16 < Ra \leq 0.63$ μm . Tools made of NK demonstrate slightly higher wear resistance and machining stability at high cutting speeds. However, they have less pronounced structural strengthening and are characterized by slightly worse Ra parameters.

In addition, an economic assessment was made, which took into account the cost of the tool and the cost of machining one kilometer of cutting path. As a result, it was found that in the finishing modes of HSS milling (cutting speed 400-800 m/min, feed rate 0.1-0.15 mm/tooth, cutting depth 0.08-0.15 mm), the use of round-shaped cutting inserts made of nitride ceramics is much more cost-effective than CBN inserts. Based on the analysis of the obtained results, recommendations for the choice of tool material depending on the production priority were formulated: CBN - to achieve maximum surface quality and increased wear resistance of the surface layer; Nitride ceramics - to ensure cost-effectiveness and process stability during serial processing. The data presented here can be used to optimize the milling process of cast irons with vermicular graphite in critical machine-building production.

Keywords: vermicular graphite cast iron (CGI), wear resistance, finishing milling, cubic boron nitride (CBN), nitride ceramics, Box-Behnken method.

Постановка проблеми. Фінішне торцеве фрезерування - є одним з найтипівіших та найефективніших методів обробки для формування плоских поверхонь з забезпеченням їх високої точності та якості. За рахунок своєї багатофункціональності цей метод широко використовується в галузях машинобудування, авіації та автомобілебудування. Чавуни є одними з найпоширеніших конструкційних матеріалів, які використовуються для виготовлення великогабаритних деталей з плоскими поверхнями, що потребують високої точності та якості. Зокрема чавуни з вермикулярним графітом протягом останніх років викликають все більший інтерес в різних галузях

машинобудування. Однак їх обробка фрезеруванням супроводжується інтенсивним зношуванням ріжучого інструменту, що призводить до зниження продуктивності та якості обробки і збільшення загальної собівартості продукції. Особливістю торцевого фрезерування є періодичність контакту зубів фрези з заготовкою. Це призводить до циклічних навантажень і втомного зносу ріжучих кромek. Перепади температурних режимів викликають термічні тріщини, а коливання сил різання - вібрації і нерівномірне зношування ріжучих пластин. Все це створює труднощі в забезпеченні стабільності обробки та досягненні необхідної якості фінішної обробки. Важливим є забезпечення шорсткості поверхні не більше $Ra = 0,63$ мкм з балансом між продуктивністю та зносостійкістю різальних інструментів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням проблеми зношування різального інструменту при торцевому фрезеруванні присвячені роботи як вітчизняних, так і зарубіжних науковців. Серед науковців, які зробили великий внесок у вивчення цього питання, слід відзначити В.М. Бушлю, Г.М. Виговського, Ю.М. Внукова, О.А. Громова, В.О. Залого, П.П. Мельничука, D. Wang, Y. Li, L. Müller, P. Schmidt, J. Smith, A. Johnson та ін. У своїх роботах вони досліджували природу зношування різальних інструментів під час торцевого фрезерування важкооброблюваних матеріалів (зокрема чавуну). Розглядали вплив основних технологічних параметрів обробки на інтенсивність зношування та пропонували шляхи підвищення стійкості різального інструменту.

Всупереч великій кількості напрацювань, обробка чавунів з вермикулярним графітом (ЧВГ) фінішним торцевим фрезеруванням залишається недостатньо вивченою. Висока абразивність матеріалу, особливості мікроструктури та форма графітових включень викликають підвищене навантаження на інструмент та створюють умови для швидкого зношування. Це все ускладнює забезпечення стабільної обробки з досягненням високих показників якості.

Актуальність дослідження полягає в необхідності підвищення продуктивності обробки та зниження вартості фінішної обробки чавунів із вермикулярним графітом шляхом обґрунтованого вибору інструментального матеріалу з урахуванням його зносостійкості, вартості та здатності забезпечувати високу якість обробки.

Метою дослідження є вибір ефективного інструментального матеріалу для фінішного торцевого фрезерування поверхонь виробів з чавунів з вермикулярним графітом шляхом порівняльного аналізу зносостійкості, здатності забезпечувати високу якість обробленої поверхні та вартості.

Викладення основного матеріалу

Ефективність обробки важкооброблюваних матеріалів, зокрема чавунів із вермикулярним графітом (ЧВГ), залежить від комплексу факторів, які пов'язані як із властивостями самого матеріалу, так і з правильно підібраними режимами, інструментальним матеріалом і умовами обробки. Одним із основних факторів, від якого залежить інтенсивність зношування, є мікроструктура ЧВГ. На рис.1. представлена мікроструктура ЧВГ, яка включає як графітні, так і карбідні включення.

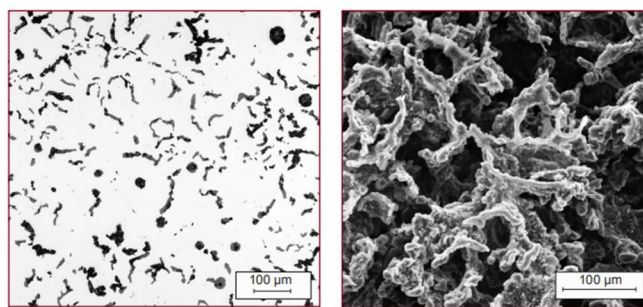


Рис.1. Мікроструктура чавуну з вермикулярним графітом [15].

Графітні включення у вигляді черв'яків об'єднані у формі коралів формують складну мережу. Завдяки цьому порушується однорідність матеріалу і ускладнюється процес різання який супроводжується локальними нерівномірними напруженнями і термічними дефектами. Карбідні включення діють як абразивні частинки, створюючи підвищене навантаження на різальну кромку інструмента, сприяючи швидкому її зношуванню.

Літературний аналіз показав, що під час обробки ЧВГ інструменти зношуються набагато інтенсивніше порівняно з СЧ. Зокрема в роботі [10], встановлено, що інструменти з КНБ вже на 8 хвилині роботи зазнали значного дифузійного зношування при швидкості різання 700м/хв, в той час як при обробці СЧ вони демонструють високу. Це обмежує ефективність їх застосування для фрезерування ЧВГ. У дослідженнях [12], основними механізмами зношування при обробці ЧВГ були абразивний і адгезійний знос, які переважали у зонах локального контакту інструменту із

твердими фазами матеріалу. У роботі [14] підтверджено, що за однакових умов роботи інструменту, оброблюваність ЧВГ гірша, ніж СЧ. Нижча теплопровідність, порівняно з СЧ викликає перегрів ріжучої кромки пришвидшуючи термічне зношування. Вища чутливість до вібрацій вимагає застосування жорстких інструментальних систем для стабілізації процесу. В таких умовах варто використовувати інструменти із високою термічною та абразивною стійкістю для зменшення термічного та абразивного зношування [14]. В свою чергу, Sadik та Dahlman дослідили вплив хімічного складу ЧВГ на інтенсивність зношування. Вони виявили що підвищення вмісту титану від 0,004% до 0,04% зменшує термін служби інструменту більш ніж на 50%. Це пов'язано з утворенням твердих включень Ti(C,N), які збільшують механічне навантаження на ріжучу кромку [11]. Ще однією особливістю обробки ЧВГ є налипання стружки на інструмент, що прискорює його зношування та ускладнює отримання стабільних високих показників якості обробленої поверхні [14].

Табл. 1

Фізико-механічні характеристики ЧВГ [15]

Властивості	Температура, °C	Значення (CGI 450)
Вміст перліту (%)	25	~90
Границя міцності на розрив (MPa)	25	450–525
	100	425–500
	400	425–500
Границя плинності 0.2% (MPa)	25	310–355
	100	290–340
	400	265–310
Модуль пружності (GPa)	25	145–155
	100	130–140
	400	125–135
Відносне подовження (%)	25	1.0–1.5
	100	1.2–2.0
	400	1.5–3.5
Коефіцієнт витривалості (σ_b)	25	0.25–0.35
Теплопровідність (Вт/м·К)	25	33–36
	300	30–33
	400	28–30
Коефіцієнт теплового розширення (мкм/м·К)	25–400	11.5–12.5
Коефіцієнт Пуассона	25	0.27–0.29
Границя стиску 0.2% (MPa)	25	410–440
	400	280–320
Коеф. зниження витривалості при надрізі	25	1.9–2.1
Густина (г/см ³)	25	7.0–7.2
Твердість за Брінеллем (BHN)	25	207–255

Табл. 2

Хімічний склад чавуну з вермикулярним графітом CGI450 [15].

Pearlite (%)	C	Si	CE	Mn	S	Mg	CeMM	Cu	Sn
> 90	3.6–3.8	2.1–2.5	4.4–4.7	0.2–0.4	0.005–0.022	0.006–0.014	0.01–0.03	0.7–1.0	0.08–0.10

Технологічними заходами які застосовуються для зниження зношування інструментів є зменшення режимів різання (глибини різання, швидкості різання та подачі). Однак надмірне зниження режимів різання може призвести до зниження продуктивності процесу та якості обробленої поверхні. Тому існує необхідність у пошуку раціонального поєднання режимів різання та інструментального матеріалу, яке б забезпечувало мінімальне зношування при збереженні високої продуктивності та стабільної якості обробки.

Отож, під час фінішного торцевого фрезерування чавуну з вермикулярним графітом (ЧВГ) особливо актуальною є проблема одночасного забезпечення високої стабільної якості обробленої поверхні, зносостійкості ріжучого інструменту та достатнього рівня продуктивності. Низька теплопровідність і неоднорідність фазового складу ЧВГ створюють несприятливі умови для

процесу різання, що спричиняє інтенсивне теплове та абразивне навантаження на ріжучу кромку, прискорене зношування інструменту та зниження якості обробки.

З метою усунення зазначених недоліків нами було розроблено комплексний підхід до оптимізації режимів різання у поєднанні з раціональним вибором інструментального матеріалу та геометрії ріжучої частини. Проведені дослідження дозволили визначити ефективні параметри фрезерування, що забезпечують покращення чистоти поверхні, зниження зношування інструменту, формування стискуючих залишкових напружень у поверхневому шарі, а також підвищення загальної продуктивності процесу.

Методика проведення експериментів. З метою підвищення ефективності фінішного торцевого фрезерування чавунів з вермикулярним графітом у дослідженні був застосований комплексний підхід, що включає оцінювання як технологічних, так і економічних показників. Зокрема, аналіз охоплював зносостійкість інструментів, якість обробленої поверхні, продуктивність процесу (MRR), а також інтегральний економічний критерій — вартість обробки одного кілометра шляху різання.

Експериментальні дослідження проводилися з метою встановлення впливу режимів різання та типу інструментального матеріалу на знос інструменту і якість обробки при фінішному фрезеруванні чавуну з вермикулярним графітом марки CGI450, виробництва компанії SinterCast (Швеція). Обробку здійснювали на вертикальному обробному центрі Haas VF-2SSYT-NG в умовах сухого фрезерування, використовуючи торцеву фрезу Sandvik Coromant R200-051Q22-12H з однією круглою ріжучою пластиною. У дослідженні застосовувалися пластини з двох типів інструментальних матеріалів: кубічного нітриду бору (КНБ) та нітридної кераміки (НК). Найменування та коди ріжучих пластин наведено в таблиці 3.

Режими різання варіювали в межах: швидкість різання $v_c = 400\text{--}800$ м/хв, подача на зуб $f_z = 0,10\text{--}0,15$ мм/зуб, глибина різання $a_p = 0,08\text{--}0,15$ мм. Для планування експерименту було застосовано метод Бокса-Бенкена, що забезпечує ефективне дослідження впливу окремих факторів та їхніх взаємодій на вихідні характеристики процесу обробки.

Зношування задньої поверхні інструменту оцінювали за допомогою електронного мікроскопа, а параметр Ra контролювали за допомогою портативного профілометра UIT TR200, у напрямку, перпендикулярному до подачі після кожної серії проходів (2, 5, 10, 15, 20, 30, 60, 90, 120). Визначення залишкових напружень у поверхневому шарі здійснювали методом $\sin^2\psi$ з використанням рентгенівського дифрактометра.

Табл. 3

Різальні пластинки, які використовувалися в дослідженнях [16]

Інструментальний матеріал	Кубічний нітрид бору	Нітридна кераміка
Код різальної пластинки	RCNT 12 04 M0 CB50	RCKT 12 04 MO 6190
Кількість різальних кромок	3	8
Вартість різальної пластини, євро	19,86	2,69

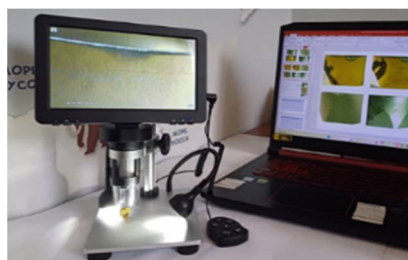


Рис. 3. Верстатно-апаратний комплекс для проведення експериментального дослідження

Аналіз отриманих результатів. Для забезпечення об'єктивного порівняння характеристик інструментів з кубічного нітриду бору (КНБ) та нітридної кераміки (НК) було проаналізовано результати фрезерування чавуну з вермикулярним графітом SinterCast CGI450 за однакових режимів: швидкість різання $v_c = 600$ м/хв, глибина різання $a_p = 0,12$ мм, подача на зуб $f_z = 0,10$ мм/зуб. Ці параметри належать до зони, в якій відбувається збалансоване поєднання основних

цільових показників: мінімізація шорсткості обробленої поверхні (R_a), зношування інструменту (VB_{max}) та забезпечення достатнього рівня продуктивності (MRR).

На рис. 4 наведено результати дисперсійного аналізу, які підтверджують, що найбільш значущим фактором для обох типів інструментальних матеріалів є швидкість різання (X_1). Також встановлено статистично значущий вплив глибини різання (X_2) та подачі на зуб (X_3), причому у випадку НК спостерігається більша чутливість до взаємодій між факторами.

На рис. 5 подано графіки залежностей вихідних параметрів (зносу інструменту — Y_1 , шорсткості R_a — Y_2 , продуктивності — Y_3) та інтегральної функції бажаності для інструментів з КНБ та НК. Вертикальні пунктирні лінії відповідають зазначеним вище режимам фрезерування. За цими умовами інструменти з НК забезпечили менший знос ($VB_{max} = 0,137$ мм), однак шорсткість обробленої поверхні була вищою ($R_a = 0,254$ мкм) порівняно з інструментами з КНБ ($VB_{max} = 0,150$ мм; $R_a = 0,242$ мкм). Рівень продуктивності ($MRR \approx 2023$ мм³/с) є ідентичним для обох варіантів, а інтегральна функція бажаності склала 0,87 для НК та 0,85 для КНБ.

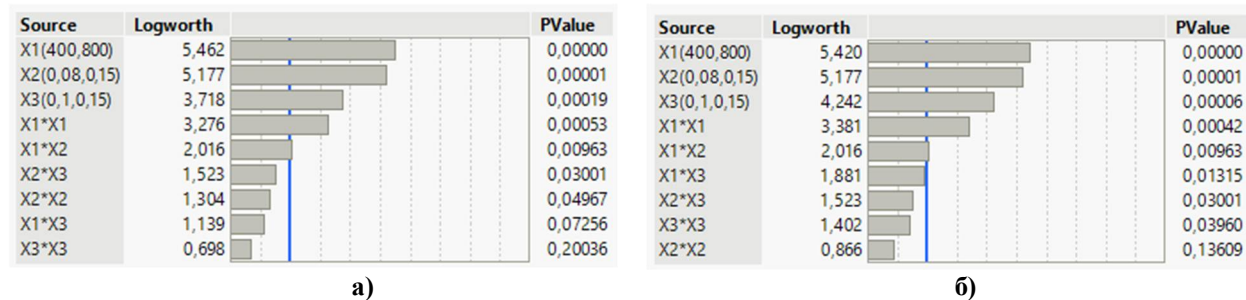


Рис.4. Результати дисперсійного аналізу значущості факторів та їх взаємодій при фрезеруванні чавуну з вермикулярним графітом CGI450: а) для інструментів з КНБ; б) для інструментів з НК.

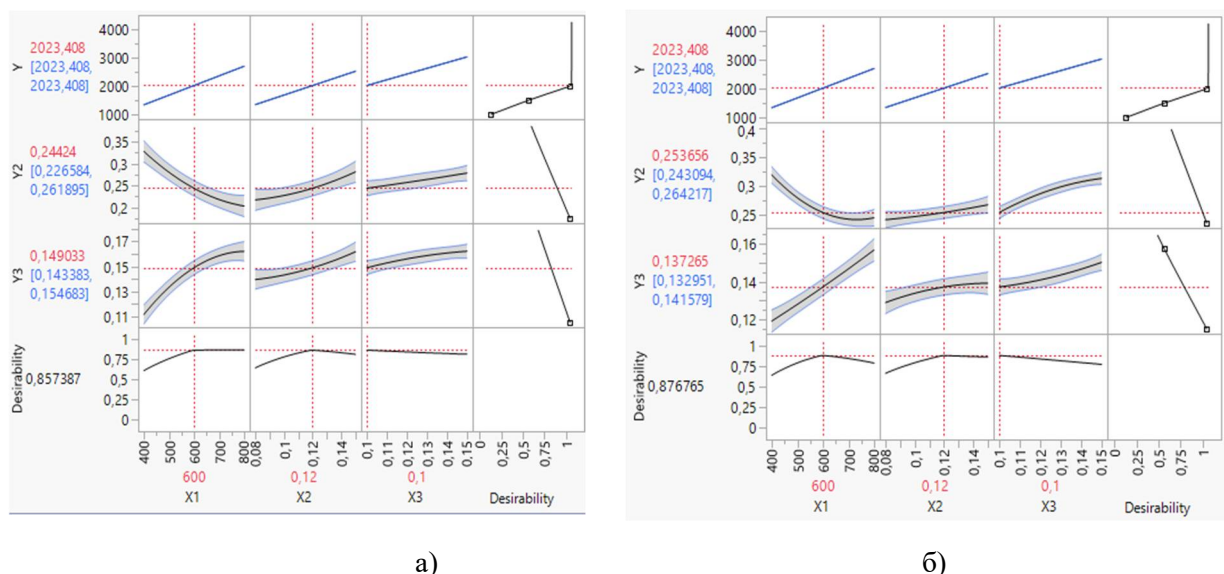


Рис.5. Профільні графіки зміни вихідних параметрів (Y – зношування інструменту; Y_2 – шорсткість R_a ; Y_3 – швидкість знімання матеріалу) та інтегральної функції бажаності залежно від основних факторів (X_1 – швидкість різання, X_2 – глибина різання, X_3 – подача на зуб): а) для КНБ; б) для НК

Таким чином, за умов збалансованих режимів фрезерування обидва типи інструментів забезпечують високу технологічну ефективність. вибір оптимального інструментального матеріалу повинен здійснюватися залежно від виробничого пріоритету: КНБ — для досягнення кращої якості поверхні, НК — для зниження зношування інструменту при стабільних умовах обробки.

Отримані результати дослідження впливу режимів фрезерування на залишкові напруження та мікроструктуру обробленої поверхні показали, що обробка інструментами з КНБ зі швидкістю 800 м/хв сприяє формуванню найбільших залишкових напружень стискання (-166,42 МПа), значному подрібненню зерен α Fe (до 369 нм), а також збільшенню мікрODEFORMАЦІЙ графіту та матриці.

Ці мікроструктурні перетворення свідчать про інтенсивне зміцнення поверхневого шару, що призводить до підвищення зносостійкості та втомної довговічності обробленої поверхні.

Величина залишкових напружень, розміри кристалів графіту 2H і α Fe, а також мікрODEформації фаз у поверхневому шарі чавуну з вермикулярним графітом CGI450

Умови обробки	Величина залишкових напружень	Розміри кристалів графіту 2H	Розміри кристалів α Fe	МікрODEформації графіту 2H	МікрODEформації графіту α Fe
Попередня обробка	108,3 МПа	-	-	-	-
НК 600м/хв	-48,13 МПа	407	1010	0,34%	0,45%
НК 800 м/хв	-101,51 МПа	284	210	0,11%	0,30%
КНБ 600м/хв	-82,38 МПа	272	985	0,23%	0,43%
КНБ 800м/хв	-166,42 МПа	477	369	0,36%	0,45%

У той же час, використання інструментів з нітридної кераміки призводить до зниження інтенсивності деформаційних і термічних процесів, що виражається в менших залишкових напруженнях, більших розмірах зерен α Fe і зменшенні мікрODEформацій. Це сприяє отриманню стабільної структури з меншим зношуванням інструменту, проте з дещо гіршими характеристиками шорсткості та поверхневого зміцнення.

Висновок. Інструменти з кубічного нітриду бору (КНБ) при високошвидкісному фінішному фрезеруванні ЧВГ забезпечують формування зміцненого поверхневого шару з високими залишковими напруженнями стиску (до $-166,42$ МПа), шорсткістю $Ra \leq 0,63$ мкм та високою зносостійкістю, що робить їх оптимальними для обробки відповідальних навантажених поверхонь. Інструменти з нітридної кераміки (НК) характеризуються більшою зносостійкістю, стабільністю обробки, дещо менш інтенсивним зміцненням поверхні та значно нижчою вартістю, що забезпечує їх ефективність у високоточних фінішних операціях. За однакової продуктивності обидва варіанти є доцільними для різних виробничих умов: КНБ — для ресурсоемної високоякісної обробки, НК — для економічно збалансованого фінішного фрезерування.

Список використаних джерел

1. Виговський Г.М., Бушля В.М. Визначення режимів обробки торцевими фрезами, оснащеними надтвердими матеріалами, при чорновій обробці сірого чавуну // Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. – 2015. – № 2 (73). – С. 14–19.
2. Виговський Г.М., Громовий О.А., Лоев В.Ю., Мельничук П.П. Спосіб плоского фрезерування торцевими фрезами: Деклараційний патент на винахід 40156 А Україна, B23C3/00. – № 2000074236; заявл. 17.07.2000; опубл. 16.07.2001. – Бюл. № 16.
3. Радкевич С., Залога В. Особливості процесу торцевого фрезерування з використанням інструментів з кубічного нітриду бору // Технічні науки та технології. – 2024.
4. Внуков Ю.М., Залога В.О. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів // Технічні науки та технології. – 2024.
5. Bushlya V., Zhou J., Avdovic P., Ståhl J.-E. Effect of ageing on machining performance of grey cast iron and its compensation by cutting speed management // *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. – 2024. – Vol. 43. – P. 1–12. DOI: [10.1016/j.cirpj.2024.03.004](https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.03.004)
6. Bushlya V., Zhou J., Avdovic P., Ståhl J.-E. Tool wear mechanisms of pcBN tooling during high-speed machining of gray cast iron // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 77. – P. 587–590. DOI: [10.1016/j.procir.2018.09.060](https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.09.060)
7. Vyhovskiy H., Plysak M., Balytska N., Hlembotska L., et al. Numerical Simulation of Cutting Forces in Face Milling // Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. – 2022.
8. Lindvall R., Diaz K.M., Peng R.L., Gutnichenko O., Sirén S., Magnusson Åberg L., Norgren S., M'Saoubi R., Bushlya V., Ståhl J.-E. Wear mechanisms in Ti(C,N)-Al₂O₃ coated carbide during sustainable machining CGI // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2024.
9. Lai D., Ma J., Liao X., Ji Q., Lin Y. Wear behavior and surface roughness analysis of carbide tools with varying coating for high-speed milling of compacted graphite cast iron // *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2024. – Vol. 38. – P. 3667–3681.
10. Tasdelen B., Özel C., Asiltürk İ. Machining of gray cast irons and compacted graphite iron // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – Vol. 189, No. 1–3. – P. 1–7.
11. Sadik I., Dahlman P. The influence of titanium content on tool performance in high-speed milling of compacted graphite iron // *Procedia CIRP*. – 2018. – Vol. 77. – P. 321–324.

12. Malakizadi A., Biermann D., Ståhl J.-E. Effects of workpiece microstructure and mechanical properties on tool wear and surface roughness in machining of compacted graphite iron // Wear. – 2018. – Vol. 406–407. – P. 174–182.
13. Suhaimi M.A., Kurniawan D. Effect of cryogenic high-speed milling on tool life and surface finish of compacted graphite iron // Int. J. of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 96. – P. 2271–2283.
14. Qiu H., Chen Z. The forty years of vermicular graphite cast iron development in China // China Foundry. – 2007. – Vol. 4, No. 4. – P. 261–267.
15. SinterCast. Compacted Graphite Iron – Material Data Sheet. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sintercast.com/media/1239/compacted-graphite-iron-material-data-sheet.pdf>
16. Sandvik Coromant. Cutting tools for CGI and cast iron machining. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us>

Є.О. Коробченко, В.А. Горобець

Київський національний університет технологій та дизайну

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ СИЛИ КОРИСНОГО ОПОРУ
ПЕРЕМІЩЕННЯ МАТЕРІАЛІВ НА ШВЕЙНІЙ МАШИНІ**

У статті визначено максимальне значення сили корисного опору, що виникає під час транспортування матеріалів у швейній машині, як він впливає на якість шва. Її значення є одним з вхідних параметрів для проектування механізмів транспорту. Проведене експериментальне дослідження підтвердило, що сила корисного опору суттєво впливає на якість шва, і її врахування є необхідним для оптимізації процесу шиття. Наукова новизна роботи полягає у дослідженні впливу сили корисного опору як додаткового фактора при переміщенні матеріалів.

Ключові слова: процес переміщення матеріалів, силова взаємодія, якість шва, стабільність довжини стібка, сила корисного опору, транспортувальний орган, притискний пристрій.

E.O. Korobchenko, V.A. Horobets

**EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE USEFUL RESISTANCE FORCE IN
MATERIAL MOVEMENT ON A SEWING MACHINE**

The article identifies the maximum value of useful resistance force that arises during material transport in a sewing machine. This value is a key parameter in designing transport mechanisms. Experimental research confirmed that the useful resistance force significantly impacts the quality of the seam, and its consideration is essential for optimizing the sewing process. The resistance force is caused by various factors that are difficult to determine analytically, including the mass of material before the sewing zone, friction between the material and the worktable surface, as well as the human factor. Additionally, certain technological operations require extra tension of the material layers in the feed zone. Information on the quantitative values of resistance force and their impact on seam quality is absent in the literature. The aim of the study is to determine the effect of resistance force on seam quality. The results showed that with resistance force values up to 5 N and certain levels of presser foot pressure, seam quality remains stable, with stitch length variation not exceeding 10%. This value can be adopted when determining parameters for new fabric transport devices.

Keywords: material transport process, force interaction, seam quality, stitch length stability, useful resistance force, transport mechanism, presser device.

Вступ. У багатьох літературних джерелах [1-3] розглядається силова взаємодія елементів процесу переміщення матеріалів однорейковим механізмом транспорту.

При розгляді процесів транспортування матеріалів стандартним однорейковим рушієм враховують, як правило наступні сили (Рис.1а)

1. Силу притиску притискної лапки до матеріалів F_{np} :

$$F_{np} = k_1 y,$$

де k_1 - жорсткість пружини притискного пристрою; y - вертикальне переміщення лапки.

Максимальна величина y залежить від товщини матеріалів, величини виходу зубців транспортувальної рейки над поверхнею голкової пластини та динамічних показників механізму транспорту.

2. Сили тертя між підшовою притискної лапки і матеріалом F_{mp1} , між матеріалом та поверхнею голкової пластини F_{mp2} , а також між шарами матеріалу F_{mp3} .

$$F_{mp1} = (F_{np} + P_{np,np}) f_1,$$

де $P_{np,np}$ - вага притискного пристрою (лапки зі стержнем і поводком); f_1 - коефіцієнт тертя між підшовою притискної лапки та матеріалами.

$$F_{mp2} = (F_{np} + P_{np,np} + P_m) f_2,$$

P_m - вага ділянки матеріалу, що контактує з поверхнею голкової пластини в зоні транспортування; f_2 - коефіцієнт тертя між матеріалом і поверхнею голкової пластини

$$F_{mp3} = (F_{np} + P_{np,np} + P_{в.м}) f_3,$$

де $P_{в.м}$ - вага верхнього шару матеріалу в зоні шиття; f_3 - коефіцієнт тертя між шарами матеріалу.

Слід зазначити, що в даному способі переміщення матеріалів співвідношення сил тертя має вирішальне значення для зменшення посадки матеріалів під час переміщення, оскільки повністю усунути посадку матеріалу при цьому способі неможливо [1].

3. Силу переміщення матеріалу $F_{пер}$

$$F_{пер} = (F_{np} + P_{np,np} + F_m) f_4$$

де f_4 - коефіцієнт зчеплення зубців рейки з матеріалом.

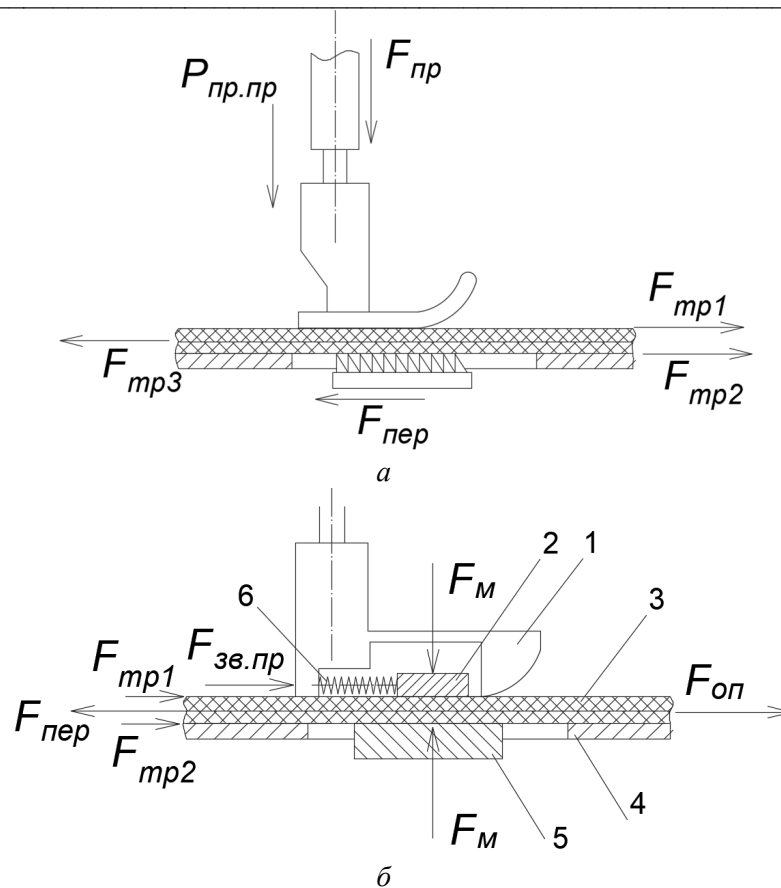


Рис. 1. Графічні моделі силової взаємодії елементів процесу транспортування матеріалів: а) в відомих механізмах швейної машини; б) в новому механізмі

Авторами були запропоновані нові спосіб і пристрій переміщення матеріалів в швейній машині [4], в яких реалізована інша суть процесу - за рахунок сили магнітного поля, що дозволяє повністю усунути посадку матеріалів.

Виконаний аналіз силової взаємодії елементів нового процесу (Рис. 1б) показав:

1. Сили тертя $F_{тр1} = P_{пр.пр} f_1$ та $F_{тр2} = (P_{пр.пр} + P_m) f_2$ - суттєво менші вказаних сил в попередньому випадку, в зв'язку з відсутністю притисної пружини.

2. Виникає сила зворотньої пружини, що діє на неодимовий магніт

$$F_{зв.пр} = k_2 x$$

де k_2 - жорсткість зворотньої пружини; x - переміщення неодимового магніту ($x_{max} = l$, де l - довжина стібка)

При цьому, слід відмітити що сила $F_{зв.пр}$ як мінімум на порядок менша сили притисної пружини в зв'язку з незначною масою неодимового магніту і практично відсутністю його контакту з матеріалом при холостому ході

4. Сила переміщення діє однаково на верхній і нижній шари матеріалу оскільки ділянка матеріалу, що транспортується, затиснута силою між магнітом і феромагнітною поверхнею транспортувального органу:

$$F_{пер} = F_m f_4$$

де F_m - сила відриву неодимового магніту від феромагнітної поверхні транспортувального органу за умови, що їх розділяють шари матеріалів, які транспортуються; f_4 - коефіцієнт тертя або зчеплення між поверхнею транспортувального органу та матеріалом.

5. Зникає необхідність враховувати силу тертя $F_{тр3}$ між шарами матеріалу оскільки вони при транспортуванні стиснуті силою магніта F_m що дозволяє створити для них однакові умови транспортування і повністю усунути їх посадку.

6. В зв'язку з вищесказаним виникає необхідність визначення впливу на якість транспортування сили корисного опору $F_{оп}$, яка при описі силової взаємодії елементів процесу транспортування відомих механізмами не розглядалась.

Дана сила спричинена рядом факторів, які важко визначити аналітично, таких як: маса матеріалу перед зоною шиття, тертя матеріалу по поверхні робочого стола швейної машини, вплив оператора швейної машини пов'язаний з виконанням технологічних операцій тощо.

В той же час в літературних джерелах є тільки констатація факту її існування, але відсутні будь-які відомості про її кількісні значення, які можуть призвести до погіршення якості шва. Так зокрема в роботі [5] при дослідженні впливу сил тертя на довжину стібка зазначається що в процесі шиття спостерігається людський фактор: швейний виріб може бути розтягнутий, зупинений і т.п. швачкою, але оцінка впливу даного фактору на стабільність шиття не розглядалась.

Також слід відмітити, що деякі технологічні операції при пошитті швейних виробів можуть передбачати додатковий натяг одного або декількох шарів матеріалу в зоні подачі матеріалу.

Мета роботи. Визначити вплив сили корисного опору на якість шва та максимальне її значення яке не призводить до його погіршення, шляхом проведення фізичного експерименту.

Методи дослідження. Застосовані відомі методи проведення та обробки багатфакторних експериментів [6].

Результати. Шляхом проведення експериментального дослідження було визначено максимальне значення сили корисного опору, що виникає при направленні матеріалів у зону транспортування швейної машини, яка незначно впливає на якість шва. Також було проаналізовано вплив інших якісних та кількісних факторів.

Наукова новизна. Наукова новизна проведеного дослідження полягає в розкритті впливу на процес переміщення матеріалів при їх зшиванні окрім сил тертя матеріалів по поверхнях притискної лапки та голкової пластини, ще й сили корисного опору, яка раніше не досліджувалася.

Результати дослідження. Експеримент проводився на промисловій швейній машині човникового стібка Turical GC6150MD [7]

Досліджувались наступні фактори.

1. Якісні:

- модель зубчастої рейки;
- модель притискної лапки;
- тип тканини.

2. Кількісні:

- швидкість обертання головного валу, (об/хв);
- теоретичний крок стібка l (мм);
- сила притиску притискної лапки $P = F_{np} + P_{np.np}$, Н;
- сила корисного опору F_{on} , Н.

Значення кількісних факторів встановлювалось засобами технологічного регулювання машини.

В ході експерименту проводилось визначення максимального значення сили опору F_{on} яке не призводить до суттєвого погіршення якості шва. За критерій оцінки якості шва був прийнятий один із стандартних експлуатаційних показників випробування швейних машин, а саме стабільність довжини стібка.

Відгук експерименту (величина відносної зміни довжини стібка), визначався за формулою

$$\varepsilon = l_p / l_0 * 100\%$$

де l_p - довжина стібка отриманого в результаті досліді та визначена за формулою

$$l_p = L / N,$$

де L – довжина вибраної ділянки шва, отриманого в досліді; N – кількість стібків в межах довжини L ; l_0 – паспортна довжина стібка.

Значення сили корисного опору змінювали шляхом підвішування до вільного кінця матеріалів тягарців різної ваги в межах 2-20 Н з кроком приблизно 2 Н. Вимірювання її значень здійснювалось динамометром ДПУ-0,01-2 в місці знаходження притискної лапки. Під час вимірювання імітувався контакт матеріалів з руками оператора, тотожний аналогічному контакту в процесі шиття. Силу притиску лапки змінювали в межах 24-34 Н, що відповідає її робочому значенню при експлуатації машини. Вимірювання зусилля притиску також здійснювалось динамометром ДПУ-0,01-2.

Для визначення впливу зазначених факторів на довжину стібка був проведений відсіюючий експеримент. Фактори, що досліджувались та рівні їх зміни наведені в табл.1. План експерименту на отримані відгуки наведений в табл.2.

Обробка результатів експерименту показала, що всі вказані фактори є значимими, отже впливають на зміну довжини стібка. При цьому значення таких факторів як сила притиску лапки P та сила опору F_{on} не тільки є значущими, але їх вплив є найбільшим серед наведених факторів.

Табл. 1

Рівні факторів, що досліджувались в відсіюючому експерименті

фактор		-1	+1
сила притиску лапки, P (Н)	X1	12,7	41,1
Тип тканини	X2	атлас платяний, 100%ПЄ, Щільність 155 г/м.кв	Саржа, 100%БВ, Щільність 250 г/м.кв
Рейка	X3	зубчаста рейка для легких танин	зубчаста рейка для середніх танин
Лапка	X4	лапка для промислової швейної машини	лапка для промислової швейної машини зі збільшеною шорсткістю пверхні
Сила опору, F (Н)	X5	1,9	3,9
Швидкість обертання головного валу, n (об/хв)	X6	1000	3000
теоретичний крок стібка l (мм)	X7	3	5

Табл.2

План відсіюючого експерименту та отримані відгуки

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	Y(сеп)	Дисперсі
1	+	+	-	-	+	-	+	9,2229	1,47039
2	-	+	-	+	-	-	+	51,896	3,94292
3	+	-	-	-	-	+	-	13,144	1,52982
4	+	+	+	+	-	-	-	3,2028	1,22108
5	-	-	+	+	-	-	-	19,16	1,79815
6	-	-	-	+	+	+	+	100	1
7	+	-	+	-	-	-	+	6,3669	1,16509
8	-	-	-	-	-	+	-	52,686	1,55498
9	+	+	-	+	-	+	+	8,2294	1,14023
10	+	-	-	+	-	+	+	14,127	1,34651
11	-	+	+	-	+	-	-	50,638	2,25147
12	-	+	-	-	+	-	-	100	1
13	-	+	+	+	+	-	+	86,898	3,94292
14	-	-	+	-	+	+	+	94,946	1,31531
15	+	-	+	+	+	+	-	13,386	1,88499
16	+	+	+	-	+	+	-	6,8752	1,55774

Виходячи з наведеного, було проведено повнофакторний експеримент з врахуванням цих факторів (табл. 3 та 4).

Табл. 3

Кількісні фактори експерименту

Кількісні фактори	Значення фактора		
Сила притиску лапки, P (Н)	14,7	24,5	34,3
Робоча сила опору, F (Н)	0 ... 5,49	0 ... 10,78	0 ... 16,89

Отримані результати представлено в таблицях 5 - 7 та на графіку (рис. 2). Отримані залежності з достатньою для практичної точністю можна виразити поліномами 4-го степеня (табл. 8)

Табл. 4

Якісні фактори експерименту		
Кількісні фактори	Значення фактора	
Тип тканини	Саржа сувор, 100%БВ, Щільність 160 г/м.кв	Бязь сувор, 100%БВ, Щільність 120 г/м.кв
Рейка	зубчаста рейка для середніх тканин	
Прижимна лапка	лапка для промислової швейної машини	
Швидкість обертання головного валу, (об/хв)	1000	
теоретичний крок стібка (мм)	5	

Табл. 5

Результати експерименту при силі притиску лапки, Р =14,7 Н									
Сила опору, F (Н)		0	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,5
		довжина кроку стібка / відносна зміна кроку стібка ϵ , %							
тип тканини	Бязь	4,67	4,63	4,60	4,55	4,43	4,19	3,75	0
		0,00	0,78	1,34	2,46	5,10	10,20	19,68	100,0
	Саржа	4,66	4,64	4,61	4,54	4,46	4,35	3,85	0
		0,00	0,36	1,05	2,55	4,27	6,64	17,46	100,0

Табл. 6

Результати експерименту при силі притиску лапки, Р =24,5 Н											
Сила опору, F (Н)		0	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	7,0	9,0	10,0	11,0
		довжина кроку стібка / відносна зміна кроку стібка ϵ , %									
тип тканини	Бязь	4,65	4,60	4,51	4,38	4,35	4,20	3,78	3,07	1,98	0
		0	1,03	2,95	5,85	6,50	9,77	18,67	34,08	57,47	100,0
	Саржа	4,61	4,58	4,57	4,48	4,45	4,28	4,02	3,44	2,47	0
		0	0,71	0,97	2,94	3,47	7,23	12,85	25,37	46,53	100,0

Табл. 7

Результати експерименту при силі притиску лапки, Р =34,3 Н									
Сила опору, F (Н)		0	1,0	4,0	6,0	10,0	12,5	15,5	17,0
		довжина кроку стібка, мм / відносна зміна кроку стібка ϵ , %							
тип тканини	Бязь	4,63	4,60	4,46	4,31	3,99	3,30	2,00	0
		0,00	0,63	3,61	6,90	13,81	28,65	56,76	100,0
	Саржа	4,61	4,60	4,52	4,42	4,17	3,59	2,35	0
		0,00	0,30	2,10	4,08	9,63	22,08	49,05	100,0

Залежність відносної зміни довжини стібка від сили опору при даних силах притиску лапки

Сила притиску лапки, Н	Тип тканини	
	Бязь	Саржа
14,7	$\varepsilon = 0,4755 F_{on}^4 - 3,4023 F_{on}^3 + 8,5091 F_{on}^2 - 4,6927 F_{on} + 0,4461$	$\varepsilon = 0,4408 F_{on}^4 - 2,8752 F_{on}^3 + 6,2989 F_{on}^2 - 2,6339 F_{on} + 0,1108$
24,5	$\varepsilon = 0,0421 F_{on}^4 - 0,6568 F_{on}^3 + 3,3735 F_{on}^2 - 3,6843 F_{on} + 0,8133$	$\varepsilon = 0,0108 F_{on}^4 - 0,2267 F_{on}^3 + 4,6173 F_{on}^2 - 4,847 F_{on} + 0,2617$
34,3	$\varepsilon = 0,0589 F_{on}^3 + 0,9525 F_{on}^2 - 4,9492 F_{on} + 2,5674$	$\varepsilon = 0,0694 F_{on}^3 + 1,1697 F_{on}^2 - 5,5181 F_{on} + 2,9973$

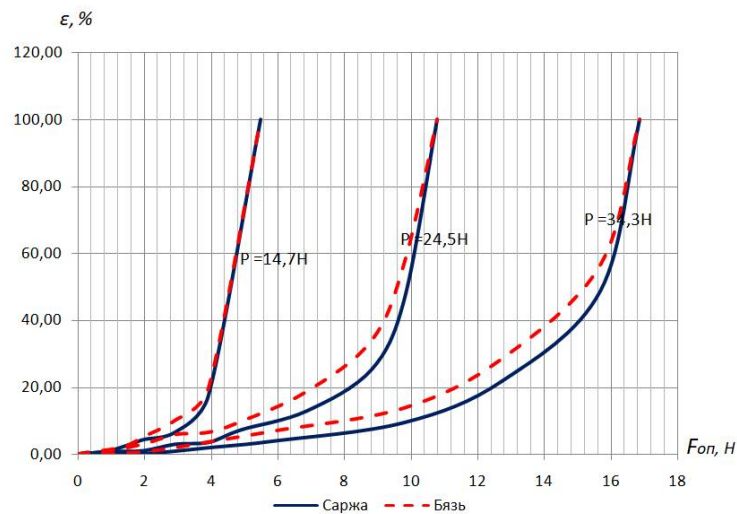


Рис. 2 Графіки залежності відносної зміни довжини стібка від сили опору та сили притиску лапки

Висновки. 1. Результати проведеного експерименту показали, що, при певних значеннях сили опору, вона суттєво впливає на якість шва.

2. Встановлено, що значення сили опору до 5 Н при різних значеннях зусилля притиску лапку несуттєво (до 10%) впливають на зміну довжини стібка. В зв'язку з цим ця максимальна величина сили опору може бути прийнята при визначенні параметрів нового пристрою транспортування для такого типу тканин.

Список використаних джерел

1. Щербань Ю.Ю. Наукові засади проектування швейних машин з регульованою пасадкою матеріалу: дис. д-ра. техн. наук: 05.05.10. Київ, 2000. 411 с.
2. Селівончик І.С. Розробка транспортуючих органів швейних машин: дис. канд. техн. наук: 05.02.13. Київ, 1994. 173 с.
3. Орловський Б.В, Абрінова Н.С. Технологічне обладнання галузі (швейне виробництво): навчальний посібник. Київ: КНУТД. 2013, 285 с.
4. Коробченко Є. О., Горобець В. А. Розроблення нового способу переміщення матеріалів на швейній машині. Синергія науки і бізнесу у повоєнному відновленні регіонів України: Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (24–26 квітня 2024 року). Одеса, 2024, С 184-188
5. Jucienė M., Vobolis. J. Dependence of stitch length along the seam on external friction force theoretical analysis. Materials Science. 2009 Vol.15, №3, pp. 273–276
6. Павленко П. М., Філоненко С. Ф., Чередніков О. М., Трейтяк В. В. М34 Математичне моделювання систем і процесів: навч. посіб. Київ: НАУ, 2017. 392 с.
7. Typical. URL.: <https://overlock.com.ua/ua/typical-gc6150-md-odnoigolnaya-mashina-s-nizhnim-prodvizheniem-i-vstroennym-privodom/> (дата звернення: 05.05.2025)

Ю.В. Муравинець¹, О.О. Івановський¹, О.П. Козарь²

ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕРНІЗОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЧОРНОВОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ТРАЄКТОРІЯХ

Луцький національний технічний університет¹

Мукачівський державний університет²

У статті наведено результати дослідження застосування модернізованої технології чорнкової обробки деталей з використанням високошвидкісних траєкторій інструменту. Розглядається вплив оптимізованих стратегій обробки на продуктивність, якість обробленої поверхні та знос інструменту. Проаналізовано переваги та обмеження використання даного підходу для підвищення ефективності виробничих процесів.

Ключові слова: чорнова обробка, високошвидкісна обробка, траєкторія інструменту, продуктивність, якість поверхні, знос інструменту.

Y.V. Muravinets, O.O. Ivanovsky, O.P. Kozar

APPLICATION OF MODERNIZED TECHNOLOGY OF ROUGH PROCESSING OF DETAILS AT HIGH-SPEED TRAJECTORIES

The article presents the results of a study of the application of modernized technology of rough processing of parts using high-speed tool trajectories. The impact of optimized machining strategies on productivity, quality of machined surface and tool wear is considered. The advantages and limitations of using this approach to increase the efficiency of production processes are analyzed.

Key words: roughing, high-speed machining, tool path, performance, surface quality, tool wear.

Introduction. In the modern machine building industry, the requirements for productivity and quality of workpiece processing are constantly growing. Roughing, as the initial stage, plays a key role in ensuring the efficiency of the entire production cycle. It determines the subsequent processing stages, the accuracy of the final dimensions and the surface quality of the product.

The use of high-speed machining (HSM) technologies in combination with optimized toolpaths opens up new opportunities for significant productivity gains and production cost reductions. HSM allows for shorter machining times, fewer tool passes and improved surface finish. This is achieved through the use of high cutting speeds and feeds, as well as the use of specialized tools and equipment.

However, the effective use of these technologies requires a thorough understanding of their impact on the cutting process, including tool wear and surface finish. High cutting speeds lead to an increase in the temperature in the machining zone, which can accelerate tool wear and degrade surface quality. Therefore, it is important to select the optimal cutting conditions, use efficient cooling and lubrication systems, and use wear-resistant tool materials. In addition, optimizing toolpaths reduces tool stress, reduces vibrations, and improves machining quality.

The purpose of this article is to study the application of the modernized roughing technology based on the use of high-speed toolpaths and analyze its impact on key process parameters. An analysis of existing research shows considerable interest in the use of HSS in various industries. The works of many authors are devoted to optimizing toolpaths in order to minimize machining time, reduce vibrations, and improve surface quality.

In particular, studies [1, 2] demonstrate the effectiveness of using trochoidal and spiral trajectories for roughing complex contours. Modernization of roughing technologies includes not only optimization of trajectories, but also the use of new cutting tools with improved characteristics, as well as adaptive strategies for controlling the cutting process [3]. An important aspect is also the modeling of the cutting process to predict forces, temperatures, and tool wear under different machining conditions and trajectories.

Research methodology. In this study, a series of experimental machining of parts from typical structural materials was carried out on a high-speed machining center.

Various roughing strategies have been used, including traditional rectilinear passes and modernized high-speed trajectories (trochoidal, spiral). During the experiments, the following parameters were monitored and recorded:

1. Cutting speed and tool feed.

The cutting speed is the speed of movement of the tool's cutting edge relative to the surface being machined. It is measured in meters per minute (m/min) and is one of the main parameters of the cutting mode. Increasing the cutting speed usually leads to an increase in machining performance, but it can also lead to increased tool wear and an increase in temperature in the cutting zone.

Tool feed is the speed of movement of the cutting tool relative to the workpiece in the direction perpendicular to the cutting direction. It is measured in millimeters per revolution (mm/rev) or millimeters per minute (mm/min). Tool feed affects the thickness of the cut layer, cutting force, and surface finish. Increasing the feed rate usually leads to higher productivity, but it can also lead to poorer surface finish and increased tool stress.

2. Cutting depth (axial and radial).

The depth of cut is a parameter that determines how deeply the cutting tool penetrates the material being processed. There are two main types of cutting depths: axial and radial.

Axial depth of cut: this is the distance the cutting tool penetrates the material along its axis. For example, in turning, this would be the depth to which the cutter cuts into the workpiece in one pass. In milling, it is the depth to which the cutter plunges into the material in a direction parallel to the axis of rotation of the cutter.

Radial depth of cut: this is the distance that the cutting tool cuts into the material in a direction perpendicular to its axis. In turning, there is no radial depth of cut. In milling, it is the width of the cut layer of material perpendicular to the direction of the cutter feed. Both of these parameters are important when selecting cutting modes, as they affect cutting force, tool wear, machined surface quality, and process performance.

3. Processing time for each part.

4. Roughness of the treated surface (R_a , R_z). Machined surface roughness is the micro-irregularities formed on the surface of a part during machining by cutting, pressure, etc. These irregularities can have different shapes, heights, and pitches, and they affect the performance properties of the part, such as wear resistance, strength, tightness, and appearance.

5. Wear of the cutting tool (behind the back surface). Cutting tool wear is the gradual deterioration of the cutting edge of a tool during the cutting process, which leads to a loss of its cutting properties. Wear can manifest itself in the form of wear, chipping, plastic deformation, and other types of damage.

6. Spindle power consumption. Spindle power consumption is the amount of energy that the machine's spindle (shaft) uses to perform a machining operation. This parameter is measured in watts (W) or kilowatts (kW) and reflects the load on the spindle drive during cutting. Factors that affect spindle power consumption:

- cutting speed;
- feed rate;
- depth of cut;
- workpiece material;
- type of cutting tool;
- cutting mode.

The methods of mathematical statistics and comparative analysis were used to analyze the obtained data. A visual examination of the machined surfaces and tool wear was also carried out using an optical microscope.

Research results. The results of the conducted experiments showed that the use of modernized high-speed trajectories during the rough processing of parts allows to achieve a significant increase in productivity compared to traditional methods. In particular, the use of trochoidal trajectories made it possible to reduce the processing time by [specify a specific value]% when processing contour elements.

Analysis of the quality of the processed surface showed that with optimal cutting modes and the use of high-speed trajectories, it is possible to achieve comparable or even better roughness indicators compared to traditional processing.

However, incorrect selection of parameters can lead to deterioration of the surface quality.

The study of tool wear revealed that when modernized trajectories are used, more uniform wear of the cutting edges is observed, which can positively affect the overall service life of the tool.

However, at high cutting speeds and great depths, more intensive wear is observed, which requires a careful selection of processing modes.

An analysis of the spindle power consumption showed that high-speed machining with optimized trajectories can lead to a more stable load on the equipment, which is important for its durability.

Discussion of results. The obtained results confirm the potential of modernized roughing technologies using high-speed trajectories to increase the efficiency of production processes.

Reduction of processing time without significant deterioration of the surface quality and while maintaining an acceptable level of tool wear are important advantages of this approach.

The effectiveness of using high-speed trajectories largely depends on the correct choice of cutting modes, the properties of the processed material and the characteristics of the cutting tool.

Further research into optimal combinations of these parameters for various production tasks is necessary.

Conclusions. The application of modernized technology of rough processing of parts at high-speed trajectories is a promising direction for increasing the productivity and efficiency of machine-building production.

Optimization of tool trajectories allows you to reduce processing time, improve surface quality and ensure more uniform wear of the cutting tool with the correct selection of cutting modes. Further research will be aimed at developing recommendations for the implementation of this technology for a wide range of materials and production tasks.

The use of modernized technology for rough processing of parts at high-speed trajectories opens up significant prospects for increasing the efficiency and quality of production processes. It should be noted that the effective implementation of modernized roughing technologies at high-speed trajectories requires: use of high-performance and accurate machine tools.

Use of modern cutting tools with appropriate characteristics, thorough development and optimization of instrument movement trajectories, careful development and optimization of tool movement trajectories using specialized software, ensuring effective cooling and removal of chips, training of qualified personnel to work with new equipment and technologies.

LIST OF USED SOURCES

1. "High-Speed Machining" by Kapil Gupta (Editor), J. Paulo Davim (Editor), 2018.
2. "Machining Technology: Machine Tools and Operations" by Helmi A. Youssef, M. Y. H. Sallese, 2008.
3. "Computer Aided Manufacturing" by C. Elanchezhian, B. Vijaya Ramnath, 2016.

В.В. Отаманський

Державний університет «Житомирська політехніка»

УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ ФОРМОУТВОРЕННЯ ПРИ ДЕФОРМУЮЧОМУ ПРОТЯГУВАННІ З НАСКРІЗНОЮ ПЛАСТИЧНОЮ ДЕФОРМАЦІЄЮ

У статті проведено глибокий літературний аналіз та розглянуто можливість керування параметрами формоутворення в процесі деформуючого протягування заготовок з пластичних матеріалів. На сьогодні даний процес є затребуваний, адже може використовуватися не тільки при виготовленні нових деталей, але і для відновлення зношених, при цьому він має ряд вагомих переваг перед іншими методами відновлення. Зважаючи на зростаючі вимоги до точності та якості продукції, актуальним є пошук технологічних рішень, що забезпечують контрольовану пластичну деформацію у зношені ділянки деталі з необхідним припуском під послідовну обробку. Метою статті є дослідження можливості управління параметрами формоутворення при наскрізному деформуючому протягуванні деталей з пластичного матеріалу та отримання її розмірів з припуском під послідовну обробку шляхом вибору геометрії деформуючого елемента та режимів обробки. В ході літературного аналізу виявлено, що крім загально прийнятих деформацій у вигляді утонення стінки, збільшення зовнішнього діаметра та укорочення деталі після обробки, бувають випадки, коли деталь подовжується, а це у свою чергу може бути використано для компенсації зносу по торцям осесиметричних деталей. Для підтвердження даного факту було здійснено чисельне моделювання процесу з використанням методу скінченних елементів (FEM). Результати моделювання показали, що дійсно на напрямок деформації можуть впливати геометричні параметри деформуючого елемента та режими протягування. У висновках запропоновано рекомендації щодо вибору параметрів, які можуть бути використані для проектування технології обробки з контрольованими вихідними розмірами та визначені напрямки для подальших досліджень.

Ключові слова: деформуюче протягування, осередок деформації, метод скінченних елементів, точність.

V.V. Otamanskyi

CONTROL OF FORMING PARAMETERS IN DEFORMATION BROACHING WITH THROUGH PLASTIC DEFORMATION

The article presents an in-depth literature review and examines the possibility of controlling forming parameters in the process of deforming broaching of workpieces made of ductile materials. Currently, this process is in demand, as it can be used not only for manufacturing new parts but also for restoring worn ones, offering several significant advantages over other restoration methods. Given the increasing requirements for product accuracy and quality, it is relevant to search for technological solutions that ensure controlled plastic deformation in worn areas of parts with an allowance for subsequent machining. The aim of this study is to investigate the possibility of controlling the forming parameters during through-deforming broaching of ductile material parts, and to obtain dimensions with a machining allowance by selecting the geometry of the deforming tool and processing parameters. The literature analysis revealed that, in addition to the commonly observed deformations such as wall thinning, outer diameter expansion, and part shortening after processing, there are cases where the part elongates. This effect can potentially be used to compensate for end-face wear in axisymmetric parts. To confirm this phenomenon, numerical modeling of the process was conducted using the Finite Element Method (FEM). The simulation results showed that the deformation direction can indeed be influenced by the geometric parameters of the deforming element and the broaching conditions. The conclusions provide recommendations for selecting parameters that can be used in the design of processing technologies with controlled final dimensions, and directions for further research are outlined.

Keywords: deforming broaching, deformation zone, finite element method, accuracy.

Постановка проблеми. Обробка деформуючим протягуванням є актуальним методом відновлення зношених осесиметричних деталей, особливо тих, виробництво яких має масовий або крупносерійний характер, адже даний метод відноситься до безвідходних технологічних процесів, який дозволяє забезпечити необхідний рівень параметрів якості робочої поверхні виробів.

Використання пластичного деформування при відновленні зношених осесиметричних деталей має вагомні переваги, які зазначені у літературі [1,2]. До 80% порожнистих осесиметричних деталей, які зношені в процесі експлуатації по зовнішньому діаметру, можна відновлювати та використовувати повторно, причому собівартість відновлення значно нижча за вартість нових і не перевищує 60% [3].

Але для досягнення позитивного результату у вигляді розробки технологічних процесів відновлення деталей необхідно глибоке вивчення процесів деформування, які мають місце при цьому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Деформуюче протягування – це процес пластичного деформування при якому деформуючі елементи інструменту переміщуються з натягом

вздовж твірної оброблюваного отвору по кінематичній схемі ковзання. При відновленні зношених по зовнішньому циліндру осесиметричних деталей використовується наскрізне вільне деформуюче протягування, адже пластичні деформації мають вийти на зовнішню поверхню для компенсації зносу і припуску під подальшу обробку.

Деформуючий елемент має такі основні геометричні параметри: d_d – діаметр по циліндричній стрічці деформуючого елемента, b_d – ширина стрічки, α – кут нахилу твірної робочого конуса, α_1 – кут нахилу твірної зворотного конуса (рис. 1.2).

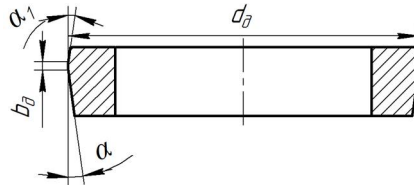


Рис. 1. Основні геометричні параметри деформуючого елемента

До основних параметрів процесу деформуючого протягування відносять: швидкість переміщення інструменту відносно заготовки – v_d , м/хв.; натяг – a , мм, який визначається різницею діаметра стрічки деформуючого елемента і отвору ($a = d_d - d$); відносний натяг – a/d_0 , який є відношенням натягу до розміру вихідного отвору.

При вивченні формоутворення заготовок при ДПР розглядають отримані розміри після її протягування зі значними наскрізними пластичними деформаціями, які характеризуються збільшенням внутрішнього і зовнішнього діаметрів, потоншенням товщини стінки та вкорочення деталі, тобто зменшення її вихідної довжини [1, 8]. Однак у роботах [4, 5, 9, 10] експерименти показують, що в деяких випадках має місце подовження деталі.

На параметри формоутворення впливає напружено-деформований стан (НДС) заготовки під час виконання ДПР, адже саме він визначає компоненти тензора напружень і деформації. Одним із найважливіших аспектів, які необхідні для об'єктивного аналізу НДС заготовок є схема взаємодії інструменту з оброблюваною поверхнею деталі, яка визначає осередок деформації. На практиці деформуюче протягування виконують одним, або декількома деформуючими елементами. У теоретичних дослідженнях зазвичай розглядають напружено-деформований стан оброблюваної заготовки при деформуючому протягуванні одним елементом [1, 5, 12], допускаючи, що обробка з декількома елементами буде рівноцінною обробці декількома проходками одного елемента, хоча дослідження [2, 9] показують, що це не є дійсністю.

Найбільш повно осередок деформації при ДПР було експериментально вивчено в ІНМ НАН України і відображено в роботі [1]. Вона подібна до схем, застосованих у більшості робіт, що відносяться до області обробки металів тиском [13, 14, 15]. Схема осередку деформації представлено на рисунку 2.

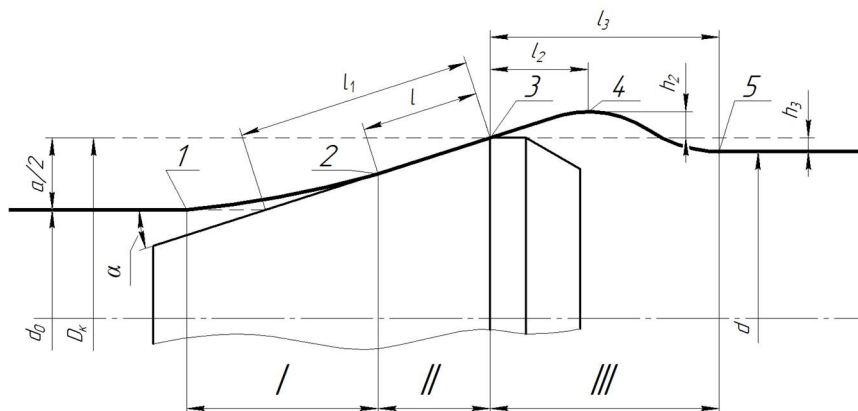


Рис. 2. Схема осередку деформації [1]

Запропонована схема (рис. 2) показує наявність контактної зони II, перед якою є позаконтактна зона I, та після якої слідує позаконтактна зона III. Слід зазначити, що деформування в різних зонах осередку деформації є єдиним процесом пластичного формоутворення заготовки і одночасно на всіх трьох ділянках визначає НДС деталі і параметри, що від нього залежать.

Разом з тим, дослідження розмірів та особливості складових осередку деформації, довжини контакту та позаконтактних зон є важливим питанням оскільки саме вони впливають на якість поверхні обробленої заготовки, залишкові напруження, шорсткість, форму та розміри, тобто знання умов протікання деформації допоможе раціонально обрати геометрію інструменту та режими обробки для досягнення необхідного вихідного результату.

Подальше уточнення схеми осередку деформації виконувалось авторами робіт [4, 5], в яких описано теоретичну модель осередку деформації для роздачі тонкостінних заготовок оболонкового типу $t_0/r_0 \leq 0,1$, де t_0 і r_0 – відповідно товщина стінки та радіус отвору заготовки. Ця модель дозволила визначити геометричні параметри осередку деформації, а саме: протяжність ділянок I, II та III (рис. 2).

Автори отримані розрахункові значення порівнюють з експериментальними даними отриманими у роботі [1] (рис. 3).

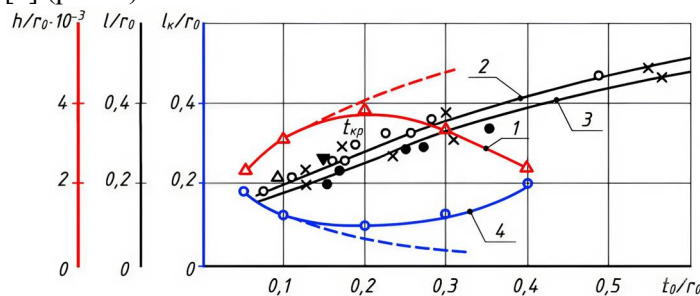


Рис. 3. Залежність висоти позаконтактної зони (h/r_0) за ділянкою контакту (крива 1); довжини позаконтактних зон: за ділянкою контакту (l_3/r_0) (крива 2), перед ділянкою контакту (l_2/r_0) (крива 3); довжини контактної зони (l_k/r_0) (крива 4) від товстостінності заготовки при використанні деформуючих елементів з кутами $\alpha = 2^\circ\text{--}12^\circ$, натягів на елемент $a/r_0 = 0,025\text{--}0,075$ [4]; дані експерименту: $\circ$ – сталь 20; Δ – сталь 10; $\blacktriangledown$ – Ст3; $\bullet$ – сталь 30ХНМА; $\times$ – сплав АК6

Як видно з графіків зі збільшенням товщини стінки осьові розміри позаконтактних зон (криві 2 та 3) монотонно зростають і добре співпадають зі значеннями експериментальних даних (точки $\circ$, Δ , $\blacktriangledown$, $\bullet$, $\times$). Причому це співпадіння спостерігається навіть при значних товщинах стінки ($t_0/r_0 > 0,5$). Однак, співпадіння розрахункових та експериментальних результатів протяжності контактної зони та висоти позаконтактних зон залежно від товстостінності заготовки (рис. 3, криві 1, 4) спостерігається тільки для випадку обробки тонкостінних заготовок. При збільшенні товщини стінки експериментальні результати докорінно відрізняються від розрахункових, тобто розрахункова модель дає достовірні результати до деякої товщини стінки. Цю товщину стінки автори роботи [1] називають критичною товщиною стінки, вона забезпечує появу в зоні контакту критичного контактного тиску. Критичний контактний тиск за твердженням авторів [1] є фізичною константою оброблюваного матеріалу. При цьому, згідно даних [1, 2], значення цієї критичної товщини стінки змінюється в залежності від факторів, що впливають на контактний тиск, а саме кута нахилу твірної робочого елемента α і натягу на елемент.

Наявність таких невідповідностей розрахункових та експериментальних даних не дозволяє використовувати розроблену теоретичну модель осередку деформації при розрахунку геометричних характеристик осередку деформації у широкому діапазоні зміни товстостінності заготовки.

Стосовно визначення НДС в осередку деформації та в цілому заготовки при ДПР займалися автори роботи [2, 6, 7], але їхні дослідження стосувалися обробки заготовок з нескінченною товщиною стінки ($t_0/d_0 > 1$), тобто умов при яких пластична деформація не виходить на зовнішню поверхню заготовки. Дослідження проводили за допомогою шаруватих моделей і по волокнистій макроструктурі з наступним аналітичним визначенням швидкостей по отриманих лініях течії. І хоч отримані результати не можна порівнювати з обробкою заготовок наскрізною деформацією, але автори отримали ряд важливих висновків, а саме: кінематика ДПР не залежить від матеріалу заготовки. Також ними зазначається, що в контактній зоні матеріал знаходиться в умовах, близьких до всебічного стиску.

У роботі [11, 12] автори досліджують НДС кожної ділянки осередку деформації при обробці заготовок з малопластичного матеріалу – СЧ-20. Виконують вони це скінчено-елементним аналізом у програмному комплексі DEFORM 2D/3DTM V11.0. І хоча обробка чавуну проводилася з режимами, які викликали тільки деформацію поверхневого шару металу отвору, цікавим є те, що моделювання НДС показує, що оброблювальний матеріал на внутрішній поверхні при переході з позаконтактної зони у контакт і при виході з неї у другу позаконтактну зону знаходиться в умовах всебічного об'ємного стискання, що узгоджується з результатами роботи [12]. Це підтверджується отриманими результатами гідростатичного тиску на внутрішній поверхні (рис. 4, а), які отримані моделюванням, та розрахунком зміни коефіцієнта жорсткості (рис. 4, б).

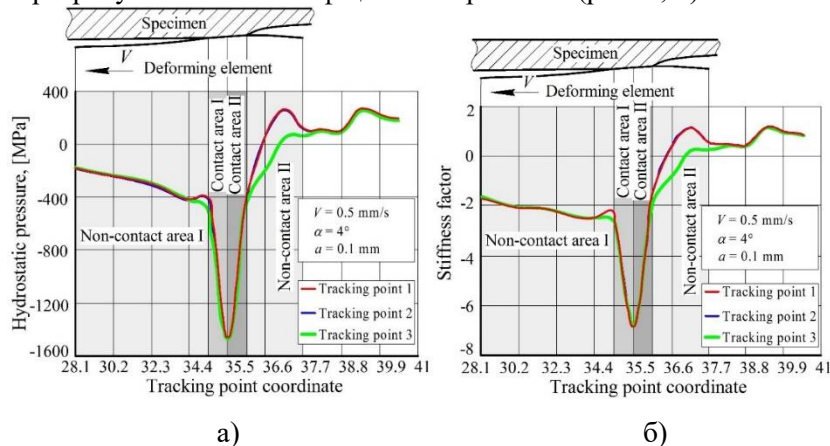


Рис. 4. Зміна гідростатичного тиску σ та коефіцієнта жорсткості напруженого стану η за координатою відстежуваних точок [12]

Останнім часом все більшого поширення набуває вивчення НДС під час виконання різних операцій саме за допомогою метода скінчених елементів у різних програмних продуктах. Про що свідчать велика кількість публікацій закордонними авторами у світових виданнях. Так, наприклад, ряд робіт [13, 14, 15, 16, 17] присвячених радіальному обтисканню трубних заготовок, операції яка має схожі риси з ДПР.

В роботі [13] досліджувалась течія матеріалів в сталевих трубних заготовках з різною товстостінністю при ротаційному обтисканні труб з осьовою подачею без оправки. Тобто реалізувався процес редукування трубної заготовки через штамп, який виконує періодичний радіальний обжим. Дослідження проводили у програмному забезпеченні ABAQUS на основі створеної в 2D осиметричній моделі кінцевих елементів. Процес має схожий характер з деформуючим протягуванням. Більш того, автори роботи виявили наявність зон локального пластичного деформування на виході і на виході із зони редукування (рис. 5). Вони зазначили, що деформація труби як зовнішньої так і внутрішньої поверхні залежить від товстостінності заготовки та коефіцієнта тертя.

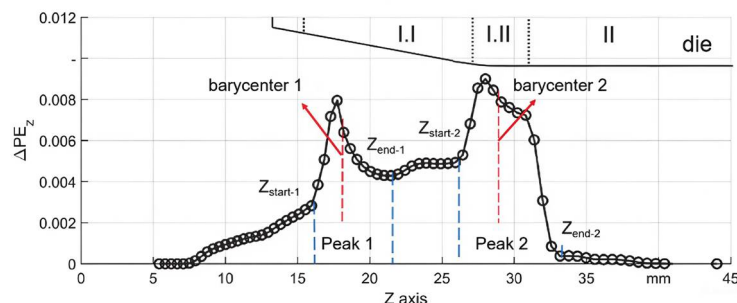


Рис. 5. Компонента пластичної деформації ΔPE_z [13]

Результати скінчено елементного аналізу зовнішнього обтискання труби без оправки проведеного у роботі [14] порівнювалися з експериментальними даними, і показали гарну відповідність. В ній автори рекомендують проводити операцію без оправки, особливо в тих випадках, коли внутрішня поверхні труби буде піддаватися послідовній обробці. Але при цьому слід звернути увагу, що осьові напруження розтягу на внутрішній поверхні труби можуть призвести

до утворення тріщин, при чому ймовірність виникнення тріщин у тонких трубах менша, ніж у товстих.

В цілому до недоліків робіт [13, 14, 15, 16, 17] по вивченню НДС при ротаційному обтисканні можна віднести те, що автори не звертають увагу на визначення схеми осередку деформації та її складових, тобто контактної ділянки та позаконтактних зон. Це не дає їм можливості в повному обсязі пояснити появу зон локального деформування та виявити ті технологічні фактори, які впливають на формоутворення заготовки та оптимізувати процес.

Що стосується деформацій, яку набуває заготовка після обробки ДПР, то О.О. Розенберг у роботі [1] наводить розрахункові залежності зміни розмірів отримані на основі експериментів при обробці деформуючим елементом з кутом $\alpha = 4^\circ$, які вказують на утонення стінки, збільшення зовнішнього діаметра та укорочення деталі після обробки.

Згодом у роботі [1] автори наводять результати досліджень, які свідчать про істотний вплив кута α на характер зміни розмірів, які виражаються у можливості подовження заготовки. Аналогічні результати були отримані і у роботах В.В. Кривошея [9], у яких при використанні кутів $\alpha > 6^\circ$, навіть при роздачі за схемою стиснення спостерігалось подовження заготовки, замість загально прийнятого укорочення.

Немировський Я.Б. розробив теоретичну модель осередку деформації при ДПР [5], яка дозволяє розрахувати інтегральні характеристики формозміни: e_r, e_φ, e_z і порівняв розрахункові значення з експериментальним. Порівняння показало, що модель може бути використана для визначення деформацій, але тільки при обробці деталей товстостінність яким менше критичної товщини стінки.

Також у роботі [5] наведені експериментальні дані по визначенню сумарної осьової деформації при обробці за схемою розтягнення та стиснення (рис. 6).

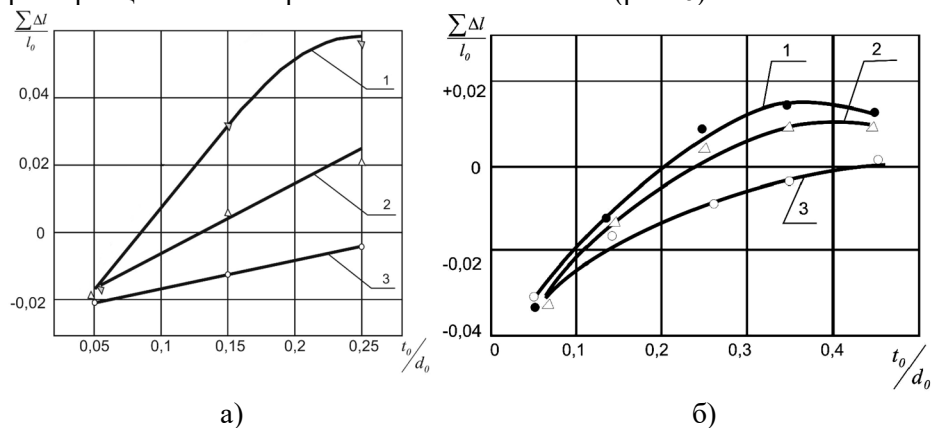


Рис. 6. Залежність осьової деформації від відносної товщини стінки: $d_0 = 40$ мм; $\frac{a}{d_0} = 0,025$; $\Sigma a/d_0 = 0,075$, кут α : 1 – 8° ; 2 – 4° ; 3 – 2° : а) за схемою розтягу, матеріал заготовки сталь 20; б) за схемою стиснення, матеріал сталь 12ХН3А [5]

Результати експериментів показують [5], що в залежності від товстостінності заготовки та кута нахилу твірної робочого конуса при обробці ДПР може утворюватися не тільки укорочення деталі, але і відсутність осьової деформації або наявність її подовження, причому при використанні схеми розтягу деформація може сягати 10% від вихідної довжини заготовки (рис. 6, а). Обробка за схемою стиснення також показує, що може утворюватися подовження, але з дещо меншою деформацією – 4% (рис. 6, б).

У роботі [15] присвяченій ротаційному обтисканню труб за допомогою методу скінченних елементів у програмі ABAQUS досліджували потік матеріалу вивчаючи історію компонентів пластичної деформації у різних напрямках. В результаті досліджень автори стверджують, що потік матеріалу можна контролювати через зміну умов тертя; найактивніші зони деформації знаходяться на початку і в кінці зони редукції, при чому в радіальному напрямку матеріал деформується нерівномірно.

Також розрахунок ділянок деформації в процесі радіального кування труби з використанням методу скінченних елементів проводився у роботі [16]. Під час аналізу результатів автори

використовують коефіцієнт неоднорідності деформації матеріалу (IF), який визначається співвідношенням:

$$IF = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{min}}{\varepsilon_{min}}$$

Надлишкова деформація може впливати на поведінку металу під час подальшого відпалу, впливаючи на кінетику рекристалізації, а також на кінцевий розмір зерна та текстуру. Неоднорідна мікроструктура призводить до неоднорідних фізичних та механічних властивостей готового виробу.

Автори [16] проводили дослідження з різними формами деформуючих матриць (рис. 7).

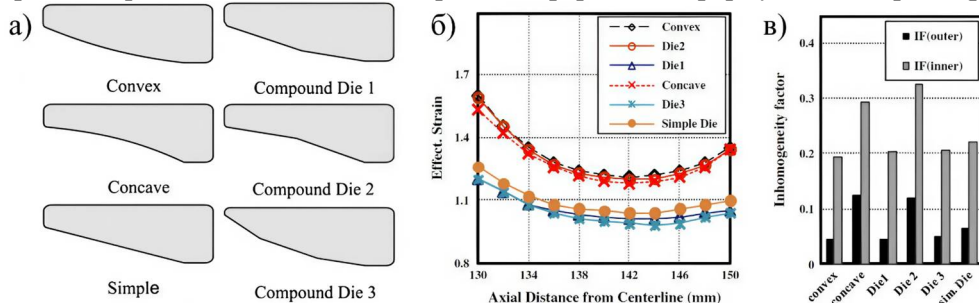


Рис. 7. Вплив форми матриці при радіальному куванні труби: а) форми матриць; б) розподіл деформації в радіальному напрямку; в) коефіцієнти неоднорідності [16]

На основі результатів (рис. 7) автори роблять висновок, що для досягнення продукту з мінімальною неоднорідністю деформації необхідно обирати опуклу форму або штамп з трьома похилими гранями. Найгірший варіант спостерігається при використанні матриць з увігнутою формою.

Отже, як видно у роботах присвячених деформуючому протягуванню залишаються відкритим питанням формоутворення обробленої заготовки після обробки. Складність математичного опису об'ємного процесу пластичного деформування товстостінних заготовок в даний час не дозволяє розробити теоретичну модель деформування. Тому для забезпечення єдності методологічного підходу і створення можливості для порівняльного аналізу у всьому діапазоні товстостінності зупинимось на дослідженні процесу деформування методом кінцевих елементів (МКЕ) з наступним аналізом результатів досліджень на феноменологічному рівні і побудові загальних аналітичних моделей. Це дозволить описати процес деформування і проаналізувати НДС деформованих заготовок. Як зазначалось в роботі [11] найбільш об'єктивно здійснювати моделювання НДС за допомогою програмного комплексу Deform при деформуванні оброблених заготовок в необхідних діапазонах натягу, геометрії інструменту та при варіюванні розмірів її поперечного перерізу.

Метою статті є дослідження можливості управління параметрами формоутворення при наскрізному деформуючому протягуванні деталей з пластичного матеріалу та отримання її розмірів з припуском під послідуєчу обробку шляхом вибору геометрії деформуючого елемента та режимів обробки.

Виклад основного матеріалу.

Методика проведення моделювання. Моделювання деформуючого протягування виконувались у програмі DEFORM 2D/3DTMV 11.0. Для визначення впливу натягу та кута забірного конуса було використано заготовку з наступними розмірами: внутрішній діаметр – $d_0 = 40$ мм, зовнішній діаметр – $D_0 = 56$ мм та довжина – $H = 100$ мм (рис. 8). Геометричні параметри інструменту (рис. 8): діаметр по стрічці дорна змінювався в межах від $d_0 + 0,25$ мм до $d_0 + 2,25$ мм з кроком 0,25 мм; кут нахилу твірної забірної конуса α приймалася: $2^\circ, 4^\circ, 6^\circ, 8^\circ$. Швидкість переміщення деформуючого елемента була не змінною і дорівнювала 0,5 мм/с.

У дослідженнях було використано сталь DIN 14NiCr14 з бібліотеки матеріалів DEFORM.

Результати досліджень. Перша група дослідів проводилася зі зміною діаметра деформуючого елемента, тобто натягу. Під час розрахунків було отримано графіки переміщення двох точок у радіальному напрямку, одна з яких розташовувалась посередині втулки на внутрішній стороні, а друга – на зовнішній (рис.8). Після виходу інструменту з втулки було побудовано графіки залежності зміщення точок в радіальному та осьовому напрямках (рис. 9).

З графіку зміщення точок в радіальному напрямку (рис. 9, а) видно, що залежність є майже лінійною. При необхідності отримання після обробки деталі певний зовнішній діаметр слід обрати, відповідний по графіку, натяг

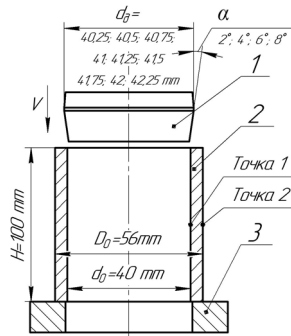


Рис. 8. Схема обробки деформуючим протягуванням:
1 – деформуючий елемент; 2 – втулка; 3 – основа

Більш цікавим є графік зміщення точок в осьовому напрямку (рис. 9, б), з якого слідує що при обробці заготовки з дуже малими натягами (приблизно до 0,3 мм) відбувається незначне укорочення деталі. При подальшому збільшенні натягу (приблизно від 0,3 до 1,3 мм) відстежувані точки починають зміщатися у додатному напрямку, тобто довжина вихідної деталі починає збільшуватися. З подальшим нарощуванням натягу – вихідна висота втулки зменшується.

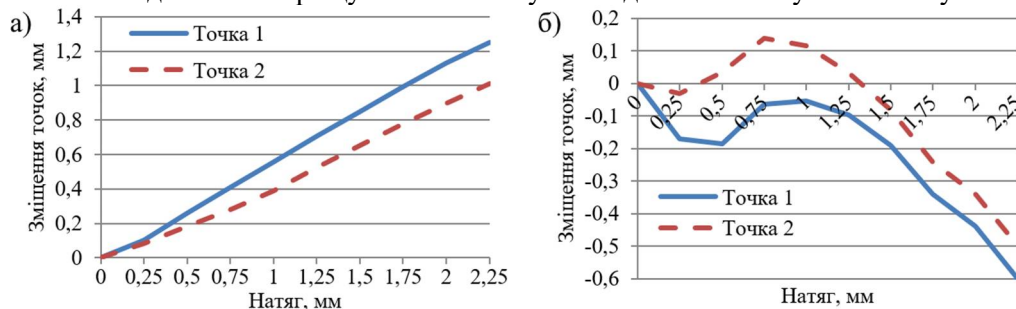


Рис. 9. Отримані результати залежності зміщення точок 1 та 2 від величини натягу: а) у радіальному напрямку, б) в осьовому напрямку

Як було вище сказано другим ваговим фактором, який впливає на вихідні розміри втулки є кут нахилу твірної забірного конуса інструменту. Тому у другому етапі було проведено дослідження впливу кута α при трьох різних натягах (0,75; 1,25; 1,75 мм) результати зміщення точок в радіальному напрямку представлені на рисунку 10 та в осьовому напрямку на рисунку 11.

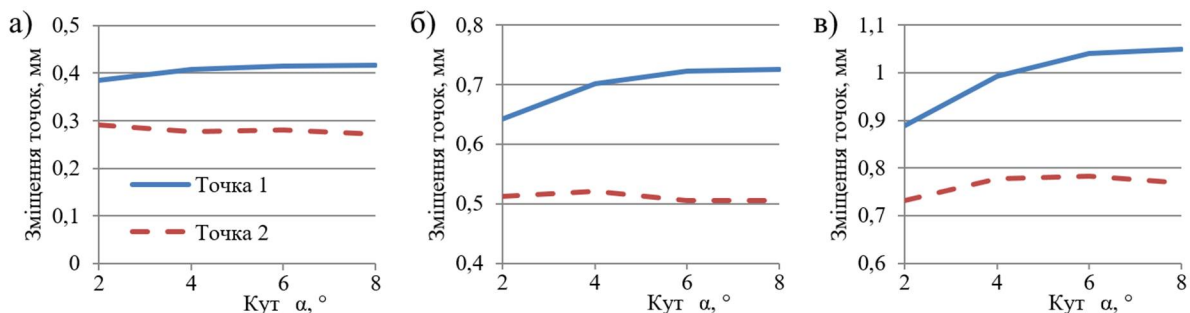


Рис. 10. Результати залежності зміщення точок 1 та 2 у радіальному напрямку від величини половини кута забірного конуса:
а) при натягу 0,75 мм, б) при натягу 1,25 мм, в) при натягу 1,75 мм

Отримані результати показали, що кут нахилу твірної забірного конуса має незначний вплив на зміщення точки на зовнішній поверхні втулки в радіальному напрямку. Що стосується зміщення точки на внутрішній поверхні, результати свідчать про те, що кут має не значний вплив на зміщення точки при малих натягах і набуває більш вагового впливу на більших натягах (рис. 10).

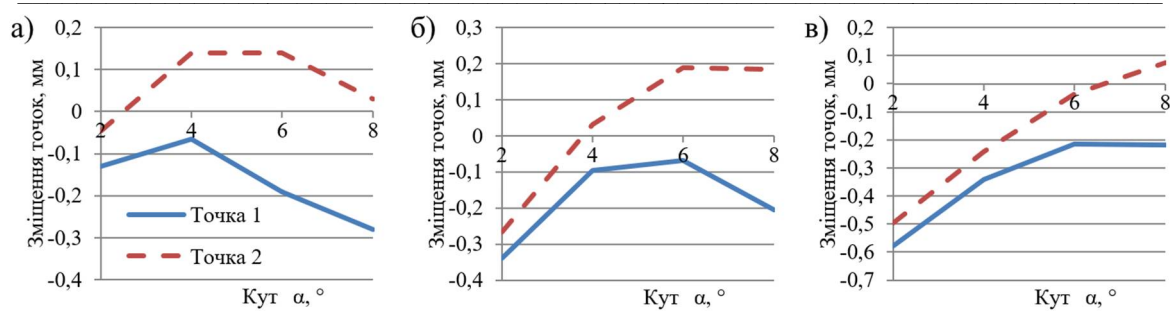


Рис. 11. Результати залежності зміщення точок 1 та 2 в осьовому напрямку від величини половини кута забірної конуса:
а) при натягу 0,75 мм, б) при натягу 1,25 мм, в) при натягу 1,75 мм

Результати зміщення точок в осьовому напрямку (рис. 11) показують, що кут нахилу твірної забірної конуса може суттєво впливати на зміщення точок. В поєднанні з натягом можливо отримувати як укорочення довжини втулки, так і її подовження.

Висновки. Аналіз літературних джерел показав, що відновлення зношених деталей деформуючим протягуванням є перспективним процесом обробки, але для повноцінного впровадження у виробництво залишається невирішеним питання формоутворення вихідної деталі, особливо це стосується тих умов обробки, при яких контактні напруження перевищують критичні. Виконане моделювання процесу ДПР методом скінчених елементів підтвердило результати експериментів проведених раніше іншими авторами та дозволило уточнити їх на предмет вибору оптимальної геометрії та режиму обробки, це дало можливість не тільки збільшувати зовнішній діаметр заготовки, але і її довжину, а також показало, що в залежності від геометрії деформуючого елемента та режимів обробки можливо отримувати не тільки перерозподілення матеріалу в зношені ділянки по зовнішній поверхні але і осьовому напрямку. Для повноцінного впровадження процесу ДПР у виробництво в подальшому планується більш глибоке дослідження напружено деформованого стану в осередку деформації з метою виявлення всіх факторів, які впливають на формоутворення.

Список використаних джерел:

1. Розенберг О.М. Механіка пластичного деформування в процесах різання та деформуючого протягування : монографія / О.М. Розенберг, О.О. Розенберг. – К. : Наук. думка, 1991. – 320 с.
2. Інженерія деталей, оброблених протягуванням : монографія / Е.К. Посвятенко, Я.Б. Немировський, С.Є. Шейкін, І.В. Шепеленко, О.В. Чернявський. – Кропивницький : Видавець Лисенко В.Ф., 2021. – 466 с.
3. Nemyrovskiy, Y. Technical- Economical aspects of the use of technological process of deforming broaching / Y. Nemyrovskiy, E. Posvyatenko, S. Sardak // InDesign, Simulation, Manufacturing: TheInnovation Exchange. Cham: SpringerInternationalPublishing. – 2019. – P. 238-247.
4. Немировський, Я.Б. Особливості розрахунку геометричних, кінематичних параметрів осередку деформації при деформуючому протягуванні / Я.Б. Немировський // Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – 2013. Вип. 26. – С. 100-111.
5. Немировський Я.Б. Наукові основи забезпечення точності при деформуючому протягуванні : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. : 05.02.08 / Я.Б. Немировський. – Київ, 2018. – 40 с.
6. Issues about limit plastic deformations of deforming broaching of cast iron parts / Y. Nemyrovskyy, O. Chernyavskyy, P. Yeryomin, Y. Tsekhanov // Вісник ТНТУ, – Т. : ТНТУ, 2016. – Том 81. – № 1. – С. 88-97.
7. Закономірності локального деформаційного зміцнення трубчастих виробів з конструкційних сталей при формоутворенні пазів холодним пластичним деформуванням / С.Є. Шейкін, С.Ф. Студенець, І.Ю. Ростоцький та ін. // Технічна інженерія. 2024. – 1(93): – С. 96–104.

8. Грушко А.В. Визначення наклепу при деформуючому протягування товстостінних труб / А.В. Грушко // Науковий Вісник ДДМА. – 2014. – № 2(14Е). – С. 18-26.
9. Krivosheya S.M. Influence of the deformation angle on drawing of cylindrical holes: monograph / S.M. Krivosheya. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015. – 136 p.
10. Немировський Я.Б. Відновлення поршневих пальців на основі деформуючого протягування / Я.Б. Немировський, Л.І. Деревець // Механізація та електрифікація сільського господарства : міжвідом. темат. наук. зб. НА-АН, Нац. наук. центр «Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва». – Гле-ваха: ННЦ «ІМЕСГ». – 2003. – Вип. 87. – С. 269–278.
11. Шепеленко І.В. Наукові основи технології нанесення антифрикційних покриттів з використанням пластичного деформування : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. : 05.02.08 / І.В. Шепеленко. – Київ, 2021. – 45 с.
12. Plasticity resource of cast iron at deforming broaching / Y. Nemyrovskiy, I. Shepelenko, M. Storchak // Metals. – 2023. – №13(3):551. – 19 p. [Electronic resource]. – Access mode : <https://doi.org/10.3390/met13030551>
13. Material Flow in Infeed Rotary Swaging of Tubes / Y. Liu, J. Liu, M. Herrmann and other // Materials. – 2021. №14(1):58. – 18 p. [Electronic resource]. – Access mode : <https://doi.org/10.3390/ma14010058>
14. Ghaei A. Finite element modelling simulation of radial forging of tubes without mandrel / A. Ghaei, M.R. Movahhedy, A. Karimi Taheri // Materials & Design. – 2008. – № 29. – P. 867–872.
15. Plastic deformation components in mandrel free infeed rotary swaging of tubes / Y. Liu, M. Herrmann, C. Schenck and other // Procedia Manufacturing. – 2019. – №27. – P. 33-38.
16. Determination of strain field and heterogeneity in radial forging of tube using finite element method and microhardness test / M. Sanjari, P. Saidi, A. Karimi Taheri and other // Materials & Design. – 2012. – №38. – P. 147-153.
17. Upper bound analysis of axial metal flow inhomogeneity in radial forging process / Wu. Yunjian, Xianghuai Dong, Yu. Qiong // International Journal of Mechanical Sciences. – 2015. – №93. – P. 102-110.

Рецензент Шепеленко Ігор Віталійович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри експлуатації та ремонту машин Центральноукраїнського національного технічного університету.

Ю.В. Муравинець, В.В. Балака, Е.Ю. Гонта

Луцький національний технічний університет

**АНАЛІЗ РЕСУРСНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТОВУВАНИХ
ГІДРОАБРАЗИВНИХ МАШИН**

У статті проведено аналіз ресурсних особливостей гідроабразивних машин, які широко використовуються в сучасній промисловості для обробки різноманітних матеріалів. Розглянуто ключові фактори, що впливають на термін служби основних компонентів обладнання, такі як тиск води, витрата абразивного матеріалу, якість води та абразиву, а також інтенсивність експлуатації. Визначено основні вузли, що піддаються найбільшому зносу, та запропоновано шляхи оптимізації їхнього ресурсу для підвищення ефективності та економічності технологічного процесу. Ця розширена анотація присвячена глибокому аналізу ресурсних особливостей гідроабразивних машин, які набувають все більшого поширення в різних галузях промисловості завдяки своїй універсальності та здатності обробляти широкий спектр матеріалів. Дослідження охоплює ключові аспекти, пов'язані з ефективністю використання ресурсів, оптимізацією експлуатаційних витрат та впливом на навколишнє середовище.

Ключові слова: гідроабразивна обробка, ресурс обладнання, знос, тиск води, абразивний матеріал, оптимізація, ефективність.

Y.V. Muravinets, V.V. Balaka, E.Y. Honta

**ANALYSIS OF RESOURCE CHARACTERISTICS OF USED HYDROABRASIVE
MACHINES**

The article analyzes the resource features of hydroabrasive machines, which are widely used in modern industry for processing various materials. The key factors affecting the service life of the main components of the equipment, such as water pressure, consumption of abrasive material, quality of water and abrasive, as well as the intensity of operation, are considered. The main nodes subject to the greatest wear and tear are identified, and ways to optimize their resource to increase the efficiency and economy of the technological process are proposed. This extended abstract is devoted to an in-depth analysis of the resource characteristics of water-abrasive machines, which are becoming more and more common in various industries due to their versatility and ability to process a wide range of materials. The study covers key aspects related to resource efficiency, operating cost optimization and environmental impact.

Key words: hydroabrasive treatment, equipment resource, wear, water pressure, abrasive material, optimization, efficiency.

Introduction. Water-abrasive cutting technology (AWG) has gained significant popularity in various industries due to its versatility, ability to process a wide range of materials without thermal effects, and high precision. However, the effective operation of hydroabrasive machines depends on understanding and managing their resource characteristics.

A water-abrasive machine consists of several key components, each of which is subject to wear and tear during operation. The main ones are: a high-pressure pump, it creates a flow of water under high pressure, which is necessary for the formation of a cutting jet. The resource of the pump depends on the working pressure, water quality, intensity of operation and regularity of maintenance. The resource of the pump depends on the working pressure, water quality, intensity of operation and regularity of maintenance. High pressure leads to faster wear of seals, valves and other internal elements. The mixing head (nozzle) mixes a high-speed jet of water with an abrasive material. The nozzle and mixing chamber are subject to the greatest wear.

The nozzle is made of hard materials such as sapphire or diamond. Nozzle wear occurs due to the abrasive effect of particles, erosion and cavitation. An increase in the diameter of the nozzle leads to a decrease in cutting accuracy and an increase in water consumption [1]. The mixing chamber is usually made of tungsten carbide or other wear-resistant materials.

Wear occurs due to the intense abrasive effect of particles moving at high speed. An increase in the internal diameter or the appearance of internal defects leads to the dispersion of the jet and a decrease in its cutting ability. The abrasive material supply system provides a dosed supply of abrasive to the mixing head. The wear of the elements of this system (dosers, hoses) depends on the type and fraction of the abrasive, as well as on the intensity of supply.

The water transportation and purification system ensures the supply of clean water to the high-pressure pump and the removal of the spent mixture. Water quality (presence of solid particles, chemical composition) significantly affects the resource of the pump and other elements of the system.

The life of the listed components is affected by the following main factors: water pressure, higher pressure provides a higher jet speed and more intensive processing, but at the same time leads to faster wear of the pump and elements of the mixing head. Abrasive material consumption, increasing the abrasive flow increases the cutting performance, but also increases the abrasive wear of the nozzle and the mixing chamber. Water quality, the presence of solid particles in the water can lead to abrasive wear of the pump and nozzle.

The chemical composition of water can cause corrosion of metal elements. The quality of abrasive material, hardness, shape and fraction of abrasive particles affect the intensity of wear of the mixing head. Contaminated or poor-quality abrasive can lead to clogging of the nozzle and damage to other elements of the system.

The intensity of operation, duration and frequency of use of the machine directly affect the total resource of its components. Regularity and quality of technical maintenance, timely replacement of worn parts, cleaning of filters, checking the tightness of connections and other preventive measures significantly extend the service life of the equipment.

Setting the task. Analysis of wear of the main nodes and assessment of their resource. The most critical resources are the nozzle and the mixing chamber. Their wear directly affects the quality of the cut (width, accuracy, roughness) and productivity.

The wear of the nozzle is manifested in an increase in its diameter and a change in the shape of the outlet opening. This leads to an expansion of the jet, a decrease in its energy and a deterioration in the quality of the cut. The resource of the nozzle depends on the material of manufacture, working pressure and water quality.

Sapphire nozzles usually have a shorter life compared to diamond nozzles. Wear of the mixing chamber is manifested in an increase in the internal diameter, the appearance of erosion potholes and other defects on the internal surface. This leads to dispersion of the abrasive-water jet, reducing its coherence and cutting ability.

The resource of the mixing chamber depends on the material, consumption and quality of the abrasive, as well as on the speed of the jet. Estimating the service life of these components is a difficult task, as it depends on many operational factors. Equipment manufacturers often provide approximate life values, but actual life can vary greatly.

For a more accurate assessment, it is necessary to regularly monitor the condition of the components, measure the diameter of the nozzle, control the inner surface of the mixing chamber and analyze the quality of the cut. The resource of the high-pressure pump is also an important parameter that affects the overall performance of the machine. Wear of seals and valves leads to loss of pressure and reduced efficiency. Regular maintenance and the use of quality water are key factors in extending the life of the pump.

Results and their discussion. To increase the efficiency and economy of hydroabrasive technology, it is necessary to take measures to optimize the resource of the equipment used. The main ways include: selection of optimal cutting modes: Selection of water pressure and abrasive consumption in accordance with the type and thickness of the processed material allows to reduce the load on the machine components and reduce their wear.

Use of high-quality consumables: the use of clean water with an appropriate filtration system and high-quality abrasive material with an optimal fraction significantly reduces abrasive wear. Regular and high-quality maintenance: timely replacement of worn parts (seals, filters, nozzles, mixing chambers), cleaning of the system and control of operating parameters ensure stable operation of the equipment and extend its service life [2].

Equipment condition monitoring, regular visual inspection, measurement of key parameters (pressure, flow rate, nozzle size), as well as analysis of the quality of the cut make it possible to timely detect signs of wear and carry out necessary repairs. Implementation of automatic control and diagnostics systems modern hydroabrasive machines can be equipped with systems that monitor the state of key components in real time and warn of possible malfunctions.

Training and qualification of personnel, correct operation of equipment and timely detection of problems by operators is an important factor to ensure long-term and efficient operation of the machine.

Conclusions. Analysis of the resource characteristics of water-abrasive machines is important to ensure the efficient and economically beneficial operation of this technology.

The life of the main components of the equipment depends on many factors, including the operating pressure, the consumption and quality of the abrasive, the quality of the water, the intensity of operation and the quality of maintenance. Optimizing the resource of hydroabrasive machines is achieved by choosing the optimal cutting modes, using high-quality consumables, regular maintenance, monitoring the condition of the equipment, and implementing modern control and diagnostic systems.

Further research can be directed to the development of new wear-resistant materials for key components of hydroabrasive machines and improvement of methods for diagnosing their condition. Hydroabrasive machines are a powerful and versatile tool for processing a wide range of materials. Their key advantages include the high quality of the cut, the absence of thermal effects, economic use of the material and environmental friendliness.

Despite some limitations, the continuous development of the technology makes waterjet cutting more and more attractive for various industries where precise, high-quality and flexible processing of materials is required. To achieve maximum efficiency, it is necessary to take into account specific production requirements, correctly select equipment and consumables, as well as ensure proper maintenance of machines.

LIST OF USED SOURCES

1. Salenko O. F. etc. Hydro- and hydroabrasive processing: theory, technology and equipment: education. manual for students higher closing education Kyiv: Institute of Teaching Content and Methods, National technical Kyiv Polytechnic University of Ukraine, 2003.
2. Orlovsky B.V., Abrinova N. WITH. Technological equipment of the industry. Kyiv: KNUTD, 2013.

С.В. Луньов¹, П.Ф. Назарчук¹, О.В. Бурбан²КІНЕТИКА ВІДПАЛУ РАДІАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ В ОПРОМІНЕНОМУ
ЕЛЕКТРОНАМИ n-GeЛуцький національний технічний університет¹Волинський фаховий коледж Національного університету харчових технологій²

Одержано кінетичні рівняння для опису ізотермічного відпалу опромінених електронами з енергією 10 MeV та потоком $\Phi=5\cdot10^{15}$ ел./см² монокристалів германію, легованих домішкою сурми, концентрацією $N_d=5\cdot10^{14}$ см⁻³. На основі одержаних експериментальних результатів температурної залежності коефіцієнта Холла та обчислених значень концентрації утворених при опроміненні та відпалі комплексів VO_iI_{2Ge} в монокристалах германію визначено енергію активації відпалу для даних комплексів та областей розвпорядкування. З одержаних результатів слідує, що ядра областей розвпорядкування є менш термічно стійкими, ніж комплекси VO_iI_{2Ge} .

Ключові слова: монокристали германію, електронне опромінення, ізотермічний відпал, кінетика відпалу, енергія активації відпалу.

S.V. Luniov, P.F. Nazarchuk, O.V. Burban

KINETICS OF ANNEALING OF RADIATION DEFECTS IN ELECTRON-IRRADIATED
n-Ge

The kinetic equations for describing the isothermal annealing of germanium single crystals, doped by the antimony impurity with the concentration of $N_d=5\cdot10^{14}$ cm⁻³, irradiated by the electrons with the energy of 10 MeV and a flow of $\Omega=5\cdot10^{15}$ el/cm², were obtained. The annealing activation energy for complexes and disordered regions based on the experimental results of the temperature dependence of the Hall coefficient and the calculated concentration values of the VO_iI_{2Ge} complexes, created during irradiation and annealing in germanium single crystals, was determined. The results show that the cores of the disordered regions are less thermally stable than the VO_iI_{2Ge} complexes.

Keywords: germanium single crystals, electron irradiation, isothermal annealing, annealing kinetics, annealing activation energy.

Statement of the problem. Penetrating radiation makes it possible to control the electrical parameters of semiconductor materials and optimize the production technology of semiconductor devices and microcircuits made on their basis [1-4]. This is due to the growing demand for semiconductor integrated circuits, the complexity of semiconductor technologies, and the reduction in the geometric dimensions of the active regions of semiconductor structures. In addition, due to the rapid development of space technology, there is considerable interest in studying the radiation-stimulated degradation of semiconductors and integrated circuits and determining the levels of radiation resistance of the element base of spacecraft electronics [5-8]. The performance of spacecraft equipment is affected by the ionizing radiation of outer space (high-energy electrons, protons, heavy element ions). The effect of radiation on the elements of the spacecraft's on board equipment leads to their failure due to degradation processes in semiconductors, which is associated with the accumulation of the absorbed dose and radiation effects [9-13].

To reduce the concentration of radiation defects and ensure the stability of the electrical parameters of semiconductors, special thermal annealing is performed, which leads to the formation of other types of thermally stable and, accordingly, time-stable defects [14-16]. In work [14], the creation and annealing of defects in germanium irradiated by different proton flows with the energy of 15 MeV at 300 K by positron annihilation spectroscopy are investigated. Two characteristic temperature stages of isochoric annealing were identified. The first stage from 400 to 500 K is associated with the annealing of vacancy complexes. At 420 K, vacancy clusters consisting of two vacancies began to appear. Further, an increase in the annealing temperature to 520 K leads to forming clusters of approximately three vacancies. The second stage of annealing occurs in the temperature range of 550–650 K, which is associated with the annealing of vacancy clusters. To describe the results of positron lifetime measurements, a model of negative-type positron traps was used. According to this model, these defects anneal in the temperature range of 500–600 K. The determined average lifetime of positrons after annealing at 740 K was almost the same as that for unirradiated germanium. In [15], studies of the annealing of proton-irradiated germanium in the temperature range of 35–300 K reveal two stages. The first at 100 K is associated with the annealing of Frenkel pairs, and the second at 200 K is associated with the annealing of monovacancies. At annealing temperatures above 200 K, mobile neutral monovacancies merged into divacancies. In [16], it was found that in fluorine-implanted germanium, fluorine enriches the germanium matrix with various vacancy-like clusters, the structure of which depends on the annealing temperature. It was found that low concentrations of fluorine

saturate the Ge matrix with high concentrations of divacancy complexes, which are effectively annealed. High concentrations of fluorine stabilize monovacancy-like complexes, which are thermally stable even after high-temperature annealing. When conducting such studies, it is important to have information about the annealing activation energy and the frequency of jumps of radiation defects to the drain. The use of these parameters will allow estimating the time of stable operation of electronic equipment of spacecraft, atomic and nuclear power, which may contain elements made based on irradiated and additionally heat-treated material. At the same time, the construction of mathematical models of radiation defect annealing will provide scientific and methodological recommendations to engineers and scientists working in the field of radiation technologies of semiconductors, regarding the creation of radiation-resistant semiconductor devices and sensors with predetermined properties.

Setting tasks. Obtaining kinetic equations for isothermal annealing of radiation defects in n-Ge single crystals, irradiated by the electrons with the energy of 10 MeV and determining the annealing activation energy for the created defects.

Presentation of the main material. We developed a mathematical model of isothermal annealing kinetics for single crystals of germanium, doped by the antimony, with the concentration of $N_d = 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, irradiated by the electrons with the energy of 10 MeV and a flow of $\Omega = 5 \cdot 10^{15} \text{ el./cm}^2$. In work [17], studies of isothermal annealing processes were carried out for the same electron-irradiated n-Ge single crystals. It was established based on measurements of the Hall effect and solutions of the electroneutrality equation that under given conditions of electron irradiation, both simple defects ($\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ complexes) and complex defects (disorder regions) are formed in germanium single crystals. Moreover, the energy spectrum of radiation defects for n-Ge samples did not change after annealing. From the analysis of the temperature dependence of the Hall coefficient and the calculated values of the concentration of $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ complexes formed during irradiation and annealing in germanium single crystals, it was concluded that the processes of both annealing and generation of $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ complexes co-occur. The generation of these complexes is associated with the annealing of disordered regions, which have lower annealing activation energy. Therefore, the different mutual contributions of the annealing processes and the generation of the formed radiation defects explain the normal and anomalous annealing obtained in this work. Calculations of the annealing activation energy and frequency factor for $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ complexes and disordered regions, the results of measurements of the temperature dependences of the Hall constant for such n-Ge single crystals after annealing at $T_1 = 433 \text{ K}$ and $T_2 = 448 \text{ K}$ and the concentration values of $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ complexes for given annealing temperatures were used. The dependences of the concentration of $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ complexes on the isothermal annealing time are presented in Fig. 1.

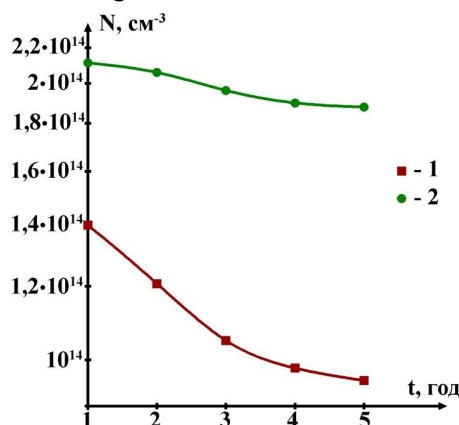


Fig. 1. Dependencies of the concentration of $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ complexes on the time of isothermal annealing for n-Ge single crystals, irradiated by the electrons with an energy of 10 MeV and a flow of $\Omega = 5 \cdot 10^{15} \text{ el./cm}^2$ at different isothermal annealing temperatures $T, \text{ K}$: 1 – 448, 2 – 433.

The nonlinear nature of the dependences of the concentration of these complexes on the annealing time, obtained on a semi-logarithmic scale, indicates that the annealing kinetics of the formed defects cannot be described by an exponential law, which is characteristic only for the annealing of defects of the same type:

$$N = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (1)$$

where N – is the defect concentration after annealing, N_0 – is the defect concentration before annealing, t – is the annealing time, τ – is the average defect lifetime.

For the case of parallel annealing processes of $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ complexes and nuclei of disordered regions in the studied n-Ge single crystals, the following system of equations can be written:

$$\begin{cases} \frac{dN_A}{dt} = \frac{N_V}{\tau_1} - \frac{N_A}{\tau_2}, \\ \frac{dN_V}{dt} = \frac{N_V}{\tau_1} + \frac{N_A}{\tau_2}. \end{cases} \quad (2)$$

where N_A , N_V – concentrations of $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ complexes and vacancies at an arbitrary point in time, τ_1 , and τ_2 are the average lifetimes of the vacancy and $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ complex, respectively.

From the solution of system (2) we obtain that

$$N_A(t) = -\frac{N_0(k_2\tau_1 + \frac{\tau_1}{\tau_2})}{\tau_1(k_1 - k_2)} e^{k_1 t} + \frac{N_0(k_1\tau_1 + \frac{\tau_1}{\tau_2})}{\tau_1(k_1 - k_2)} e^{k_2 t}, \quad (3)$$

$$\text{where } k_1 = \frac{-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} - 1\right) + \sqrt{\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} - 1\right)^2 + \frac{8\tau_1}{\tau_2}}}{2\tau_1}, \quad k_2 = \frac{-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} - 1\right) - \sqrt{\left(\frac{\tau_1}{\tau_2} - 1\right)^2 + \frac{8\tau_1}{\tau_2}}}{2\tau_1}.$$

To find the times τ_1 and τ_2 , we write equation (3) for two different isothermal annealing times t_1 and t_2 . As a result, we obtain a system of equations:

$$\begin{cases} N_A(t_1) = -\frac{N_0(k_2\tau_1 + \frac{\tau_1}{\tau_2})}{\tau_1(k_1 - k_2)} e^{k_1 t_1} + \frac{N_0(k_1\tau_1 + \frac{\tau_1}{\tau_2})}{\tau_1(k_1 - k_2)} e^{k_2 t_1}, \\ N_A(t_2) = -\frac{N_0(k_2\tau_1 + \frac{\tau_1}{\tau_2})}{\tau_1(k_1 - k_2)} e^{k_1 t_2} + \frac{N_0(k_1\tau_1 + \frac{\tau_1}{\tau_2})}{\tau_1(k_1 - k_2)} e^{k_2 t_2}. \end{cases} \quad (4)$$

To perform such calculations, the experimental results of annealing at temperatures $T_1=433$ K and $T_2=448$ K were used, fig. 1. To find the activation energy of annealing of the formed radiation defects, we write down the expressions for the average lifetime of the $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ complex and vacancies at two different annealing temperatures T_1 and T_2 [18]:

$$\tau_1(T_1) = \frac{1}{\nu_1} e^{\frac{E_{a1}}{kT_1}}, \quad \tau_1(T_2) = \frac{1}{\nu_1} e^{\frac{E_{a1}}{kT_2}}, \quad (5)$$

$$\tau_2(T_1) = \frac{1}{\nu_2} e^{\frac{E_{a2}}{kT_1}}, \quad \tau_2(T_2) = \frac{1}{\nu_2} e^{\frac{E_{a2}}{kT_2}}. \quad (6)$$

From the solutions of equations (5) and (6), we obtain that $E_{a1} = 0,92$ eV is the activation energy of the annealing of the disordered region and $E_{a2} = 1,04$ eV is the activation energy of the annealing of the $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ complex, $\nu_1 = 2,52 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ and $\nu_2 = 1,07 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$ are the frequency factors for the vacancy and the $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ complex, respectively.

Conclusions. The proposed theoretical model of annealing, considering the found activation energies of annealing and frequency factors for these defects, well describes the annealing kinetics, which was experimentally revealed in [17]. According to the data of [19], the annealing of VO_i complexes in germanium after γ -irradiation occurred in the temperature range of 383-403 K. The obtained values of the activation energy of annealing for this defect and the frequency factor turned out to be equal to 0,94 eV and $4 \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$, respectively. In our case, the activation energy of annealing of the $\text{VO}_i\text{I}_{2\text{Ge}}$ complex is equal to 1,04 eV, which indicates its greater thermal stability. The obtained kinetic equations of isothermal annealing and its found parameters allow us to predict the stability over time of operation of electronic elements made based on germanium, which is additionally subjected to radiation and heat treatment.

References:

1. A Review of Semiconductor Based Ionising Radiation Sensors Used in Harsh Radiation Environments and Their Applications / A. Karmakar et al. Radiation. 2021. Vol. 1, no. 3. P. 194–217.
2. Iniewski K. Semiconductor Radiation Detection Systems. Taylor & Francis Group, 2018. 400 p.
3. Owens A. Semiconductor radiation detectors. CRC Press, 2019.
4. Anjankar S., Dhavse R. Radiation Sensor Design for Mitigation of Total Ionizing Dose Effects. In Advances in VLSI and Embedded Systems: Select Proceedings of AVES 2021, 2022. P. 267–279.
5. Anjankar S. C., Dhavse R. Design and Optimization of MOS Capacitor based Radiation Sensor for Space Applications. 2024. Vol. 49, no. 5. P. 7013–7028.
6. Radiation Resistance of a Spacecraft Coating Obtained by 3D Printing / M. M. Mikhailov et al. Cosmic Research. 2024. Vol. 62, no. 3. P. 242–246.
7. Advancements in radiation resistance and reinforcement strategies of perovskite solar cells in space applications / Z. Huan et al. Journal of Materials Chemistry A. 2024. Vol. 12, no. 4. P. 1910–1922.
8. Nazarenko A. A., Maksimov I. A., Kochura S. G. Possibility of unification of requirements for radiation resistance for spacecraft with different operating conditions. Siberian Aerospace Journal. 2023. Vol. 24, no. 1. P. 126–135.
9. Iniewski K. Radiation effects in semiconductors. CRC press, 2018.
10. Luniov S., Nazarchuk P., Maslyuk V. Tensoelectrical Properties of Electron-Irradiated N-Si Single Crystals. 3. 2021. No. 3. P. 37–42.
11. Mechanisms of Electron Scattering in Uniaxially Deformed Silicon Single Crystals with Radiation Defects / S. V. Luniov et al. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. 2019. Vol. 56, no. 5. P. 45–57.
12. Tensoelectric properties irradiated by the fast electrons n-Ge single crystals / S. V. Luniov et al. Radiation Effects and Defects in Solids. 2023. Vol. 178, no. 9-10. P. 1073–1080.
13. Gaidar G. P. Influence of Impurity Complexes on the Electrophysical Properties of Germanium. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2024. Vol. 60, no. 6. P. 844–850.
14. Formation and annealing of vacancy-P complexes in proton-irradiated germanium / M. Elsayed et al. Acta Materialia. 2015. Vol. 100. P. 1–10.
15. Direct observations of the vacancy and its annealing in germanium / J. Slotte et al. Phys. Rev. B. 2011. Vol. 83, no. 23. P. 235212.
16. Defect complexes in fluorine-implanted germanium / D. J. Sprouster et al. Journal of Physics D: Applied Physics. 2013. Vol. 46, no. 50. P. 505310.
17. Features of Radiation-Defect Annealing in n-Ge Single Crystals Irradiated with High-Energy Electrons / S. V. Luniov et al. Ukrainian Journal of Physics. 2019. Vol. 64, no. 2. P. 151–156.
18. Influence of irradiation and annealing on the thermal stability of radiation defects in silicon / M. D. Varentsov et al. Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki. 2010.
19. Litvinov V. V., Urenov V., Shershel V. A. Energy level and A center annealing in germanium.[Gamma radiation]. Fiz. Tekh. Poluprovodn. 1983. Vol. 17, no. 9. P. 1623–1626.

Рецензент: Федосов С. А., д.ф.-м.н., професор, професор кафедри фізики та вищої математики Луцького національного технічного університету.

В.О. Онукевич, Б.М. Зельман, М.І. Пилипчук, М.Р. Бурдяк

Національний лісотехнічний університет України

НАПРЯМИ ДОСЛІДЖЕННЯ ОРТОГОНАЛЬНИХ КРУГЛОПИЛКОВИХ ВЕРСТАТІВ

Визначено напрями дослідження ортогональних круглопилкових верстатів. Розглянуто вплив низки чинників на точність пиляння горизонтальною пилкою: системи базування заготівки, способу кріплення пилки та особливостей процесу пиляння. Встановлено потребу у ґрунтовних наукових дослідженнях впливу вищенаведених чинників на точність пиляння.

Ключові слова: ортогональний круглопилковий верстат, точність пиляння, кругла пилка.

V. Onukevych, B. Zelman, M. Pylypchuk, M. Burdiak

DIRECTIONS FOR IMPROVING THE DESIGNS OF PLANER MACHINES

The analysis of research directions on orthogonal circular sawmills is provided. The impact on cutting precision by a horizontal saw is considered: log base system, saw attachment method, and cutting process specifics. The need for thorough scientific research on the influence of these factors on cutting precision is established.

Keywords: orthogonal circular sawmill, cutting precision, circular saw.

Актуальність теми дослідження. З плином часу завдання раціонального використання лісових ресурсів стає все актуальнішим, як в Україні так і закордоном. Одним із шляхів виконання цього завдання є вдосконалення сучасних конструкцій лісопилального устаткування для забезпечення високоточного оброблення деревини з отриманням мінімального обсягу відходів [1, 2].

Ортогональні круглопилкові верстати (рис.1) є сучасним лісопилальним устаткуванням, яке призначене для якісного розпилювання колод на обрізні пиломатеріали заданих розмірів. Основною перевагою ортогональних круглопилкових верстатів є наявність круглих пилок, які завдяки порівняно високій жорсткості диска і зносостійкості пластин твердого сплаву мають більший період тривкості до затуплення зубців та забезпечують вищу точність пиляння [3, 4].



Рис. 1. Загальний вигляд ортогонального круглопилкового верстата марки ТТРР 450-550 фірми Walter (Польща) [5]

Важливою технологічною перевагою ортогональних круглопилкових верстатів є можливість отримання обрізних пиломатеріалів за один прохід пилкового супорта вздовж колоди, що суттєво спрощує технологічний процес. Дана особливість ортогонального верстата дозволяє виключити з технологічного потоку кромкообрізний верстат і тим самим зменшити виробничу площу, кількість працівників та витрати на обслуговування цього верстата.

Для порівняння, на лісопилальній рамі отримати обрізні пиломатеріали можна мінімум за два проходи під час розпилювання двокантного бруса. А на стрікопилковому верстаті для цього треба виконати щонайменше три проходи, при цьому виконати кількаразове повертання колоди. Якщо ж не ставити завдання отримати обрізні пиломатеріали одразу на лісопилальній рамі чи стрікопилковому верстаті, тоді однозначно потрібно задіяти кромкообрізний верстат.

Застосування кромкообрізного верстата є ефективним на великих лісопилальних виробництвах, які переробляють великі об'єми деревини. Проте лівову частку сучасної деревообробної промисловості становлять малі та середні підприємства, які орієнтовані на порівняно малі об'єми перероблення деревини. Тому, перевага надається високотехнологічному

устаткуванню, здатному виготовляти одразу обрізні пиломатеріали, яким є ортогональні круглопилкові верстати.

1. Аналіз відомих досліджень ортогональних круглопилкових верстатів

За час існування ортогональних круглопилкових верстатів інженери фірм-виробників цих верстатів, працівники лісопильних підприємств і науковці провели чимало спостережень, експериментів, досліджень та розробили низку конструкційних рішень для підвищення ефективності їх роботи [3, 4, 6]. В основному вдосконалення ортогональних круглопилкових верстатів відбувається у напрямках підвищення продуктивності та технологічної точності.

Щодо підвищення продуктивності можна відмити вдосконалення механізму різання верстата шляхом збільшення кількості вертикально та горизонтально розміщених круглих пилок або ортоблоків [4]. Проте через ускладнення конструкції механізму різання та збільшення енергоємності процесу ортопилення такі рішення не набули популярності. Тому, найпоширенішими залишаються класичні круглопилкові верстати з двома ортогонально розміщеними пилками.

Основною проблемою напряму дослідження технологічної точності цих верстатів є зниження точності пиляння, в межах періоду тривкості до затуплення зубців круглих пилок, нижче вимог ($\pm 1,0$ мм) чинних стандартів [7].

Здебільшого проблема точності ортопилення стосується верстатів з рухомим пилковим супортом, які на відміну від верстатів з рухомим візком з колодою є більш компактними, займають меншу виробничу площу і популярнішими.

Відомі дослідження ортогональних круглопилкових верстатів [3, 4, 6] були направлені на підвищення технологічної точності верстатів шляхом вдосконалення: геометричної точності верстата; конструкції круглих пилок для ортопилення; конструкції аспіраційної системи; особливостей організації процесу ортопилення.

У результаті аналізу відомих досліджень технологічної точності ортогональних круглопилкових верстатів виявлено, що проблема значного зниження точності оброблення у межах періоду тривкості пилок щодо спрацювання на сьогодні невирішена і потребує подальших досліджень.

2. Обґрунтування напрямків подальших досліджень технологічної точності ортогональних круглопилкових верстатів

Вплив системи базування заготовки

У результаті аналізу літературних джерел очевидно, що відсутні дослідження впливу на точність ортопилення системи базування заготовки та способів її закріплення. Відстань між поперечними балками із затискними механізмами є заздалегідь визначеною і вони розміщені з певним інтервалом для надійного базування колоди. Але бувають випадки коли колода має таку довжину, що при розміщенні на станині один з кінців буде консольним і недостатньо закріпленим (рис. 2). Випилювання пиломатеріалів на недостатньо закріплених ділянках колоди призводитиме до появи вібрації та збільшення ширини пропилю горизонтальною пилкою, яка нижньою площиною контактує з поверхнею колоди. Внаслідок цього зростатиме бокова сила різання і навантаження на пилку, що спричинить зниження точності пиляння та зменшення розміру товщини пиломатеріалу.

Враховуючи, що в процесі поступового розпилювання об'єм колоди зменшується і відповідно жорсткість залишку колоди буде постійно знижуватися, тому можна стверджувати, що вібрації консольних кінців у вертикальній площині будуть постійно збільшуватись.

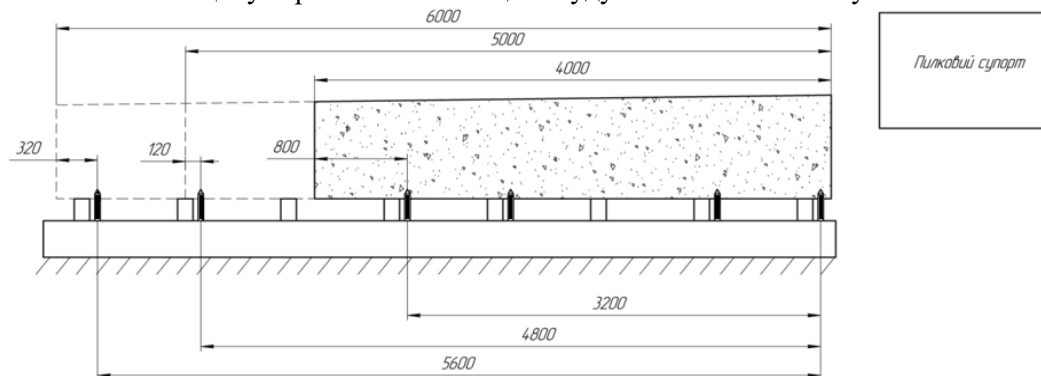


Рис. 2. Схема розміщення колоди на установчій поверхні системи базування

Такі явища сприятимуть більш інтенсивному затупленню зубців горизонтальної пилки порівняно з вертикальною, а отже під час кожного наступного різку точність пиляння деревини буде

нижчою. Відомо, що точність пиляння саме горизонтальною пилкою є нижчою і не відповідає вимогами чинних стандартів впродовж періоду стійкості.

Також під час дослідження впливу жорсткості колоди на точність пиляння варто врахувати фізико-механічні властивості деревини. Важливим є також розгляд впливу вологості деревини, що безпосередньо впливає на модуль пружності матеріалу і, відповідно, на жорсткість колоди. Таким чином, жорсткість заготовки може бути одним із ключових чинників, що впливають на технологічну точність ортогональних круглопилкових верстатів та продуктивність роботи.

Вплив способу кріплення пилки одним фланцем.

Для забезпечення можливості повного або майже повного розміщення горизонтальних пилки на колоді в ортогональних та горизонтальних круглопилкових верстатах застосовується спосіб фактично одностороннього кріплення на валу фланцем з потайними болтами (рис. 3).

Спосіб кріплення круглих пилки одним фланцем з потайними болтами є відносно новим для деревообробних верстатів. Проте не можна стверджувати що він є рівноцінною заміною способу кріплення пилки двома фланцями. Принаймні у деревообробній промисловості результатів таких порівняльних наукових досліджень не відомо.

На основі загального порівняння двох способів кріплення пилки на валу можна зробити такі висновки:

- кріплення двома фланцями є простішим за конструкцією, оскільки здійснюється лише двома деталями;
- вартість виготовлення кріплення з одним фланцем є вищою. Висвердлювання отворів у диску пилки вимагає додаткової технологічної операції на високоточному обладнанні, що робить виготовлення дорожчим;
- заміна пилки закріпленої фланцем з потайними болтами займає більше часу, що знижує продуктивність верстата;
- завдяки фрикційному з'єднанню між поверхнями фланців і пилки забезпечується рівномірне розподілення навантажень. Це знижує ризик виникнення локальних напружень і підвищує довговічність конструкції фланців;
- за умови кріплення одним фланцем площа контакту диска пилки з одного боку буде рівна площі поверхні фланця, а з іншого лише по площі фасок головок потайних болтів;

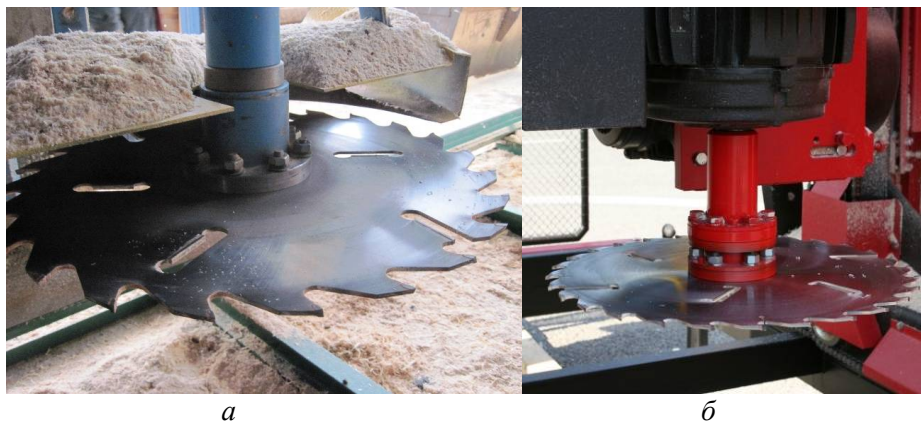


Рис. 3. Кріплення горизонтальної пилки одним фланцем на ортогональних верстатах:

а – «Ясень-Баракуда-2» фірми Ясень (Україна); б – «DKP 6» фірми StrojCAD (Словаччина)

- болти забезпечують надійне механічне з'єднання, що дозволяє зменшити ризик осьового зміщення пилки. Однак надійність болтів залежить від якості різьби, матеріалу, а також від регулярного контролю моменту затягування. З часом болтове з'єднання фланця з пилкою може послаблюватися через вібрації, що виникають під час розпилювання деревини;

- у разі нерівномірного закріплення потайними болтами у зоні їх контакту виникатимуть локальні напруження, а горизонтальна пилка не буде розміщена перпендикулярного до осі валу і здійснюватиме дещо ширший пропил. Це спричинить тертя певної ділянки пилки із деревною стружкою що опала на колоду, а при найменших вібраціях колоди із її поверхнею, внаслідок чого можливе припалювання диска та втрати працездатного стану. Також розширення пропила приведе до підвищення енергоємності процесу пиляння та інтенсивності затуплення зубців пилки.

Невідомим на сьогодні є вплив діаметра та товщини фланця кріплення з потайними болтами на жорсткість пилки та точність пиляння. Також варто визначити оптимальні конструкційні параметри фланця та товщини пилки для забезпечення точності пиляння відповідно вимог чинних стандартів.

Вплив особливостей пиляння горизонтальною пилкою.

У відомих наукових працях [3, 4] на основі проведених досліджень автори приходили до висновків про нижчу точність пиляння горизонтальною пилкою порівняно з вертикальною, пояснюючи це складнішими умовами різання. Проте, ґрунтовних наукових досліджень особливостей контакту горизонтальної пилки з колодою не відомо і їх взаємовплив залишається невизначеним.

На наведених фотографіях (рис. 4) видно припалювання диска пили в центральній ділянці довкола місця контакту з кріпильним фланцем. Більш помітним є припалювання диска з нижньої сторони горизонтальної пилки, з якої вона кріпиться болтами з потайними головками. Нижня частина пилки часто контактує з поверхнею колоди повністю, що унеможливає її охолодження шляхом відведення тепла із зони різання. Оскільки деревина не є теплопровідником, то теплова енергія накопичується у металевому диску, який віддає її навколишньому середовищу переважно через верхню свою поверхню. Як видно такого тепловідведення із зони різання не достатньо для нормального охолодження інструменту.



а –нижня поверхня; б –верхня поверхня

Рис. 4. Фото горизонтальної пилки після роботи на ортогональному верстаті

На верхній поверхні диска сліди припалювання є менш інтенсивними, що свідчить про напрямок відведення тепла знизу вверх. з ділянки кріплення пили

Певну роль у відведенні тепла відіграє і металевий кріпильний фланець який є хорошим провідником. Свідченням цього є відсутність слідів припалювання на площі контакту диска пилки з фланцем. Отже, варто дослідити з якого високотеплопровідного матеріалу краще виготовити фланець.

Сліди припалювання розміщені в центральній ділянці диска де немає радіальних прорізів та не здійснюється охолодження. Наявність двох внутрішніх радіальних прорізів у диску пили теж не вирішують цієї проблеми. Такі припалювання на диску є свідченням його перегрівання, яке супроводжується зменшення твердості металу. Це може привести до зниження жорсткості пилки і точності пиляння, або й взагалі до викривлення диска і втрати працездатного стану. Тому, варто провести більш ґрунтовні дослідження процесу пиляння горизонтальною пилкою та вивчити особливості контакту пилки з деревиною.

Висновки. Встановлено, що основним напрямом подальших досліджень ортогональних круглопилкових верстатів є підвищення точності пиляння. Попри наявність низки досліджень у цьому напрямі, не встановленим є вплив на точність пиляння горизонтальною пилкою системи базування заготовки і способу кріплення пилки та не повністю встановлено вплив особливостей процесу пиляння.

Перелік посилань

1. Pylypchuk M., Mayevskyy, V., Taras, V., Burdiak, M., Kopynets, Z. Patterns of change in the

accuracy of wood machining on plano-milling machines during the period of the cutting tool wear resistance. In Acta Facultatis Xylologiae Zvolen. Vol. 63(1), pp. 85–92. 2023. DOI:10.17423/afx..63.1.08

2. Білецький М.О. Визначення якості обробленої поверхні пиломатеріалів колод / М.О. Білецький, З.С. Сірко // Наук. журнал Техніка та енергетика: зб. наук.-техн. праць. – Київ: НУБІП, 2013. – Вип. № 185 (2). – С. 109-114.

3. Бурдяк М.Р. Підвищення технологічної точності круглопилкових верстатів для ортогонального пиляння колод. Дис. к. т. н. Спеціальність 05.05.04 – Машини для земляних, дорожніх і лісотехнічних робіт. Львів, 2014. – 224 с.

4. Пилипчук М.І. Напрямки вдосконалення конструкцій круглопилкових верстатів для поздовжнього розпилювання колод / М.І. Пилипчук, П.В. Андрієвський // Наук. вісник НЛТУ України: зб. наук.-техн. праць. – Львів: НЛТУ України, 2009. – Вип. 16.9. – С. 111-118.

5. Дискава пилорам ТТРР-450-550 : веб-сайт. URL: <http://mwm-kiev.com.ua/machine/81-diskovaya-pilorama-ttrp-450-550> (дата звернення: 30.01.2025).

6. Пилипчук М.І. Аналіз конструкцій круглопилкових верстатів для ортогонального пиляння колод / М.І.Пилипчук, М.Р.Бурдяк // Наук. вісник НЛТУ України: зб. наук.-техн. праць. – Львів, 2011. – Вип. 21.18. – 92-99с.

7. Пиломатеріали конструкційні із хвойних порід та тополі. Розміри. Допустимі відхили (EN 336:1995, IDT): ДСТУ EN 336: 2003. – [Чинний від 2003-10-02]. – Київ: Держспоживстандарт України, 2004. – 8 с.

Рецензент: Маєвський В. О., доктор технічних наук, професор кафедри технологій лісопиляння, столярних і дерев'яних будівельних виробів національного лісотехнічного університету України.

О.П. Чигвинцева, І.В. Рула, Ю.В. Бойко

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ АРОМАТИЧНОГО ПОЛІАМІДУ ФЕНІЛОН С-2

Досліджені основні теплофізичні, фізико-механічні і трибологічні властивості ароматичного поліаміду фенілон С-2. Встановлено, що полімер має високі значення коефіцієнта теплопровідності і міцнісних характеристик, гарну зносостійкість, низький коефіцієнт тертя і критерій працездатності PV до $1,6 \text{ МПа} \cdot \text{м/с}$ при роботі в умовах тертя без змащування. Результати досліджень дозволяють рекомендувати фенілон С-2 до застосування як полімерне в'язуче з метою створення нових полімерних композитів конструкційного призначення.

Ключові слова: ароматичний поліамід, фенілон С-2, експлуатаційні характеристики, коефіцієнт тертя, зносостійкість, конструкційний матеріал

O.P. Chigvintseva, I.V. Rula, Ju.V. Boyko

RESEARCH OF THE PROPERTIES OF THE AROMATIC POLYAMIDE PHENYLON C-2

The main thermophysical, physical-mechanical and tribological properties of the aromatic polyamide phenylone C-2 have been studied. It has been established that the polymer has high values of thermal conductivity coefficient and strength characteristics, excellent wear resistance, low friction coefficient and performance criterion PV up to $1.6 \text{ MPa} \cdot \text{m/s}$ while working in frictional conditions without lubrication. The results of the study allow us to recommend phenylone C-2 for use as a polymer binder for the purpose of creating new polymer composites for structural purposes.

Key words: aromatic polyamide, phenylone C-2, performance characteristics, friction coefficient, wear resistance, structural material.

До перспективних термопластичних полімерних матеріалів відносяться ароматичні поліаміди. Температура початку активної деструкції цих полімерів досягає 350°C , а температура розм'якшення – 300°C . Завдяки цьому вироби із ароматичних поліамідів зберігають свою гарну працездатність у вузлах різних конструкцій в умовах підвищених температур, а за рівнем механічних властивостей та зносостійкістю – значно перевершують більшість відомих існуючих полімерів [1-2]. Вони мають високу міцність, легко обробляються, вироби на їх основі мають гладку поліровану поверхню, стійку до пошкоджень. Завдяки поєднанню високих тепло-і термостійкості з жорсткістю, міцністю та стабільними трибологічними властивостями, ароматичні поліаміди знайшли широке застосування у різних галузях промисловості з метою заміни металів: в автомобілебудуванні, електротехнічній промисловості, для виробництва товарів народного споживання, спортивних товарів, деталей машин та механізмів.

Ароматичний поліамідфенілон С-2 має високі деформаційно-міцнісні показники, гарну зносостійкість, хімічну стійкість до агресивних середовищ, формостабільність у широкому інтервалі температур. Відомо, що ароматичні поліаміди при терті в умовах невисоких навантажень зношуються приблизно в чотири рази менше у порівнянні з аліфатичними [3]. Характер процесів тертя і зношування фенілону С-2 істотно залежить від режимів експлуатації і температур, що розвиваються у вузлі тертя, тому вивчення експлуатаційних характеристик зазначеного в'язучого має науковий і практичний інтерес.

Як відомо, необхідною умовою визначення режимів експлуатації полімерних матеріалів є дослідження їх теплофізичних характеристик, особливо, теплопровідності, низька величина якої може негативно впливати на термін роботи виробів із них. Теплофізичні характеристики мають винятково велике значення практичної цінності полімерів, оскільки від них суттєво залежать технологічні та експлуатаційні властивості матеріалів.

Дослідження впливу температури на питому теплоємність фенілону С-2 (рис. 1, крива 1) показало, що в області невисоких температур ($273\text{--}448 \text{ K}$) спостерігалось близьке до лінійного монотонне підвищення теплоємності, що здійснювалось за рахунок поглинання енергії, яке викликано збільшенням рухомих кінетичних елементів макромолекул при нагріванні полімеру [4]. Подальше підвищення температури призвело до інтенсивного зростання вказаного теплофізичного показника, а в області переходу полімеру зі склоподібного у високоеластичний стан ($498\text{--}573 \text{ K}$) проявлявся характерний стрибок питомої теплоємності (ΔC_p).

Дослідження коефіцієнта теплопровідності фенілону С-2, який знаходився в межах $0,35\text{--}0,45 \text{ Вт/м} \cdot \text{K}$, свідчили про його зростання в усьому інтервалі температур (рис. 1, крива 2), що пов'язане із розповсюдженням і розсіюванням пружних хвиль, які виникають внаслідок теплових коливань макромолекул полімеру.

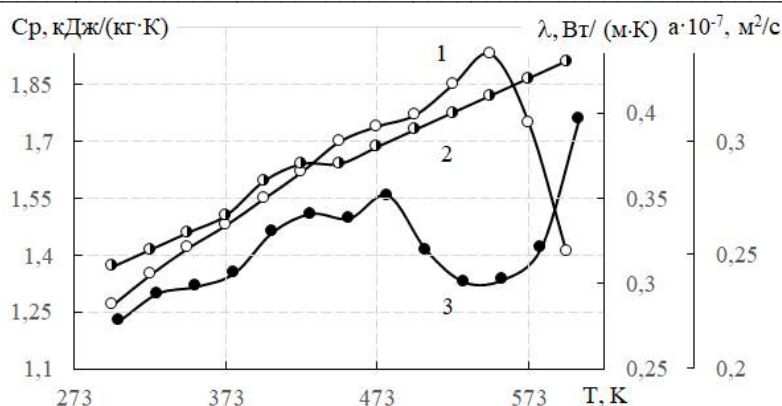


Рис. 1. Температурні залежності питомої теплоємності (1), коефіцієнтів теплопровідності (2) і температуропровідності (3) фенілону С-2

Визначення коефіцієнта температуропровідності, який характеризує теплоінерційні властивості матеріалів і є мірою “ефективної” швидкості вирівнювання температурних полів у тілі [5], необхідне в технологічних цілях для визначення технології переробки виробів із полімеру, а також для оцінки поведінки полімерної деталі в нестандартних теплових полях. Підвищення цього теплофізичного показника, зазвичай, забезпечує більш інтенсивне вирівнювання температури в усіх точках тіла. На температурній кривій коефіцієнта температуропровідності (рис. 1, крива 3), спостерігались позитивні і негативні відхилення даного показника від лінійних. Це пояснюється появою додаткових рухомих сегментів в області температур, нижче температури склування (T_c), і значних рухомих ділянок ланцюга в області вище неї, що призводить до додаткового розсіювання теплових хвиль.

Міцнісні показники фенілону С-2 (табл. 1) мали доволі високі значення: межа міцності і модуля пружності при стисканні склали 438 і 3274 МПа відповідно. Крива залежності межі міцності при стисканні від деформації фенілону С-2 (рис. 2), згідно з класифікацією Херцберга, відноситься до кривих II типу. На першій прямолінійній ділянці кривої при малих значеннях деформації напруження і деформація пропорційні одна одній (описуються законом Гука) і характеризують пружну деформацію матеріалу, після чого йде параболічна ділянка кривої, яка описує його гомогенну пластичну деформацію [6]. Зовнішній вигляд зразків фенілону С-2 після стискання (рис. 2) свідчили про те, що вони руйнувалися пластично за рахунок втрати стійкості.

Табл. 1

Міцнісні показники фенілону С-2

Межа міцності при стисканні $\sigma_{ст.}$, МПа	438,0
Межа текучості при стисканні, $\sigma_{тек.}$, МПа	215,3
Модуль пружності при стисканні, Е, МПа	3273,9
Відносне подовження при руйнуванні, $\epsilon_{руйн.}$, %	38,4
Відносне подовження при текучості, $\epsilon_{тек.}$, %	13,2

Вивчення процесів тертя і зносу фенілону С-2 здійснювалося на дисковій машині тертя в режимі тертя без змащення в умовах питомих навантажень 0,2-0,8 МПа і швидкостей ковзання 1,0, 1,5 і 2 м/с, шлях тертя становив 1000 м. Як контртіло використовувався сталевий диск, термооброблений до твердості 45-48 HRC з шорсткістю поверхні $Ra = 0,16-0,32$ мкм.

Трибологічні дослідження зразків фенілону С-2 показали, що полімер має доволі низькі значення коефіцієнта тертя (f) і стабільні показники інтенсивності лінійного зношування ($J_h \cdot 10^{-8}$) в умовах усіх досліджених режимів експлуатації.

Визначення коефіцієнта тертя фенілону С-2 свідчило про те, що зі зростанням питомого навантаження в інтервалі усіх досліджуваних швидкостей ковзання ($v = 1-2$ м/с) він знижувався в середньому на 40-50 % досягаючи своїх мінімальних значень (0,08-0,10) при питомому навантаженні $P = 0,8$ МПа (рис. 3а).

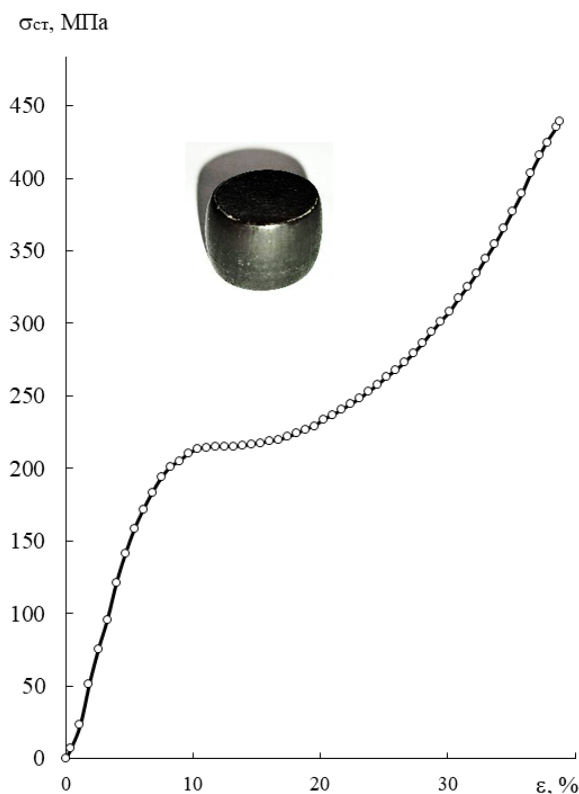


Рис. 2. Крива залежності межі міцності при стисканні ($\sigma_{ст.}$) від відносного подовження (ϵ) зразків фенілону С-2

Найбільш високі значення коефіцієнта тертя були характерні для зразків полімеру, досліджених при мінімальній швидкості ковзання ($v = 1$ м/с) [7]. Зменшення значень коефіцієнта тертя зі зростанням швидкостей ковзання от 1,0 до 2,0 м/с можна пояснити, з одного боку, скороченням часу фрикційного зв'язку зразку фенілону С-2 – сталеве контртіло, а з іншого – збільшенням тангенційної складової швидкості ковзання, що призводило до більш ефективного видалення частинок зношування із зони тертя [8].

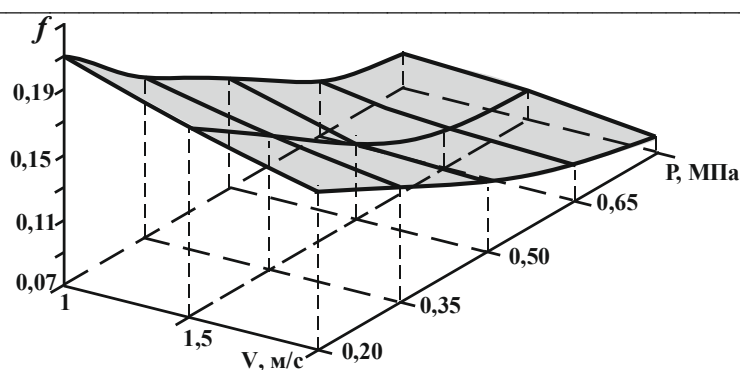
Інтенсивність лінійного зношування з посиленням навантажувального режиму суттєво зростала (від 4,7 до 14,3), причому найбільш чітко цей процес проявлявся в умовах мінімальної швидкості ковзання ($v = 1,0$ м/с). Вказаний факт можна пояснити тим, що в умовах значних навантажень на поверхні сталюгого диску зросла температура, яка виникала на межі розподілу полімерний зразок – контртіло. Це призводило до розм'якшення поверхневих шарів в'язучого, внаслідок чого адгезія між поверхнями тертя збільшилась, а це, в свою чергу, викликало інтенсифікацію процесу зношування зразків фенілону С-2.

При дослідженнях в умовах швидкостей ковзання 1,5-2,0 м/с процес зношування зразків стабілізувався і інтенсивність лінійного зношування знаходилась в межах $3,2-6,0 \cdot 10^{-8}$, що свідчило про гарну зносостійкість матеріалу (рис. 3б). Ефект стабілізації процесу зношування полімеру можна пояснити тим, що в ході тривалих досліджень на поверхні контртіла утворилася плівка із дрібнодисперсних частинок зношування, внаслідок чого тертя зразків фенілону С-2 здійснювалось не по сталюму диску, а по полімерній плівці.

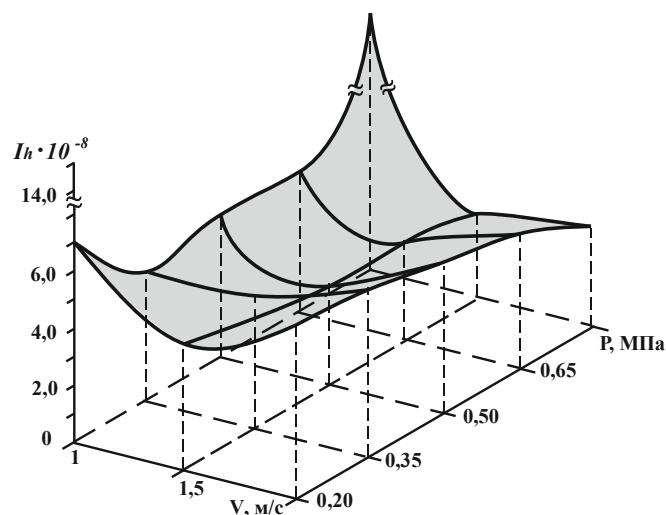
В цілому, за результатами проведених триботехнічних досліджень було визначено, що зношування зразків фенілону С-2 відбувалось за адгезійним механізмом (рис. 4).

Такий тип зношування характеризується фрикційним переносом полімерного матеріалу на контактну поверхню сталюгого контртіла, що можна пояснити руйнуванням зв'язків на межах надмолекулярних глобулярних утворень фенілону С-2 [8].

В результаті трибологічних досліджень встановлено, що фенілон С-2 може працювати до значень критерію працездатності $PV \leq 1,6$ МПа · м/с. Гарна зносостійкість зразків фенілону С-2, відповідно до втомлювальної теорії зношування, може бути обумовлена високими значеннями коефіцієнта теплопровідності полімеру, що запобігає локалізації тепла у зоні тертя [9].



а



б

Рис. 3. Вплив питомого навантаження (P) і швидкості ковзання (v) на коефіцієнт тертя (а) і інтенсивність лінійного зношування (б) фенілону С-2

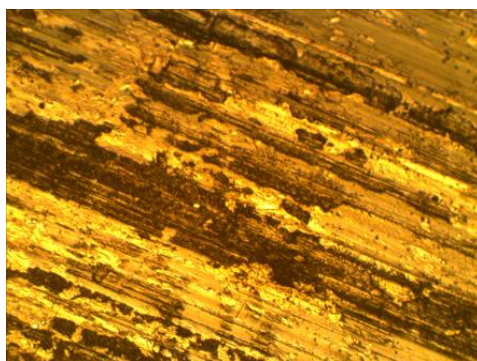


Рис. 4. Поверхні тертя зразків фенілону С-2 після тертя в режимі сухого тертя при навантаженні 0,65 МПа та швидкості ковзання 1 м/с

Таким чином, результати проведеного комплексу досліджень свідчать про те, що ароматичний поліамідфенілон С-2 має покращений комплекс теплофізичних і міцнісних властивостей, гарну зносостійкість і низький коефіцієнт тертя при роботі в умовах тертя без змащування, що дозволяє рекомендувати його до застосування як полімерне в'язуче з метою створення нових полімерних композитів конструкційного призначення.

Список використаних джерел.

1. Соколов Л.Б. (1984). Термостійкі і високоміцні полімерні матеріали. М.: Знання. 64 с.
2. Бюллер К.-У. (1984). Тепло- і термостійкі полімери: Пер. з нім. М.: Хімія. 1056 с.

3. Соколов Л.Б., Герасимов В.Д., Савинов В.Д., Беляков В.К. (1975). Термостійкі ароматичні поліаміди. М.: Хімія. 256 с.
4. Теплофизические свойства полимерных материалов / А.Н. Пивень, Н.А. Гречаная, И.И. Чернобыльский. К.: Вища школа. (1976). 180 с.
5. Тугов И.И., Кострыкина Г.И. (1989). Химия и физика полимеров: Учеб. пособие для вузов. М.: Химия. 432 с.
6. Херцберг Р.В. (1989). Деформация и механика разрушения конструкционных материалов: Пер. с англ. / Под ред. Бернштейна М.Л., Ефименко С.П. М.: Металлургия. 576 с.
7. Чигвинцева О.П., Рула І.В., Бойко Ю.В. (2024). Трибологічні властивості ароматичних поліамідів // Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції “Перспективні полімерні матеріали та технології” Львів, 24–26 вересня 2024 р., Львів: Вид-во Львівської політехніки. С. 137-139.
8. Крагельский И.В. (1968). Трение и износ. М.: “Машиностроение”. 480 с.
9. Бартенев Г.М., Лаврентьев В.В. (1972). Трение и износ полимеров. Л.: Химия. 240 с.

Рецензенти:

Олексій ДЕРКАЧ, завідувач кафедри експлуатації машинно-тракторного парку Дніпровського державного аграрно-економічного університету, к.т.н., доцент

Олег КАБАТ, завідувач кафедри інноваційної інженерії ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технологій, д.т.н, професор

В.І. Осипенко, М.Р. Прусс

Черкаський державний технологічний університет

РОЗРОБКА РЕГРЕСІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ 12 ММ НЕРЖАВІЮЧОЇ СТАЛІ ВИПРОМІНЮВАННЯМ ПОТУЖНОГО ОПТОВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА

В роботі представлено результати експериментальних та теоретичних досліджень закономірностей впливу тиску асистуючого газу (азот), положення фокусу відносно поверхні деталі, швидкості різання на параметри шорсткості отриманих поверхонь при розкрююванні 12 мм нержавіючої сталі AISI 304 випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт. За результатами системного комплексу експериментальних досліджень з використанням пакету Statistica отримано регресійні моделі процесу, обґрунтовано їх точність та адекватність. Експериментальна верифікація підтвердила ефективність використання найбільш точної регресійної моделі для визначення параметрів режимів, які забезпечують високі якість та продуктивність різання.

Ключові слова: оптоволоконний лазер, газолазерне різання, нержавіюча сталь, тиск асистуючого газу, шорсткість поверхні, положення фокусу, регресійна модель.

V.I. Osypenko, M.R. Pruss

DEVELOPMENT OF REGRESSION MODELS FOR CALCULATING EFFECTIVE CUTTING MODES OF 12 MM STAINLESS STEEL BY HIGH-POWER FIBER OPTIC LASER RADIATION

The paper presents the results of experimental and theoretical studies of the patterns of influence of the pressure of the assist gas (nitrogen), the focus position relative to the surface of the part, and the cutting speed on the roughness parameters of the obtained surfaces when cutting 12 mm stainless steel AISI 304 using a 12 kW fiber laser. Based on the results of a systematic complex of experimental studies using the Statistica package, regression models of the process were obtained, their accuracy and adequacy were substantiated. Experimental verification confirmed the effectiveness of using the most accurate regression model to determine the parameters of the modes that ensure high quality and productivity of cutting.

Keywords: fiber laser, gas laser cutting, stainless steel, assist gas pressure, surface roughness, focus position, regression model.

Постановка проблеми.

Різнання нержавіючих сталей різної товщини за допомогою потужних оптоволоконних лазерів сьогодні достатньо широко використовується промисловими підприємствами України. Виробники, які використовують у своєму виробництві дану технологію, особливо зацікавлені в досягненні високої якості різання, щоб можна було виключити повторну обробку відрізнаних деталей, високої швидкості різання для максимізації продуктивності та доброї відтворюваності процесу. Таким чином технічні та економічні критерії, що впливають на вибір відповідної лазерної системи для конкретного лазерного різання, зараз набувають великого значення. Підвищення ефективності процесу, якості та гнучкості допомагають зменшити витрати. Провідний виробник лазерних технологічних установок в Україні компанія «Араміс» започаткувала випуск лінійки установок, укомплектованих оптоволоконними лазерами потужністю 12 кВт. Таку потужність економічно доцільно використовувати при різанні нержавіючих сталей товщиною 10 мм – 25 мм. Визначення ефективних режимів різання подібних товщин є складною багатоетапною задачею, одним з етапів якої є експериментальне обґрунтування режимів газолазерного різання 12 мм нержавіючої сталі AISI 304 з використанням потужності 12 кВт, які забезпечують досягнення максимальної швидкості різку за заданої якості поверхонь отриманих деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тип і тиск допоміжного газу, який використовується під час різання, сприймаються як ключові параметри різання. Процес лазерного різання виконується киснем, повітрям або азотом. При різанні нержавіючих сталей в основному використовують азот, так як в порівнянні з киснем чи повітрям він в основному забезпечує більш високу якість різання. Азот, який використовується для різання, має мати чистоту не менше 99,99%. Така висока чистота азоту запобігає зміні кольору нарізаних листів. При різанні азотом метал розплавляється тільки теплом лазерного променя [1]. Як інертний газ, азот запобігає окисленню під час різання та видуває розплавлений метал. Однак багато дослідників відзначають, все ж відносно низьку якість бічної поверхні, отриманої під час лазерного різання товстого перерізу нержавіючої сталі (10 мм – 25 мм) з використанням інертного газу за допомогою потужних оптоволоконних лазерів, яку пов'язують зі складнощами отримання повного викиду розплаву через вузькі пропили товстих перерізів [2, 3, 4]. Максимально досяжна швидкість різання та кінцева якість різаної

© В.І. Осипенко, М.Р. Прусс

поверхні визначаються параметрами процесу, включаючи потужність лазера, фокусну відстань оптичної головки, положення фокусу відносно поверхні заготовки, тиском допоміжного газу, діаметром сопла, відстанню від сопла до поверхні заготовки. Положення фокусу вимірюється в міліметрах, у додатних значеннях, якщо вона знаходиться над верхньою поверхнею металевго листа, або у від'ємних значеннях, якщо вона нижче верхньої поверхні металевго листа. Що стосується параметрів сопла, важливо вибрати відповідний тип сопла (одно чи двоканальне), з вихідним діаметром який може бути більшим або меншим в залежності від товщини металевго листа. Перш ніж приступити до лазерного різання, дуже важливо перевірити положення лазерного променя та відрегулювати його по центру сопла. Недотримання цієї вимоги може призвести до втрати якості різу або пошкодження деталей оптоволоконного лазера [5, 6]. Таким чином підбір раціональних параметрів процесу покращує видалення розплаву з розпили, запобігає небажаному налипанню окалини на нижній кромці різу або навіть неповному проникненню лазерного променя в заготовку, коли інтенсивність випромінювання є недостатньою для даної товщини металу.

Мета статті. Розробка регресійних моделей для розрахунку параметрів режимів різання 12 мм нержавіючої сталі AISI 304 випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт, які забезпечують високу продуктивність процесу та відповідну якість отриманих деталей. Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення таких задач: 1) провести аналіз відомих результатів використання технології газолазерного різання нержавіючих сталей; 2) провести серію пошукових експериментів та визначити факторний простір і найбільш інформативну функцію відгуку; 3) розробити матрицю планування повнофакторного експерименту; 4) відповідно до розробленої матриці провести комплекс експериментів по газолазерному різанню 12 мм нержавіючої сталі AISI 304 випромінюванням оптоволоконного лазера з вихідною потужністю 12 кВт; 5) отримати математичні статистичні моделі та встановити залежності якості отриманих деталей від обраних параметрів процесу газолазерного різання 12 мм нержавіючої сталі AISI 304.

Виклад основного матеріалу.

Обладнання, та методи дослідження. Різання листа з нержавіючої сталі AISI 304 товщиною 12 мм з типовим хімічним складом проводилось за допомогою лазера потужністю 12 кВт. Дослідження виконувалися на експериментальному верстаті компанії «Арамис» (рис. 1), основна інформація про верстат наведена в таблиці 1.

Табл. 1

Моделі основних систем верстата для проведення досліджень

Верстат	AFX-PRO-12000-1530LD
Модель лазера, діаметр оптоволоконна	MAX Photonics 12 kWt, оптоволоконно 100 мкм
Модель оптичної головки, коліматор	BLT9120MA Product Manual, f 250 мм

Параметри процесу (факторний простір), які досліджувалися в цій роботі, включали тиск асистуючого газу (Z_1 – бар, азот з чистотою 99,99%), положення фокусу відносно поверхні листа (Z_2 – $\pm$ мм), швидкість різання (Z_3 – мм/хв), Різання виконували на максимальній потужності лазера 12 кВт. Діаметр лазерної плями в фокальній площині становив 200 мкм. Дані параметри задавалися і контролювалися системою числового програмного керування (ЧПК) з точністю, яка відповідає паспортним даним верстата.

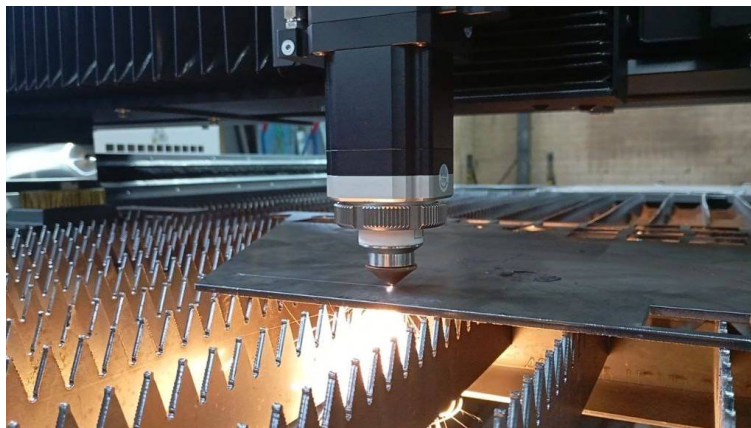


Рис. 1. Процес газолазерного різання на верстаті моделі AFX-PRO-12000-1530LD

З врахуванням попередніх експериментальних робіт авторів [7, 8] верстат комплектувався оптичною головкою з фокусною відстанню 250 мм, яка забезпечує в цілому більш високі показники якості при різанні нержавіючих сталей з використанням як асистуючого газу азоту (в порівнянні з оптичною головкою з фокусною відстанню 200 мм), та одноканальним конічним соплом з вихідним діаметром 3 мм. Відслідковуваний затор між торцем сопла та поверхнею листа становив 0,5 мм і залишався незмінним. Згідно вимог ISO 9013:2017 як критерій оцінки якості поверхні (функція відгуку Y) обрано максимальне значення шорсткості R_z з трьох вимірів (верх, середина, низ зразка). Профілограми поверхні лазерного різання дослідних зразків отримували за допомогою профілографа TIME 3221. Креслення зразків для досліджень та методика вимірювань шорсткості наведені в попередній роботі авторів [9].

Результати досліджень.

На основі аналізу результатів серії пошукових експериментів були визначені рівні варіювання досліджуваних факторів та розроблена матриця планування експерименту таким чином, щоб повний факторний експеримент відповідав 59 дослідям. При цьому обрана для досліджень область факторного простору виключала режими за яких фіксувалися наявність окалини на нижній поверхні зразка, повне або часткове заварювання пазу. За створеним планом експериментів проведено низка досліджень, умови проведення і результати яких наведено на рис. 2.

Побудова регресійної моделі $Y = f(z_1, z_2, z_3)$. Наступний етап необхідно почати із оцінки можливих регресійних моделей, що можна побудувати різними методами [10, 11] з використанням різноманітних програмних продуктів. Отже, враховуючи низку вимог до програмних продуктів, а саме, використання простої програмно-орієнтованої мови, автоматизоване управління процесами обробки даних, підтримка користувацької бази даних і формування звітів за результатами проведеного аналізу, забезпечення діалогової взаємодії користувача з програмним пакетом та інтеграція і сумісність з іншими програмними засобами для подальшої роботи обрано пакет Statistica. При цьому пакет Statistica дозволяє працювати як із базовими модулями регресійного аналізу так і засобами інтелектуального аналізу даних Statistica Data Miner.

Використовуючи можливості пакету Statistica здійснюємо аналіз даних і визначаємо кореляційну матрицю (рис. 3).

	Spreadsheet			
	1 z1	2 z2	3 z3	4 Y
1	6	0.5	5500	46.5
2	6	-1.5	5500	39.3
3	8	0.5	5500	44.1
4	8	-1.5	5500	38.7
5	6	0.5	4500	46.9
6	6	-1.5	4500	40.1
7	8	0.5	4500	50.2
8	8	-0.5	4500	46.5
9	7	0	5000	49.2
10	6.5	-1	4750	40.9
11	7.5	-0.25	5250	46.7
12	6.2	-1.25	5375	42.5
13	7.2	-0.75	4875	45.4
14	6.8	-0.5	5125	49.5
15	7.8	0.0	4625	47.3
16	6.1	-1.0	5188	47.7
17	7.1	-0.2	4688	42.2
18	6.6	-1.2	5438	46.2
19	7.6	-0.8	4938	48.3
20	6.4	0.2	4813	45.8
21	7.4	0.4	5313	50.0
22	6.9	-0.6	4563	39.6
23	7.9	-1.1	5063	48.8
24	6.1	-0.1	4906	40.4
25	7.1	-0.9	5406	48.7
26	6.6	0.1	4656	45.9
27	7.6	-0.4	5156	45.7
28	6.3	-1.4	5031	49.8
29	7.3	-0.4	4531	47.5
30	6.8	-1.4	5281	43.3
31	7.8	-0.9	4781	46.3
32	6.2	0.1	5344	49.2
33	7.2	-1.2	4844	48.0
34	6.7	-0.2	5094	43.0
35	7.7	0.3	4594	48.8
36	6.4	-0.7	4719	41.8
37	7.4	-0.6	5219	43.0
38	6.9	0.4	4969	41.0
39	7.9	-0.1	5469	46.8
40	6	-1.1	5453	44.6
41	7	0.2	4953	42.7
42	6.5	-0.8	5203	46.9
43	7.5	-1.3	4703	50.1
44	6.3	-0.3	4578	48.1
45	7.3	0.1	5078	49.1
46	6.8	-0.9	4828	39.8
47	7.8	-1.4	5328	48.7
48	6.2	-0.4	4766	46.1
49	7.2	-0.7	5266	48.5
50	6.7	0.3	4516	43.4
51	7.7	-0.2	5016	47.8
52	6.4	-1.2	5441	43.0
53	7.4	-1.0	4641	42.9
54	6.9	-0.0	5391	47.2
55	7.9	0.5	4891	46.8
56	6.1	-0.5	5109	50.0
57	7.1	-0.3	4609	45.4
58	6.6	-1.3	5359	40.4
59	7.6	-0.8	4859	48.0

Рис. 2. Матриця планування експерименту та результати дослідів

Як видно із результатів сильної кореляції між факторами не спостерігається тобто вони не є мультиколінеарні, тому жодного з них видаляти не потрібно.

Variable	Correlations (Spreadsheet_in Workbook1)			
	z1	z2	z3	Y
z1	1,000000	-0,035871	-0,065882	-0,441817
z2	-0,035871	1,000000	-0,055660	0,622814
z3	-0,065882	-0,055660	1,000000	-0,487432
Y	-0,441817	0,622814	-0,487432	1,000000

Рис. 3. Отримана кореляційна матриця

Відповідно будуюмо поліноміальну модель виду:

$$y = b_0 + b_1 \cdot z_1 + b_2 \cdot z_2 + b_3 \cdot z_3 \quad (1)$$

Для цього виконуємо розрахунок коефіцієнтів рівняння (1) та перевіряємо їх рівень значимості за критерієм Стюдента (рис. 4).

Regression Summary for Dependent Variable: Y (Spreadsheet_in Workbook1)						
R= ,89303372 R²= ,79750922 Adjusted R²= ,78646427 F(3,55)=72,206 p<0,0000 Std. Error of estimate: 1,4797						
N=59	b*	Std. Err. of b*	b	Std. Err. of b	t(55)	p-value
Intercept			86,76594	3,784764	22,92506	0,000000
z1	-0,452993	0,060857	-2,23833	0,300705	-7,44361	0,000000
z2	0,579563	0,060819	2,85566	0,299670	9,52936	0,000000
z3	-0,485011	0,060912	-0,00480	0,000603	-7,96250	0,000000

Рис. 4. Результати розрахунку коефіцієнтів поліноміальної моделі (стовпчик b) та значень критерію Стюдента для кожного з них ($t^{експ}$ - стовпчик t(55))

Критичне значення критерію Стюдента при рівні значущості $\alpha=0,05$ і числі степенів свободи $k=55$ становить $t_{0,05;55}^{крит} = 1,96$. Оскільки умова $t^{експ} > t_{0,05;55}^{крит}$ виконується для всіх чотирьох коефіцієнтів, то вони статистично значимі. Тоді рівняння лінійної регресії:

$$y = 86,76594 - 2,23833 \cdot z_1 + 2,85566 \cdot z_2 - 0,0048 \cdot z_3 \quad (2)$$

Проведений аналіз за створеною лінійною регресійною моделлю (2) встановив, що похибка отриманої регресійної моделі $MAPE=2,4\%$. Перевірка за критерієм Фішера підтвердила адекватність розробленої моделі так як $F_{0,05;3;55}^{крит} = 2,812$, а $F_{3,55}^{експ} = 72,2$, тобто $F_{3,55}^{експ} > F_{0,05;3;55}^{крит}$, отже умова адекватності виконується. Значення коефіцієнту детермінації $R^2=0.797$. Тобто 79,7 % факторів враховано в моделі. Відповідна діаграма розсіювання наведена на рис. 5.

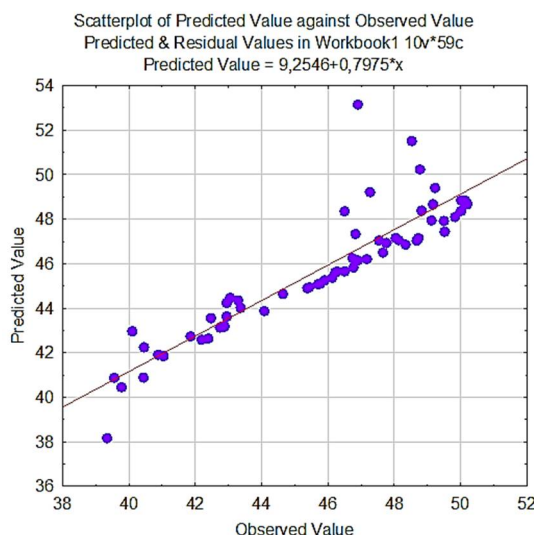


Рис. 5. Діаграма розсіювання значень цільової та апроксимаційної функцій за регресійною моделлю (2)

Наступним кроком побудуємо поліноміальну модель виду:

$$y = b_1 \cdot z_1 + b_2 \cdot z_2 + b_3 \cdot z_3 + b_4 \cdot z_1 \cdot z_2 + b_5 \cdot z_1 \cdot z_3 + b_6 \cdot z_2 \cdot z_3 + b_7 \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot z_3 \quad (3)$$

Така модель враховує ефект взаємодії факторів. Як і в попередньому випадку розраховуємо коефіцієнти рівняння (3) та перевіряємо їх рівень значимості за критерієм Стюдента. Всі

коефіцієнти регресійної моделі є статистично значимі. Окрім цього такий висновок підтверджується за критерієм Фішера ($F_{0,05;3;55}^{крит} = 2,812$; $F_{3,55}^{експ} = 99,94$; $F_{3,55}^{експ} > F_{0,05;3;55}^{крит}$). Отримане рівняння регресії:

$$y = 9,936 \cdot z_1 - 140,756 \cdot z_2 + 0,011 \cdot z_3 + 20,041 \cdot z_1 \cdot z_2 - 0,002 \cdot z_1 \cdot z_3 + 0,026 \cdot z_2 \cdot z_3 - 0,004 \cdot z_1 \cdot z_2 \cdot z_3 \quad (4)$$

Похибка отриманої регресійної моделі (4) $MAPE=1,58\%$. Значення коефіцієнту детермінації $R^2=0.92$. Тобто 92% факторів враховано в моделі. Відповідна діаграма розсіювання наведена на рис. 6. Таким чином врахування ефекту взаємодії факторів дозволило підвищити адекватність і точність регресійної моделі.

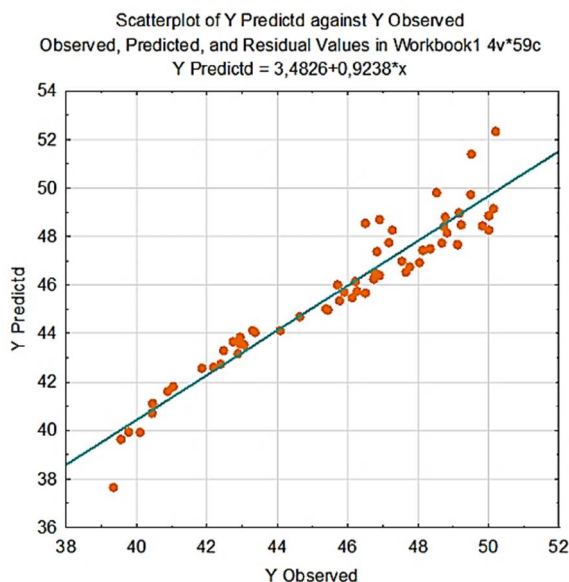


Рис. 6. Діаграма розсіювання значень цільової та апроксимаційної функцій за регресійною моделлю (4)

Розглянемо в якості поліноміальної регресійної моделі поліном другого ступеня, який в даному випадку має вигляд:

$$y = b_0 + b_1 \cdot z_1 + b_2 \cdot z_1^2 + b_3 \cdot z_2 + b_4 \cdot z_2^2 + b_5 \cdot z_3 + b_6 \cdot z_3^2 + b_7 \cdot z_1 \cdot z_2 + b_8 \cdot z_1 \cdot z_3 + b_9 \cdot z_2 \cdot z_3 \quad (5)$$

Розраховуємо коефіцієнти рівняння (5) та перевіряємо їх рівень значимості за критерієм Стюдента (рис. 7).

Parameter Estimates (Spreadsheet_13/05 in Workbook1)										
Sigma-restricted parameterization										
Effect	Y Param.	Y Std. Err.	Y t	Y p	-95,00% Cnf.Lmt	+95,00% Cnf.Lmt	Y Beta (?)	Y St. Err. ?	-95,00% Cnf.Lmt	+95,00% Cnf.Lmt
Intercept	65,6354	48,61699	1,35005	0,183203	-32,0641	163,3349				
z1	4,0915	7,16079	0,57138	0,570355	-10,2986	18,4817	0,82804	1,449201	-2,08424	3,74032
z1^2	-0,3569	0,46308	-0,77075	0,444554	-1,2875	0,5737	-1,01025	1,310731	-3,64426	1,62376
z2	-14,2673	3,80517	-3,74946	0,000469	-21,9141	-6,6205	-2,89559	0,772269	-4,44752	-1,34366
z2^2	-1,2680	0,44692	-2,83713	0,006603	-2,1661	-0,3698	-0,29623	0,104413	-0,50606	-0,08641
z3	-0,0069	0,01892	-0,36249	0,718544	-0,0449	0,0312	-0,69277	1,911132	-4,53333	3,14780
z3^2	0,0000	0,00000	0,15727	0,875679	-0,0000	0,0000	0,29387	1,868577	-3,46118	4,04892
z1*~\FT1...z2	1,8548	0,30047	6,17290	0,000000	1,2510	2,4586	2,67273	0,432977	1,80263	3,54283
z1*~\FT1...z3	-0,0001	0,00060	-0,11264	0,910773	-0,0013	0,0011	-0,08046	0,714252	-1,51580	1,35489
z2*~\FT1...z3	0,0006	0,00061	0,91994	0,362112	-0,0007	0,0018	0,57451	0,624510	-0,68049	1,82951

Рис. 7. Результати розрахунку значень коефіцієнтів рівняння (5) та рівня їх значимості за критерієм Стюдента

На відміну від попередніх випадків, як видно з рис. 7, лише деякі коефіцієнти регресійної моделі другого ступеня є статистично значимими (виділено червоним), які необхідно врахувати. Відповідно отримане квадратичне рівняння регресії:

$$y = -14,267 \cdot z_2 - 1,268 \cdot z_2^2 + 1,8548 \cdot z_1 \cdot z_2 \quad (6)$$

За критерієм Фішера ($F_{0,05;3;55}^{крит} = 2,812$; $F_{3,55}^{експ} = 51,81$; $F_{3,55}^{експ} > F_{0,05;3;55}^{крит}$) модель є адекватною. Похибка отриманої регресійної моделі (6) $MAPE=1,6\%$. Значення коефіцієнту детермінації $R^2=0.90$. Тобто 90% факторів враховано в моделі. Відповідна діаграма розсіювання наведена на рис. 8.

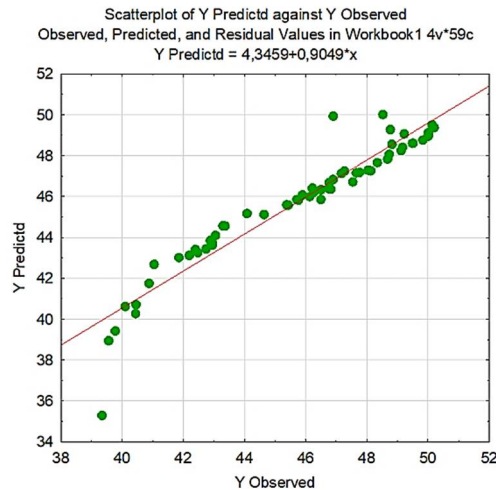


Рис. 8. Діаграма розсіювання значень цільової та апроксимаційної функцій за регресійною моделлю (6)

Таким чином поліноміальна регресійна модель другого ступеня (6) в точності і адекватності, хоча і незначно, поступається лінійній моделі (4).

Побудова регресійних моделей засобами інтелектуального аналізу даних Statistica Data Miner. Для цієї задачі було використано робочу область Data Mining – Workspaces [12] для аналізу різноманітних регресійних моделей та вибору найкращої. Об'єм даної статті не дозволяє детально навести всі процедури інтелектуального аналізу даних, тому зупинимось лише на основних результатах. На рис. 9 наведено отримані діаграми розсіювання цільової та апроксимаційної функцій для різних методів інтелектуального аналізу регресійної моделі.

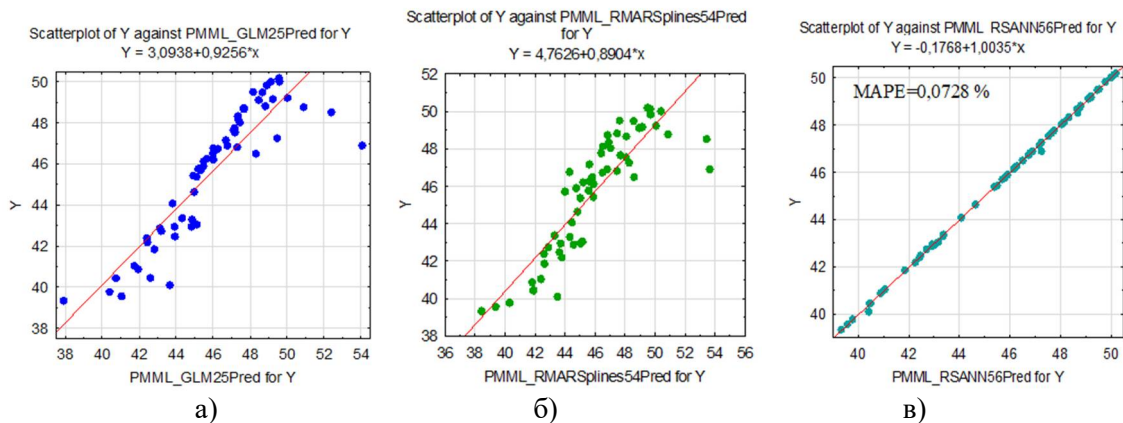


Рис. 9. Діаграми розсіювання цільової та апроксимаційної функцій для інтелектуальної регресійної моделі (навчання та тестування) за використання методів: а - Best-Subset and Stepwise ANCOVA with Deployment; б - MARSplines For Regression With Deployment; в - SANN Regression with Deployment (нейромережева модель MLP-3-23-1)

Очевидно що найкращу точність та адекватність регресійної інтелектуальної моделі, що створена на основі штучних нейронних мереж, дає метод SANN Regression with Deployment (MLP нейронна мережа із 3 входами із одним прихованим шаром, що має 23 нейрони та 1 вихід. Функція активації прихованого шару – tanh (гіперболічний тангенс). Функція активації вихідного шару – identity). Похибка отриманої за даним методом інтелектуальної регресійної моделі MAPE=0,0728 %. Значення коефіцієнту детермінації $R^2 > 0.95$. В загальному вигляді ця модель описується рівнянням [13]:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_K) = \sum_{i=1}^N a_i \cdot f\left(\sum_{k=1}^K a_{ik} \cdot x_k + a_{0k}\right), \quad (7)$$

де $(x_1, x_2, \dots, x_K)$ – вектор вхідних даних; $f(\cdot)$ обмежена, не постійно монотонно висхідна неперервна функція; K – кількість вхідних вузлів; N – кількість нейронів прихованого шару; a_{ik} – синаптичні ваги прихованого шару; a_i – синаптичні ваги вихідного шару; a_{0k} – зміщення.

Отримана регресійна нейромережева модель MLP-3-23-1 має експериментальне значення показника Фішера $F_{3;45}^{експ} = 29800.52$, а критичне значення цього критерію з рівнем значущості $\alpha=0,05$ та числом степенів свободи $\nu_R=45$, $\nu_D=3$ складає $F_{\alpha;\nu_D;\nu_R}^{крит} = F_{0,05;3;45}^{крит} = 2,812$. Тобто умова $F_{3;45}^{експ} > F_{0,05;3;45}^{крит}$ виконується, регресійна модель адекватна. Оскільки $R^2 > 0,95$ то регресійна модель інформативна та значимо достовірна.

Таким чином зі всіх отриманих регресійних моделей найкращі статистичні показники має регресійна модель MLP-3-23-1, що створена на основі штучних нейронних мереж за методом SANN Regression with Deployment. Тому поверхню відгуку будуюмо за даною регресійною нейромережевою моделлю (рис. 10).

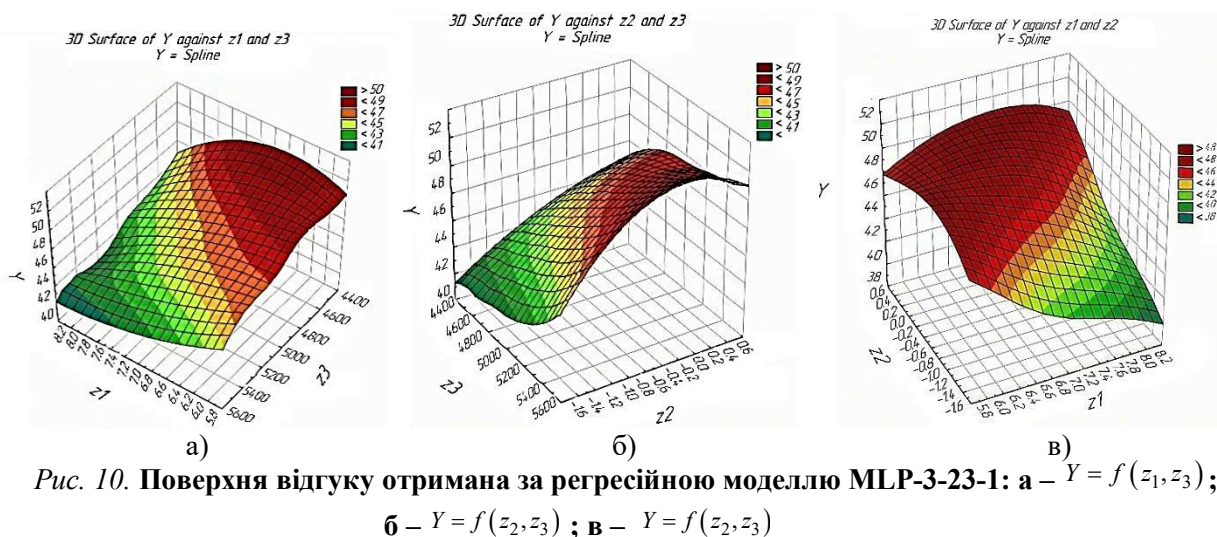


Рис. 10. Поверхня відгуку отримана за регресійною моделлю MLP-3-23-1: а – $Y = f(z_1, z_3)$; б – $Y = f(z_2, z_3)$; в – $Y = f(z_1, z_2)$

Загальний аналіз отриманих результатів показує, що в області обраного факторного простору найбільший вплив на шорсткість поверхні різь має положення фокусу відносно поверхні деталі, дещо нижчий вплив має тиск асистуючого газу, і найбільш низький вплив показала швидкість різання. Це пояснюється тим, що положення фокусу суттєво впливає на розподіл падаючої енергії по висоті різь і відповідно на ширину прорізу, яка є вагомим чинником протікання асистуючого газу через проріз та ефективності видалення розплаву від якої залежить формування мікрогеометрії поверхні. Аеродинамічна взаємодія між струменем асистуючого газу і деталлю формує так званий ріжучий тиск, який в основному і обумовлює характер видалення розплаву з зони різання. В свою чергу швидкість різання по суті забезпечує баланс між об'ємами розплавленого та видаленого металу. На рис. 10а показано взаємозалежність між шорсткістю поверхні різь, тиском асистуючого газу та швидкістю різання. Очевидно, що за умов експерименту збільшення тиску асистуючого газу дозволяє отримати меншу шорсткість при більшій швидкості різання. На рис. 10б показано взаємозалежність між шорсткістю поверхні різь, положенням фокусу та швидкістю різання. Спостерігається чітка тенденція до зниження шорсткості при заглибленні положення фокусу всередину заготовки. Однак варто відзначити незначне зростання шорсткості при збільшенні швидкості різання. На рис. 10 в показано взаємозалежність між шорсткістю поверхні різь, тиском асистуючого газу та положенням фокусу. Найкращий відгук за шорсткістю (Rz38) можливо отримати за тиску 8,2 бар та положенні фокусу -1,6 мм. Для експериментального підтвердження отриманих результатів було виконано вирізання 5 тестових зразків на розрахованих за регресійною моделлю режимах (Z1=8,2 бар; Z2=-1,6 мм; Z3=5600 мм/хв). Контроль шорсткості показав діапазон зміни максимальної шорсткості поверхонь зразків Rz37,92 – Rz41,71 що є досить високим рівнем кореляції між прогнозом за регресійною моделлю та експериментом.

Висновки.

1. З застосуванням методів математичного планування експерименту проведено комплекс системних експериментальних досліджень, результати яких дозволили отримати дані про кількісний вплив базових параметрів газолазерного різання на продуктивність та якість процесу при обробці 12 мм нержавіючої сталі AISI 304 випромінюванням оптоволоконного лазера потужністю 12 кВт.

2. Використовуючи ліцензійний пакет Statistica виконано статистичний аналіз отриманого експериментального матеріалу та розроблено три регресійні моделі, які встановлюють залежність максимальної шорсткості поверхні різання (Y) від базових факторів процесу: тиску асистуючого газу (Z1-азот), положення фокусу відносно поверхні листа (Z2), швидкості різання (Z3). Перевірка отриманих моделей за критеріями Стюдента та Фішера підтвердила їх інформативність та адекватність. Виконане порівняння моделей показало, що найвищі точність і адекватність має регресійна інтелектуальна модель MLP-3-23-1, що створена на основі штучних нейронних мереж, за методом SANN Regression with Deployment. Розрахункова похибка прогнозу за моделлю не перевищує 0,0728 %.

3. Розраховані за регресійною інтелектуальною моделлю MLP-3-23-1, параметри різання (Z1=8,2 бар; Z2=-1,6 мм; Z3=5600 мм/хв) які забезпечують високу якість та продуктивність процесу підтверджені експериментально. При прогнозі Rz38 реальні значення максимальної шорсткості отримані на 5 зразках мали розкид Rz37,92 – Rz41,71 що є високим рівнем точності прогнозування та відтворюваності процесу.

Список використаних джерел:

1. Petru J., Zlamal T., Cep R., Monkova K., Monka P. Influence of cutting parameters on heat-affected zone after laser cutting, *Tehnički vjesnik*, volume 20, 225-230, 2013.
2. Sparkes, M., Gross, M., Celotto, S., Zhang, T., and O'Neill, W. Practical and theoretical investigations into inert gas cutting of 304 stainless steel using a high brightness fiber laser. *J. Laser Applic.*, 2008, 20, 59–67.
3. Sparkes, M., Gross, M., Celotto, S., Zhang, T., and O'Neill, W. Inert cutting of medium section stain-less steel using a 2.2kW high brightness fibre laser. In *Proceeding of the 25th International Congress on Applications of lasers and electro optics (ICALEO)*, Scottsdale, Arizona, USA, 30 October–2 November 2006, paper 402, pp. 197–205 (Laser Institute of America).
4. Gross, M. S., Celotto S. and O'Neill, W. Melt flow in narrow thick-section kerfs. In *Proceeding of the 25th International Congress on Applications of lasers and electro optics (ICALEO)*, Scottsdale, Arizona, USA, 30 October–2 November 2006, paper 403, pp. 206–210 (Laser Institute of America).
5. Adelmann B., Hellmann R. Simultaneous Burr and Cut Interruption Detection during Laser Cutting with Neural Networks, *Sensors*, 21(17), 5831, 2021.
6. Zubko M., Loskot J., Świec P., Prusik K., Janikowski Z. Analysis of Stainless Steel Waste Products Generated during Laser Cutting in Nitrogen Atmosphere, *Metals*, 10(12), 1572, 2020.
7. Осипенко В.І. Вплив внутрішньої структури та розмірів типових сопел на поле ріжучого тиску асистуючого газу при газолазерному різанні / В.І. Осипенко, М.Р. Прусс // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 79/2024 Ст 70-78. DOI 10.36910/775.24153966.2024.79.10.
8. Осипенко В.І. Технологічне забезпечення якісного газолазерного різання 12 мм нержавіючої сталі / Осипенко В.І. Плахотний О.П., Прусс М.Р., Середюк С.П. // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2025): матеріали тез доповідей XV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 22–23 травня 2025 р.): у 2 т. / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.]; – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2025. – Т. 1. – Ст 82-83.
9. Осипенко В.І. Експериментальне обґрунтування ефективних режимів різання сталей випромінюванням потужного оптоволоконного лазера / Осипенко В.І., Плахотний О.П., Прусс М.Р., Середюк С.П. // Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ». Луцьк, 78/2024 Ст 100-108. DOI 10.36910/775.24153966.2024.78.14.
10. Олійник А. О. Інтелектуальний аналіз даних: навчальний посібник / А. О. Олійник, С. О. Субботін, О. О. Олійник. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. – 278 с. ISBN 978-617-529-052-1.
11. Гороховатський В.О., Творошенко І.С. Методи інтелектуального аналізу та оброблення даних: навч. посібник. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 92 с. DOI: 10.30837/978-966-659-298-2.
12. <https://docs.tibco.com/pub/stat/14.0.0/doc/html/UsersGuide/GUID-058F49FC-F4EF-4341-96FB-A785C2FA76E9-homepage.html>
13. Субботін С. О. Нейронні мережі: теорія та практика: навч. посіб. / С. О. Субботін. – Житомир: Вид. О. О. Євенок, 2020. - 184 с.

Л. Д. Мисник¹, Л.М. Мізнік¹, Б.В. Мисник²Черкаський державний технологічний університет¹Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького²**НАУКОВО-МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ
ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ ТЕХНІЧНИХ ДИСЦИПЛІН**

Стаття присвячена розробці науково-методичних основ технології дистанційного навчання технічних дисциплін, створенню ефективного процесу формування інформаційного ресурсу у ході моніторингу навчання. Представлено перелік задач, які потрібно розв'язати для формування інформаційного ресурсу систем управління дистанційним навчальним процесом та запропоновано функціональні модулі дистанційної тестової технології, що реалізують систему процедур породження нової інформації, дозволяючи проводити навчання та контроль знань, а також отримувати протоколи успішності на різних етапах контролю для здобувача вищої освіти, викладача чи будь-якого структурного підрозділу навчального закладу.

Ключові слова: дистанційні технології навчання, тестування, контроль знань, управління навчальним процесом, моніторинг навчання.

L. D. Mysnyk, L.M. Miznik, B.V. Mysnyk

**SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL ASPECTS OF IMPLEMENTING DISTANCE
LEARNING TECHNOLOGIES IN TECHNICAL DISCIPLINES**

The article is devoted to the development of scientific and methodological foundations of distance learning technologies in technical disciplines and the creation of an effective process of forming an informational resource during training monitoring. There is a list of tasks that need to be solved to form an informational resource for distant learning process management systems presented. As well as functional modules of distance testing technology are proposed. These modules implement a system of procedures for generating new information that enables training and knowledge control. But at the same time it gives an opportunity to receive success reports at various stages of control for a higher educational applicant, teacher or any structural unit of educational institution. The results of knowledge tests of higher educational students allow for effective adjustment of the focus, intensity and methods of learning.

Key words: distance learning technologies, testing, knowledge control, learning process management, learning monitoring.

Постановка проблеми. Дистанційна освіта запроваджується в Україні ще з 2000 року як альтернативна форма ведення освітнього процесу. І весь цей час в науково-педагогічному колі не припиняються суперечки щодо ефективності та доцільності даної форми здобуття освіти. Але складне, непередбачуване сьогодення ставить перед нами завдання безперервного віддаленого та ефективного процесу навчання і вимагає пошуку шляхів для вирішення цього завдання. Розв'язати цю проблему значною мірою дозволяють сучасні інформаційні та телекомунікаційні технології і саме технології дистанційного навчання. Основою проведених досліджень є інформаційно-математичний аналіз та моделювання процесу й функцій навчання і контролю знань. Ефективне розв'язання цих задач можливе завдяки системному підходу та методам моделювання. Системна модель становить складну багаторівневу структуру, в якій можна виділити рівень планування задач, алгоритми (технології) та засоби їх вирішення, а також можливість коригування навчального процесу з конкретної дисципліни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання дистанційних технологій під час пандемій, а особливо в час повномасштабної воєнної агресії, дозволяє освітянам вирішувати надскладну та важливу задачу якісного безперервного проведення освітнього процесу незалежно від місця перебування його учасників. Підготовка та проведення такого навчання можливі завдяки спільній об'єднаній співпраці викладачів освітніх закладів, здобувачів освіти та всебічній підтримці з боку держави [1–2]. Проблемам створення та використання дистанційних технологій в навчальному процесі освітніх закладів різного напрямку приділяється велика увага. Цей процес охоплює різноманітні аспекти, зокрема, наукове забезпечення дистанційної технічної освіти, напрями і проблеми досліджень, пошуки нових парадигм, модернізації технологій (В. Биков, В. Кухаренко, В. Бондаренко, Н. Сиротенко, О. Рибалко, Ю. Богачков) [3–4]; теоретичні та методичні засади розвитку, дослідження ефективності дистанційних технологій навчання (С. Сисоєва, К. Осадча, В. Олійник та ін.) [5–7]; врахування педагогічних та психологічних факторів при створенні дистанційних курсів, створення електронних навчальних курсів та електронних тестів (П. Стефаненко, В. Вишнівський, М. Гніденко, Г. Гайдур, О. Ільїн та ін.) [8–9]; можливості та напрями

дистанційного навчання (В. Кухаренко, В. Бондаренко В. та ін.) [10-11,15]. Але, тим не менш, деякі моменти створення та введення в навчальний процес дистанційних технологій навчання потребують вдосконалення. Існує потреба в створенні дистанційних технологій, які б дали змогу якісно й оперативно налаштувати процеси навчання та перевірки засвоєння матеріалу здобувачами освіти шляхом тестування; адаптувати навчальний процес до рівня знань студентів; отримувати всебічну, достовірну інформацію про перебіг навчання. Особливо складно і важливо забезпечити якісний систематичний процес вивчення технічних дисциплін: теоретичної механіки, опору матеріалів, теорії машин і механізмів та ін.

Мета роботи. Розробка науково-методичних основ технології дистанційного навчання технічних дисциплін, створення ефективного процесу формування інформаційного ресурсу у ході моніторингу навчання, шляхом управління процесом формування лекційних, практичних презентацій і тестів та застосування їх при навчанні здобувачів вищої у вищих навчальних закладах України.

Основний матеріал досліджень. Актуальність широкого впровадження дистанційних технологій навчання технічних дисциплін висуває об'єктивні потреби в розробленні та впровадженні цих технологій як технологій, що забезпечують якісне систематичне навчання, яке не залежить від того де знаходяться учасники навчального процесу, так і формуванні повної, достовірної, своєчасної інформації про хід навчання, формуванні інформаційного ресурсу систем управління навчальним процесом.

Перелік задач, які потрібно розв'язати для формування інформаційного ресурсу систем управління дистанційним навчальним процесом наступний:

- сформувати структурно-логічну схему, елементами якої є модулі дисциплін, а зв'язки визначають порядок викладання модулів;
- визначити елементи знань, необхідні на початку вивчення кожного з модулів;
- визначити елементи знань, необхідні в кінці вивчення кожного з модулів;
- визначити структуру інформаційного ресурсу, який буде формуватися в процесі навчання і тестування студентів;
- підготувати план тестування, який повинен відповідати структурно-логічній схемі спеціальності, а також структурі вхідних і вихідних елементів знань модулів дисциплін та потребам у формуванні інформаційного ресурсу для системи управління дистанційним навчальним процесом;
- визначити форму, час надання та суб'єктів системи управління навчальним процесом, які будуть отримувати інформацію, сформовану в тестових технологіях;
- затвердити план тестування та графік надання інформації про результати тестування та план розробки тестів.

Отже, основою дистанційної технології є система представлення презентаційних занять (лекційних та практичних) завдяки яким здобувачі освіти отримують якісний матеріал для навчання (рисунк 1), а також проектування тестів (рисунк 2) та методів їх реалізації, які повинні включати науково-технічний базис у вигляді моделей формування інформаційного ресурсу в процесі тестування, методів побудови оптимальних моделей реалізації тестових технологій та програмні засоби, які реалізують ці методи і які б відповідали потребам навчального процесу.

Потрібна технологія може бути створена на основі деякого програмного середовища з подальшим розширенням різноманітних робочих і забезпечуючих компонентів [12]. Базисом для неї може бути модульне об'єктно-орієнтоване динамічне навчальне середовище – Moodle (Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment). Зусиллями великої кількості спеціалістів усього світу цей проект був значно вдосконалений, і продовжує інтенсивно розвиватися. Цей засіб є одним з рекомендованих для дистанційного навчання Українським інститутом інформаційних технологій в освіті [13].

Та все ж технологія дистанційного навчання та тестування для поточного і підсумкового контролю знань студентів – це не лише програмний комплекс. Це насамперед чітка організація всіх дій спрямована на реалізацію ефективних способів отримання, обробки та використання інформації суб'єктами навчання для досягнення наведених цілей. Навчальний процес базується на поєднанні двох основних під процесів – навчання (що відіграє основну роль при формуванні вмінь, знань і навичок фахівців) та моніторингу навчання (відіграє роль зворотного зв'язку стосовно процесу навчання).

У дистанційній тестовій технології реалізуються такі функціональні вимоги (рис. 3):

- створення навчальних презентацій і тестів;
- одержання результатів тестового контролю знань (ДНТР);

- проведення навчання здобувачів вищої освіти та контроль набутих знань (ДНТНК);
- створення робочих місць для проведення контролю (ДНТО);
- заповнення довідників тестової системи (ДНТД);
- контроль процесу навчання та тестування навчальним департаментом (ДНТК);
- формування шкали контролю знань (ДНТВ);
- створення методики навчання та тестування для перевірки знань (ДНТМ);
- встановлення правильних відповідей на тестові завдання (ДНТП);
- створення бази методів навчання і тестування (ДНТБ).

ОПІР МАТЕРІАЛІВ 49 / 59 75% +

Будуємо епюру нормальних напружень в небезпечному перерізі

$$\sigma_1 = \sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_z} = \frac{120 \cdot 10^3}{743 \cdot 10^{-6}} = 161,5 \cdot 10^6 \text{ Па} = 161,5 \text{ МПа}$$

Нормальне напруження в довільній точці, що знаходиться на відстані y від нейтральної осі знаходимо за формулою Нав'є $\sigma = \frac{M_{\max} \cdot y}{I_z}$

Напруження в точках 2 і 3

$$y_2 = \left(\frac{h}{2} - t\right)$$

$$\sigma_2 = \frac{M_{\max} \cdot \left(\frac{h}{2} - t\right)}{I_z} = \frac{120 \cdot 10^3 \cdot \left(\frac{36}{2} - 1,23\right)}{13380} = 150,4 \text{ МПа}$$

$\sigma_3 = 0$ так як $y_3 = 0$.

Рис. 1. Презентація лекційного заняття

Завдання 5

З умов рівноваги складеної конструкції реакції X_A і Y_A дорівнюють:

☐ $X_A = 0,5F \cos \alpha$; $Y_A = 0,5F \cos \alpha$.

☐ $X_A = 0,5F \sin \alpha$; $Y_A = 0,5F \cos \alpha$.

☐ $X_A = 0,5F \sin \alpha$; $Y_A = 0,5F \sin \alpha$.

☒ $X_A = -0,5F \cos \alpha$; $Y_A = -0,5F \cos \alpha$.

Завдання 6

Для наведеної схеми момент сили $\vec{F}$ відносно осі Ox дорівнює:

☐ $F \cos 30^\circ DO$

☐ $-F \sin 30^\circ KD$

☒ $F \cos 60^\circ KD$

☐ $-F \cos 60^\circ KC$

Рис. 2. Приклад тестових завдань для перевірки знань

Наведені функції технології дистанційного навчання та тестування реалізують систему процедур породження нової інформації, дозволяють проводити навчання та контроль знань, створюють документацію результатів тестового контролю знань, для інформування здобувачів вищої освіти, викладачів чи будь-якого структурного підрозділу навчального закладу.

Як результат проведеного контролю одержуємо протоколи тестування на різних етапах контролю (вхідного, поточного, підсумкового). В системі зберігається інформація про бали, набрані студентами, по етапах та видах контролю з різних дисциплін.

Вхідна інформація включає бази дисциплін (презентації занять, методичні рекомендації та ін.) списки студентів, етапи контролю, методики контролю, види контролю.

© Л. Д. Мисник, Л.М. Мізнік, Б.В. Мисник

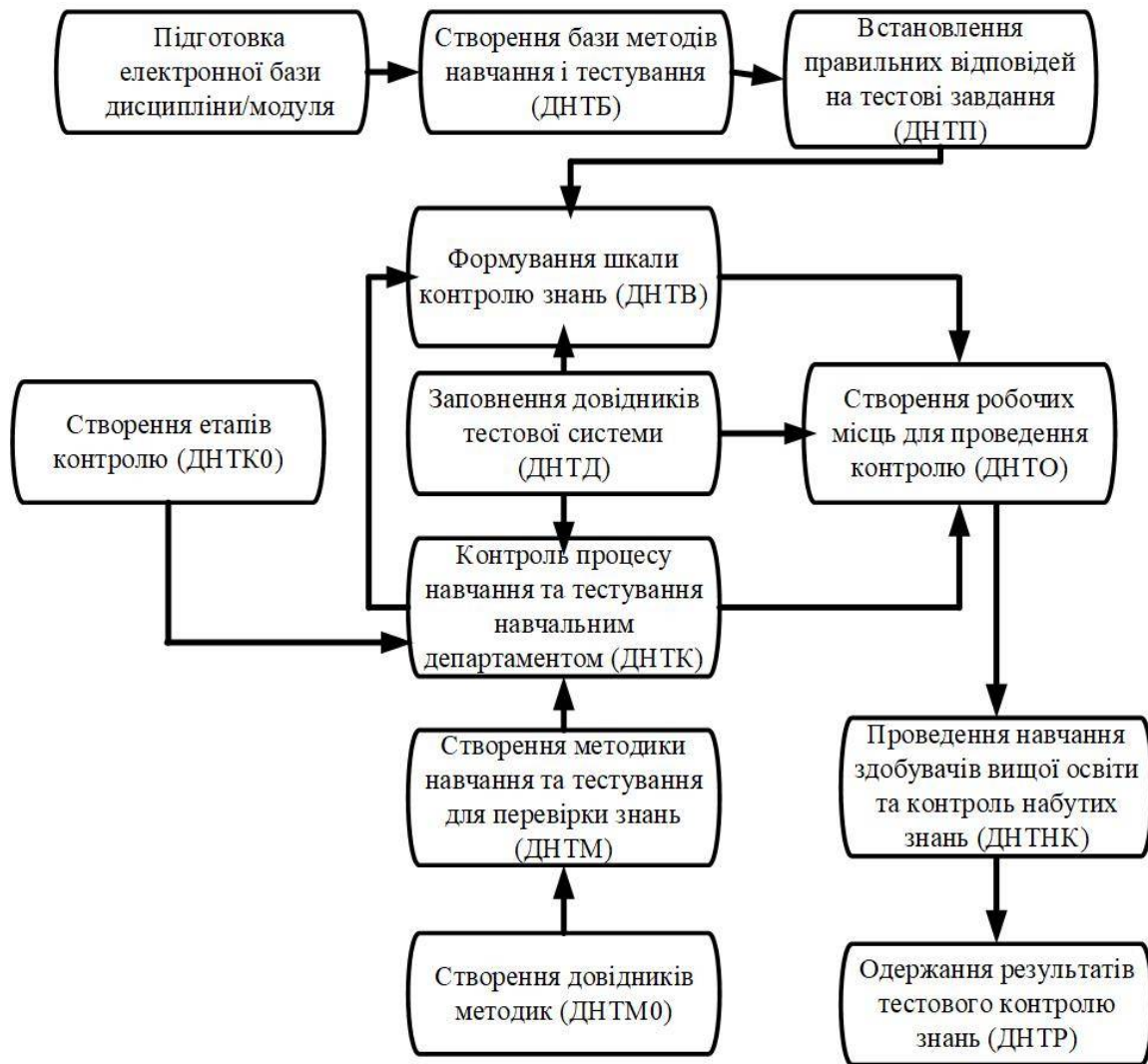


Рис. 3. Структурна схема дистанційної тестової технології

Виконання кожної функціональної вимоги забезпечують певні модулі. Розглянемо детально реалізацію деяких з них.

Модуль проведення навчання здобувачів вищої освіти та контроль набутих знань (ДНТНК). Призначений для навчання здобувачів вищої освіти та їх підготовки до тестування, так як має доступ до довідників тестової системи. Також використовується викладачами при проведенні тестування.

Технологічна послідовність навчання і тестування (ДНТНК) зображена на рисунку 4. Вхідною інформацією є база тестів, сформована в модулі ДНТБ, методика оцінки (модуль ДНТМ), етап контролю (ДНТК) і база контролю (ДНТО), а також база відповідей (модуль ДНТП). Вихідною інформацією є протоколи тестування студентів.

Розглянемо також модуль формування шкали контролю знань (ДНТВ), який використовується для встановлення навчального матеріалу, що буде використовуватись для даного етапу контролю знань дисципліни, який потрібен на тому чи іншому етапі тестування. Початковою інформацією є модуль створення бази методів навчання і тестування (ДНТБ).

В цьому модулі встановлюються наступні параметри контролю:

- назва освітнього компоненту;
- вид контролю;
- список питань для тестування;
- кількість питань;
- обмеження по часу на відповідь.

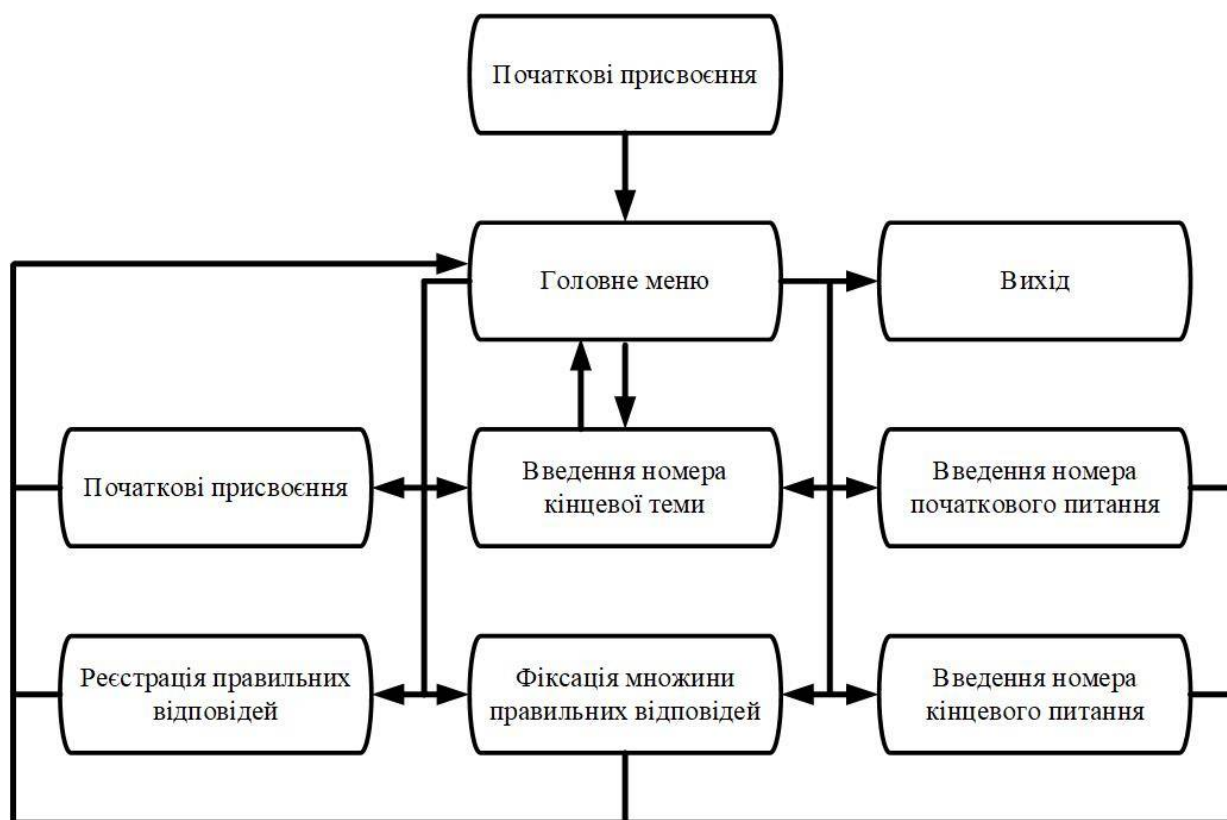


Рис. 4. Структурна схема технології тестування

Технологічна послідовність реалізації функцій модуля зображена на рисунку 5.

Електронна база кожної технічної дисципліни складається з окремих модулів, що відповідають основним розділам курсу. Модуль заповнюється питаннями, відповідями, матеріалом для навчання у вигляді текстових файлів та рисунків, підготовленим у WORD чи інших додатках OFFICE або WINDOWS. Набір питань охоплює весь потрібний для ґрунтовного та успішного засвоєння дисципліни матеріал [14]. В системі передбачено отримання здобувачами освіти теоретичних відомостей, що дадуть змогу вірно відповісти на питання.

В пам'яті системи закладено інформацію про назви дисциплін для тестування, назви модулів дисциплін, теоретичний матеріал по модулях дисциплін; завдання тестового контролю, відповіді до завдань тестового контролю, списки груп студентів, списки студентів, викладачів, множину різних методик контролю, опис видів і етапів контролю, статистику правильних відповідей з кожного питання, оцінки тестування (за датами) по групах студентів, протоколи контролю знань. Реалізований процес контролю знань (тестування) базується на використанні різних видів вибіркового тестів і тестів-задач, в яких студент мають розв'язати запропоновану технічну задачу та ввести правильну цифрову відповідь.

Автоматизовану дистанційну тестову технологію потрібно використовувати протягом семестру, проводити систематичне навчання та здійснювати поточний і підсумковий контроль знань. Це дає можливість відстежити рівень знань студентів і знайти причини незадовільної організації навчального процесу.

Її використання дозволяє:

здобувачам вищої освіти:

- організувати систематичну, ритмічну роботу по засвоєнню навчального матеріалу;
- оцінювати щоденно стан своєї роботи з вивчення дисципліни і виконання всіх видів навчальних завдань;
- впродовж семестру вносити корективи в організацію своєї роботи та інтенсивність навчання;
- мати інформацію про рівень вивчення дисциплін і прогнозувати підсумкову оцінку з дисципліни;

викладачам

- раціонально планувати навчальний процес з конкретної дисципліни;

- виконувати моніторинг успішності кожного здобувача вищої освіти та всієї групи загалом на кожному етапі навчання;
- за необхідності вносити зміни в проведення навчання враховуючи результати перевірки знань.

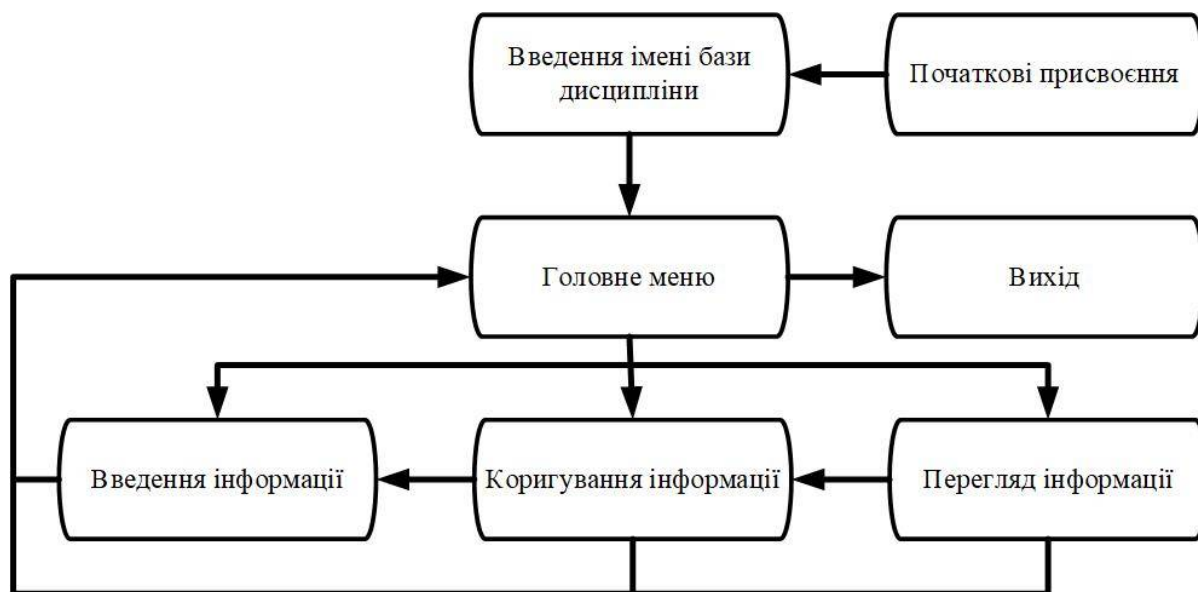


Рис. 5. Структурна схема технології встановлення схеми тестування

Висновок. Засоби дистанційної тестової технології дають змогу проводити процес навчання і перевірки знань як процес раціонального планування, моніторингу та коригування, що особливо важливо при засвоєнні технічних дисциплін. Результати поточного та підсумкового контролю знань здобувачів вищої освіти дозволяють ефективно корегувати направленість, інтенсивність та методи навчання.

Запропоновані технологічні структури здійснення засобів дистанційного навчання та тестування здобувачів вищої освіти, модульна реалізація основних функцій навчання і контролю знань дозволяє створювати систему навчання з довільним складом та конфігурацією та забезпечує організацію робіт з підготовки навчального матеріалу та тестів; формування тестових завдань та надання до них доступу; контролювання та управління системою навчання і тестування; збереження інформації про успішність здобувачів вищої освіти на всіх етапах та видах контролю з різних дисциплін; внесення змін в процес навчання за результатами контролю.

Список літератури

1. Міністерство освіти України. (2015). Наказ № 761. Про затвердження Положення про дистанційне навчання. [Електронний ресурс]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0923-15#n16>
2. Верховна Рада України. (2014). Закон № 1556-VII, Про вищу освіту. [Електронний ресурс]. <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18>
3. Биков В. Ю., Кухаренко В. М., Сиротенко Н. Г., Рибалко О. В., Богачков Ю. М. Технології розробки дистанційного курсу: навч. посіб. Київ: Міленіум, 2008. 324 с.
4. Bykov, V. Yu. (2003) Structure of actual directions (topics) of research of problems of distance professional education. Visnyk Akademii dystantsiinoi osvity, No. 1, pp. 22–26 [in Ukrainian]. <https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/5757/>
5. Сисоєва С.О., К. П. Осадча Стан, технології та перспективи дистанційного навчання у вищій освіті України. Інформаційні технології і засоби навчання, №70 (2), 2019, с. 271-282 https://www.researchgate.net/publication/332717610_STAN_TEHNOLOGII_TA_PERSPEKTIVI_DIST_ANCIJNOGO_NAVCANNA_U_VISIJ_OSVITI_UKRAINI
6. Олійник В. В. Теоретичні та методичні засади розвитку системи підвищення кваліфікації працівників профтехосвіти на основі дистанційних технологій: навч. посіб. НАПН України, Ун-т менедж. освіти. Київ, 2010. 268 с. <https://scholar.google.com.ua/citations?user=7HkHHrwAAAAJ&hl=uk>
7. Кухаренко В. М., Березенська С. М., Бугайчук К. Л., Олійник Н. Ю., Олійник Т. О., Рибалко О. В., Сиротенко Н. Г., Столяревська А. Л. Теорія та практика змішаного навчання: монографія.

Харків: Міськдрук, НТУ «ХП», 2016. 284 с. <https://repository.ldufk.edu.ua/items/db835d77-1853-4f0f-bc7b-60ff36d7e6ea>

8. Стефаненко П. Теоретичні і методичні засади дистанційного навчання у вищій школі: дис. д-ра пед. наук: 13.00.04. Київ, 2002. 470 с. <http://www.disslib.org/teoretychni-i-metodychni-zasady-dystantsiynoho-navchannja-u-vyshchij-shkoli.html>

9. Вишнівський В. В., Гніденко М. П., Гайдур Г. І., Ільїн О. О. Організація дистанційного навчання. Створення електронних навчальних курсів та електронних тестів: навч. посіб. Київ: ДУТ, 2014. 140 с. https://duikt.edu.ua/uploads/1_786_40131752.pdf

10. Кухаренко В. М., Бондаренко В. В. Екстрене дистанційне навчання в Україні: Монографія / За ред. В. М. Кухаренка, В. В. Бондаренка – Харків: Вид-во КП «Міська друкарня», 2020. 409 с. URL: https://dl.khadi.kharkov.ua/pluginfile.php/76494/mod_resource/content/1/ОРИГ%20макет%20%282%29.pdf.

11. Сучасні тенденції розвитку інформаційно-комунікаційних технологій в освіті: зб. Матеріалів II Міжнародної науково-практичної конференції в рамках Міжнародного освітнього форуму «Цифрова трансформація освіти» / упоряд. Н. А. Басараба ; за ред. А. Л. Черній, І. В. Вєтрова, В. С. Безрученка. – Рівне : РОППО, 2020. – 78 с.

12. Мисник Л.Д. Управління формуванням та реалізацією підготовки і проведення контролю знань при дистанційному навчанні студентів. Вісник Черкаського державного технологічного університету, Черкаси, 2018, – № 1 С. 75-80. <https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/2522/1/13.pdf>

13. Відкрита платформа (навчальних середовищ) підтримки дистанційної освіти Moodle <http://www.moodle.org>

14. Мисник Л.Д. Організаційні аспекти реалізації тестової технології для контролю знань студентів Вісник Національного технічного університету «ХП», зб. наук. праць. – Х.: НТУ «ХП», – 2014, – № 17(1060) С. 30-37. http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2014_17.pdf

Н.В. Шинкарчук

Рівненський державний гуманітарний університет

**ОДНОСТОРОННИЙ КОНТАКТ ОРТОТРОПНОЇ ПЛАСТИНКИ
З КРУГОВИМ ОТВОРОМ І ПРУЖНОГО ДИСКА**

Досліджується напружений стан кусково-однорідної ортотропної пластинки з коловим розрізом по лінії умовного поділу матеріалів пластинки і пружного диска за умови контактування їхніх берегів. Пластинчаста конструкція перебуває в умовах однорідного узагальненого плоского напруженого стану на нескінченності. Побудовано систему сингулярних інтегральних рівнянь з логарифмічними ядрами для визначення функцій через які виражаються контактні зусилля на контурі отвору ортотропної пластинки і пружного диска. Наближений розв'язок задачі реалізовано методом механічних квадратур і колокації. Подано результати числових розрахунків.

Ключові слова: напружений стан, ортотропна пластинка, пружний диск, сингулярні рівняння, ортотропні матеріали, зона контакту

N.V. Shynkarchuk

**UNILATERAL CONTACT OF AN ORTHOTROPIC PLATE
WITH A CIRCULAR HOLE AND AN ELASTIC DISK**

The reliability of machine parts and structural elements designed in the form of piecewise homogeneous plates is one of the important problems of engineering mechanics. Their functionality and durability largely depend on the presence of defects such as cuts or cracks on the material boundary line, which can occur at the manufacturing stage and significantly reduce the permissible external load on the part during operation.

A solution to the problem is proposed for an infinite orthotropic plate with a circular hole and an elastic isotropic disk, which are welded together on one part of the common contour, and on the rest of the contour there is a symmetrical circular cut between them. The plate structure is in conditions of a uniform generalized plane stress state at infinity. Under the action of uniformly distributed forces directed along the coordinate axes, the edges of the cut of the plate structure are in contact partially or along the entire length. Friction forces in the contact zone of the plate and disk are absent. The solution to this problem involves determining the components of the stress state at the interface between the materials of an orthotropic plate and an elastic disk, and establishing the dimensions and position of the boundary contact zone.

The boundary conditions of the problem in the smooth contact area are chosen as the equality of the normal displacements of the contour points of the plate and the disk, and in the joint area as the equality of their displacements. The dependencies between the components of the displacement vector of the contour points of the orthotropic plate and the elastic disk and the contact stresses are written as integral relations with logarithmic kernels. By substituting these expressions into the boundary conditions of the problem, a system of four singular integral equations is constructed to determine the functions through which the contact forces in the contact and joint areas are expressed. In addition to the obtained system of equations, the conditions of force equilibrium of the disk must be fulfilled. The approximate solution of the problem is implemented by the method of mechanical quadratures and collocation. The size and position of the contact zone are determined by the method of dichotomy.

For a piecewise-homogeneous orthotropic plate with a symmetric circular section, the edges of which are in contact partially or along the entire length, the influence of the material orthotropy on the distribution of contact and annular stresses is investigated. The value of the limiting angle of the section zone for which the complete contact is broken at its end points is established. The results of numerical calculations are shown in two figures and a table.

Keywords: tense state, orthotropic plate, elastic disk, singular equations, orthotropic materials, zone of contact.

Постановка проблеми. Функціональна здатність та довговічність кусково-однорідних пластин, як деталей машин і елементів конструкцій, значною мірою залежить від наявності на лінії поділу матеріалів математичних розрізів або тріщин, які можуть виникнути в процесі виготовлення або експлуатації деталі. Розгляд випадку часткового або повного контакту берегів тріщини в таких кусково-однорідних пластинках має важливе значення з точки зору забезпечення герметичності й непроникливості конструкції.

Тому дослідження й аналіз напружено-деформованого стану в околі таких дефектів становить значний теоретичний та практичний інтерес у сучасній інженерній механіці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботах [1, 2] подано розв'язки задач про напружений стан кусково-однорідних пластин з контактуючими берегами розрізу по дузі кола, які перебувають в умовах узагальненого плоского напруженого стану на нескінченності.

Розв'язок задачі про напружений стан кусково-однорідної ортотропної пластинки з одним еліптичним розрізом, береги якого перебувають у частковому або повному контакті, при навантаженні пластинки на нескінченності, наведено в [3].

Розрахунок напруженого стану кусково-однорідної ізотропної пластинки, яка перебуває в умовах узагальненого плоского напруженого стану на нескінченності, за наявності на лінії поділу матеріалів зон спаю, гладкого без тертя контакту і відставання, здійснено в [4].

© Н.В. Шинкарчук

Мета статті. Реалізувати розв'язок контактної задачі для нескінченної ортотропної пластинки з круговим отвором та ізотропного пружного диска, що перебувають в умовах однорідного узагальненого плоского напруженого стану на нескінченності, за наявності на лінії їхнього поділу симетричного розрізу по дузі кола, береги якого контактують у процесі деформації.

Постановка задачі. Допустимо, що в отвір нескінченної ортотропної пластинки товщиною $2h$, яка послаблена круговим отвором одиничного радіуса з контуром γ , без зазору і натягу вставлено пружний ізотропний диск такої ж форми та товщини. Середня площина пластинки віднесена до системи прямокутних (x, y) і полярних (ρ, λ) координат з полюсом в центрі отвору. Вважається, що головні осі ортотропії матеріалу пластинки співпадають з координатними осями.

На ділянці $\gamma_3 = [\pi - \beta_0, \pi + \beta_0]$ диск спаяний з пластинкою, а на іншій частині контуру γ між ними наявний наскрізний симетричний розріз. Пластинчаста конструкція перебуває в умовах однорідного узагальненого плоского напруженого стану на нескінченності, викликаного рівномірно розподіленими зусиллями p і q , які діють в напрямках координатних осей. Внаслідок дії такого навантаження на ділянці $\gamma_1 = [-\alpha_0, \alpha_0]$ пластинка вступає в гладку контактну взаємодію з диском. Контакт між пластинкою і диском на ділянках γ_2 відсутній (рис. 1).

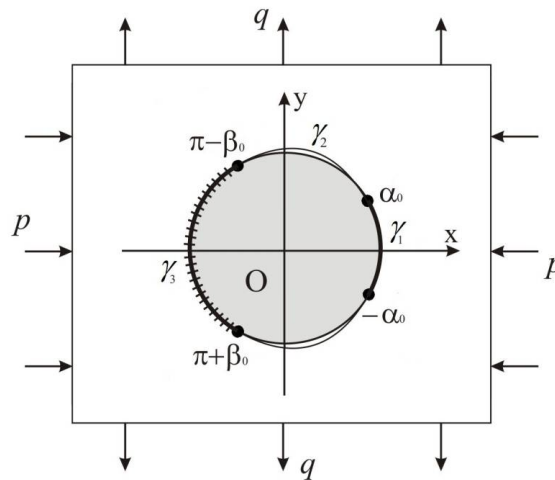


Рис. 1. Розрахункова схема задачі

Розв'язок поставленої задачі полягає у визначенні компонентів напруженого стану на контурі отвору γ , а також встановленні умов, що накладаються на зовнішнє навантаження та величину розрізу, при виконанні яких контакт між пластинкою і диском буде суцільним (повний контакт берегів розрізу).

Виклад основного матеріалу. Граничні умови задачі в зоні контакту $\gamma_1 = [-\alpha_0, \alpha_0]$ приймаємо у вигляді рівності нормальних зміщень пластинки і диска. При відсутності сил тертя їх можна записати так [4, 5]

$$\cos \lambda (U - U^{(1)}) + \sin \lambda (V - V^{(1)}) = 0; \quad S_{\rho\lambda} = S_{\rho\lambda}^{(1)} = 0, \quad T_\rho = T_\rho^{(1)}, \quad \lambda \in \gamma_1, \quad (1)$$

а в зоні спаю $\gamma_3 = [\pi - \beta_0, \pi + \beta_0]$ пластинки та диска – у вигляді рівності зміщень їх контурних точок [4, 5]

$$U - U^{(1)} = 0, \quad V - V^{(1)} = 0; \quad S_{\rho\lambda} = S_{\rho\lambda}^{(1)}, \quad T_\rho = T_\rho^{(1)}, \quad \lambda \in \gamma_3. \quad (2)$$

Тут T_ρ , $S_{\rho\lambda}$, $T_\rho^{(1)}$, $S_{\rho\lambda}^{(1)}$ – нормальні та дотичні зусилля на контурі отвору ортотропної пластинки і пружного диска.

Вирази для компонентів вектора зміщення контурних точок ортотропної пластинки при заданому навантаженні, мають вигляд [3]

$$2E_x h U = (\beta_{11} \beta_{22} - \nu_x) \int_{-\alpha_0}^{\lambda} f_1'(t) dt + R_0(\lambda) + \\ + \frac{\beta_{11} + \beta_{22}}{\pi} \left[\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_2'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt + \int_{\pi - \beta_0}^{\pi + \beta_0} f_2'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt \right] + c_1;$$

$$2E_x hV = (\beta_{11}\beta_{22} - \nu_x) \int_{-\alpha_0}^{\lambda} f_2'(t) dt + Q_0(\lambda) -$$

$$- \frac{\beta_{11}\beta_{22}(\beta_{11} + \beta_{22})}{\pi} \left[\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_1'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt + \int_{\pi - \beta_0}^{\pi + \beta_0} f_1'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt \right] + c_2, \quad \lambda \in \gamma, \quad (3)$$

де

$$R_0(\lambda) = -\cos \lambda [(\beta_{11} + \beta_{22})bp + ap + \beta_{11}\beta_{22}aq];$$

$$Q_0(\lambda) = \beta_{11}\beta_{22} \sin \lambda [(\beta_{11} + \beta_{22})aq + bp + \beta_{11}\beta_{22}bq],$$

а компоненти вектора зміщення контурних точок пружного диска з урахування (1) – (2) і за умов

$$f_1^{(1)'}(t) = f_1'(t), \quad f_2^{(1)'}(t) = f_2'(t)$$

набувають вигляду [4, 6]

$$2E^{(1)}hU^{(1)} = (1 - \nu^{(1)}) \int_{-\alpha_0}^{\lambda} f_1'(t) dt - \frac{2}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_2'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt -$$

$$- \frac{2}{\pi} \int_{\pi - \beta_0}^{\pi + \beta_0} f_2'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt - T^0 \cos \lambda + c_1^{(1)};$$

$$2E^{(1)}hV^{(1)} = (1 - \nu^{(1)}) \int_{-\alpha_0}^{\lambda} f_2'(t) dt + \frac{2}{\pi} \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_1'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt +$$

$$+ \frac{2}{\pi} \int_{\pi - \beta_0}^{\pi + \beta_0} f_1'(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt - T^0 \sin \lambda + c_2^{(1)}, \quad \lambda \in \gamma, \quad (4)$$

де $f_1 + if_2 = i \int_{-\alpha_0}^{\lambda} (T_\rho + iS_{\rho\lambda}) e^{it} dt$, $T^0 = \frac{1}{\pi} \int_{\gamma} (f_2'(t) \cos t - f_1'(t) \sin t) dt$, E_x , ν_x – модуль Юнга

і коефіцієнт Пуассона матеріалу пластини в напрямку осі Ox ; $E^{(1)}$, $\nu^{(1)}$ – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона матеріалу диска; β_{11} , β_{22} – корені характеристичного рівняння [7]; c_1 , $c_1^{(1)}$, c_2 , $c_2^{(1)}$ – дійсні сталі. Решта позначень такі ж як і в [4].

Шляхом підстановки (3), (4) в граничні умови (1), (2) та використавши позначення:

$$f_1'(\lambda) + if_2'(\lambda) = f_1^{\circ'}(\lambda) + if_2^{\circ'}(\lambda), \quad \lambda \in [-\alpha_0, \alpha_0],$$

$$f_1'(\pi + \tilde{\lambda}) + if_2'(\pi + \tilde{\lambda}) = \tilde{f}_1'(\tilde{\lambda}) + i\tilde{f}_2'(\tilde{\lambda}), \quad \tilde{\lambda} \in [-\beta_0, \beta_0], \quad (5)$$

отримаємо систему з чотирьох сингулярних інтегральних рівнянь з логарифмічними ядрами для визначення функцій $f_1^{\circ'}$, $f_2^{\circ'}$, $\tilde{f}_1'$, $\tilde{f}_2'$ на ділянках контакту і спаю

$$\cos \lambda \left[\left((\beta_{11}\beta_{22} - \nu_x) - (1 - \nu^{(1)})k \right) \int_{-\alpha_0}^{\lambda} f_1^{\circ'}(t) dt + R_0(\lambda) + \right.$$

$$+ \frac{\beta_{11} + \beta_{22} + 2k}{\pi} \left[\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_2^{\circ'}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_2'(\tilde{t}) \ln \left| \cos \frac{\lambda - \tilde{t}}{2} \right| d\tilde{t} \right] +$$

$$+ kT^0 \cos \lambda \left. \right] + \sin \lambda \left[\left((\beta_{11}\beta_{22} - \nu_x) - (1 - \nu^{(1)})k \right) \int_{-\alpha_0}^{\lambda} f_2^{\circ'}(t) dt - \frac{\beta_{11}\beta_{22}(\beta_{11} + \beta_{22}) + 2k}{\pi} \times \right.$$

$$\times \left[\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_1^{\circ'}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_1'(\tilde{t}) \ln \left| \cos \frac{\lambda - \tilde{t}}{2} \right| d\tilde{t} \right] + Q_0(\lambda) +$$

$$+ kT^0 \sin \lambda \left. \right] = \tilde{c}_1 \cos \lambda + \tilde{c}_2 \sin \lambda, \quad f_1^{\circ'}(\lambda) \cos \lambda + f_2^{\circ'}(\lambda) \sin \lambda = 0, \quad \lambda \in [-\alpha_0, \alpha_0]. \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \left((\beta_{11}\beta_{22} - \nu_x) - (1 - \nu^{(1)})k \right) \int_{-\alpha_0}^{\lambda} f_1^{\circ'}(t) dt + R_0(\lambda) + \frac{\beta_{11} + \beta_{22} + 2k}{\pi} \times \\ & \times \left[\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_2^{\circ'}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_2^{\circ'}(\tilde{t}) \ln \left| \sin \frac{\tilde{\lambda} - \tilde{t}}{2} \right| d\tilde{t} \right] + kT^0 \cos \lambda = \tilde{c}_1, \\ & \left((\beta_{11}\beta_{22} - \nu_x) - (1 - \nu^{(1)})k \right) \int_{-\alpha_0}^{\lambda} f_2^{\circ'}(t) dt + Q_0(\lambda) - \\ & - \frac{\beta_{11}\beta_{22}(\beta_{11} + \beta_{22}) + 2k}{\pi} \left[\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_1^{\circ'}(t) \ln \left| \sin \frac{\lambda - t}{2} \right| dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_1^{\circ'}(\tilde{t}) \ln \left| \sin \frac{\tilde{\lambda} - \tilde{t}}{2} \right| d\tilde{t} \right] + \\ & + kT^0 \sin \lambda = \tilde{c}_2, \quad \lambda \in [\pi - \beta_0, \pi + \beta_0], \quad \tilde{\lambda} \in [-\beta_0, \beta_0]. \end{aligned} \quad (7)$$

Тут $k = \frac{\sqrt{E_x E_y}}{E^{(1)}}$, $\tilde{c}_1 = kc_1^{(1)} - c_1$, $\tilde{c}_2 = kc_2^{(1)} - c_2$.

Крім системи рівнянь (6), (7) повинні виконуватися умови силової рівноваги диска [3, 8]

$$\int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_2^{\circ'}(t) dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_2^{\circ'}(\tilde{t}) d\tilde{t} = 0; \quad \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} f_1^{\circ'}(t) dt + \int_{-\beta_0}^{\beta_0} \tilde{f}_1^{\circ'}(\tilde{t}) d\tilde{t} = 0, \quad (8)$$

які служать для визначення сталих $\tilde{c}_1$ і $\tilde{c}_2$.

Якщо функції $f_1^{\circ'}$, $f_2^{\circ'}$, $\tilde{f}_1^{\circ'}$, $\tilde{f}_2^{\circ'}$ стануть відомі, то контактні зусилля на контурі отвору пластинки, з врахуванням позначень (5), визначаються за формулою [9]

$$T_{\rho} + iS_{\rho\lambda} = (f_2^{\circ'}(\lambda) - if_1^{\circ'}(\lambda))(\cos \lambda - i \sin \lambda), \quad \lambda \in \gamma. \quad (9)$$

Кільцеві зусилля на контурі отвору ортотропної пластинки визначаються за співвідношеннями, наведеними в [3] при $\varepsilon = 0$, $a = b = 1$, а пружного диска визначаються за формулою, наведеною в [6].

Наближений розв'язок задачі. Для наближеного розв'язання задачі (6) – (8) потрібно використати числові методи, оскільки знаходження точного розв'язку пов'язано зі значними математичними труднощами.

Система рівнянь (6) – (8) має таку ж структуру, як і відповідна система для випадку кусково-однорідної ізотропної пластинки з коловим розрізом [4], тому її наближений розв'язок знаходиться методом механічних квадратур та колокації, ефективність якого продемонстрована в роботах [4, 6, 9]. Методом дихотомії визначається величина і положення зони контакту.

Результати числового розрахунку. Характеристики досліджуваних ортотропних матеріалів і лінії, які відповідають їм на рисунках, наведено в таблиці 1.

Табл. 1.

Характеристики досліджуваних ортотропних матеріалів

Матеріал пластинки	β_{11}	β_{22}	ν_x	E_x/E_y	Вид лінії
Епоксид-графіт	0.143	1.401	0.010	1/25	— — —
Епоксид-скло	0.440	1.310	0.083	1/3	— — — — —
Ізотропний	1	1	0.300	1	_____
Скло-епоксид	2.271	0.762	0.250	3	— — — — —
Графіт-епоксид	6.999	0.714	0.250	25	— — — — —

Для кусково-однорідної ортотропної пластинки з коловим розрізом, яка перебуває в умовах одностороннього стиску на нескінченності зусиллями p , досліджено вплив ортотропії матеріалу пластинки на величину граничного кута зони розрізу, для якого точка розмикання зони контакту збігається з кінцем розрізу, і розподіл напружень на лінії поділу матеріалів пластинки і диска.

Результати числових розрахунків напруженого стану на контурі отвору пластинки і диска при $p = 1$, $q = 0$, $k = \frac{\sqrt{E_x E_y}}{E^{(1)}} = 1$, $\nu^{(1)} = 0.3$ проілюстровано на рис. 2-3. В таблиці 2, для відповідного

матеріалу пластинки, подано величину граничного кута зони розрізу і значення нормальних зусиль в центрі ділянки контакту та спаю.

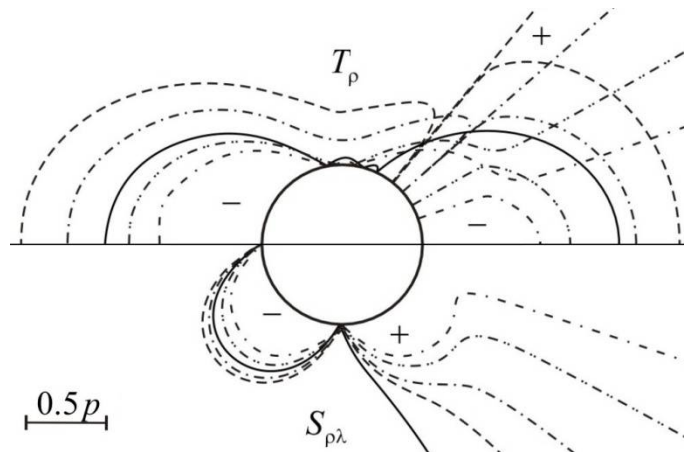


Рис. 2. Розподіл контактних зусиль T_ρ , $S_{\rho\lambda}$ при $k = 1$

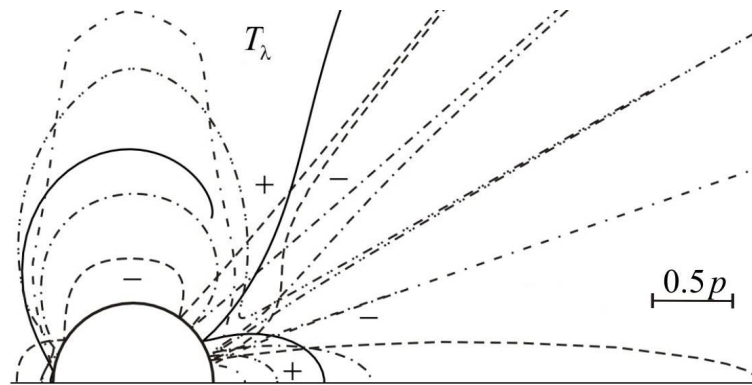


Рис. 3. Розподіл кільцевих зусиль T_λ при $k = 1$

Табл. 2.

Результати розрахунку величин α_0 і T_ρ

Матеріал пластинки	α_0 (град)	$T_\rho (\lambda = 0)$	$T_\rho (\lambda = \pi)$
Епоксид-графіт	50.68	-1.6002	-1.5033
Епоксид-скло	41.32	-1.3298	-1.2158
Ізотропний	64.63	-1.2239	-0.9805
Скло-епоксид	29.49	-0.9196	-0.8301
Графіт-епоксид	19.02	-0.7317	-0.6519

Висновки. В даній роботі досліджено вплив ортотропії матеріалу на розподіл напружень у кусково-однорідній ортотропній пластинці з коловим розрізом, яка перебуває в умовах однорідного узагальненого плоского напруженого стану на нескінченності, викликаного рівномірно розподіленими зусиллями p і q . Для відповідного матеріалу пластинки, встановлено величину граничного кута зони розрізу для якого розмикання повного контакту відбувається в кінцевих його точках.

Аналіз результатів числових розрахунків приводить до таких висновків: при односторонньому стиску ортотропної пластинки на нескінченності вздовж осі симетрії колового розрізу, максимальні значення T_ρ у центрі зони контакту і спаю пластинки та круглого пружного диска зменшується при збільшенні E_x/E_y ; ортотропія матеріалу пластинки вносить суттєвий вплив на величину граничної зони контакту і розподіл нормальних та кільцевих зусиль в зоні контакту і спаю; вплив ортотропії на розподіл дотичних зусиль в зоні спаю проявляється в меншій мірі; для

забезпечення більшої міцності пластинчастої конструкції в інженерній практиці доцільно використовувати ортотропні матеріали для яких $E_x/E_y > 1$.

Список використаних джерел:

1. Грилицький Д.В., Луцишин Р.М. Напряженное состояние анизотропной пластинки с впаянным изотропным ядром при наличии разрезом на спале. Изв. АН СССР. Механика твердого тела, 1962. № 2. С. 159–165.
2. Грилицький Д.В., Луцишин Р.М. Напруження в пластинках з коловою лінією розмежування граничних умов. Львів: Вища школа, 1975. 115 с.
3. Сяський А.О., Шинкарчук Н.В. Кусково-однорідна ортотропна пластинка з еліптичним розрізом за умови контактування його берегів. Наукові нотатки : Міжвузівський збірник (за напрямом «Машинобудування та металообробка», «Інженерна механіка», «Металургія та матеріалознавство»). Луцьк: Луцький національний технічний університет, 2011. Вип. 30. С. 168 – 174.
4. Шинкарчук Н.В. Односторонній контакт ізотропної пластинки з коловим отвором і пружного диска. Наукові нотатки : Міжвузівський збірник (за напрямом «Машинобудування та металообробка», «Інженерна механіка», «Металургія та матеріалознавство»). Луцьк: Луцький національний технічний університет, 2014. Вип. 44. С. 296 – 301.
5. Сяський А.О., Комбель С.М. Граничні умови контактних задач для нескінченної пластинки з криволінійним отвором і жорсткого диска. Волинський математичний вісник. Рівне, 2002. Вип. 9. С. 93 – 97.
6. Сяський В.А. Вплив тертя на розподіл напружень при контакті гладких циліндричних тіл і штампів з кутовими точками. Волинський математичний вісник. Рівне, 1999. Вип. 6. С. 127 – 134.
7. Лехницький С.Г. Анизотропные пластинки. М.: Гостехиздат, 1957. 464 с.
8. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 708 с.
9. Сяський А.О., Шинкарчук Н.В. Мішана контактна задача для пластинки з криволінійним отвором і жорсткого диска. Волинський математичний вісник. Серія прикладна математика. 2010. Вип. 7 (16). С. 199 – 209.

Рецензент: Турбал Юрій Васильович, завідувач кафедри комп'ютерних наук та прикладної математики Національного університету водного господарства та природокористування, доктор технічних наук, професор.

О. О. Твердохліб, І. Т. Ребезнюк

Національний лісотехнічний університет України

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСОВУВАННЯ АСИМЕТРИЙНИХ ОРГАНІЧНИХ КАТАЛІЗАТОРІВ ДЛЯ ПОЛІПШУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ПИЛЯННЯ ДЕРЕВИНИ СТРИЧКОВИМИ ПИЛКАМИ

На підставі аналізування хімічних явищ і перетворювання під час готування й експлуатування стрічкових пилок та ймовірного впливу на них асиметричного органічного каталізатора передбачено й частково засвідчено можливість застосовувати модифікатора складу TREVITAN® під час зварювання і загострювання стрічкових пилок та під час пиляння ними деревини. Це вможливить підвищити довговічність пилок, якість пиляння й продуктивність роботи стрічковопилкових верстатів.

Ключові слова: хімічні явища, стрічкова пила, асиметричний органічний каталізатор, зварювання, загострювання, пиляння деревини.

O. O. Tverdokhlib, I. T. Rebezniuk

PROSPECTS FOR THE USE OF ASYMMETRIC ORGANIC CATALYSTS TO IMPROVE THE PERFORMANCE OF WOOD CUTTING BY BAND SAWS

Based on the analysis of chemical phenomena and transformations during the preparation and operation of band saws and the probable influence of an asymmetric organic catalyst on them, the possibility of using the TREVITAN®-composition modifier during welding and sharpening of band saws and during sawing wood with them has been predicted and partially confirmed. This will make it possible to increase the service life of the saws, the quality of sawing and the performance of band saw machines.

Key words: chemical phenomena, band saw, asymmetric organic catalyst, welding, sharpening, wood cutting.

Problem statement. For the past thirty years, band saws have been the leading machine tools for lengthwise sawing of logs into lumber.

The practice of using band saws shows that a number of factors affect wood cutting performance both at the stages of handling of saws (preparation of saws for operation) and during their operation.

The currently available technologies and methods for handling and operating machines have a number of drawbacks, which leads to a deterioration in the quality, accuracy, and wood cutting performance. The processes of welding band saws, sharpening their teeth, and sawing wood are accompanied by physical and chemical phenomena caused by the interaction of two solid bodies, as well as by the design and technological features of the cutting mechanism of band saws.

The wood on such machines is sawn with a saw in the form of a flexible steel band of a certain length with teeth on one or both longitudinal edges and its opposite ends welded together, forming a one-piece ring-shaped band. On the machines, the saw is mounted on two metal pulleys, giving it the necessary tension and motion trajectory. During sawing, in contact with the driving and driven pulleys, the saw is subjected to continuous unidirectional bending loads, and due to friction between the saw kerf surfaces with sawdust residues, the saw body heats up. This can cause cracks and blade breakage, which can affect cutting performance and the service life of the tool. In order to prevent overheating of the saw body, an aqueous solution is fed into the cutting area. A aqueous-cooling solution is also used during sharpening of the band saw teeth

While the physical phenomena in these processes have been partially investigated, the specific features of chemical phenomena have been hardly studied.

Thus, the optimal operation of band saws is subject to the mutual influence of organic and inorganic material factors in the technological components of band saw formation and its mechanical contact with wood during sawing.

To identify and investigate the components of positive and negative effects on the saw body during these processes, in order to isolate and develop the positive ones, is a complex task that requires the use of innovative means of both methodological and experimental content.

In this context, it would be appropriate to investigate how the use of asymmetric organic catalysts, which are currently effectively used in the agrochemical [1, 2, 3], pharmaceutical [4, 5], and materials science industries [6, 7], will affect these processes. The role of these catalysts is to accelerate chemical reactions.

Therefore, investigating the possibility of using asymmetric organic catalysts (organocatalysts) to prepare and operate band saws is a timely research task.

Analysis of the latest studies and publications.

Catalysis is the process of changing the rate of a chemical reaction under the influence of catalysts [6].

A catalyst is a substance that speeds up a chemical reaction but is not part of the final products.

The term “catalysis” was proposed in 1835 by the Swedish scientist Jens Jakob Berzelius.

Over 115 years of work on catalysis, Nobel Prizes have been awarded 14 times. The first Nobel Prize in Chemistry in this field was awarded in 1909 to the Baltic German Wilhelm Ostwald "for his studies of the nature of catalysis and for his fundamental research into the rates of chemical reactions." In 2007, German Gerhard Ertl won the Nobel Prize for the study of chemical processes on the surfaces of solids [6].

The 2021 Nobel Prize in Chemistry was awarded to German Benjamin List and Scottish-born American David McMillan for “the development of asymmetric organocatalysis.” Until the 21st century, chemists believed that there were only two types of catalysts in the world: metals and enzymes. In 2000, Benjamin List and David McMillan independently developed a third type of catalysis called asymmetric organocatalysis. This type of catalysis makes it possible to synthesize molecules using organic catalysts. Organic catalysts have a stable structure of carbon atoms to which more active chemical groups can attach. Often, these catalysts contain common elements such as oxygen, nitrogen, sulfur, or phosphorus. This makes asymmetric organocatalysis cheaper to manufacture and more environmentally friendly. Benjamin List and David McMillan showed that organic catalysts can be used for many chemical reactions [8, 9].

Organocatalysts are organic molecules that accelerate chemical reactions, resulting in the creation of new molecules that are used to develop and improve various products, including medicines, plastics, and other materials [1–7]. These catalysts fundamentally improve chemical synthesis, making processes more environmentally friendly, efficient, and opening up unprecedented opportunities for creating complex chemical compounds.

The TREVITAN[®]-composition modifier is a high-tech product developed by the company “TREVITAN Ukraine” in the form of a liquid concentrate [1–3]. This product is a carbon (C) asynchronous asymmetric organic catalyst with an energy-information mechanism for directing the reaction based on a colloidal composite of high-molecular-weight oxycarboxylic aromatic (C ha) and aliphatic organic (C fa) acids.

Setting the task.

The aim of the paper is to demonstrate the possibility and formulate the scientific and practical basis for the use of an asymmetric organic catalyst during the preparation for operation and the use of wood-cutting band saws, which increases the service life of the saws and the performance of band saw machines.

Solving the problem.

The object of the study is the process of preparation and operation of wood-cutting band saws.

The subject of the study is wood-cutting band saws with asymmetric organic catalysts used during welding, sharpening, and operation.

Welding of band saw blades is accompanied by a complex of chemical and physicochemical processes, including: metal oxidation, carbon release and carbide formation, diffusion of alloying elements, recrystallization and structural changes, and formation of slag impurities.

When sharpening the blades, especially when performed with full-profile borazone wheels on a grinding machine, friction occurs, which leads to heating of the steel. High temperature can: change the structure of the metal in the cutting area (tempering, reducing hardness); cause overheating and the appearance of cracks or microdefects on the teeth; impair the cutting properties and performance of the saw; cause metal particles to stick to the working surface of the abrasive tool, causing it to wear out more quickly.

Therefore, when sharpening band saws, an aqueous solution (often with anti-corrosion or lubricating additives) is used, which is intended for several purposes: cooling the saw; improving the quality of sharpening; removing cut metal shavings and worn abrasive grains from the sharpening zone, which also extends the service life of the grinding wheel.

The lower heating of the saw and the wheel, and the interaction of their clean surfaces ensure precise tooth geometry and reduce the roughness of the ground surface, which has a positive impact on the service life of the saw. If you use a special aqueous solution with anti-corrosion additives, it also protects the saw from rust after sharpening.

During wood cutting, a number of chemical phenomena occur, caused by mechanical stress on the material, increased temperature in the cutting area, and the interaction of the wood with the environment. The main chemical processes: oxidation and hydrolysis of polymers; release of volatile substances, reactions with the environment.

Wood contains cellulose, hemicellulose and lignin. During cutting, especially at high temperatures or friction, these compounds are partially oxidized. The moisture contained in the wood can contribute to the hydrolysis of hemicellulose, which changes its chemical composition.

During cutting of wood, essential oils (especially in conifers), resins and other organic compounds can evaporate, which affect the odour and physico-chemical properties of the wood. During the processing of wood containing moisture, partial decomposition of organic acids can also occur.

Wood dust generated during cutting can interact with moisture in the air, forming weakly acidic or neutral solutions that can affect the tool or the wood itself.

Although wood cutting is largely a mechanical process, the chemical phenomena that accompany this process can affect the quality of the processing and change the physical properties of the wood.

It is in order to improve the quality of processing, increase the tool service life, and ensure a productive wood-sawing process that an aqueous solution is used.

Thus, when sharpening a saw, we have two solid reagents (abrasive wheel and a saw blade) and a cooling liquid solution; when sawing wood, we have a saw and wood, and a cooling liquid solution. Liquid solutions can be used as catalysts by adding to them the TREVITAN[®]-composition modifier in certain proportions. Thus, we will have an inverse heterogeneous catalysis, when the catalyst is in a liquid state and the reagents are in a solid state. The ends of band saws up to 10 cm long can be kept in the specified TREVITAN[®]-composition modifier (or in its liquid solution) for a certain period of time before welding, in order to evaluate the effect of the catalyst on the quality of the weld seam.

Based on the analysis of the use of asymmetric organic catalysts [1-7], it can be assumed that during the handling and operation of wood-cutting band saws, where chemical phenomena and transformations occur, organocatalysts can be used in different ways:

1 To use as part of a cooling liquid solution to further reduce friction between moving solids and to accelerate tool cooling.

2 To influence the microstructure of surfaces by catalytically modifying the surface layers of the material, which will affect their hardness and the wear of the tool.

3 To create a nanostructured protective layer on the surfaces of the band saw, which will increase its resistance to wear.

4 To use as an impregnating agent for wood or metals to improve their machinability, reduce resin and sawdust adhesion on the surface of the saw.

Based on studies [10], it was found that, due to pre-wetting the 10 mm long ends of saw blades by dipping them in the TREVITAN[®]-composition modifier before welding the band, the number of bending cycles before the destruction of joints made of wetted saw blade ends increased by 16 % compared to saw blade joints welded using conventional technology.

The average number of bending cycles to failure of joints welded using conventional technology is 9% less than the average number of bending cycles to failure of saw blade samples made of the base material without joints, and this is the main cause why the saw blades are the most prone to cracking and breaking in the area of the weld seam. The average value of the number of cycles before destruction of welded joints obtained with the use of the TREVITAN[®]-composition modifier is 6% higher than the number of cycles before destruction of samples of the saw blade made of the base material without joints. Such an increase in the number of cycles before failure of the resulting welded joints will reduce the likelihood of cracks in the saws and their rupture in the area of the weld seam.

To confirm the validity of the results, it is necessary to test the saws welded using the two technologies on a bending bench at the European *Wood-Mizer* plant and in production conditions.

The initial experiments [11] showed that the use of the TREVITAN[®]-composition modifier in the cooling liquid solution during sawing wood on a band saw increases the volume of sawdust removed from the kerf, which reduces the friction of the tool against the kerf walls. At the same time, it was found that when sawing wood with the addition of the TREVITAN[®]-composition modifier to the liquid solution, noise is reduced, a smoother machined surface is obtained, sawdust sticks to the band less, and cutting power decreases.

Conclusions.

The initial experiments have demonstrated the suitability of using an asymmetric organic catalyst in the welding of band saws and in the sawing of wood.

Therefore, in order to attain the goal, the following tasks need to be performed:

- to establish the relevance of using an asymmetric organic catalyst when welding a band saw to increase service life of the tool;
- to establish the expediency of using an asymmetric organic catalyst in an aqueous solution when sharpening band saw teeth, as well as in an aqueous solution used for sawing wood with such a saw in order to increase the tool service life;
- to develop, based on the results of experiments, an asymmetric organic catalyst-based improver for

the processes of sharpening band saw teeth and sawing with a band saw, in order to use it at industry enterprises;

- to elaborate recommendations for the use of the sharpening and sawing improver - the TREVITAN®-composition modifier.

References

1. Dzendzel, A.Yu.; Pyda, S.V. (2021). Composite reclamation agent Trevitan™ - a new complex preparation for rapid soil reclamation. *Educational and scientific aspects of the natural sciences: proceedings of the II-th All-Ukrainian correspondence scientific conference, the city of Sumy, December 8, 2021* Sumy: The A. S. Makarenko Sumy State Pedagogical University. Pp. 51-53. Available at: http://dspace.tnpu.edu.ua/bitstream/123456789/24410/1/Zbirnyk_2021_Dzendzel_Pyda.pdf (accessed on April 2, 2025). [In Ukrainian].
2. Dzendzel, A.Yu.; Pyda, S.V. (2021). Trevitan™ composite reclamation agent - a new complex preparation for the treatment of seeds and planting material. *Eco Forum - 2021: collection of report abstracts of the V-th specialized international Zaporizhia Environmental Forum. September 14-16, 2021, Zaporizhia: Zaporizhia Chamber of Commerce and Industry.* Pp. 45-46. Available at: https://er.chdtu.edu.ua/bitstream/ChSTU/3889/1/%D0%A2%D0%B5%D0%B7%D0%B8_%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D1%84%D0%BE%D1%80%D1%83%D0%BC.pdf (accessed on April 2, 2025). [In Ukrainian].
3. Dzendzel, A. Yu. (2021). Trevitan™ composite reclamation agent - a new complex preparation for accelerating plant growth and development. *Ternopil Biological Readings - Ternopil Bioscience - 2021: proceedings of the All-Ukrainian scientific and practical conference devoted to the 50th anniversary of the Department of General Biology and Methods of Teaching Natural Sciences and to the 100th anniversary of the birth of Doctor of Biology, Professor I. V. Shust - Ternopil: Vector.* Pp.76-77. Available at: <http://dspace.tnpu.edu.ua/bitstream/123456789/23442/1/Dzendzel.pdf> (accessed on April 2, 2025). [In Ukrainian].
4. MacMillan, D. W. C. (2008). «The advent and development of organocatalysis». *Nature*, 455:304–308. <https://doi.org/10.1038/nature07367>.
5. List, B.; Lerner, R. A., & Barbas III, C. F. (2000). «Proline-catalyzed direct asymmetric aldol reactions». *J. Am. Chem. Soc.*, 122(10), 2395–2396. <https://doi.org/10.1021/ja994280y>.
6. Chebanov, V. Modern methods of synthesis and analysis. Lecture 7: Catalysis and catalytic processes. Group of the Department of Applied Chemistry on FB: Available at: <https://www.facebook.com/groups/applied.chemi> (accessed on April 9, 2025). [In Ukrainian]
7. Chebanov, V. Modern methods of synthesis and analysis. Lecture 1: Present-day trends in chemistry. “Green chemistry” and its principles. Group of the Department of Applied Chemistry on FB: Available at: [https://chemistry.univer.kharkov.ua/files/201\(%D0%97%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B0%20%D1%85%D1%96%D0%BC%D1%96%D1%8F\).pdf](https://chemistry.univer.kharkov.ua/files/201(%D0%97%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B0%20%D1%85%D1%96%D0%BC%D1%96%D1%8F).pdf) (accessed on April 10, 2025). [In Ukrainian].
- 8 The winners of the 2021 Nobel Prize in Chemistry have been announced. What they discovered. Available at : <https://life.pravda.com.ua/society/2021/10/6/246136/> (accessed on April 12, 2025). [In Ukrainian].
- 9 Nobel Prize in 2021: How COVID-19 affected the award. Available at: <https://zaborona.com/nobelivska-premiya-u-2021-roczi-yak-covid-19-vplynuv-na-nagorodu/> (accessed on April 14, 2025). [In Ukrainian].
- 10 Tverdokhlib, O. O.; Rebezniuk, I. T. (2025). Initial results of the use of the TREVITAN composition modifier during welding of band saws. *The present time and prospects for the development of the forest industry, landscape architecture and land management.* All-Ukrainian scientific and practical conference. April 24-25, 2025 : collection of the report abstracts. Kharkiv: SBTU. Pp. 157-159. [In Ukrainian].
- 11 Tverdokhlib, O. O. (2024). Initial experiments on the use of the TREVITAN-composition modifier during sawing wood on a band saw. *Innovative solutions for increasing the efficiency of construction, road-building- and carrying-and-lifting machines.* All-Ukrainian scientific and practical conference of higher education students and young scientists. October 16, 2024: collection of articles and report abstracts. Kharkiv: KhNADU. Pp. 202–204. [In Ukrainian].
- 12 DSTU 3966-2009. (2010). Terminology. Principles and rules for the development of standards for terms and definitions of concepts. [Effective as of January 7, 2010]. Published by the official. Kyiv: State Standard of Ukraine, 31 pp. [In Ukrainian].
- 13 Rebezniuk Ihor. (2022). Ukrainian scientific vocabulary: a teaching manual. Lviv: Spolom. 400 pp. [In Ukrainian].

Рецензент: Гасій О. Б., доктор технічних наук, професор кафедри прикладної механіки і технології машинобудування Національного лісотехнічного університету України.

Н.В. Курилко, Р.М. Федоришин

Національний університет «Львівська політехніка»

**МОДЕЛЬНО-ОРІЄНТОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ТА МІЖПЛАТФОРМНЕ
ВПРОВАДЖЕННЯ КОНТРОЛЕРІВ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**

У статті запропоновано модельно-орієнтований підхід до розробки систем керування вітровими електростанціями (ВЕС), що забезпечує адаптацію алгоритмів до технічних і регуляторних вимог, зокрема до мережесевих кодексів. Основна увага приділена створенню контролера ВЕС у середовищі MATLAB/Simulink з автоматичною генерацією коду (C/C++, Structured Text) для розгортання на вбудованих пристроях і ПЛК. Запропоновано створення DLL-бібліотек відповідно до IEC 61400-27-2:2020 (Annex G) для сумісності з симуляторами PowerFactory та PSCAD. Наведено результати валідації моделі (бібліотеки). Визначено переваги такого підходу для прискорення розробки й сертифікації контролерів ВЕС, а також визначено перспективи інтеграції з аероеластичними моделями та цифровими подвійниками вітрових турбін та іншого обладнання ВЕС.

Ключові слова: вітрова електростанція, модельно-орієнтоване проєктування, Simulink, PSCAD, DIgSILENT Power Factory, контролер ВЕС, IEC 61400-27-2, DLL, генерація коду, сертифікація, цифровий двійник.

N.V. Kurylko, R.M. Fedoryshyn

**MODEL-BASED DESIGN AND CROSS-PLATFORM DEPLOYMENT OF WIND POWER
PLANT CONTROLLERS**

This paper presents a model-based development approach for wind power plant (WPP) control systems, emphasizing the adaptation of control algorithms to meet specific technical and regulatory requirements, including grid codes. The WPP controller is implemented in the MATLAB/Simulink environment, enabling automatic code generation in C/C++ and Structured Text for deployment on embedded platforms and programmable logic controllers (PLCs). To ensure interoperability with industry-standard simulation tools such as DIgSILENT PowerFactory and PSCAD, the approach includes generating dynamic link libraries (DLLs) conforming to the interface specification defined in IEC 61400-27-2:2020 (Annex G). The paper details the verification process by comparing the DLL-based implementation against the original Simulink model and demonstrates successful integration within external simulation environments. The proposed methodology accelerates the development, testing, and certification of WPP controllers. Future work includes extending the framework to support integration with aeroelastic models and digital twin platforms.

Key words: wind power plant, model-based design, Simulink, PSCAD, PowerFactory, WPP controller, IEC 61400-27-2, DLL, code generation, certification, digital twin

Introduction. Modern wind power plants (WPPs) encounter a range of technical, operational, and regulatory challenges when developing and implementing control systems [1]. One of the most critical tasks is ensuring compliance with grid-code requirements that govern active-power limitation, reactive-power control, voltage stabilisation, and frequency response. Because these requirements differ across regional standards, designing universal control algorithms becomes significantly more complex [2]. Furthermore, the diversity of WPP architectures—turbine numbers, electrical-mechanical characteristics, and layout configurations—adds another layer of difficulty for standardised solutions [3].

Direct testing of new control algorithms on real installations demands substantial resources owing to long validation cycles and strict safety rules [4]. A model-based design approach therefore gains relevance: it allows engineers to adapt algorithms to a specific WPP configuration and to conduct exhaustive virtual tests before field deployment.

During certification, developers are often required to supply controller models compatible with leading industry simulation suites such as DIgSILENT PowerFactory, PSCAD, and MATLAB/Simulink [5]. The international standard IEC 61400-27-2:2020 (model validation) [6] and national guidelines such as FGW TR4 Rev. 9 (Germany) [7] explicitly stipulate that WPP models be provided as dynamically linked libraries—e.g., Windows DLLs or shared objects on Linux-based platforms—to facilitate verification, testing, and certification.

Current development workflows therefore rely on unified software frameworks that can automatically generate these libraries, greatly simplifying integration into diverse simulation and hardware-in-the-loop environments [8].

A parallel objective of WPP control is to maximise energy yield while reducing structural loads on turbine components. Meeting this goal requires aeroelastic models that capture the wind-structure interaction with high fidelity. However, integrating controllers with aeroelastic-capable tools such as OpenFAST or FAST.Farm remains challenging because no universally accepted interface exists for real-time co-simulation [9].

System Requirements Definition. Considering the technical and operational challenges faced by modern wind power plant (WPP) control systems, a comprehensive model-based approach to the development of control algorithms is proposed. Below, we define the main requirements for the proposed control system.

The WPP control algorithm should be developed in an environment that allows modeling the behavior of real-world systems and conducting initial functional testing, taking into account local requirements and the specific parameters of the particular WPP. This approach aligns with the principles of model-based design, which are widely applied in wind energy engineering [10]. A critical requirement is the ability to quickly adapt control algorithms through visual programming to different grid codes, WPP architectures, turbine types, and auxiliary equipment. An important requirement is also the integration of the developed algorithms with leading simulation environments commonly used in the energy sector, such as DIgSILENT PowerFactory, PSCAD, and MATLAB/Simulink [6].

The proposed solution should support a modular architecture for control algorithms, simplifying their adaptation to real-world operational changes and facilitating updates to individual system components. A key condition for practical deployment is the ability to port the developed algorithms to industrial target platforms, particularly to industrial controllers executing C/C++ code or to programmable logic controllers (PLCs), in accordance with IEC 61400-27-2:2020 [6] and technical recommendations for model certification [7].

Analysis of recent research and publications. The development pipeline based on *dynamically linked libraries* (DLLs) – model creation in MATLAB/Simulink, automatic C/C++ code generation, and compilation into DLLs that follow Annex G of IEC 61400-27-2 – is documented by Chmielewski et al. [8] and remains the de-facto recipe for producing controller models that run unchanged in PSCAD or DIgSILENT PowerFactory. Experiments on a room-temperature control loop showed that the DLL produced identical temperature and current traces in all three simulators, confirming cross-platform consistency.

An important extension of this idea is to couple aero-elastic farm simulators with controller prototypes in Simulink. A full MPI/MEX interface between FAST.Farm and MATLAB/Simulink has been released open-source (FASTFarm2Simulink) and described in detail by its authors; the repository includes example co-simulations of a 10-turbine farm and benchmarks a speed-up factor of 100× relative to high-fidelity CFD models [9]. A separate academic implementation – Smits (2023) – gives a step-by-step configuration of the same interface and demonstrates active-power control of a 10-turbine array under time-varying inflow [11].

Because DLLs must be verified against *all* target simulators, IEC 61400-27-2 has shifted research attention from mere code portability (IEC 61400-27-1) to rigorous model-validation test cases. Comparative studies confirm that DLL controllers compiled from one source achieve virtually identical transient responses in PSCAD, DIgSILENT and PSS®E, provided Annex G entry-points are respected [8].

Parallel and distributed execution is another fast-moving topic. The FASTFarm2Simulink/MPI framework [9] parallelises the super-controller, individual turbine models and wake dynamics into separate processes, cutting multi-hour sequential runs down to minutes – a decisive advantage when tuning large parameter sets.

Beyond controller verification, researchers are linking aero-elastic solvers to layout-optimisation and wake-model tool-chains written in Python. Rodrigues et al. (2024) integrate OpenFAST-derived loads into the *PyWake* / *TOPFARM* stack and show that gradient-based, parallel optimisation trims computation time for 150-turbine layouts by two orders of magnitude [13].

The same push for unification underlies the rise of digital-twin platforms. Branlard et al. (2024) assemble a real-time twin for the TetraSpar floating prototype by merging OpenFAST linearisations with SCADA streams; the twin predicts tower-fore-aft fatigue loads within 10 % of field measurements, enabling proactive maintenance scheduling [14].

Trend summary

- Model unification. Annex G-compliant DLLs now compile once and run anywhere, provided validation tests (IEC 61400-27-2) are passed.
- Cross-platform co-simulation. MPI-based links let Simulink controllers drive FAST.Farm or OpenFAST in parallel, accelerating design-of-experiments runs.
- Python tool-chain coupling. OpenFAST outputs feed PyWake/TOPFARM for gradient-based farm layout or control optimisation.

- Digital twins. Physics-based twins that fuse OpenFAST models with live SCADA data are moving from concept to validated prototypes.

These developments reinforce our choice to follow a model-based design workflow: generate Annex G DLLs from a single Simulink source, validate them once, and reuse the same implementation in PowerFactory, PSCAD, hardware-in-the-loop benches, and eventually in an on-line digital twin of the plant.

Development of the Solution. To implement the above-mentioned requirements, this work proposes the development and testing of wind-power-plant (WPP) control algorithms within the MATLAB/Simulink environment. The choice of this platform is based on two key advantages. First, Simulink is a scalable and flexible tool that enables modelling of a wide range of tasks — from real-time control-system analysis and hardware-in-the-loop (HIL) testing to fault-condition analysis, power-system integration, algorithm optimisation, and comprehensive model validation [13]. Second, the platform supports automatic code generation in C/C++ and Structured Text, providing a direct transition from the modelling phase to deployment on embedded or industrial controllers [14]. This approach significantly shortens the development cycle, reduces errors during control-logic transfer, and ensures consistency between the model and its implementation.

The proposed concept is implemented as a modular model, illustrated in Fig. 1. The central component of the system is the Wind Power Plant Controller, which coordinates the operation of all wind turbines, responds to commands from the grid operator, and ensures that the plant operates in compliance with relevant grid-code requirements. The controller generates control signals based on the current state of the plant, meteorological conditions, and dispatch constraints, aiming to optimally distribute power, regulate reactive power, and maintain voltage and frequency levels at the point of common coupling.

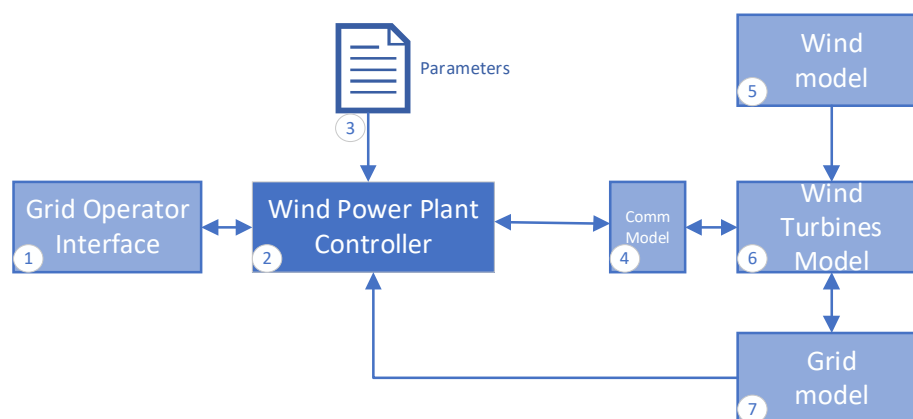


Fig. 1. Structural diagram of the wind-power-plant model

The diagram (Fig. 1) includes the following key components:

1. **Grid Operator Interface** model, which enables communication for transmitting constraints and control commands to the WPP controller, as well as receiving feedback on the current state of the power plant.
2. **Centralised WPP controller**, which directly manages wind-turbine operation by distributing power and performing the necessary control functions.
3. **WPP-controller Parameters**, enabling real-time adjustment of system settings in accordance with current grid-code requirements or internal technical constraints of the plant.
4. **Communication** interface **model** between the WPP controller and turbines, which enables simulation of signal delays and analysis of their impact on overall system performance.
5. **Wind-field model (Wind Model)**, which generates wind-speed and -direction signals needed for assessing wind-turbine performance and control-system operation.
6. Aggregated **Wind-Turbines Model** (Wind Farm Model), which simulates mechanical and electrical processes within turbines under various operating modes and load conditions.
7. **Grid model**, which enables analysis of grid parameters — voltage, frequency, current, active and reactive power — under both normal and fault conditions.

The proposed model, implemented in Simulink, provides a comprehensive approach for testing wind-power-plant control algorithms. It allows for thorough assessment of the effectiveness, robustness, and compliance of control strategies with applicable regulatory requirements. This approach significantly

accelerates the design, verification, and deployment phases of WPP control systems, which is crucial for improving the reliability and adaptability of modern wind-energy installations.

Integration of the WPP Controller Model into Specialized Simulation Environments. Annex G of the IEC 61400-27-2:2020 standard defines an extended interface for data exchange between models implemented in different simulation environments. This annex specifies the C programming language as the primary implementation language, although other languages are also permitted. A model that supports this interface can be compiled as a dynamic (DLL) or static library and integrated into any software environment that complies with the interface requirements [6].

Such models are most commonly compiled as DLLs for the Windows operating system. However, with proper compiler configuration and build-environment setup, they can also be adapted for use with other operating systems or embedded platforms. This approach is widely used to protect intellectual property and to ensure reproducibility when transferring models across simulation tools.

A key advantage of the Annex G interface is its flexibility, which allows the implementation to be tailored to the technical and functional needs of the target environment without modifying the underlying control logic.

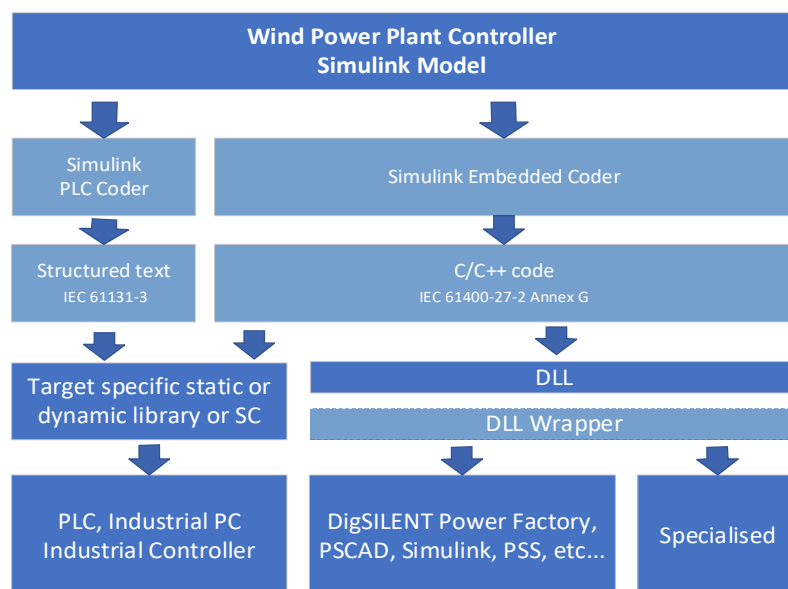


Fig. 2. Code-generation workflow for the WPP controller

Figure 2 shows the workflow for generating code from a Simulink-based WPP-controller model. Two core toolboxes are used:

- **Simulink PLC Coder** automatically produces Structured-Text (ST) code compliant with IEC 61131-3 [15, 13]. The ST code can be loaded directly into industrial programmable-logic controllers, enabling real-time deployment of the control algorithms.
- **Simulink Embedded Coder** generates C/C++ code for embedded systems [14]. To maximise portability, the generated code follows the unified interface of Annex G in IEC 61400-27-2 [6], so that the same source can target multiple hardware platforms.

The resulting C/C++ code may be compiled as a static or dynamic library for industrial computers or other controllers. The same source can also be built as a Windows DLL, enabling plug-and-play integration with simulation suites such as DIgSILENT PowerFactory [17], PSCAD [19], or even another Simulink session.

In summary, this workflow supports a seamless transition from a high-level Simulink model to industrial implementations: from Structured-Text code for PLCs to dynamic libraries for DIgSILENT/PSCAD/Simulink, ensuring a single, validated code base throughout the entire development cycle.

Integration of the WPP Controller Model into DIgSILENT PowerFactory Power-generation equipment operated by transmission-system operators (TSOs) is routinely modelled in DIgSILENT PowerFactory. German TSOs (50Hertz, TenneT, Amprion, TransnetBW) and several other ENTSO-E members—including Elia, RTE, REE and EirGrid—explicitly recommend PowerFactory for dynamic studies in their technical guidelines [17]. National Grid ESO in the United Kingdom follows the same practice during grid-code compliance assessments. PowerFactory owes its popularity to flexible RMS

solvers for electromechanical analysis [17] and EMT solvers for detailed fault studies [18]. Since the 2022 release, external models compiled as DLLs that implement the Annex G interface of IEC 61400-27-2 [6] can be attached directly to objects of type *TypMdl*.

Integration steps are straightforward: Create a new *TypMdl* object; Point the *File* field to the DLL; Populate parameter and initial-value tables. Map the model's inputs and outputs. Because no source-code changes are required, any controller that conforms to Annex G [6] plugs into PowerFactory “as-is.”

Integration of the WPP Controller Model into PSCAD. PSCAD is a specialised EMT platform that TSOs and OEMs use to validate WPP controllers under both normal and stressed grid conditions. Unlike RMS-oriented tools, PSCAD performs fixed-time-step electromagnetic calculations, capturing fast transients that are critical for converter-interfaced wind turbines [19].

TSOs such as 50Hertz, TenneT, TransnetBW and EirGrid rely on PSCAD for controller testing, harmonic analysis and Fault-Ride-Through (FRT) evaluation. Its component-level electromagnetic detail helps detect over-voltages, resonances and converter–grid interaction issues early in the design phase [19].

During certification, PSCAD typically assesses FRT, harmonic content, transient stability and controller performance to verify compliance with IEC 61400-27-2 [6]. Recent PSCAD versions allow C/C++ DLLs, but the tool does not natively recognise the Annex G interface. Therefore, an integration wrapper is required. The wrapper exposes three entry points—Init(), Step() and Terminate()—that PSCAD calls at every time step, translating signals between the Annex G convention and PSCAD's internal format [19]. This extra layer ensures that Annex G-compliant controllers can still be evaluated in PSCAD without rewriting the underlying control logic.

Case Study. To validate the proposed strategy for developing a wind-power-plant (WPP) control system, we built a modular simulation model in MATLAB/Simulink. The architecture follows IEC 61400-27-1 [5] and comprises five key blocks (Fig. 3):

1. **Wind Model** — generates individual wind-speed signals per turbine and the farm-average speed. The model captures both long-term climatology and short-term turbulence, enabling realistic controller tests under variable inflow conditions [10].

2. **Grid Operator Interface** — emulates dispatch commands, issuing active-power limits (CTRL_P_Limit_pct), reactive-power set-points (CTRL_Q_Sp), mode selection (CTRL_Q_Mode) and global stop commands (CTRL_StpCmd).

3. **Grid Model** — computes point-of-common-coupling (PCC) quantities: active power (PCC_P), reactive power (PCC_Q), frequency (PCC_Frq) and voltage (PCC_V).

4. **Wind Park Controller** — a centralised algorithm that distributes power among turbines according to their availability and PCC conditions. Outputs are per-turbine active-power limits (ToWTs_P_lim), reactive-power set-points (ToWTs_Q_sp) and stop signals (ToWTs_Stp).

5. **Wind Farm Model** — aggregates mechanical and electrical dynamics of individual turbines, feeding real-time states (WTs_PCtrl_State, WTs_QCtrl_State) back to the controller.

The closed-loop arrangement allows us to test power-sharing, voltage/frequency support and fault-ride-through logic without hardware. By mirroring dispatch scenarios and grid events in a single Simulink workspace, the workflow shortens controller tuning cycles while ensuring full traceability to IEC 61400-27-1 requirements [5].

C Code Generation and DLL Compilation for the WPP Controller Model. To guarantee compatibility between the wind-power-plant (WPP) controller and industry-standard simulation tools, we implemented a fully automated pipeline for code generation and dynamic-library creation that complies with IEC 61400-27-2 [6]. Starting from the built-in target *ert_shrlib.tlc* (Simulink Embedded Coder) we produced a customised template that emits the complete C/C++ codebase—headers, source files, build scripts and auxiliary metadata—exactly matching the Annex G interface of IEC 61400-27-2 [6].

The generated code is compiled into a 64-bit Windows DLL, ready for use in external environments such as DiGSILENT PowerFactory, PSCAD (via a thin wrapper) or any other simulator that accepts DLL-based models.

For in-house verification a dedicated S-function was written. The block loads any Annex G DLL, executes Init(), exchanges inputs and outputs each timestep, calls the computational kernel, and finally invokes Terminate(), thereby exercising the identical interface that external tools will use. Successful back-to-back tests confirm that the compiled library reproduces the behaviour of the original Simulink model bit-for-bit, completing the portability loop from graphical design to deployable binary.

To verify the correctness of the generated DLL, we executed two controller instances in parallel:

1. Native Simulink model – the original block-diagram implementation.

2. DLL-based model – a custom S-function that loads the Annex-G DLL, calls Init(), steps the controller each sample, and invokes Terminate() exactly as an external simulator would (IEC 61400-27-2, Annex G [6]).

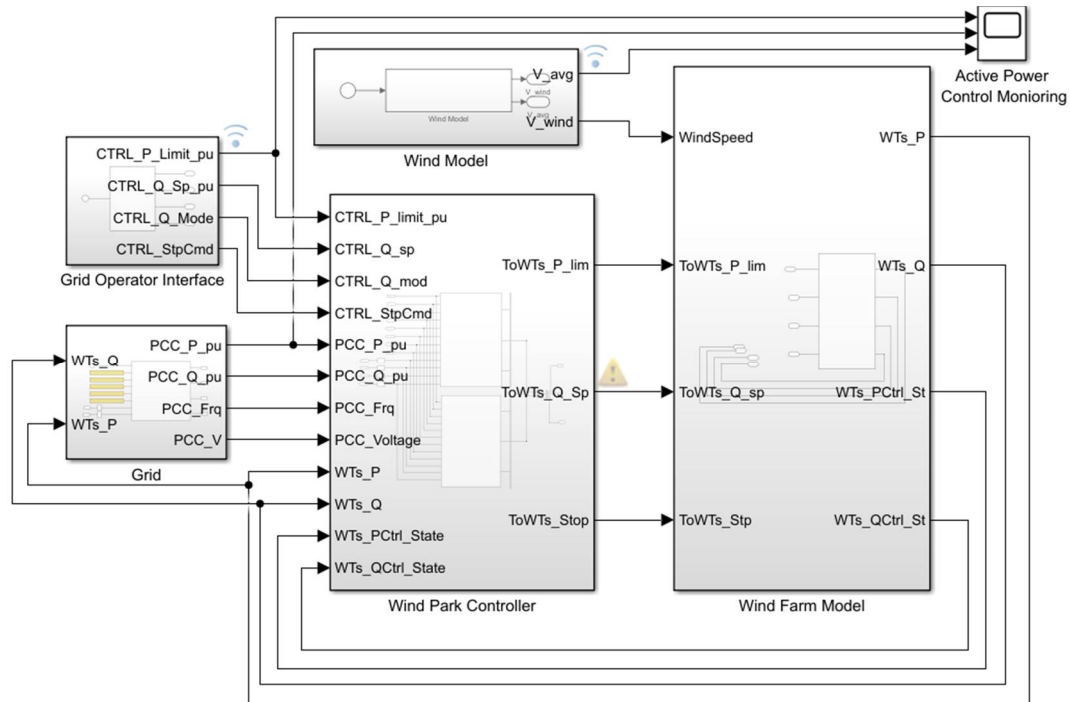


Fig. 3. Wind power plant control model in the Simulink Environment

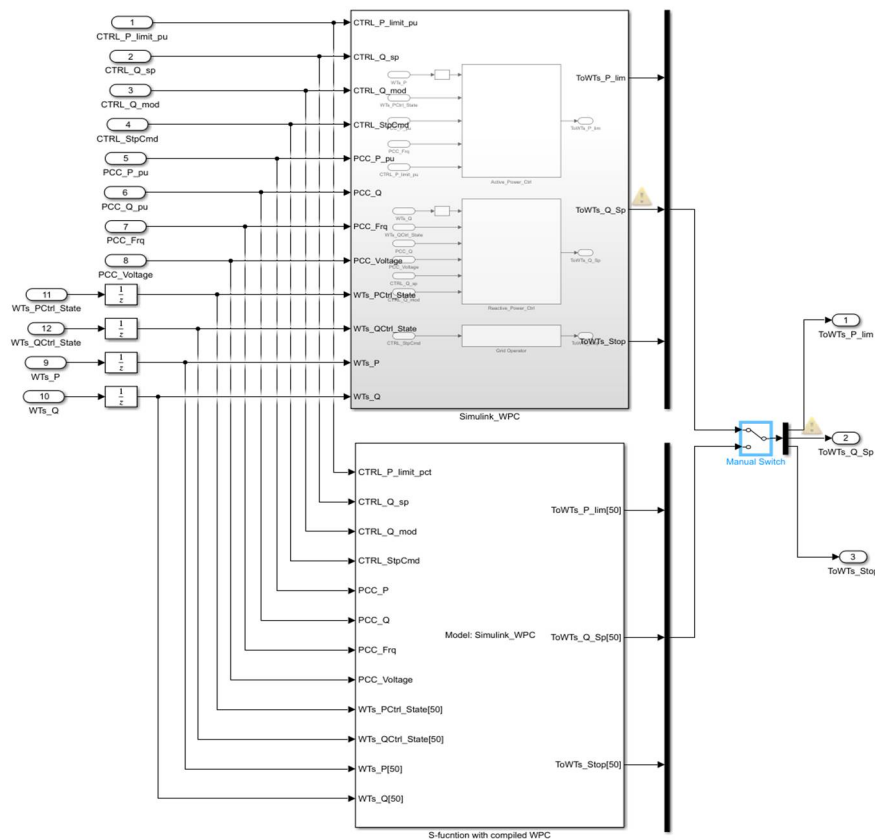


Fig. 4. Parallel validation set-up: native Simulink vs Annex-G DLL

Both instances receive identical input vectors, so any divergence in their outputs can be detected with sample-by-sample precision (Fig. 4).

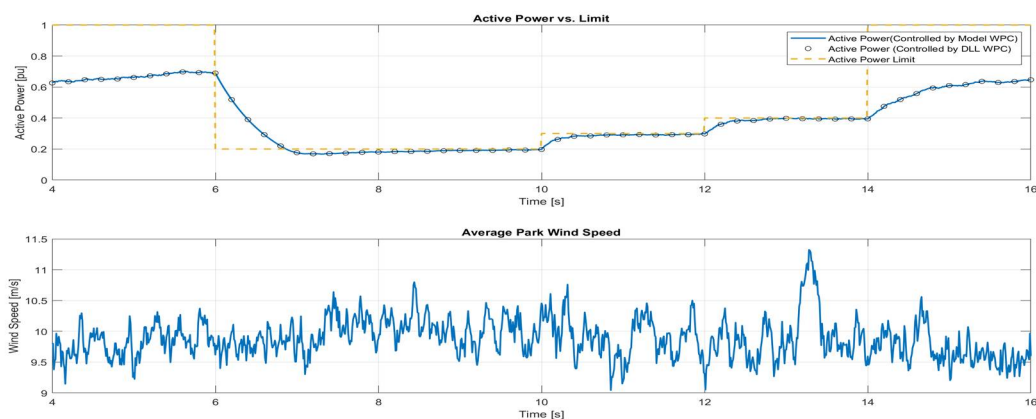


Fig. 5. Comparison of active power generated by the Simulink-based WPP controller and the compiled DLL-based WPP controller

Fig. 5 compares the active-power trajectories produced by the two implementations. Solid line – native Simulink controller. Dotted line – DLL controller. Dashed line – upper-level active-power limit (CTRL_P_Limit_pct). The lower subplot shows the mean wind speed across the WPP, a common input to both controllers.

The near-perfect overlap of the solid and dotted lines confirms computational equivalence and therefore functional parity between the DLL and the source model. This back-to-back test closes the loop: the controller, once compiled, behaves identically in any Annex-G-compliant environment without further modification.

Conclusion. This study examined the technical requirements for wind-power-plant (WPP) control systems and the interface defined in Annex G of IEC 61400-27-2 [6]. We proposed a model-based workflow centred on MATLAB/Simulink, chosen for its extensive modelling tool-set, automatic C/C++ generation, and straightforward deployment to embedded or industrial controllers. Using the IEC Annex G interface as a “universal adapter” ensures that one validated controller can move seamlessly among simulation and execution environments—crucial for meeting diverse grid-code obligations.

At the same time, practical gaps in the current standard were highlighted: the absence of native support for parameter arrays, limited intellectual-property protection, and no formal mechanism for loading external parameter files. Addressing these issues will be essential for large-scale industrial adoption.

Future work should couple the Simulink-based WPP controller with high-fidelity aerodynamic or aeroelastic simulators. Such integration promises tighter control design loops, improved accuracy in turbulent and wake-interaction scenarios, and greater flexibility when adapting to new turbine technologies or regulatory changes.

List of used sources:

1. O'Malley M., Holttinen H., Cutululis N., Vrana T. K., King J., Gevorgian V., Wang X., Rajaei-Najafabadi F., Hadjileonidas A. Grand challenges of wind energy science – meeting the needs and services of the power system // *Wind Energy Science*. – 2024. – Vol. 9. – P. 2087–2112. – DOI: 10.5194/wes-9-2087-2024.
2. Al-Shetwi A. Q., Hannan M. A., Jern K. P., Mansur M., Mahlia T. M. I. Grid-connected renewable energy sources: review of the recent integration requirements and control methods // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 253. – Art. 119831. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119831.
3. Schlueter A., Javid M., Sørensen P., Kristoffersen J. R., Christiansen C. Wind farm flow control: prospects and challenges // *Wind Energy Science*. – 2022. – Vol. 7. – Art. 2271. – P. 1–15. – DOI: 10.5194/wes-7-2271-2022.
4. Gevorgian V., Koralewicz P., Petersen L., Iov F., Tarnowski G., Stroe D.-I. Validating performance models for hybrid power plant control assessment // *Energies*. – 2019. – Vol. 12, No. 22. – Art. 4330. – DOI: 10.3390/en12224330.
5. International Electrotechnical Commission. *IEC 61400-27-1:2020 Wind energy generation systems – Part 27-1: Electrical simulation models – Generic models*. – Geneva : IEC, 2020. – [Electronic resource]. – Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/32564> (accessed: 10 Jun 2025).

6. International Electrotechnical Commission. *IEC 61400-27-2:2020 Wind energy generation systems – Part 27-2: Electrical simulation models – Model validation*. – Geneva : IEC, 2020. – [Electronic resource]. – Available at: <https://webstore.iec.ch/en/publication/34543> (accessed: 10 Jun 2025).
7. FGW e.V. *Technical Guidelines for Power Generating Units and Systems – Part 4 (TG 4): Demands on Modelling and Validating Simulation Models of the Electrical Characteristics of Power Generating Units and Systems, Storage Systems as well as their Components*. – Rev. 09. – Berlin : FGW e.V., 2019. – [Electronic resource]. – Available at: https://wind-fgw.de/wp-content/uploads/2019/05/TG_Part4_Rev9_EN_preview.pdf (accessed: 10 Jun 2025).
8. Chmielewski T., Mars P., Miśkiewicz M., Błaszczuk P. Universal DLL-based components for simulations of multiphysical electro-thermal systems // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2017. – Vol. 93, No. 9. – P. 78–81. – DOI: 10.15199/48.2017.09.15.
9. Boersma S., Doekemeijer B. M., Vali M., van Wingerden J. W., van der Hoek D. Interfacing FAST.Farm with a farm controller in MATLAB/Simulink using an MPI-based communication framework // *Wind Energy Science*. – 2021. – Vol. 6, No. 1. – P. 29–42. – DOI: 10.1088/1742-6596/2626/1/012069.
10. Doekemeijer B. M., Van der Hoek D., Van Wingerden J. Closed-loop model-based wind farm control using FLORIS under time-varying inflow conditions // *Renewable Energy*. – 2020. – Vol. 156. – P. 719–730. – DOI: 10.1016/j.renene.2020.04.007.
11. Rodrigues V., Valotta G. Wind farm flow modeling and optimization in PyWake/TOPFARM // *Proceedings of the NREL Engineering Workshop*. – 2022. – [Electronic resource]. – Available at: <https://www.nrel.gov/docs/libraries/wind-docs/engineering-wkshp2022-4-2-valottarodrigues.pdf> (accessed: 10 Jun 2025).
12. Branlard E., Bush I., Bredmose H., et al. A digital-twin solution for floating offshore wind turbines validated using the TetraSpar demonstrator // *Wind Energy Science*. – 2024. – Vol. 9. – P. 1–24. – DOI: 10.5194/wes-9-1-2024.
13. MathWorks. *Simulink Documentation*. – [Electronic resource]. – Available at: <https://www.mathworks.com/help/simulink/> (accessed: 27 May 2025).
14. MathWorks. *Embedded Coder Documentation*. – [Electronic resource]. – Available at: <https://www.mathworks.com/help/ecoder/> (accessed: 27 May 2025).
15. International Electrotechnical Commission. *IEC 61131-3:2013 Programmable controllers – Part 3: Programming languages*. – Geneva : IEC, 2013. – [Electronic resource]. – Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/4552> (accessed: 10 Jun 2025).
16. ENTSO-E. *CE Dynamic Model v2 – User's Manual*. – 2024. – [Electronic resource]. – Available at: https://eepublicdownloads.blob.core.windows.net/public-cdn-container/clean-documents/SOC%20documents/CE_Dynamic_Model_v2_user_s_manual.pdf (accessed: 10 Jun 2025).
17. DIgSILENT GmbH. *Stability Analysis Functions (RMS)*. – [Electronic resource]. – Available at: <https://www.digsilent.de/en/stability-analysis.html> (accessed: 10 Jun 2025).
18. DIgSILENT GmbH. *Electromagnetic Transients (EMT)*. – [Electronic resource]. – Available at: <https://www.digsilent.de/en/electromagnetic-transients-emt.html> (accessed: 10 Jun 2025).
19. Manitoba HVDC Research Centre. *Wind Power Modelling & Simulation Using PSCAD*. – 2016. – [Electronic resource]. – Available at: https://www.pscad.com/uploads/knowledge_base/wind_power_modeling_simulation_using_pscad.pdf (accessed: 10 Jun 2025).

Рецензент: Химко Ольга Мирославівна, д.т.н., проф., каф. АВКТ, НУ «Львівська політехніка».

Л. Ю. Федік, Я. В. Борейко, Р. Я. Грудецький

Луцький національний технічний університет

САПР У ПРОЄКТУВАННІ РОЗУМНИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ: АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ТА ПРИКЛАД ІОТ-ТЕРМОМЕТРА

У статті розглянуто застосування систем автоматизованого проєктування (САПР) для розробки розумних електронних пристроїв з інтеграцією технологій Інтернету речей (IoT). Проаналізовано сучасні програмні засоби для проєктування друкованих плат, вибору мікроконтролерів і налаштування бездротового зв'язку. Особливу увагу приділено практичному створенню розумного термометра на базі ESP32 та DS18B20, що демонструє можливості автоматизації процесу розробки IoT-пристроїв

Ключові слова: САПР, розумні пристрої, Інтернет речей (IoT), електронне проєктування, мікроконтролери, PCB-дизайн, автоматизоване проєктування, передача даних, оптимізація розробки.

L. Yu. Fedik, Ya. V. Boreiko, R. Ya. Grudetskyi

CAD IN THE DESIGN OF SMART ELECTRONIC DEVICES: ANALYSIS OF APPROACHES AND AN EXAMPLE OF AN IOT THERMOMETER

This paper explores the application of Computer-Aided Design (CAD) systems in the development of smart electronic devices integrated with Internet of Things (IoT) technologies. It provides an overview of modern software tools used for PCB design, microcontroller selection, and wireless communication setup. A particular focus is given to a practical example—the creation of a smart thermometer based on ESP32 and DS18B20 sensors. This case study demonstrates how automated design approaches enhance efficiency in IoT device development, optimizing hardware and software integration for real-world applications.

Keywords: CAD, smart devices, Internet of Things (IoT), electronic design, microcontrollers, PCB design, automated design, data transmission, development optimization.

Постановка проблеми. Світова тенденція до цифровізації суттєво вплинула на розвиток розумних електронних пристроїв. Згідно зі статистикою компанії Statista, у 2023 році кількість пристроїв, підключених до Інтернету речей (IoT), перевищила 15 мільярдів, а до 2030 року прогнозується зростання до понад 29 мільярдів. Розумні пристрої, такі як сенсори, виконавчі механізми, контролери, стають основою нової техноекосистеми, у якій проєктування відіграє ключову роль[1].

В умовах стрімкого розвитку IoT-інженери стикаються з викликом створення пристроїв, які відповідають вимогам енергоефективності, мобільності та інтеграції в цифрові мережі. Системи автоматизованого проєктування (САПР) стають важливим інструментом, який допомагає оптимізувати цикл розробки, підвищити якість проєктування та забезпечити ефективну взаємодію компонентів.

Метою цієї статті є аналіз застосування САПР у розробці розумних електронних пристроїв з IoT-інтеграцією, огляд сучасного програмного забезпечення, основних етапів розробки та практичних реалізацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження підтверджують важливість використання САПР у розробці IoT-пристроїв. Понад 60% академічних проєктів використовують KiCad завдяки відкритій архітектурі та активній спільноті. Це дозволяє швидко інтегрувати нові компоненти й адаптувати САПР під специфічні задачі[2].

З іншого боку, Altium Designer пропонує повну інтеграцію всіх етапів проєктування, включаючи 3D-візуалізацію, бібліотеки компонентів та трасування. Це робить його оптимальним рішенням для промислових IoT-пристроїв у сферах телекомунікацій, автомобілебудування та медичної електроніки [3].

Дослідження Autodesk Fusion 360 Electronics демонструє переваги інтеграції електронного та механічного моделювання, що критично важливо для створення складних IoT-пристроїв. Це дає можливість розробникам оцінювати конструктивні особливості пристрою ще на етапі проєктування, що суттєво скорочує час на розробку [4].

Постановка завдань. Дослідження спрямоване на аналіз методів використання САПР у розробці розумних електронних пристроїв з інтеграцією IoT-технологій. Зокрема, оцінює ефективності автоматизованих інструментів на прикладі розумного термометра, який використовує мікроконтролер ESP32 та сенсор DS18B20 для збору, обробки та передачі даних у цифрову екосистему.

© Л. Ю. Федік, Я. В. Борейко, Р. Я. Грудецький

Викладення основного матеріалу. Розгляд цього практичного кейсу дозволяє продемонструвати ключові етапи проєктування: вибір компонентів, трасування друкованої плати, інтеграцію бездротових модулів та налаштування IoT-зв'язку через MQTT. Аналізуємо, як САПР сприяють прискоренню розробки та підвищенню надійності пристроїв. Це допомагає визначити найкращі підходи до автоматизованого проєктування та сформулювати рекомендації для розробників, які прагнуть оптимізувати IoT-рішення.

Серед основних етапів проєктування розумних пристроїв є:

1. Розробка принципової схеми, що включає вибір мікроконтролерів, джерел живлення, сенсорів та модулів комунікації. Виконується перевірка електричних правил за допомогою ERC (Electrical Rule Check);
2. Вибір мікроконтролера та сенсорів, який відбувається відповідно до вимог щодо входів/виходів, енергоспоживання та сумісності з розробницькими інструментами. Популярними є STM32, ESP32, AVR, NRF52;
3. Проєктування друкованої плати (PCB) – створюється електрична схема, визначається оптимальне розміщення компонентів, виконується трасування доріжок. САПР дозволяє перевірити коректність розведення за допомогою DRC (Design Rule Check);
4. Трасування та оптимізація, що зменшує електромагнітні завади, покращує охолодження пристрою, враховує механічні обмеження;
5. IoT-інтеграція під час якої додаються бездротові модулі ESP32, LoRa, NRF24L01, налаштовується передача даних через MQTT, HTTP(S), CoAP;
6. Тестування та емуляція – перевіряється працездатність пристрою, проводиться моделювання в Proteus, Tinkercad, застосовуються логічні аналізатори та осцилографи.

Ринок програмного забезпечення для електронного проєктування надзвичайно різноманітний і включає як професійні, так і відкриті інструменти, що задовольняють широкий спектр задач розробників. Серед найбільш популярних рішень виділяються Altium Designer, KiCad та Autodesk Fusion 360 Electronics Workspace, кожен з яких пропонує унікальні можливості. Altium Designer забезпечує комплексний підхід, інтегруючи всі етапи проєктування та надаючи потужні інструменти трасування та 3D-візуалізації, що робить його незамінним у промислових розробках складних пристроїв, зокрема у сферах телекомунікацій та медичної електроніки. KiCad, навпаки, надає гнучкі можливості для розробників завдяки відкритому коду та безкоштовному розповсюдженню, що робить його особливо популярним серед академічних досліджень та незалежних інженерів. Fusion 360 Electronics у свою чергу інтегрує електронне та механічне моделювання, що є критично важливим для IoT-проєктів і робототехнічних систем[3; 5-6].

При розробці розумних пристроїв важливою складовою є підтримка мікроконтролерів та модулів зв'язку, серед яких Bluetooth, Wi-Fi та LoRa, а також наявність стандартних інтерфейсів I2C, SPI та UART, що забезпечують ефективну взаємодію компонентів. Автоматизоване проєктування проходить через кілька ключових етапів: створення принципової схеми, вибір мікроконтролерів та сенсорів, розробка друкованої плати, трасування та оптимізація її структури. Особливу увагу приділяють розміщенню компонентів з урахуванням електромагнітних характеристик та механічних обмежень.

З інтеграцією IoT-технологій з'являється необхідність в додаванні бездротових модулів, таких як ESP32, NRF24L01, LoRa, що дозволяє налаштувати ефективну передачу даних за допомогою MQTT, HTTP(S) чи CoAP. Крім того, перед фінальним виробництвом пристрої проходять етап тестування та емуляції, який включає перевірку віртуальних моделей у середовищах Proteus чи Tinkercad, а також аналіз роботи в реальних умовах за допомогою логічних аналізаторів та осцилографів[7].

У 2023 році компанія Keysight повідомила, що понад 70% інженерів використовують емуляцію перед фізичним створенням прототипу, що підкреслює важливість тестування на ранніх стадіях розробки. Завдяки сучасним інструментам САПР, розробники можуть значно скоротити час виробництва та підвищити надійність своїх пристроїв, використовуючи передові програмні платформи для оптимізації проєктування[8].

Для підтвердження практичності підходу створено пристрій вимірювання температури, що використовує DS18B20 та передає дані через ESP32 у мобільний застосунок.

При цьому компонентами є: ESP32 DevKit; DS18B20, резистор 4.7 кОм, стабілізатор AMS1117; програмне забезпечення: САПР KiCad 7.0, прошивка: Arduino IDE; передача даних: MQTT → Node-RED → Telegram Bot.

Фрагмент прошивки на Arduino:

```
#include <WiFi.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <PubSubClient.h>

const char* ssid = "YourSSID";
const char* password = "YourPassword";
const char* mqtt_server = "broker.hivemq.com";

WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);
#define ONE_WIRE_BUS 4

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  client.setServer(mqtt_server, 1883);
  sensors.begin();
}

void loop() {
  sensors.requestTemperatures();
  float tempC = sensors.getTempCByIndex(0);
  char msg[10];
  dtostrf(tempC, 1, 2, msg);
  client.publish("home/temperature", msg);
  delay(10000);
}
```

Висновки. Системи автоматизованого проектування є фундаментом ефективного розроблення розумних пристроїв. Завдяки широкому вибору програмних рішень інженери можуть адаптувати процес проектування під конкретні задачі – від побутових IoT-гаджетів до складних промислових систем.

Практичний приклад розумного термометра підтверджує, що навіть з використанням безкоштовних САПР можливо створювати ефективні, масштабовані пристрої, інтегровані у цифрову екосистему.

У майбутньому розвиток мікроконтролерів та програмного забезпечення ще більше розширить можливості проектування, роблячи IoT-технології доступними для більшої кількості розробників.

Список використаних джерел:

1. Statista. Internet of Things (IoT) connected devices installed base worldwide from 2015 to 2030 (in billions) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/>. – Дата звернення: 25.05.2025.
2. About KiCad. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.kicad.org/about/kicad/>. – Дата звернення: 05.06.2025.
3. Altium Designer 25: From Requested to Required. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.altium.com/altium-designer>. – Дата звернення: 05.06.2025.

4. Як навчитися Autodesk Fusion. Ч. 1. Офіційні ресурси. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://forums.autodesk.com/t5/community-blog/yak-navchitisa-autodesk-fusion-ch-1-ofitsiyi-resursi/ba-p/13261847>. – Дата звернення: 05.06.2025.
5. IEEE Spectrum. Open-Source KiCad EDA Suite Gets a Boost [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://docs.kicad.org/9.0/ru/kicad/kicad.pdf>. – Дата звернення: 25.05.2025.
6. Autodesk. Fusion 360 Electronics Capabilities – Unified ECAD/MCAD Design [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.engineering.com/Fusion-360-Adds-Integrated-Electrical-Design>. – Дата звернення: 25.05.2025.
7. Das, A. P., Banerjee, S. Comparative Study on PCB Design Tools for Future PCB Designers [Електронний ресурс] / A. P. Das, S. Banerjee // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. – 2020. – Vol. 9, Issue 6. – P. 233–238. – Режим доступу: <https://ijcsmc.com/docs/papers/June2020/V9I6202029.pdf>, вільний. – Дата звернення: 01.06.2025.
8. Keysight. Keysight Releases 2023 Corporate Social Responsibility Report and Disclosures [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.keysight.com/us/en/about/newsroom/news-releases/2024/0514-PR24-075-Keysight-Releases-2023-Corporate-Social-Responsibility-Report-and-Disclosures.html>. – Дата звернення: 06.06.2025.

О.В. Крупський, О.С. Приходько

Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕВОЛЮЦІЙНОЇ ДИНАМІКИ ГЕНЕТИЧНИХ СТРАТЕГІЙ В УМОВАХ ЗМІННОЇ ДОСТУПНОСТІ РЕСУРСІВ

Робота присвячена експериментальному дослідженню впливу різних режимів доступності ресурсів на еволюційну динаміку, використовуючи раніше розроблену агент-орієнтовану симуляцію. Проаналізовано п'ять сценаріїв (від дефіциту до екстремальних коливань) та виявлено залежність домінуючих генетичних стратегій і стабільності популяції від умов середовища.

Ключові слова: агент-орієнтоване моделювання, еволюційна адаптація, доступність ресурсів, генетичні стратегії, динаміка популяції, симуляційні експерименти, сезонність, екологічні сценарії, штучне життя.

O.V. Krupskyi, O.S. Prykhodko

RESEARCH ON THE EVOLUTIONARY DYNAMICS OF GENETIC STRATEGIES UNDER CONDITIONS OF VARIABLE RESOURCE AVAILABILITY

This paper is devoted to the experimental study of the influence of different resource availability regimes on evolutionary dynamics using a previously developed agent-based simulation. Five scenarios (from scarcity to extreme fluctuations) were analyzed, and the dependence of dominant genetic strategies and population stability on environmental conditions was revealed.

Keywords: agent-based modeling, evolutionary adaptation, resource availability, genetic strategies, population dynamics, simulation experiments, seasonality, ecological scenarios, artificial life..

Introduction and problem statement. The evolutionary adaptation of living organisms to constantly changing environmental conditions is a fundamental process underlying biological diversity and ecosystem resilience. Understanding the mechanisms by which populations respond to fluctuations in resource availability, climate change, or other environmental challenges is not only of theoretical but also of practical importance for predicting the consequences of anthropogenic impact and developing strategies for biodiversity conservation. This work is a continuation of a previous study in which an agent-oriented simulation model for analyzing evolutionary processes was developed, described in detail, and validated [1]. This model simulates a population of autonomous agents whose genome determines four key phenotypic traits: “Speed”, ‘Endurance’, ‘Vision’, and ‘Maximum Energy’. Agents compete for food resources that appear in the environment, taking into account seasonal changes, and also have the ability to form social groups (clans) for mutual assistance. Preliminary research has demonstrated the functionality of the model using a baseline scenario with stable, moderate conditions, laying the methodological foundation for further experiments.

Analysis of the latest research and publications. The relevance of studying evolutionary adaptation using computer modeling, in particular the agent-based approach (ABA), was thoroughly justified in our previous work [1]. AOM allows us to reproduce complex interactions between individuals and the environment, making it an effective tool for studying the emergent properties of population systems, such as natural selection, adaptation, and the emergence of social structures [2-3]. Previous studies using AOM have often focused on individual aspects, such as optimal foraging [4], the evolution of cooperation [3,5-6], or adaptation to specific stressors. However, the complex impact of a wide range of resource availability regimes—from severe scarcity to abundance and catastrophic fluctuations—on the competition of a specific set of genetic strategies (speed, endurance, perception, energy consumption) remains an area that needs further study. In particular, conditions of significant resource scarcity are expected to increase selection in favor of energy-efficient strategies [7-8]. In contrast, environments with resource abundance may alter selection pressures, potentially favoring strategies of rapid growth and reproduction (r-strategies), even if they are less efficient in terms of energy use [7]. Investigating the impact of abrupt and unpredictable resource fluctuations (boom-bust environments) is particularly relevant, as such conditions can lead to nonlinear population dynamics, bottleneck effects, and the dominance of specialized stress-tolerant strategies [7-9]. Although the concept of the Parrondo effect, where a combination of losing strategies can lead to a win in changing conditions [2,5,10-11], was mentioned in [1] as a theoretical basis, our current study does not aim to directly test it. Instead, we use the developed model for empirical analysis of how different stable or cyclically variable levels of resource provision affect evolutionary outcomes, thus

© О.В. Крупський, О.С. Приходько

complementing existing theoretical and modeling work in evolutionary ecology. Thus, based on a validated simulation tool [1], this study aims to fill a gap in the understanding of adaptive responses of populations to a wide range of ecological scenarios determined by resource availability.

The aim of the study. An in-depth experimental study of the impact of a wide range of resource availability regimes on the competitive success of different genetic strategies, population dynamics, and the role of clan structures.

Experimental methodology. The basis for conducting experimental research in this work was an agent-oriented simulation model developed and described in detail in our previous publication [1]. To ensure the self-sufficiency of the presentation, we will briefly recall the key aspects of the model. The simulation takes place in a two-dimensional discrete environment measuring 256x256 cells. The main resource is food, the dynamics of which depend on four seasons (Spring, Summer, Autumn, Winter), each lasting 180 simulation seconds. Agents representing individual individuals are characterized by energy level, movement speed, field of vision, and genome. The genome consists of 10 slots, each of which can contain one of four functional alleles that additively affect phenotypic traits: Gene 1 (“Speed”), Gene 2 (“Endurance” – reduction in energy consumption), Gene 3 (“Vision”), and Gene 4 (“Maximum Energy”). The behavior of agents is determined by a set of rules with priorities: food search, reproduction, and interaction within the clan. Reproduction is sexual, requires energy expenditure, and success depends on the genetic similarity of the parents. Offspring inherit genes from both parents with the possibility of mutation (1% per gene slot). Agents with a high concentration of identical genes (≥ 8) can form clans, whose members are able to provide energy assistance to each other. More details about agent parameters, characteristic calculation formulas, behavior algorithms, and software implementation are given in [1].

Presentation of the main research material. Five experimental scenarios were developed and analyzed to systematically study the impact of different resource availability regimes on population evolutionary dynamics. In all scenarios, the simulation was initiated with 20 agents with randomly generated genomes and continued until one of the four functional gene types disappeared or the maximum simulation time was reached. The scenarios differed in two key parameters: the value of one unit of food (the amount of energy received by the agent) and the intensity of food appearance (units per second) in different seasons.

Table 1

Comparative characteristics of simulation scenarios

№	Сценарій	Food value (energy units)	Food appearance intensity (units/s) Spring (Sp) / Summer (Su) / Autumn (Au) / Winter (Wi)	Brief justification
1	Stable Environment	50	4 / 5 / 3 / 2	Moderate seasonality, control example.
2	Scarce Environment	20	3 / 4 / 2 / 1	Chronic shortage and low nutritional value.
3a	Rich Environment	600	5 / 6 / 4 / 3	High resources, change in selection pressure.
3b	Rich Environment	>900	5 / 6 / 4 / 3	Same as above, but with maximum excess.
4	Seasonal Inequality	50	6 / 8 / 2 / 1	Sharp seasonal fluctuations, adaptation to unevenness.
5	Boom-and-Bust	10	50 / 2 / 2 / 1	Spring “boom” and subsequent “bust”, studying resilience.

Data collection and analysis. For each simulation run in all scenarios, the following indicators were recorded at specific time intervals (e.g., every simulation second or every 10 seconds): the total number of agents in the population; the relative number (proportion) of each of the four functional types of genes in the population's gene pool; the number of active clans for each gene type and the total number of agents who are members of clans. The collected data were used to construct time series graphs visualizing the dynamics of the population, gene frequencies, and clan structures.

Results. This section presents the results of simulation experiments for five scenarios modeling different modes of food resource availability. The analysis is based on the dynamics of the total population

size, the relative proportions of each of the four functional gene types (“Speed”, “Endurance”, “Vision”, “Maximum Energy”), and the activity of clan structures. The visualizations are presented in Figures 1-6, where each figure corresponds to one of the described scenarios and contains graphs of population dynamics (top) and gene frequencies (bottom). The behavior of clan structures is not shown in the graphs and is presented in a text description.

Baseline scenario ('Stable Environment') (Parameters: food value 50; appearance intensity: Sp-4, Su-5, Au-3, Wi-2 units/s). The results for the baseline scenario are shown in Fig. 1. Stable population dynamics were observed after the initial growth. The “Vision” gene (Gene 3) quickly established a dominant position (~40-50% share), competing with the “Speed” (Gene 1) and “Endurance” (Gene 2) genes, which maintained lower but stable shares. The “Maximum Energy” gene (Gene 4) proved to be the least successful. Clans were formed mainly on the basis of the “Vision” gene.

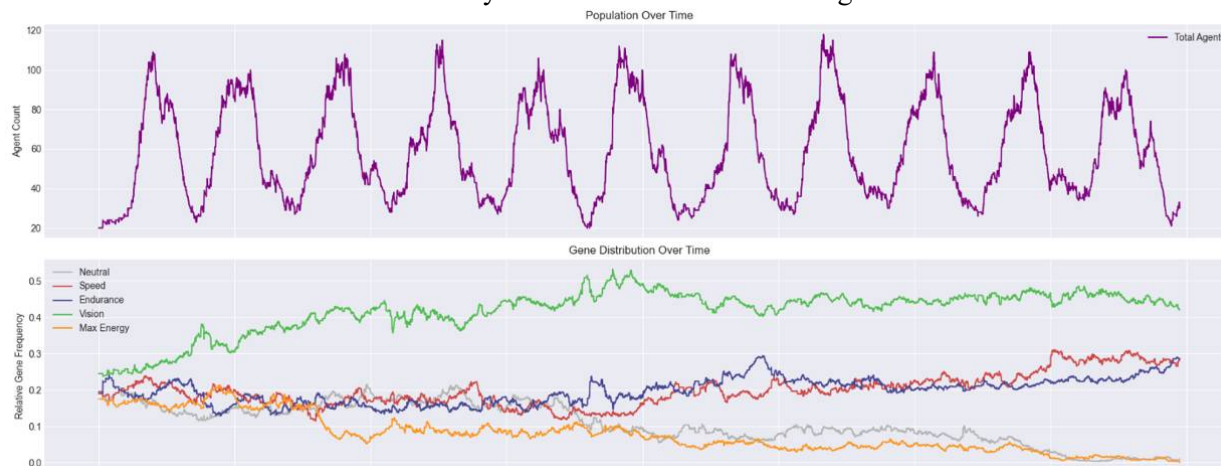


Fig. 1. Results of 'Stable Environment' scenario

Scarce Environment scenario. (Parameters: food value 20; appearance intensity: Sp-3, Su-5, Au-2, Wi-1 units/s). Under conditions of significant resource scarcity (Fig. 2), the population showed high instability and a significant proportion (70-90%) of unsuccessful simulation runs. The key adaptation was the transition to the dominance of the “Endurance” gene (Gene 2) after the initial dominance of the “Vision” gene (Gene 3) during the first ~5 seasons. This indicates the critical role of energy efficiency for survival under such conditions. “Maximum Energy” (Gene 4) and ‘Speed’ (Gene 1) were the least adaptive. Clan formation was rare, and when it did occur, it was predominantly for ‘Endurance’ or ‘Vision’ in successful launches.

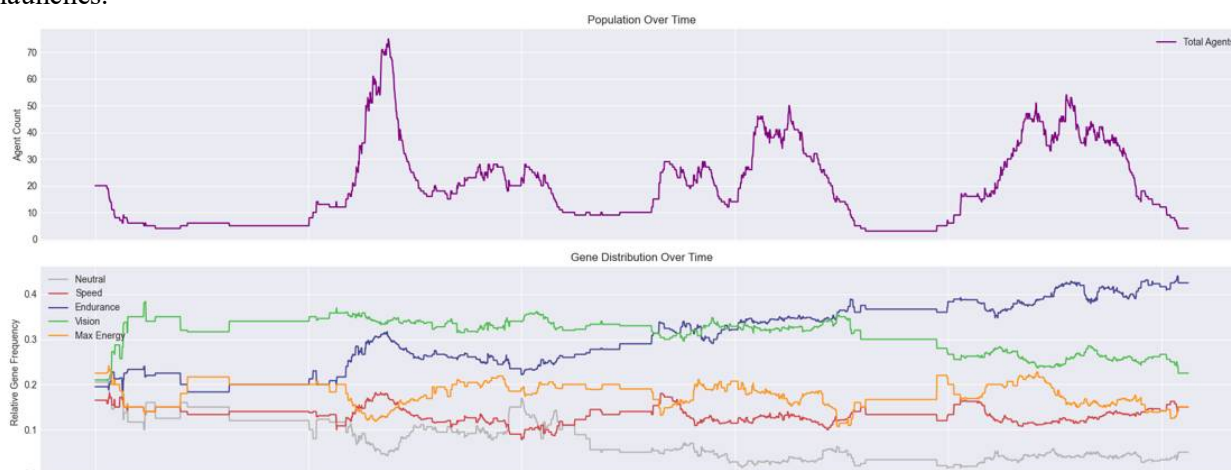


Fig. 2. Results of 'Scarce Environment' scenario

Rich Environment scenario (Appearance intensity parameters: Sp-5, Su-6, Au-4, Wi-3 units/s). Two variants of the scenario were considered: with a food value of 600 (this is the nominal size of the agent's energy buffer) and a food value of 900 and above.

Food value = 600: (Fig. 3). The population is stable. From the very beginning, “Endurance” (Gene 2) became the dominant strategy, reaching a ~75% share. The “Speed” (Gene 1) and “Maximum Energy”

(Gene 4) genes had low shares, and “Vision” (Gene 3) was the least successful. “Endurance” clans were formed.



Fig. 3. Results of 'Rich Environment' scenario (food value = 600)

Food value greater than 900: (Fig. 4). With a food value of 900, the “Maximum Energy” gene (Gene 4) became significantly more competitive, competing with “Endurance” (Gene 2) for dominance (shares ~35-40%). With a further increase in food value (e.g., to 1000), “Maximum Energy” became clearly dominant (60-70% share), displacing other strategies.



Fig. 4. Results of 'Rich Environment' scenario (food value >900)

Seasonal contrasts scenario ('Seasonal Inequality') (Parameters: food value 50; appearance intensity: Sp-6, Su-8, Au-2, Wi-1 units/s). Under conditions of sharp seasonal fluctuations in resource availability (Fig. 5), the population remained relatively stable. The dominant strategy gradually became “Endurance” (Gene 2) (~50% share after 5-6 seasons). The “Vision” gene (Gene 3), which was successful at the beginning, gradually decreased its share to the level of the “Speed” gene (Gene 1). “Endurance” clans formed regularly.

Extreme contrasts scenario (“Boom-and-Bust”). (Parameters: food value 10; appearance intensity: Sp-50, Su-2, Au-2, Wi-1 units/s). This scenario (Fig. 6) showed the highest instability: 90-95% of simulation runs ended in complete extinction of the population at the very first seasonal transition. In rare successful runs, a cyclical “boom and bust” dynamic was observed, where surviving agents rapidly multiplied during a short spring abundance, depleted resources, leading to mass death, and the cycle repeated if a small group survived. The dominant gene in such cases was “Endurance” (Gene 2). Clans formed during population “booms”.

Discussion. Experimental studies convincingly demonstrate that the evolutionary success of different genetic strategies is closely related to the characteristics of the resource availability of the environment. Thus, in stable conditions with a moderate amount of resources, the dominance of the “Vision” gene emphasizes the importance of effective food search.

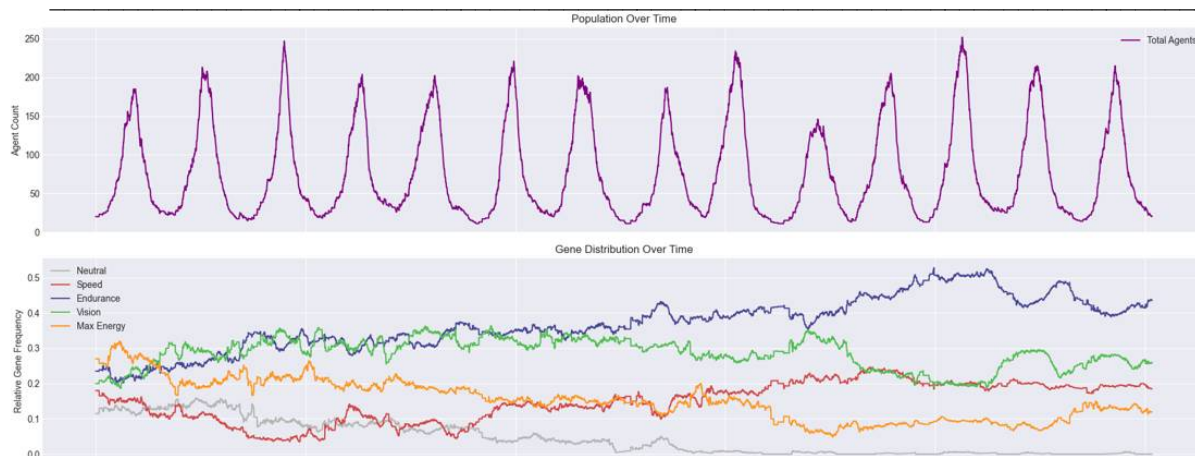


Fig. 5. Results of 'Seasonal Inequality' scenario

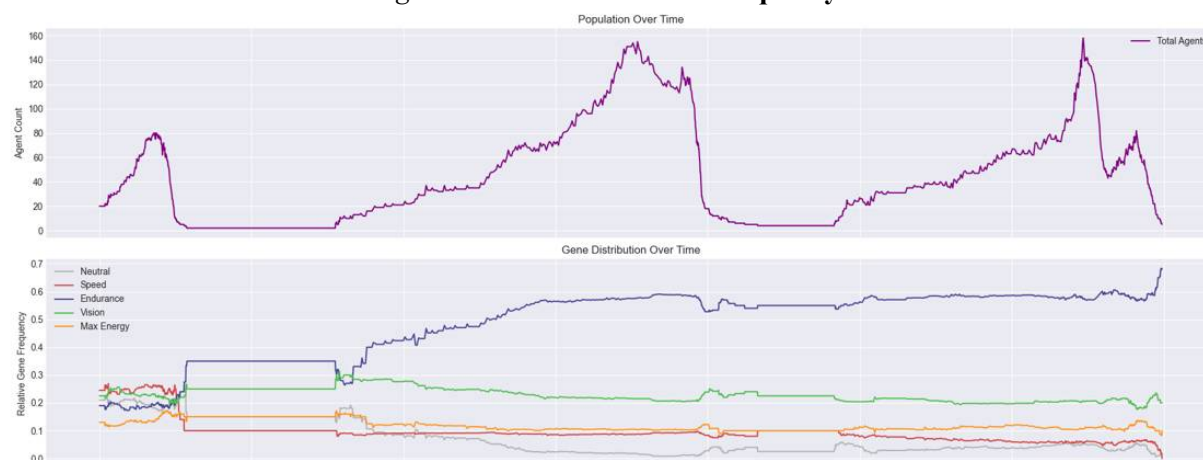


Fig. 6. Results of 'Boom-and-Bust' scenario

However, when transitioning to conditions of scarcity or strong seasonal contrasts, energy efficiency becomes the key adaptation, expressed in the dominance of the “Endurance” gene; the ability to conserve energy proves to be more important than the speed of finding it. Scenarios with an excess of resources showed interesting dynamics: with a moderate excess, “Endurance” still prevailed, which may indicate advantages in energy efficiency even when energy is abundant, possibly for the optimization of reproductive cycles. However, in conditions of extreme surplus, when obtaining energy becomes trivial, selection pressure shifts in favor of the ability to accumulate the maximum energy buffer (“Maximum Energy”), which probably provides advantages in cases of significant energy expenditure on reproduction or as insurance against accidental local shortages. The “Boom-and-Bust” scenario, with its catastrophic fluctuations in resources, clearly illustrates the high vulnerability of the population to extreme changes and emphasizes the critical role of “Endurance” for survival in such conditions, although stochastic factors (“founder effect”) also had a significant impact here. The observed “overpopulation-famine” cycle indicates that the internal dynamics of the population can become the dominant factor determining its size, even more so than external seasonality. As expected, clan formation was more characteristic of stable scenarios with clear dominance of one of the genes, indicating their potential role in strengthening successful genetic lines through cooperative behavior, although in extreme conditions their formation was complicated. Overall, the results are consistent with fundamental evolutionary-ecological principles of adaptation and demonstrate how agent-based modeling can reveal complex, context-dependent consequences of natural selection in dynamic environments. Further research could focus on quantifying the influence of clans, introducing plasticity in agent behavior, or modeling spatial heterogeneity of resources.

Conclusions. The experimental study using agent-based simulation demonstrated a clear dependence of the success of genetic strategies on resource availability regimes. Under moderate conditions, “Vision” dominated, while under conditions of scarcity and strong seasonal contrasts, “Endurance” dominated, and under conditions of extreme abundance, “Maximum Energy” dominated. Extreme resource fluctuations (“boom-bust”) led to high mortality, where survival was associated with

“Endurance” and cyclical population dynamics. Clan formation was more pronounced under stable conditions. Thus, the results confirm the adaptive plasticity of populations and the effectiveness of AOM for analyzing evolutionary trajectories in dynamic environments.

List of references:

1. Krupskyy O. Development and validation of an agent-based simulation with a simple artificial intelligence for modeling evolutionary adaptation / O.V. Krupskyy, O.S. Prykhodko // Наукові податки. - 2025. - Вип. 81.
2. Lai JW, Cheong KH. Social dynamics and Parrondo's paradox: a narrative review. *Nonlinear Dyn* 2020;101(1):1–20.
3. Wang L-G, Xie N-G, Xu G, Wang C, Chen Y, Ye Y. Game-model research on cooperation behavior of parrondo's paradox based on network. *Fluct Noise Lett* 2011;10(01):77–91.
4. Dinis L, Parrondo JM. Inefficiency of voting in Parrondo games. *Phys A, Stat Mech Appl* 2004;343:701–11.
5. Wen T, Cheong KH, Lai JW, Koh JM, Koonin EV. Extending the lifespan of multicellular organisms via periodic and stochastic intercellular competition. *Phys Rev Lett* 2022;128(21):218101.
6. Koh JM, Cheong KH. New doubly-anomalous Parrondo's games suggest emergent sustainability and inequality. *Nonlinear Dyn* 2019;96:257–66.
7. Cheong KH, Wen T, Benler S, Koh JM, Koonin EV. Alternating lysis and lysogeny is a winning strategy in bacteriophages due to Parrondo's paradox. *Proc Natl Acad Sci* 2022;119(13):e2115145119.
8. Posfai A, Taillefumier T, Wingreen NS. Metabolic trade-offs promote diversity in a model ecosystem. *Phys Rev Lett* 2017;118(2):028103.
9. Tan Z-X, Koh JM, Koonin EV, Cheong KH. Predator dormancy is a stable adaptive strategy due to Parrondo's paradox. *Adv Sci* 2020;7(3):1901559.
10. Rajendran J, Benjamin C. Playing a true Parrondo's game with a three-state coin on a quantum walk. *Europhys Lett* 2018;122(4):40004.
11. Lai JW, Cheong KH. Parrondo's paradox from classical to quantum: a review. *Nonlinear Dyn* 2020;100(1):849–61.

Reviewer: Pasternak Yaroslav - Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Computer Science and Cybersecurity at Lesya Ukrainka Volyn National University.

О.В. Дуров, Т.В. Стецюк, В.В. Полуюнська, А.І. Євтушенко

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

ОКСИД ЦИНКУ ТА ЙОГО ВЗАЄМОДІЯ З МЕТАЛАМИ (ОГЛЯД)

Представлено загальний огляд літературних джерел та проведено аналіз даних щодо основних параметрів оксиду цинку (ZnO), його фізико-хімічних властивостей, будови та найбільш важливих сфер застосування в контексті взаємодії з металами. Розглянуто перспективи подальших досліджень капілярних та адгезійних властивостей керамічних матеріалів на основі ZnO. Більша частина наведених у статті досліджень присвячена взаємодії ZnO з металами, оскільки у значній частині застосувань щільний контакт оксиду цинку з металом відіграє суттєву роль.

Ключові слова: оксид цинку, метал, контактна взаємодія

O.V. Durov, T.V. Stetsyuk, V.V. Poluyanskaya, A.I. Ievtushenko

ZINC OXIDE AND ITS INTERACTION WITH METALS (REVIEW)

A general overview of literature sources is presented and data analysis is carried out regarding the main parameters of zinc oxide (ZnO), its physical and chemical properties and the most important areas of application in the context of interaction with metals. Prospects for further research into the capillary and adhesive properties of ZnO-based ceramic materials are considered. The main properties of materials based on ZnO, their fabrication methods and their application are given. Key useful properties make ZnO valuable for a variety of applications: transparent electrodes, various sensors, energy-saving or heat-shielding windows, electronics, etc. Most of the research presented in the article is devoted to the interaction of ZnO with metals, since in a significant part of applications the close contact of zinc oxide with the metal plays a significant role. ZnO thin films, which can be obtained by chemical vapor deposition, magnetron sputtering, metal-organic vapor phase epitaxy, electrodeposition, pulsed laser deposition, sputtering, sol-gel synthesis, atomic layer deposition, spray pyrolysis, etc., are important for practical application.

Key words: zinc oxide, metal, contact interaction

Постановка проблеми. Сучасний рівень розвитку електронної промисловості потребує наявності широкого спектра матеріалів з новими фізичними та хімічними властивостями. Оксид цинку (ZnO) та композити на його основі широко використовуються в різних сферах науки, техніки й технології. Завдяки своїм унікальним властивостям оксид цинку у різних формах (об'ємні кристали, тонкі плівки та наноструктури) використовується при створенні різних приладів та пристроїв як науково-технічного та побутового призначення. Ключові корисні властивості роблять ZnO цінним для різноманітних застосувань: прозорі електроди, різноманітні сенсори, енергозберігаючі або теплозахисні вікна, електроніка, тощо [1, 2].

Вступ. Основне застосування оксид цинку знайшов у виробництві варисторів, приладів, електричний опір яких залежить від прикладеної напруги. На основі варисторів створюються обмежувачі перенапруг (ОПН), що пригнічують перенапруги в електромережах. Це обумовлено особливою властивістю варисторів – не лінійністю вольт-амперної характеристики (ВАХ), яка є симетричною відносно початку координат.

Основне застосування оксид цинку знайшов у виробництві варисторів, приладів, електричний опір яких залежить від прикладеної напруги. На основі варисторів створюються обмежувачі перенапруг (ОПН), що пригнічують перенапруги в електромережах. Це обумовлено особливою властивістю варисторів – не лінійністю вольт-амперної характеристики (ВАХ), яка є симетричною відносно початку координат.

Варистор на основі оксиду цинку є полікристалічний напівпровідниковий матеріал, окремі зерна якого знаходяться в електричному контакті один з одним. У місцях контакту зерен оксиду цинку є тонкі ізолюючі області, які зумовлюють нелінійність ВАХ. Мікроструктура варисторів включає кристали оксиду цинку (напівпровідник n-типу) і міжкристалічні прошарки (напівпровідники р-типу). Таким чином, варистори на основі оксиду цинку є системою послідовно-паралельно увімкнених р-n переходів, які і визначають нелінійну залежність величини струму, що протікає через варистор, від прикладеної до нього напруги. Варисторах з оксиду цинку в разі досягнення на них напруги більше певного порогового значення починає різко падати опір (до часток одиниць Ом). Варистори мають симетричну ВАХ із пороговою напругою 10–1000 В і мають здатність поглинати (розсіювати) високоенергетичні імпульси перенапруги зі струмами до декількох кілоампер у імпульсі. Завдяки цим особливостям варистори використовуються для обмеження імпульсної перенапруги, що виникає у разі швидких перемикань силових ключів (зокрема, тиристорів), наприклад, у мережах змінного струму [3].

© О.В. Дуров, Т.В. Стецюк, В.В. Полуюнська, А.І. Євтушенко

У хімічній промисловості оксид цинку часто використовується в якості допоміжного матеріалу для дисперсних металевих каталізаторів. Він застосовується у гетерогенному каталізі як активний компонент, носій, структурний і текстурний модифікатор каталізаторів процесів органічного синтезу, дегідрування, каталітичного очищення газів, що відходять, отримання та очищення водню. Значна кількість робіт присвячена вивченню властивостей каталізаторів в залежності від металу на підкладці з ZnO [4–21], зокрема у [4–7] розглянуті системи Cu/ZnO, Pd/ZnO [8–10], Pt/ZnO [11–13], Ag/ZnO [14–16] Au/ZnO [17–21] Ru/ZnO [22]. Біметалічні каталізatori на оксидноцинковому носії досліджені у роботах [23–26]. Слід зазначити, що ці каталізatori працюють переважно у відновних умовах, відповідно спостерігалось відновлення ZnO, яке впливало, зокрема, на його взаємодію з міддю [3-20, 27-29]. Відзначається інтенсивна взаємодія золота та міді з ZnO, також спостерігається утворення сплавів Pd–Zn, Pt–Zn при взаємодії металу з оксидом у каталізatori Pd(Pt)/ZnO.

Як фотокаталізатор оксид цинку вже давно конкурує з найпопулярнішим каталізатором TiO₂. Створення необхідної архітектури ZnO у процесі синтезу дозволяє мінімізувати втрати електронів при збудженні та максимізувати поглинання фотонів. Таким чином, змінюючи морфологію та розмір частинок, можна створювати ефективні каталітичні матеріали на основі ZnO [30–32]. Оксид цинку використовують в якості переднього контакту для сонячних елементів або РК-дисплеїв. Для створення нового покоління сонячних перетворювачів використовують плівки ZnO на підкладках з кварцового скла для отримання на їх основі фотоелектрохімічних комірок [33].

Висока електрична провідність, оптична прозорість в широкому діапазоні та стійкість до дії водневої плазми шарів ZnO роблять їх перспективними для використання в якості прозорих електродів в різноманітних оптоелектронних пристроях [34].

Оксид цинку також знайшов широке застосування в якості основного компоненту чутливих шарів хеморезистивних газових сенсорів для детектування та вимірювання концентрації таких газів, як CO, H₂, CO₂, NO, NO₂, H₂S та деяких летких органічних сполук [35–37]. Важливим параметром для даного застосування є поверхнева провідність чутливого шару. В результаті численних досліджень було визначено, що цей параметр залежить від морфології і розміру частинок ZnO [35, 37, 38]. Оксид цинку використовується в якості іммобілізаційних шарів в імуносенсорах, забезпечуючи розподіл антитіл по всій досліджуємі області за допомогою електричного поля, що прикладається до мікро електродів. Радіаційна стійкість дозволяє застосовувати оксид цинку у космосі.

Прозорий тонко плівковий транзистор допомагає підвищити якість РК-дисплеїв, роблячи їх екрани чіткішими та яскравішими. Електронні пристрої майбутнього можна буде вбудовувати у скло будинків або транспортних засобів, створюючи нові форми подання візуальної інформації. Области застосування новинки дуже широкі: споживча електроніка, засоби транспорту і, звичайно ж, військові розробки. В деяких транзисторах навіть використовують нанострижні оксиду цинку в якості провідних каналів

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Будова та властивості оксиду цинку. Оксид цинку — неорганічна сполука з формулою ZnO, яка являє собою тверду білу речовину, нерозчинну в воді, яка присутня в земній корі у вигляді мінералу цинкиту. Однак більшість комерційно використовуваного матеріалу є синтетичним. Існує значна кількість методів синтезу ZnO. Ці методи можна класифікувати за одержуванним видом речовини (об'ємний, тонко плівковий, нанодротовий), температурою, типом процесу та іншими параметрами. В залежності від потреб промисловості і наукових цілей отримують об'ємні монокристали за допомогою газового транспорту (осадження з парової фази), гідротермального синтезу або вирощування з розплаву. Однак через високий тиск пару оксиду цинку ріст з розплаву проблематичний. Ріст за рахунок транспортування газу важко контролювати, тому перевага надається гідротермальному методу.

Широке застосування знаходять тонкі плівки, які можуть бути отримані методом хімічного осаження з парової фази, металоорганічною парофазною епітаксією, електроосадженням, імпульсним лазерним осаженням, золь-гель синтезом, атомно-шаровим осаженням, розпилювальним піролізом, випарюванням та конденсацією цинку на підкладку у вакуумі з подальшим окисленням плівки металу при нагріванні в атмосфері кисню або реактивним двоелектродним іонним розпиленням цинку в атмосфері Ar + O₂.

Звичайний білий порошкоподібний оксид цинку можна отримати шляхом електролізу розчину бікарбонату натрію з використанням цинкового аноду. При цьому утворюються газоподібний водень та гідроксид цинку, який при нагріванні розкладається на чистий оксид цинку.

Оксид цинку кристалізується у трьох формах – кам'яної солі, гексагонального вюрциту та кубічного сфалериту [39] (рис. 1). У випадках структур вюрциту та сфалериту іон кисню розташований у тетраедричних порожнечах елементарних кристалічних комірок, що є найбільш характерною геометрією для Zn(II) . Вюрцитоподібна структура найбільш стабільна за нормальних умов і тому найпоширеніша, інші два типи ґраток метастабільні та існують лише за певних умов. Структура сфалериту може бути стабілізована шляхом вирощування оксиду на підкладках з кубічною структурою ґраток. ZnO може переходити у структуру кам'яної солі при відносно високих тисках — близько 10 ГПа.

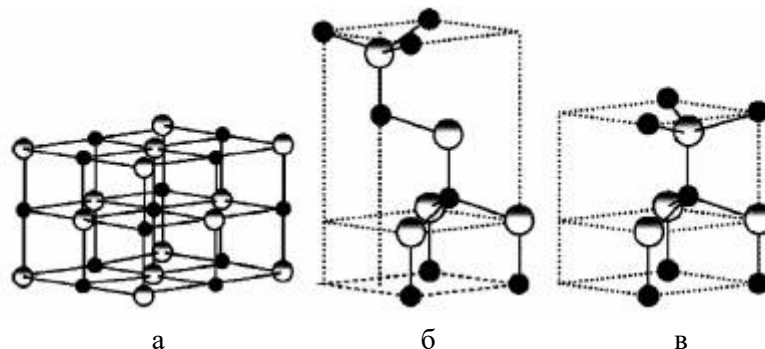


Рис. 1. Атомна кристалічна структура різних модифікацій ZnO [5]:
а – кам'яної солі; б – сфалериту; в – вюрциту

Структура оксиду цинку може бути описана як чергування площин, складених з тетраедрично скоординованих іонів O^{2-} і Zn^{2+} , розташованих поперемінно вздовж осі c . Ще однією важливою характеристикою речовини є полярні поверхні, які є базальними площинами (0001 та 000 $\bar{1}$). Базальна полярна площина (0001) складена іонами цинку, а площина (000 $\bar{1}$) – кисневими іонами. Протилежно заряджені іони створюють позитивно заряджену Zn-(0001) та негативно заряджену $\text{O-(000}\bar{1}\text{)}$ поверхні, що призводить до дипольного моменту та спонтанної поляризації вздовж осі c . Тому ZnO виявляє діелектричні, п'єзоелектричні, піроелектричні, акустооптичні та фотоелектрохімічні властивості [1, 40, 41]. Гексагональна та сфалеритова поліморфні форми не мають інверсійної симетрії.

ZnO належить до напівпровідників групи $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ з прямозонною забороненою зоною (~3,3 еВ за кімнатної температури). У зв'язку з цим, можна спостерігати порівняно високу напругу пробою, здатність витримувати електричні поля великої напруженості, зменшений електронний шум, а також здатність працювати при високих температурах та потужностях. Заборонена зона може бути додатково розширена до ~4 еВ шляхом легування магнієм чи створенням твердих розчинів ZnMgO .

ZnO має n -тип провідності навіть за відсутності додаткового легування. Електронний тип провідності в ZnO зумовлений існуванням в його ґратці таких власних дефектів донорного типу як вакансії кисню та міжвузловий цинк. Контрольоване легування n -типу легко досягається шляхом заміщення цинку донорними домішками металів III групи, як Al, Ga, In або шляхом заміни кисню елементами VII групи – хлором чи йодом [1, 42].

Рухливість електронів оксиду цинку дуже залежить від температури та має максимум ~2000 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ при 80 К. Даних в літературі про рухливість дірок небагато, їх значення знаходиться в діапазоні 5 – 30 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$.

Різноманітність фізико-хімічних властивостей ZnO (діелектричні, п'єзоелектричні, піроелектричні, акустооптичні та фотоелектрохімічні) (табл. 1) зумовлюють широкий спектр областей застосування матеріалів на його основі.

Теоретичні дослідження та розрахунки взаємодії металів в контакт з ZnO . Можливість застосування плівкового оксиду цинку в якості акустооптичного, фотоелектрохімічного матеріалів, в каталітичних процесах викликали величезний інтерес його взаємодії з різними металами в рідкому та плівковому вигляді. Крім того цей ця речовина використовується як модельна для багатьох розрахунків термодинамічних та фізико-хімічних властивостей.

Фізико-хімічні характеристики масивного оксиду цинку [43]

Властивості	Значення
Зовнішній вигляд	Білий кристалічний порошок або безбарвні кристали
Твердість за шкалою Мооса	4,5
Стан	Твердий
Запах	Без запаху
Кристалічна ґратка	Гексагональна сингонія типу вюрциту
Параметри ґратки, нм	$a = 0,32495$, $c = 0,52069$
Молярна маса, г/моль	81,408
Густина, г/см ³	5,61
Температура плавлення, К	2248 (розкладається)
Температура кипіння, К	2623
Коефіцієнт термічного розширення 10^{-6} K^{-1}	4,31
Показник заломлення	2,0041
Теплопровідність, Вт/(м·К).	54
Ширина забороненої зони (300 К), еВ	3,36
Провідність, См·см ⁻¹	8000
Концентрація електронів, см ⁻³	$>10^{21}$
Мольна теплоємність, Дж/(моль·К)	40,28
Стандартна ентальпія утворення, кДж/моль	-350,8
Стандартна молярна ентропія, Дж·К ⁻¹ ·моль ⁻¹	43,9

З перших принципів методом функціоналу густини розраховували адсорбцію атомів металів на поверхню оксиду цинку та можливість взаємодії в таких системах. Теоретично досліджено поверхню ZnO (1010) та адсорбцію на неї міді. Встановлено, що енергія взаємодії міді з киснем сильніша, ніж з цинком, отримані дані підтверджуються експериментальними результатами інших досліджень [44]. Взаємодія в системі призводить до більшої катіонності атомів міді, передбачена анізотропна міграція міді по поверхні оксиду (1010) [45]. Досліджені межфазні характеристики моношару ZnO на поверхні Cu(111) з вакансіями кисню та без них. Встановлено, що переміщення електронів від підкладки міді в моношар ZnO і різне розташування атомів кисню відносно поверхні металу визначають міжфазну взаємодію, а потім перетворюють плоский графічний моношар ZnO в асиметричну комкувату структуру. Вакансія кисню є не лише результатом ефекту стабілізації підкладки, але також посилює міжфазну взаємодію, щоб зробити механізм перенесення заряду та ефект комкування домінуючим над ефектом стиснення, що призводить до загального збільшення роботи виходу міді та зменшення потенційного шагу [46]. Також було змодельовано осадження міді на поверхню ZnO 10 $\bar{1}$ 0 [47]. Мідь розповсюджується, утворюючи двовимірні структури, поки товщина покриття не перевищить 0,4 моношару. Після цього двовимірні структури стають товщі зі збільшенням покриття металевого шару і, нарешті, утворюють тривимірні кластери. Розраховані властивості двошарових плівок ZnO та ZnO/Cu(111), легованих азотом. У плівці ZnO для азоту характерна ступінь окислення 2⁻, в той час як у плівці ZnO/Cu(111), внаслідок перенесення електронів від міді, атоми азоту набувають ступеню окислення 3⁻ [48]. Також було розраховано адсорбцію атомних пар 2Cu на поверхні ZnO (10 $\bar{1}$ 0) [49]. Атомні пари утворюються в результаті переносу електронів від міді до поверхні ZnO, що призводить до окислення Cu⁰ до Cu⁺, що стабілізує модель 2Cu. Отже утворюються два активних центри, верхній (Cu) та міжфазний Cu⁺.

З перших принципів була розрахована адсорбція срібла на поверхню ZnO 10 $\bar{1}$ 0 та її вплив на структурні, оптичні і електронні властивості ZnO [50]. Ця поверхня є дуже сприятливою для адсорбції атомів срібла. Відбувається перенесення заряду від срібла до оксиду і його накопичення у при поверхневій області, що призводить до зменшення роботи виходу електрону. Крім того, виникають нові піки оптичного поглинання, що може вплинути на фотокаталітичні властивості оксиду цинку. Також за цим методом була розрахована структура поверхні ZnO (0001) при

поглинанні атомів золота та міді. Результати показують, що найбільш вірогідними позиціями адсорбції срібла та міді є H_3 (центри кілець Zn-O), найбільш вигідне покриття один моно шар [51]. Адсорбовані атоми демонструють металічні властивості навіть якщо покриття дуже тонке. Проведений розрахунок адсорбції для металів Pd, Pt, Ag, Au, Cu на моношарі ZnO, показав, що переважними точками адсорбції є атоми кисню, адсорбовані срібло, золото та мідь можуть надати системі магнітні властивості [52]. Було досліджено контакт міді, срібла та золота з ZnO (10 $\bar{1}$ 0) [53]. Атомам міді та срібла енергетично вигідно з'єднуватися за атомами кисню на поверхні ZnO, в той час, як золота з атомами цинку.

Методом функціоналу густини розраховано адсорбцію атомів нікелю, міді, кадмію та золота на поверхню графеноподібного ZnO (нанотрубок та пластин). ZnO-нанотрубка мала кращу адсорбуючу поведінку в порівнянні з листом ZnO-графену в кожному окремому випадку через меншу рівноважну відстань та більшу енергію адсорбції [54]. Ця наноструктура демонструвала сильне зв'язування з Ni, Cu та Ag, але енергія адсорбції для Cd була явно нижчою, ніж у інших. Крім того, лише Ni і Cu здатні до хемосорбції на пластині ZnO-графену, а інші показали переважно слабку фізичну адсорбцію. Вивчалась природа вакансій кисню в графітоподібних двошарових плівках ZnO, нанесених на поверхні Cu, Ag і Au (111), і порівнювали її з тим же центром дефекту, утвореним на окремо розташованій двошаровій плівці ZnO і на поверхні вюрцити ZnO (10 $\bar{1}$ 0) [55]. Енергії утворення кисневої вакансії близькі в об'ємному вюрциті ZnO та в окремих бішарах ZnO і складають приблизно 4,3 eV, а на поверхні вюрцити (1 0 $\bar{1}$ 0) приблизно на 1 eV вище. Аналіз густини станів, електронної густини та розподілу заряду показує, що два надлишкові електрони, пов'язані з вакансією, які локалізовані на місці вакансій у всіх цих системах. Складніша ситуація з двошаровими плівками на металі. Видалення кисню з верхнього шару ZnO/Cu(111) і ZnO/Ag(111) призводить до делокалізації заряду по всій плівці оксиду, перенесення заряду на підкладку не відбувається, а енергія утворення залишається високою, як і для окремого шару – близько 4,2 eV. У випадку ZnO/Au(111), завдяки вищій роботі виходу золота, електрони переносяться з верхнього шару оксиду до металу, і витрати на видалення кисню істотно зменшуються – на 1,7 eV. Для всіх плівок на основі ZnO/метал енергія утворення вакансій зменшується на межі метал/оксид, що показує важливу роль, яку грають ці межі у визначенні відновлюваності оксиду. Крім електронних ефектів, локальні структурні спотворення тонких плівок ZnO та металевої основи також сприяють зменшенню енергії утворення вакансій кисню.

Проведені розрахунки адсорбції для металів Pd, Pt, Ag, Au, Cu на ZnO вказують на те, що переважними точками адсорбції є атоми кисню, але тільки Ni і Cu здатні до хемосорбції на пластині ZnO, а інші показали переважно слабку фізичну адсорбцію.

Осадження, фрагментації та агрегації плівок металів на поверхні ZnO. Крім теоретичних розрахунків велику зацікавленість викликають практичні експериментальні роботи по вивченню поведінки металевих покриттів на поверхні ZnO.

Досліджено кінетику осадження міді з парової фази, яка, як показали теоретичні розрахунки, має хемосорбцію до поверхні оксиду цинку [56]. При низьких температурах (кімнатній та нижче) спочатку утворюються та ростуть двовимірні острівці, які після досягнення певного критичного значення (близько 0,3 моношару) перетворюються на тривимірні. Чисті проміжки між острівцями заповнюються дуже повільно, оскільки утворення тривимірних частинок термодинамічно вигідніше. Зростання острівців міді при кімнатній температурі на неполярній поверхні оксиду цинку (10 $\bar{1}$ 0) досліджували за допомогою скануючої тунельної мікроскопії [57]. Зображення чистої поверхні (10 $\bar{1}$ 0), отриманої напиленням і відпалом при 550–700 °C, демонструють плоскі тераси з високою щільністю сходинок, які здебільшого проходять уздовж напрямків [0 0 0 1] і [1 $\bar{2}$ 1 0]. Для покриттів 0,025–1 моношарів, нанесених на плоскі, щойно відпалені поверхні, переважне зародження відбувається на кромках сходинок, орієнтованих перпендикулярно напрямку [1 $\bar{2}$ 1 0] атомного ряду. На всіх покриттях спостерігалися виключно тривимірні острівці. Для порівняння, покриття міді такої ж товщини були нанесені на поверхню, яка була забруднена адсорбованими молекулами із залишкового газу в камері надвисокого вакууму. Виявилось, що як двовимірні, так і тривимірні острівці були розподілені випадковим чином по терасах та відтворювалися на слабо забруднених поверхнях. Щільність острівців, а також їх середній діаметр і висота збільшуються зі збільшенням покриття для обох поверхонь. Осадження міді при кімнатній температурі на поверхні ZnO (0001) – Zn та ZnO (0001) – O вивчено у роботі [58]. На ZnO (0001) – Zn мідь демонструє двовимірний ріст лише при дуже малих покриттях (0,001-0,05 моношарів), далі утворюються тривимірні кластери, далі збільшуються їх розмір та густина. Кластери чітко розділені та мають

виразну шестикутну форму. Аналіз форми кристалів дає видиму роботу адгезії $3,4 \pm 0,1$ Дж/м² для найбільших кластерів. На ZnO(000 $\bar{1}$)–O поверхні двовимірні кластери утворювалися при покриттях менше ніж 0,1 моношару. При дослідженні кластерів міді, напиленої на ZnO (000 $\bar{1}$), виявлено, що мідь має переважно структуру (111) поза площиною контакту та азимутальну орієнтацію часток [59–62]. При номінальній товщині 50 Å мідь вкриває ZnO суцільно, на пізніх стадіях осадження розростання острівців міді відбувається вище до їх злиття. Під час осадження міді на ZnO спостерігалось утворення кластерів, спочатку двовимірних, а зі збільшенням покриття тривимірних. Відпал вище 570 K призводив до часткового закріплення острівців на оксиді та утворення сплаву.

Спрямована на поверхню міграція підповерхневих дефектів впливає на адгезію міді на полярному ZnO (0001) у технологічно цікавому діапазоні температур до 550 K [63]. Це призводить до посиленої адгезії та, зрештою, повного «змочування» ZnO (0001) наночастинами міді. На основі експериментальних даних і розрахунків описано механізм, згідно якому концентрація дефектів в об'ємі є важливим і, можливо, контрольованим параметром для росту металу на оксиді. Підтверджено існування особливої взаємодії при осадженні наночастинок міді на «чотирьохпроменеві» кристали ZnO, зокрема синергетичний ефект внаслідок структурної гібридизації, що призводить до збільшення вмісту іонів міді та істотно покращило антибактеріальні властивості матеріалу [64].

Під час напилення золота на плівку ZnO на поверхні Al₂O₃ при номінальній товщині до 50 Å утворюються кластери з золота, які можуть виростати до 300 Å у висоту, переважної орієнтації (111). При подальшому осадженні кластери зливаються, утворюючи суцільний шар металевого покриття [65].

При паровому осадженні плівок паладію на ZnO (0001) відбувається двовимірний ріст острівців до критичного покриття поверхні, далі зростання проходить переважно пошарово зверху острівців [66, 67]. Під час осадження при 300 K острівці паладію росли за двовимірним механізмом, блокуючи активні центри на ZnO. Відпал при 350 K достатній для часткової агломерації плівок, а при 700 K крім подальшої агломерації відбувається часткове відновлення поверхні ZnO та утворення PdZn.

Моделльні каталізатори, що складаються з плівок або частинок паладію на монокристалах ZnO (10 $\bar{1}$ 0) та ZnO (0001) вивчалися у роботі [68]. Під час осадження з парової фази при 300 K шар паладію росте за двовимірним механізмом, а при нагріванні агломерується. Сплав PdZn легше утворюється на поверхні ZnO (0001), також на межі розділу Pd/ZnO(0001) в більшій кількості формуються високоактивні центри, що суттєво впливає на каталітичні властивості.

Вивчено ріст плівок срібла на ZnO (000 $\bar{1}$). Від самого початку зароджуються острівці високої густини, вони зростають переважно у вертикальному напрямку, тому, хоча й зливаються, невикрита частка поверхні ZnO залишається постійною, складаючи приблизно 30 % [69]

Теоретичні розрахунки вказували на суттєву роль кисню при взаємодії оксиду цинку з металами, однак експериментальні результати показали можливість взаємодії цинку з металами з утворенням хімічних сполук, наприклад PdZn, PtZn.

Контактна взаємодія оксиду цинку з металами. При використанні кераміки та покриттів на основі ZnO для вирішення ряду практичних задач потрібен надійний контакт металевого розплаву з твердою поверхнею. Незважаючи на нагальні потреби у з'єднанні матеріалів на основі ZnO, існує лише декілька поодиноких робіт, в яких досліджуються питання, пов'язані саме зі змочуванням та адгезією металічних розплавів на поверхні оксиду цинку або сполук на його основі.

Змочування плівок оксиду цинку різної товщини літєм при T = 483 K досліджено в роботі [70]. Було встановлено, що при збільшенні товщини наноплівки крайовий кут змочування її літєм різко зменшується (табл. 2).

Табл. 2

Змочування наноплівки ZnO розплавом Li

Товщина плівки ZnO, нм	Крайовий кут змочування, град.
12	125
24	68
36	40
48	13

При контакті розплавленого літію з ZnO відбувається інтенсивна взаємодія, з утворенням Li_2O та LiZn , яка забезпечує змочування. Нанесення оксидноцинкових покриттів використовується для покращення лігієфільності поверхонь [71, 72]. Для покращення контакту гранатового твердого електроліту з розплавом літію, на поверхню гранату був нанесений тонкий шар ZnO [71]. Спостерігалася інтенсивна взаємодія літію з оксидом, що призвело до підвищення адгезії та зниження електричного опору на контакті. Для покращення змочування полімерного каркасу композитного аноду розплавом літію на поверхню полімеру наносили шар ZnO, що забезпечувало просочення каркасу розплавом [72].

Було вивчено змочування оксиду цинку розплавом алюмінію методом лежачої краплі у вакуумі за допомогою двох різних процедур: 1) класичного контактного нагріву та охолодження; 2) процедура витискання краплі, що дозволяє відкрити межу розділу Al/ZnO при температурі випробування і, таким чином, запобігти впливу охолодження краплі алюмінію на структуру розділу. На міжфазній поверхні утворювався перехідний шар товщиною приблизно 50 мкм, він складався з взаємопрониклих ґраток $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ і $\text{Al}(\text{Zn})$, характерних для структури типу оксидно-металевих композитів. Крім того, на межі ZnO з перехідним шаром виявлено наявність тонкого (подібного до 250 нм) шару метастабільного $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Отримані результати порівнювали з експериментальними даними, отриманими для зразка після процедури виштовхування, що призвело до утворення двох шарів шпінелі ZnAl_2O_4 і оксиду алюмінію в тетрагональній δ -фазі, які демонструють сильне епітаксіальне зростання [73]. Змочуваність та реакційна здатність пари Al/ZnO при 1273 K у вакуумі досліджена за допомогою модифікованого методу лежачої краплі [74]. Результати, отримані для монокристалічних підкладок ZnO різної орієнтації, засвідчили незмочування рідким алюмінієм, демонструючи крайові кути $100 - 107^\circ$. Спостерігалася утворення двох міжфазних шарів, які демонструють високоепітаксіальне зростання, що відбувалося при високотемпературній взаємодії між рідкою краплею алюмінію та оксиду. Шари стовпчастих зерен складалися з реактивно утворених Al_2O_3 та ZnAl_2O_4 , який зростав в умовах надлишку Al_2O_3 . Оксид алюмінію ідентифікували як кубічний c-, тетрагональний d- або моноклінний k- Al_2O_3 залежно від тонких змін у хімії поверхневого верхнього шару підкладок ZnO.

Досліджено мікроструктуру області продукту реакції, утворену внаслідок взаємодії рідкого алюмінію та полікристалічної підкладки з оксиду цинку при 1273 K [75]. Область поширювалася на оксидну підкладку та мала структуру керамічного композиту, що складається з двох фаз. Дослідження за допомогою скануючої електронної мікроскопії виявили, що великі кристали оксиду алюмінію оточені металевою фазою Al(Zn). Крім того, дослідження за допомогою трансмісійної електронної мікроскопії показало наявність тонкого (~ 250 нм) шару поруч із ZnO. Аналіз показав в обох випадках однаковий стехіометричний склад оксиду алюмінію, але різну кристалографічну структуру, тобто великі кристали відповідали фазі $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, тоді як поверхневий шар був ідентифікований як метастабільний $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$.

Також було досліджено методом лежачої краплі змочування оксиду цинку електролітичним сріблом Ag_{99} [76]. Досліджено чисту кераміку ZnO, а також ZnO з додаванням 1 мол. % іншого оксиду (CuO , Al_2O_3 , Ga_2O_3 , In_2O_3). Експеримента проводили на повітрі та у вакуумі не гіршому ніж $1,25 \times 10^{-3}$ Па при $T = 1323$ K. Результати вимірювань наведені в табл. 3. Крайовий кут змочування при $T = 1323$ K збільшується у рядах:

на повітрі – $\text{Zn}_{0,99}\text{In}_{0,01}\text{O} \rightarrow \underline{\text{ZnO}} \rightarrow \text{Zn}_{0,99}\text{Ga}_{0,01}\text{O} \rightarrow \text{Zn}_{0,99}\text{Al}_{0,01}\text{O} \rightarrow \text{Zn}_{0,99}\text{Cu}_{0,01}\text{O}$;

у вакуумі – $\text{Zn}_{0,99}\text{In}_{0,01}\text{O} \rightarrow \text{Zn}_{0,99}\text{Cu}_{0,01}\text{O} \rightarrow \underline{\text{ZnO}} \rightarrow \text{Zn}_{0,99}\text{Ga}_{0,01}\text{O} \rightarrow \text{Zn}_{0,99}\text{Al}_{0,01}\text{O}$.

Отже, великий вплив на змочування відіграє середовище, в якому проводився експеримент та склад підкладки (табл. 3).

Табл. 3

Крайові кути змочування та робота адгезії

Підкладка	Вакуум		Повітря	
	Θ , град.	W_a , мДж/м ²	Θ , град.	W_a , мДж/м ²
ZnO	110	612	91	914
$\text{Zn}_{0,99}\text{Cu}_{0,01}\text{O}$	104	708	129	345
$\text{Zn}_{0,99}\text{Al}_{0,01}\text{O}$	131	322	96	832
$\text{Zn}_{0,99}\text{Ga}_{0,01}\text{O}$	119	483	95	849
$\text{Zn}_{0,99}\text{In}_{0,01}\text{O}$	89	950	74	1186

Взаємодія наноструктурного оксиду цинку з металами. Велике розповсюдження в техніці отримали різні форми наноструктур оксиду цинку. Вони можуть бути синтезовані з різноманітними морфологіями, включаючи нанодротики, нанострижні, тетраподи, наногранули, наноквітки, наночастинки і т.д. Наноструктури можуть бути отримані за допомогою більшості вищезгаданих методів за певних умов. Синтез зазвичай проводиться при температурі близько 90 °С в еквімолярному водному розчині нітрату цинку та гексаміну, останній забезпечує основне середовище. Деякі добавки, такі як поліетиленгліколь або поліетиленімін, можуть покращити співвідношення сторін нанодроптиків ZnO. Допування таких структур здійснюється шляхом додавання нітратів інших металів в розчин з якого відбувається вирощування наноструктур. Морфологію наноструктур можна регулювати шляхом зміни параметрів складу прекурсору (таких як концентрація цинку і рН) або термічної обробки (таких як температура і швидкість нагрівання).

Розроблено синтез композитної наноструктури за наночастинок міді на нанопластинках ZnO з олеатів відповідних металів [77]. Орієнтація частинок Cu (111) специфічно узгоджена з площиною ZnO (002), що є свідченням поверхнево-індукованого механізму взаємодії. Також був розроблений метод осадження наносфер ZnO нової тривимірної «пухнастої» структури, зібраних з наночастинок [78]. Така структура підвищує швидкість реакцій, зокрема забезпечує високу інтенсивність сильної взаємодії зі сріблом. В роботі [79] описаний синтез нанокompозитів ZnO-Ag зі структурою ядро-оболонка. Нанокompозити відпалювали при різних температурах для підвищення кристалічності та покращення зчеплення срібла з оксидом. Срібло присутнє у вигляді дуже маленьких наночастинок зі структурою ГЦК. За багатьма ознаками мала місце сильна міжфазна взаємодія між сріблом та ZnO. Також нанокompозити структури ядро-оболонка виготовлені осадженням срібла на нанострижні ZnO [80]. Дослідження спектрів поглинання виявили червоні зміщення відносно чистих нанострижнів ZnO та наночастинок срібла і зниження спектрів глибокого випромінювання, що свідчить про сильну взаємодію срібла з ZnO на міжфазній межі. В структурі Ag-ZnO типу ядро-оболонка (англ. *core-shell*) згідно результатів дослідження методами Рамановської спектроскопії та фотолюмінісценції виявили суттєві зміни властивостей структури порівняно з чистим ZnO. Це підтверджує сильну міжфазну взаємодію у системі [81]. Срібні наночастинки були нанесені на поверхню нанострижнів ZnO [82]. Зсув випромінювання ближньої смуги у фотолюмінісценції кімнатної температури свідчить про те, що присутність наночастинок Ag на поверхні ZnO може блокувати переходи електронів у ZnO, тоді як зсув випромінювання, пов'язаного з дефектами, вказує на генерацію дефектів на міжфазній межі між сріблом та ZnO.

Було з'ясовано, що осадження благородних металів (платина, золото) не призводить до змін структури та морфології наночастинок оксиду цинку, спектри випромінювання композитів показали, що Pt посилює розподіл заряду в УФ-діапазоні, а Au зменшує рекомбінацію через дефектні стани [83]. Наночастинки золота на поверхні наноплатин ZnO діють як «кільцевий міст» і «транзитне депо» для міжфазового перенесення заряду через ефект локального поверхневого плазмонного резонансу і бар'єр Шотткі, що покращує фотоелектричні властивості [84]. Також спостерігали переніс заряду між металевими наночастинами (срібло, золото) та ZnO, причому для срібла ефект був сильніший через нижчий бар'єр Шотткі на міжфазній межі [27].

Встановлено, що тонкі плівки ZnO виявляють п'єзоелектричний ефект. Досліджено нанесення наноплівки ZnO на поверхню Cu (111), при якому мав місце її епітаксціальний ріст [28]. Якщо окремі незв'язані плівки ZnO зберігають структуру графіту до товщини 10 моношарів, після чого відбувається фазовий перехід у вюрцит, то на поверхні Cu (111) до товщини 5 моношарів плівка ZnO зберігає злегка «гофровану» графітоподібну структуру, далі «зминання» стає суттєвим і відбувається перетворення на вюрцит. Рушійною силою дестабілізації плівок на міді є перенесення заряду від підкладки до ZnO.

Наноплівки ZnO на поверхні міді, (ефект легування металами III групи (Al, Ga та In) і Cu плівок ZnO), зокрема двошарових на поверхні Cu(111), було досліджено за допомогою методів теорії функціоналу густини [29]. Зміни електронних властивостей легованих плівок ZnO та ZnO / Cu (111) перевірено шляхом адсорбції CO. Заміна ґраткового іона Zn у окремому бішарі ZnO елементом III групи утворює додатковий електрон, розподіл якого залежить від добавки. Інша ситуація на плівці ZnO / Cu (111), де зайвий електрон передається на основу Cu. У той час як енергія адсорбції CO в легованих ділянках двошару ZnO така ж, як і в ультратонких плівках ZnO / Cu (111), CO демонструє більший червоний зсув у двошарі ZnO без опори. Ступінь окислення Cu, що замінює Zn у плівках ZnO без опори, становить 2+, стан Cu (3d9), тоді як у плівках на основі ZnO / Cu (111) це стан 1+ Cu (3d10), де має місце передача заряду з металевію міді Cu до іонів Cu в структурі ZnO.

Додавання міді до ZnO призводить до більш сильної взаємодії з CO і великого червоного зміщення частоти розтягування CO, тоді як легування елементами III групи не призводить до істотних змін адсорбційних властивостей, якщо окремі плівки ZnO порівнювати з плівками ZnO / Cu (111).

Було розроблено метод нанесення на наностержні ZnO дискретних частинок міді регульованого розміру [85]. Аналіз спектрів плазмонного поглинання виявив відносно ослаблене поглинання ZnO зі збільшенням кількості осаджених наночастинок Cu, що підтверджує чітку електронну взаємодію між пов'язаними металевими та оксидними компонентами. Був виготовлений новий сенсорний матеріал з нанопластин ZnO та наночастинок золота [86]. Характеристики сенсора значно покращені, що, крім унікальних властивостей золота, пояснюється також електронною взаємодією Au з ZnO, а також виготовили сенсори з наночастинками паладію на наностержнях з ZnO [87]. Властивості сенсорів були значно покращені за рахунок електронної та хімічної сенсibiliзації наночастинок паладію.

Висновки. На відміну від інших добре досліджених оксидів, таких, як Al_2O_3 , ZnO може досить активно взаємодіяти з металами, зокрема й інертними. Спорідненість до кисню відіграє суттєву роль, проте, на відміну від Al_2O_3 , при контакті з ZnO метали взаємодіють також з цинком оксиду, утворюючи фази складу метал-цинк, наявність яких, зокрема, істотно впливає на властивості каталізаторів. Взаємодія металу з цинком у ZnO частіше спостерігається у відновних умовах, зокрема при роботі каталізаторів, але варто зазначити, що для інших оксидів потрібно значно жорсткіше відновлення, щоб досягти подібного ефекту. Також треба зазначити вплив дефектів по кисню у ZnO на взаємодію з металами, можна припустити, що саме можливість утворення дефектної структури спричиняє вказані особливості цих систем.

Необхідно додати, що, незважаючи на значний обсяг досліджень взаємодії ZnO з металами, більшість даних отримані для мікромасштабних об'єктів, експерименти у макромасштабах описані лише для окремих роботах для обмеженої кількості металів (літій, алюміній, срібло). Отже докладне вивчення контактної взаємодії у системах, що містять оксидноцинкову та металічну фази, буде корисним, зокрема, для пояснення ефектів виявлених у мікромасштабних експериментах.

Список використаних джерел:

1. Klingshirn C. ZnO: material, physics and applications. *ChemPhysChem*. 2007. Iss. 8 (6). P. 782–803. doi:10.1002/cphc.200700002.
2. Kołodziejczak-Radzimska A., Jesionowski T. Zinc oxide – from synthesis to application: a review. *Materials*. 2014. Vol. 7, No. 4. P. 2833–2881.
3. Шавьолкін О.О. *Силові напівпровідникові перетворювачі енергії*. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015. 403 с.
4. Van den Berg M. W. E., Polarz S., Tkachenko O. P., Klementiev K. V., Bandyopadhyay M., Khodeir L., Gies H., Muhler M., Grünert W. Cu/ZnO aggregates in siliceous mesoporous matrices: Development of a new model methanol synthesis catalyst. *Journal of Catalysis*. 2006. Vol. 241, No. 2. P. 446–455.
5. Jiménez-Gómez C. P., Cecilia J. A., Durán-Martín D., Moreno-Tost R., Santamaría-González J., Mérida-Robles J., Mariscal R., Maireles-Torres P. Gas-phase hydrogenation of furfural to furfuryl alcohol over Cu/ZnO catalysts. *Journal of Catalysis*. 2016. Iss. 336. P. 107–115.
6. Corro G., Cebada S., Pal U., Fierro J. L. G., Alvarado J. Hydrogen-reduced Cu/ZnO composite as efficient reusable catalyst for diesel particulate matter oxidation. *Appl. Catal., B*. 2015. Iss. 165. P. 555–565.
7. Shi G., Chen Q., Zhang Q., Cai W., Li Z., Zhai S., Yu H., Tan F., Wang Y. Morphology effect of ZnO support on the performance of Cu toward methanol production from CO₂ hydrogenation. *Journal of Saudi Chemical Society*. 2020. Vol. 24, No. 1. P. 42–51.
8. Kim C.-H., Lee J. S., Trimm D. L. Catalytic hydrogenation of CO₂ to methanol over Pd/ZnO: Metal-support interaction. *Studies in Surface Science and Catalysis*. 2004. Iss. 153. P. 61–66.
9. Liu S., Takahashi K., Fuchigami K., Uematsu K. Hydrogen production by oxidative methanol reforming on Pd/ZnO: Catalyst deactivation. *Applied Catalysis A: General*. 2006. Vol. 299, No. 1–2. P. 58–65.
10. Liu S., Takahashi K., Eguchi H., Uematsu K. Hydrogen production by oxidative methanol reforming on Pd/ZnO: Catalyst preparation and supporting materials. *Catalysis Today*. 2007. Vol. 129, No. 3–4. P. 125–135.

11. Boccuzzi F., Chiorino A., Ghiotti G., Pinna F., Strukul G., Tessari R. Pt/ZnO catalysts: Spectroscopic and catalytic evidences of a ligand effect as a consequence of PtZn alloying. *Journal of Catalysis*. 1990. Vol. 126, No. 2. P. 381–387.
12. Ammari F., Lamotte J., Touroude R. An emergent catalytic material: Pt/ZnO catalyst for selective hydrogenation of crotonaldehyde. *Journal of Catalysis*. 2004. Vol. 221, No. 1. P. 32–42.
13. Ramos-Fernández E. V., Ferreira A. F. P., Sepúlveda-Escribano A., Kapteijn F., Rodríguez-Reinoso F. Enhancing the catalytic performance of Pt/ZnO in the selective hydrogenation of cinnamaldehyde by Cr addition to the support. *Journal of Catalysis*. 2008. Vol. 258, No. 1. P. 52–60.
14. Zhang Y., Gao X., Zhi L., Liu X., Jiang W., Sun Y., Yang J. The synergetic antibacterial activity of Ag islands on ZnO (Ag/ZnO) heterostructure nanoparticles and its mode of action. *Journal of Inorganic Biochemistry*. 2014. Iss. 130. P. 74–83.
15. Deng Q., Tang H., Liu G., Song X., Xu G., Li Q., Ng D. H. L., Wang G. The fabrication and photocatalytic performances of flower-like Ag nanoparticles/ZnO nanosheets-assembled microspheres. *Applied Surface Science*. 2015. Iss. 331. P. 50–57.
16. Martínez-Vargas B. L., Durón-Torres S. M., Bahena D., Rodríguez-López J. L., Peralta-Hernández J. M., Picos A. One-pot synthesis of ZnO–Ag and ZnO–Co nanohybrid materials for photocatalytic applications. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2019. Iss. 135. P. 109120.
17. Carabineiro S. A. C., Machado B. F., Bacsa R. R., Serp P., Dražić G., Faria J. L., Figueiredo J. L. Catalytic performance of Au/ZnO nanocatalysts for CO oxidation. *Journal of Catalysis*. 2010. Vol. 273, No. P. 191–198.
18. Corro G., Cebada S., Pal U., Fierro J.L.G. Au⁰–Au³⁺ bifunctional site mediated enhanced catalytic activity of Au/ZnO composite in diesel particulate matter oxidation. *Journal of Catalysis*. 2017. Iss. 347. P. 148–156.
19. Yu C., Yu Y., Xu T., Wang X., Ahmad M., Sun H. Hierarchical nanoflowers assembled with Au nanoparticles decorated ZnO nanosheets toward enhanced photocatalytic properties. *Materials Letters*. 2017. Iss. 190. P. 185–187.
20. Fujita T., Ishida T., Shibamoto K., Honma T., Ohashi H., Murayama T., Haruta M. CO Oxidation over Au/ZnO: Unprecedented Change of the Reaction Mechanism at Low Temperature Caused by a Different O₂ Activation Process. *ACS Catalysis*. 2019. Vol. 9, No. 9. P. 8364–8372.
21. Gu F., Wang Y., Han D., Wang Z. Effects of ZnO crystal facet on the ethanol detection by the Au/ZnO sensors. *Talanta Open*. 2021. Iss. 4. P. 100068.
22. Ramos-Fernández E. V., Silvestre-Albero J., Sepúlveda-Escribano A., Rodríguez-Reinoso F. Effect of the metal precursor on the properties of Ru/ZnO catalysts. *Applied Catalysis A: General*. 2010. Vol. 374, No. 1–2. P. 221–227.
23. Schuyten S., Guerrero S., Miller J. T., Shibata T., Wolf E. E. Characterization and oxidation states of Cu and Pd in Pd–CuO/ZnO/ZrO₂ catalysts for hydrogen production by methanol partial oxidation. *Applied Catalysis A: General*. 2009. Vol. 352, No. 1–2. P. 133–144.
24. Basumatary P., Konwar D., Yoon Y.S. A novel Nisingle bondCu/ZnO@MWCNT anode employed in urea fuel cell to attain superior performances. *Electrochimica Acta*. 2018. Iss. 261. P. 78–85.
25. Kaskow I., Decyk P., Sobczak I. The effect of copper and silver on the properties of Au–ZnO catalyst and its activity in glycerol oxidation. *Applied Surface Science*. 2018. Iss. 444. P. 197–207.
26. Javed A. H., Shahzad N., Butt F. A., Khan M. A., Naeem N., Liaquat R., Khoja A. H. Synthesis of bimetallic Co–Ni/ZnO nanoprisms (ZnO–NPr) for hydrogen-rich syngas production via partial oxidation of methane. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. Vol. 9, No. 6. P. 106887.
27. Zhou N., Yan R., Wang X., Fu J., Zhang J., Li Y., Sun X. Tunable thickness of mesoporous ZnO-coated metal nanoparticles for enhanced visible-light driven photoelectrochemical water splitting. *Chemosphere*. 2021. Iss. 273. P. 129679.
28. Thang H. V., Tosoni S., Pacchioni G. The epitaxial growth of ZnO films on Cu(111) surface: Thickness dependence. *Applied Surface Science*. 2019. Iss. 483. P. 133–139.
29. Thang H. V., Pacchioni G. Electronic structure of Al, Ga, In and Cu doped ZnO/Cu(111) bilayer films. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2019. Vol. 21, No. 1. P. 369–377.
30. Mirzaeifard Z., Shariatnia Z., Jourshabani M. et al. ZnO Photocatalyst Revisited: Effective Photocatalytic Degradation of Emerging Contaminants Using S Doped ZnO Nanoparticles under Visible Light Radiation. *ACS Publications. Journal contribution*. 202. Vol. 59(36). P. 15894–1591. doi:10.1021/acs.iecr.0c03192.

31. Nahirniak S.V., Dontsova T.A., Lapinsky A.V. et al. Soil and soil breathing remote monitoring: A short review. *Biosystems Diversity*. 2020/ Vol. 28(4). P. 350–356. doi: 10.15421/01204483.
32. Dontsova T.A., Kutuzova A.S., Bila K.O. et al. Enhanced Photocatalytic Activity of TiO₂/SnO₂ Binary Nanocomposites. *Journal of Nanomaterials*. 2020. P. 8349480. doi: 10.1155/2020/8349480.
33. Скуратовский И.А., Вольнов И.Ю., Полозов К.Ю., Коваленко А.В. Фотоэлектронические преобразователи на основе поликристаллических пленок SnO₂ и ZnO. 5-та Міжнародна науково-технічна конференція «Сенсорна електроніка та мікросистемні технології». Тези доповідей. 2012. С. 215.
34. Асваров А.Ш., Абдулаев А.Х., Ахмедов А.К.. Прозрачные электроды на основе ZnO: оптимизация состава, условий синтеза и исследование свойств. *Краткие сообщения по физике ФИАН*. 2010. №1. С. 31-34.
35. Ramos-Fernández E. V., Silvestre-Albero J., Sepúlveda-Escribano A., Rodríguez-Reinoso F. Effect of the metal precursor on the properties of Ru/ZnO catalysts. *Applied Catalysis A: General*. 2010. Vol. 374, No. 1–2. P. 221–227.
36. Biasotto G., Ranieri M.G.A., Foschini C.R. et al. Gas sensor applications of zinc oxide thin film grown by the polymeric precursor method. *Ceramics International*. 2014. Vol. 40 (9). P. 14991–14996. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.06.099>
37. Kang Y., Yu F., Zhang L. et al. Review of ZnO-based nanomaterials in gassensors. *Solid State Ionics*. 2021. Iss. 360. P. 115544. doi: 10.1016/j.ssi.2020.115544
38. Li C., Li L., Du Z., Yu H., Xiang Y., Li Y., Cai Y., Wang T. Rapid and ultrahigh ethanol sensing based on Au-coated ZnO nanorods. *Nanotechnology*. 2008. Vol. 19(3). P. 035501. doi:10.1088/0957-4484/19/03/035501
39. Özgür Ü., Alivov Y. I., Liu C., Teke A., Reshchikov M., Doğan S., Avrutin V., Cho S.-J., Morkoç H. A comprehensive review of ZnO materials and devices. *Journal of applied physics*. 2005. Vol. 98, No. 4. P. 11.
40. Geurts J. Crystal Structure, Chemical Binding, and Lattice Properties. In: Zinc Oxide. *Springer Series in Materials Science*. 2010. Springer, Berlin, Heidelberg 120. doi: 10.1007/978-3-642-10577-7_2
41. Isai K. A., Shrivastava V. S. Photocatalytic degradation of methylene blue using ZnO and Fe–ZnO semiconductor nanomaterials synthesized by sol–gel method: a comparative study. *SN Applied Sciences*. 2019. Iss. 1. P. 1247. doi: 10.1007/s42452-019-1279-5
42. Biasotto G., Ranieri M. G. A., Foschini C. R. et al. Gas sensor applications of zinc oxide thin film grown by the polymeric precursor method. *Ceramics International*. 2014. Iss. 40 (9). P. 14991–14996. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.06.099>
43. <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%BA%D1%81%D0%B8%D0%B4%D1%86%D0%B8%D0%BD%D0%BA%D1%83>
44. Beltrán A., Andrés J., Calatayud M., Martins J. B. L. Theoretical study of ZnO (1010) and Cu/ZnO (1010) surfaces. *Chemical Physics Letters*. 2001. Vol. 338, No. 4–6. P. 224–230.
45. Cheng Y.-T., Shan T.-R., Devine B., Lee D., Liang T., Hinojosa B. B., Phillpot S. R., Asthagiri A., Sinnott S. B. Atomistic simulations of the adsorption and migration barriers of Cu adatoms on ZnO surfaces using COMB potentials. *Surface Science*. 2012. Vol. 606, No. 15-16. P. 1280–1288.
46. Weng Z., Zhang C., Huang Z. Effect of oxygen vacancy on Cu(111)/ZnO interface. *Molecular Physics*. 2020. Vol. 118, No. 4. P. 1619856.
47. Cheng Y. T., Liang T., Nie X., Choudhary K., Phillpot S. R., Asthagiri A., Sinnott S. B. Cu cluster deposition on ZnO 10 $\bar{1}$ 0: Morphology and growth mode predicted from molecular dynamics simulations. *Surface Science*. 2014. Iss. 621. P. 109–116.
48. Thang H. V., Pham T. L. M., Pacchioni G. DFT study of electronic properties of N-doped ZnO and ZnO/Cu(111) bilayer films. *Surface Science*. 2022. Iss. 716. P. 121978.
49. Cong V. T., Huynh L. K., Jiang J.-C., Nhung N. T. A., Tat P. V. Density function theory study of water gas shift reaction on 2Cu/ZnO (10 $\bar{1}$ 0) surface. *Computational and Theoretical Chemistry*. 2016. Iss. 1081. P. 62–70.
50. Lahmer M. A. The effect of Ag adsorption on the structural, electronic, and optical properties of the ZnO 10 $\bar{1}$ 0 surface: A first-principles study. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 2016. Iss. 96–97. P. 107–114.

51. Yang Z., Xiong S.-J. Adsorption of Ag and Au atoms on wurtzite ZnO (0001) surface. *Surface Science*. 2011. Vol. 605, No. 1–2. P. 40–45.
52. Chen L., Li S., Cui Y., Xiong Z., Luo H., Gao Y. Manipulating the electronic and magnetic properties of monolayer by noble metal adsorption: A first-principles calculations. *Applied Surface Science*. 2019. Iss. 479. P. 440–448.
53. Hu H., Lv Z., Cui S., Zhang G. Theoretical study of ZnO(1 0 $\bar{1}$ 0) and M/ZnO(1 0 $\bar{1}$ 0) (M = Cu, Ag and Au) surfaces with DFT approach. *Chemical Physics Letters*. 2011. Vol. 510, No. 1–3. P. 99–103.
54. Hamed M. A., Fathalian M., Ahangari M. G., Shahavi M. H. DFT study of Ni, Cu, Cd and Ag heavy metal atom adsorption onto the surface of the zinc-oxide nanotube and zinc-oxide graphene-like structure. *Materials Chemistry and Physics*. 2018. Iss. 220. P. 366–373.
55. Thang H. V., Pacchioni G. Oxygen Vacancy in Wurtzite ZnO and Metal-Supported ZnO/M(111) Bilayer Films (M = Cu, Ag and Au). *J. Phys. Chem. C*. 2018. Vol. 122, No. 36. P. 20880–20887.
56. Yoshihara J., Parker S. C., Campbell C. T. Island growth kinetics during vapor deposition of Cu onto the Zn-terminated ZnO(0001) surface. *Surface Science*. 1999. Vol. 439, No. 1–3. P. 153–162.
57. Dulub O., Boatner L. A., Diebold U. STM study of Cu growth on the ZnO(10 $\bar{1}$ 0) surface. *Surface Science*. 2002. Iss. 504. P. 271–281.
58. Koplitz L. V., Dulub O., Diebold U. STM Study of Copper Growth on ZnO(0001)–Zn and ZnO(000 $\bar{1}$)–O Surfaces. *Phys. Chem. B*. 2003. Vol. 107, No. 38. P. 10583–10590.
59. Ay M., Nefedov A., Zabel H. Structural properties of Cu clusters on the O-terminated ZnO (000 $\bar{1}$) surface. *Applied Surface Science*. 2004. Vol. 226, No. 4. P. 405–411.
60. Bech M., Simonsen J. B., Handke B., Li Z., Møller P. J. Copper nucleation on ZnO(1120) in the presence of sulphur. *Surface Science*. 2006. Vol. 600, No. 17. P. 3375–3381.
61. Kroll M., Köhler U. Small Cu-clusters on ZnO(0001)–Zn: Nucleation and annealing behavior. *Surface Science*. 2007. Vol. 601, No. 10. P. 2182–2188.
62. Ozawa K., Oba Y., Edamoto K. Angle-resolved photoemission study of Cu on ZnO(1 0 $\bar{1}$ 0); room temperature deposition and annealing effect. *Surface Science*. 2007. Vol. 601, No. 18. P. 4053–4057.
63. Beinik I., Hellström M., Jensen T. N., Broqvist P., Lauritsen J. V. Enhanced wetting of Cu on ZnO by migration of subsurface oxygen vacancies. *Nat Commun*. 2015. Iss. 6. P. 8845.
64. Yu Q., Xu X., Wang C., Ma Y., Hui D., Zhou Z. Remarkably improvement in antibacterial activity by synergistic effect in n-Cu@T-ZnO nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*. 2017. Iss. 110. P. 32–38.
65. Ay M., Nefedov A., Zabel H. Growth properties and structural analysis of ZnO films and of Au clusters on ZnO. *Applied Surface Science*. 2003. Vol. 205, No. 1–4. P. 329–335.
66. Bera P., Vohs J. M. Growth and Structure of Pd Films on ZnO(0001). *The Journal of Chemical Physics*. 2006. Vol. 125, No. 16. P. 164713.
67. Bera P., Vohs J. M. Reaction of CH₃OH on Pd/ZnO(0001) and PdZn/ZnO(0001) Model Catalysts. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2007. Vol. 111, No. 19. P. 7049–7057.
68. Hyman M. P., Lebarbier V. M., Wang Y., Datye A. K., Vohs J. M. A Comparison of the Reactivity of Pd Supported on ZnO(10 $\bar{1}$ 0) and ZnO(0001). *The Journal of Physical Chemistry C*. 2009. Vol. 113, No. 17. P. 7251–7259.
69. Duriau E., Agouram S., Morhain C., Seldrum T., Sporken R., Dumont J. Growth of Ag thin films on ZnO(0 0 0 –1) investigated by AES and STM. *Applied Surface Science*. 2006. Vol. 253, No. 2. P. 549–554.
70. Wojewoda-Budka J., Sobczak N., Morgie J., Nowak R. Reactivity of molten aluminium with polycrystalline ZnO substrate. *J. Mater. Sci*. 2010. Vol. 45, No. 16. P. 4291–4298.
71. Wang C. W., Gong Y. H., Liu B. Y., Fu K., Yao Y. G., Hitz E., Li Y., Dai J. Q., Xu S. M., Luo W., Wachsman E. D., Hu L. B. Conformal, Nanoscale ZnO Surface Modification of Garnet-Based Solid-State Electrolyte for Lithium Metal Anodes. *Nano Lett*. 2017. Iss. 17. P. 565–571.
72. Liu Y., Lin D., Liang Z., Zhao J., Yan K., Y. Cui. Lithium-coated polymeric matrix as a minimum volume-change and dendrite-free lithium metal anode. *Nat. Commun*. 2016. Iss. 7. P. 10992.
73. Wojewoda-Budka J., Stan K., Nowak R., Sobczak N. High-temperature reactivity and wetting characteristics of Al/ZnO system related to the zinc oxide single crystal orientation. *J. Mater. Sci*. 2016. Iss. 51. P. 1692–1700.

74. Николаева Н. С. Смачивание расплавом Ag керамик на основе ZnO / IX Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». Сборник материалов. Москва: ИМЕТ РАН, 2014. С. 395.
75. Wojewoda-Budka J., Sobczak N., Stan K., Nowak R. Microstructural characterization of the reaction product region formed due to the high temperature interaction of ZnO(0001) single crystal with liquid aluminium. *Arch Metall Mater.* 2013. Vol. 58, No. 2. P. 349–353.
76. Wang J., Wang H., Xie J., Yang A., Pei A., Chun-Lan Wu C., Shiab F., Liua Y., Lina D., Gong Y., Cuia Y. Fundamental study on the wetting property of liquid lithium. *Energy Storage Materials.* 2018. Iss. 14. P. 345–350.
77. Wang H., Lu Z., Lu D., Li C., Fang P., Wang X. The synthesis of Cu/plate-like ZnO nanostructures and their self-assembly mechanism. *Solid State Sciences.* 2016. Iss. 55. P. 69–76.
78. Lai Y., Ming M., Yu Y. One-step synthesis, characterizations and mechanistic study of nanosheets-constructed fluffy ZnO and Ag/ZnO spheres used for Rhodamine B photodegradation. *Applied Catalysis B: Environmental.* 2010. Vol. 100, No. 3–4. P. 491–501.
79. Li F., Yuan Y., Luo J., Qin Q., Wu J., Li Z., Huang X. Synthesis and characterization of ZnO-Ag core-shell nanocomposites with uniform thin silver layers. *Applied Surface Science.* 2010. Vol. 256, No. 20. P. 6076–6082.
80. Khan M., Wei C., Chen M., Tao J., Huang N., Qi Z., Li L. CTAB-mediated synthesis and characterization of ZnO/Ag core-shell nanocomposites. *J. Alloys Compd.* 2014. Iss. 6. P. 306–314.
81. Zhai H., Wang L., Han D., Wang H., Wang J., Liu X., Lin X., Li X., Gao M., Yang J. Facile one-step synthesis and photoluminescence properties of Ag-ZnO core-shell structure. *Journal of Alloys and Compounds.* 2014. Iss. 600. P. 146–150.
82. Toe M. Z., Le A. T., Han S. S., Yaacob K. A. B., Pung S.-Y. Silver nanoparticles coupled ZnO nanorods array prepared using photo-reduction method for localized surface plasmonic effect study. *Journal of Crystal Growth.* 2020. Iss. 547. P. 125806.
83. Kovács Z., Márta V., Gyulavári T., Ágoston Á., Baia L., Pap Z., Hernadi K. Noble metal modified (002)-oriented ZnO hollow spheres for the degradation of a broad range of pollutants. *Journal of Environmental Chemical Engineering.* 2022. Vol. 10, No. 3. P. 107655.
84. Shao Z., Jia H., Zhang Y., Yang X., Zhong M., Chang C. Oxygen Vacancy-Mediated Interfacial Charge Transfer of Au/ZnO Schottky Heterojunctions for Enhanced UV Photodegradation. *International Journal of Photoenergy.* 2020. Vol. 2020. P. 1–17.
85. Tan Z. Y., Yong D. W. Y., Zhang Z., Low H. Y., Chen L., Chin W. S. Nanostructured Cu/ZnO coupled composites: Toward tunable Cu nanoparticle sizes and plasmon absorption. *Journal of Physical Chemistry C.* 2013. Vol. 117, No. 20. P. 10780–10787.
86. Zhang J., Liu X., Wu S., Cao B., Zheng S. One-pot synthesis of Au-supported ZnO nanoplates with enhanced gas sensor performance. *Sensors and Actuators B: Chemical.* 2012. Iss. 169. P. 61–66.
87. Rai P., Yu Y.-T. Citrate-assisted one-pot assembly of palladium nanoparticles onto ZnO nanorods for CO sensing application. *Materials Chemistry and Physics.* 2013. Vol. 142, No. 2–3. P. 545–548.
88. Zhang J., Liu X., Wu S., Cao B., Zheng S. One-pot synthesis of Au-supported ZnO nanoplates with enhanced gas sensor performance. *Sensors and Actuators B: Chemical.* 2012. Iss. 169. P. 61–66.
89. Rai P., Yu Y.-T. Citrate-assisted one-pot assembly of palladium nanoparticles onto ZnO nanorods for CO sensing application. *Materials Chemistry and Physics.* 2013. Vol. 142, No. 2–3. P. 545–548.

Рецензент: Красовський Віталій Петрович, зав. відділу ІПМ НАН України, д.х.н, ст. наук. співроб.

I.C. Ющук, O.C. Приходько
Луцький національний технічний університет

АНАЛІЗ ОБМЕЖЕНЬ МАШИННОГО НАВЧАННЯ У ПРОГНОЗУВАННІ СПОРТИВНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

У статті представлено експериментальну оцінку ефективності прогностичної моделі на основі алгоритмів машинного навчання. Ключовою метою був аналіз причин розбіжностей між прогнозованими та реальними результатами. Результати експериментів виявили суттєвий вплив динамічних та непередбачуваних факторів (раптові травми, зміни складу, мотивація команд, погодні умови) на точність прогнозів. Систематизовано основні обмеження існуючих статистичних підходів та визначено пріоритетні напрями для подальшого вдосконалення методів спортивної аналітики. Головним результатом роботи є виявлення ключових викликів та обґрунтування необхідності нових підходів до прогнозування в умовах високої динамічності спортивних подій.

Ключові слова: Прогнозування спортивних результатів, штучний інтелект, аналітика даних, методи машинного навчання, спортивна статистика, ефективність прогнозування.

I.S.Yushchuk, O.S. Prykhodko

ANALYSIS OF THE LIMITATIONS OF MACHINE LEARNING IN PREDICTING SPORTS RESULTS

This paper presents an experimental evaluation of the effectiveness of a predictive model based on machine learning algorithms. The key objective was to analyze the reasons for the discrepancies between predicted and actual results. The results of the experiments revealed a significant impact of dynamic and unpredictable factors (sudden injuries, changes in composition, team motivation, weather conditions) on the accuracy of predictions. The main limitations of existing statistical approaches were systematized and priority areas for further improvement of sports analytics methods were identified. The main result of the work is the identification of key challenges and justification of the need for new approaches to forecasting in the context of highly dynamic sporting events.

Keywords: Sports results prediction, artificial intelligence, data analytics, machine learning methods, sports statistics, prediction efficiency.

Introduction and problem statement. Predicting sports results is an important area of research that combines elements of statistics, machine learning, and data analytics. In today's sports environment, where competition is growing and the volume of information is increasing, the need for reliable predictions is relevant for athletes, coaches, and organizations. However, the dynamic nature of sporting events, the presence of numerous uncontrollable factors, and high uncertainty pose significant challenges to achieving high accuracy. Artificial intelligence (AI) opens up new possibilities for analysis, but its practical effectiveness needs to be critically evaluated in the context of real-world unpredictable events. The relevance of this study is due to the need for a deeper understanding of the limitations of modern AI-based forecasting methods and the identification of key factors that reduce their accuracy. This will allow us to identify priority areas for further improvement of the methodology, which has a direct impact on the quality of decision-making in sports.

Analysis of the latest research and publications. Predicting sports results is traditionally considered a classification task (win/loss/draw) [1]. However, recent studies reveal fundamental limitations of such approaches, especially when attempting to predict exact results (score, goal difference) [2]. Although regression methods can theoretically provide deeper analysis [3], their practical effectiveness is severely limited by the high stochasticity of sporting events and the difficulties of formalizing dynamic factors. Studies such as Puruker's work [4] demonstrate typical barriers even for simple models: the use of neural networks for NFL predictions yielded only 61% accuracy (compared to 72% for experts), despite the use of key features (yards, interceptions, bookmaker odds). This indicates a critical dependence of accuracy on the quality and completeness of data—a limited set of features did not allow overcoming the “noise” of real game conditions. More complex approaches (e.g., Tax and Joustra [5]) confirm the methodological complexity of integrating additional factors. An analysis of a thirteen-year sample of matches in the Dutch soccer league showed that betting odds often prove to be better predictors of the outcome than even detailed game statistics. Attempts to improve models by adding additional features, such as current team form or tactical characteristics, did not result in a stable increase in accuracy. The best result (only 56.1%) was demonstrated by the LogitBoost model with feature selection using the ReliefF method [6-8], which indicates the existence of a certain limit of effectiveness for models based solely on statistical

approaches. These works systematically highlight the main problem: existing models inadequately account for the impact of unpredictable events (injuries, motivation, tactical changes) and rely too heavily on historical patterns. Thus, our work focuses on the empirical analysis of these limitations, in particular for the task of predicting scores — the most vulnerable to dynamic changes.

The aim of the study. Analysis of modern methods of predicting sports results using artificial intelligence, in particular, the study of their limitations and challenges in the context of the high dynamism of sporting events. The aim of the study is not only to identify the main trends and approaches, but also, and more importantly, to critically assess the barriers to achieving high prediction accuracy, particularly those caused by the influence of unpredictable factors. The object of the study is the technologies and algorithms of artificial intelligence used to analyze sports data, while the subject of the study is the accuracy of predictions of sports results and the factors that cause them to diverge from reality. The practical significance of the study lies in identifying key areas for improving the methodology of sports analytics. The results obtained can serve as a basis for future developments aimed at improving the effectiveness of the use of analytical data by sports teams and organizations. The systematization of the identified limitations opens up new horizons for scientific research in the field of sports analytics, contributing to the further development of innovations and the development of more robust forecasting methods.

Experimental methodology. The experimental part of the study aimed to evaluate the capabilities and limitations of a statistical model for predicting the results of Premier League football matches, including the number of goals, the probability of victory, and the assessment of team form. The model took into account numerous factors that influence the outcome of a game (including historical form, potential weather conditions, and stadium attendance). The key task was not only to obtain predictions, but also to conduct a thorough analysis of the reasons for the discrepancies between the predicted and actual results, in order to identify the main barriers to improving accuracy, especially in light of dynamic and unpredictable events (e.g., injuries, lineup changes, motivational factors).

To implement the prediction system, historical data from the football-data.org API, which provides real-time information on football match results, was used. The algorithmic implementation covers several stages, from processing historical data to generating predictions for future matches. The main task is to build models that can reflect the current form of the team and predict its further development. The program code consists of several main components that work in close interaction:

- Data collection and processing: The program collects data on match results—for each season, information about the date of matches and results is stored.
- Team form assessment: The team's current form is assessed using the average points method for the last five matches, which allows the dynamics of the form to be modeled.
- Forecast generation: Based on this form, forecasts are generated for the likely results of the remaining matches of the current season, and results are also predicted for the next season. To ensure the realism of trends, random changes in form are used with certain restrictions (for example, changes within 0.7–2.7 points per match). The program generates 2–3 possible trends for the development of events.
- Application of machine learning methods: Machine learning methods, including linear regression, Random Forest, and Gradient Boosting, are used to process data and build predictive models.

Visualization of the model's results using graphs serves as a tool for visual analysis of its limitations. The graphs show how the indicators have changed over time. The indicators obtained using moving average methods allow us to clearly see trends and fluctuations in form, as well as instantaneous declines or rises. This allows us to visually assess the discrepancies between real data and model extrapolations, as well as analyze tendencies to generate unrealistic trends.

Presentation of the main research material. The results of the experimental model are presented in the form of graphs that visualize key aspects of forecasting for football teams. This approach allows us to clearly demonstrate the dynamics of indicators, artifacts, and limitations of algorithms.

Figure 1 shows the graph of points accumulated by the team for the 2023/24 and 2024/25 seasons and the extrapolation (trend) for the 2025/26 season. The 2023/24 season is characterized by stable points accumulation. In the 2024/25 season, there is a significant slowdown in the pace. The dotted line (2024/25) shows a slight improvement at the end of the season, as predicted by the model. The most significant finding is the forecast for 2025/26: the model predicts a sharp acceleration in points scored, which differs significantly from the trends of previous years. This anomaly highlights the risk of over-optimization of the model based on historical data and its inability to adequately take into account contextual changes (e.g.,

© I.C. Ющук, О.С. Приходько

changes in the team's composition, the club's financial capabilities). Without additional context, such dynamics demonstrate the fundamental complexity of long-term forecasting in the highly dynamic environment of soccer.

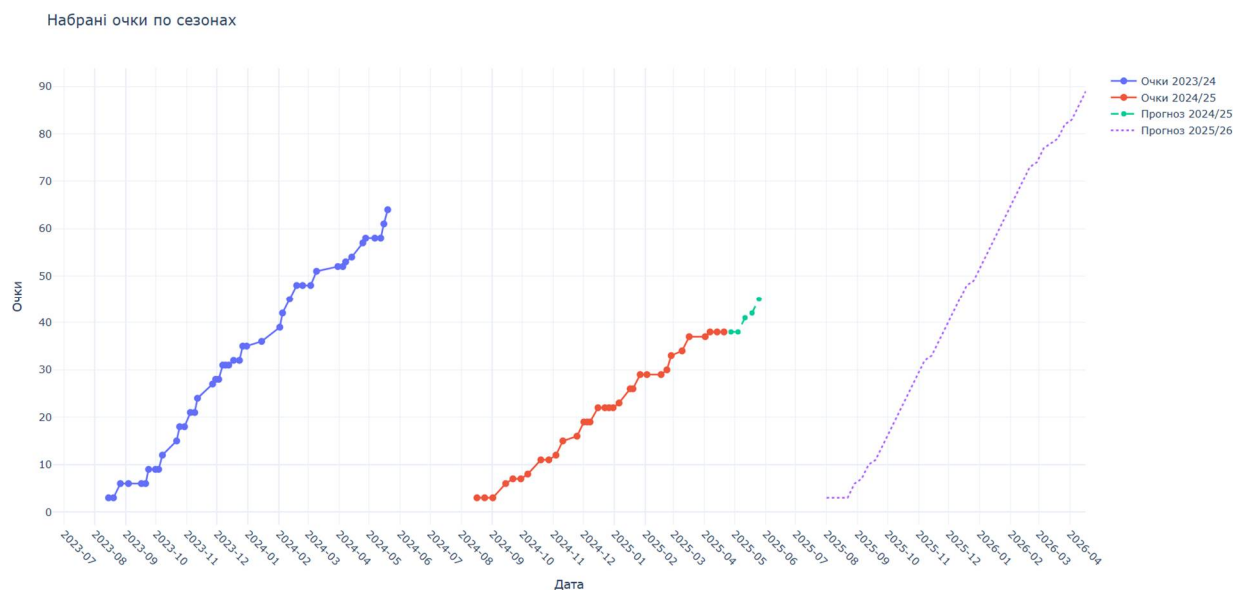


Fig. 1. Graph of points scored by season and predictions for the next season

Figure 2 illustrates the dynamics of the team's short-term form (average number of points in the last 5 matches). The 2023/24 season saw significant fluctuations with episodes of performance above the “good form” level (1.5 points). In the 2024/25 season, performance deteriorated significantly, remaining mostly at around 1 point. The forecast for the end of 2024/25 shows a short-term increase, and the forecast for 2025/26 shows a rapid increase to the theoretical maximum (2.5 points). This extremely optimistic trend, especially against the backdrop of previous fluctuations, raises doubts about the stability of the model: it may indicate an underestimation of the randomness factor, excessive sensitivity to local changes, or failure to take into account real-world constraints (injuries, fatigue, changes in opponents' tactics). Such extrapolation is a striking example of a fundamental challenge in forecasting – models tend to generate unrealistic trends when detached from the current context.

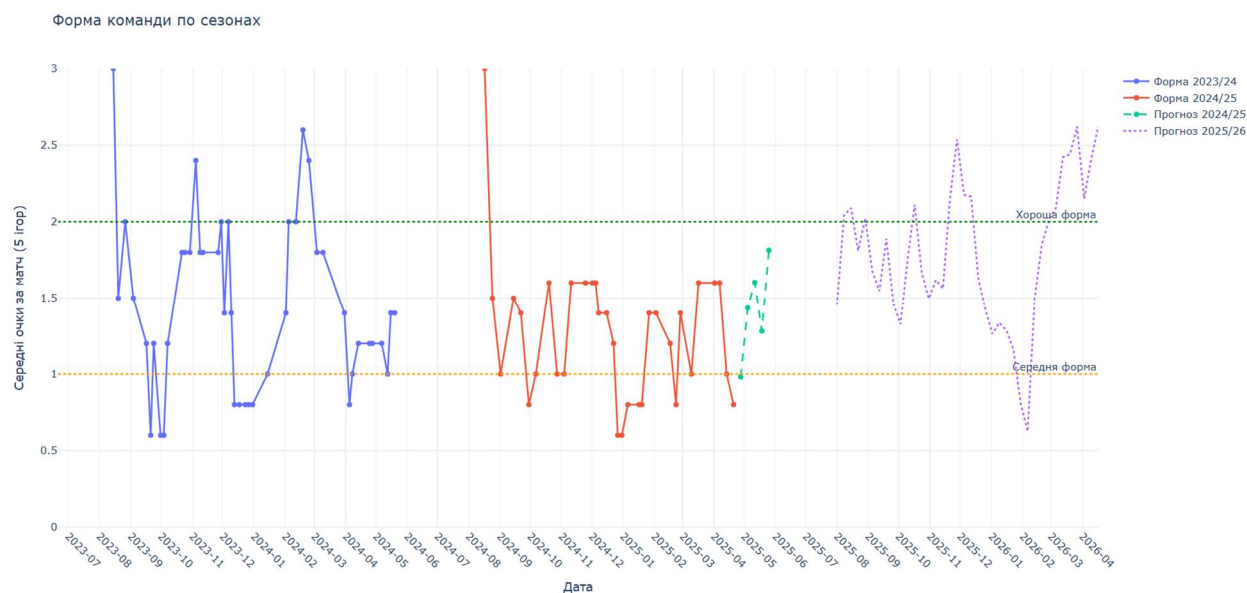


Fig. 2. Team form chart based on the results of the last 5 games

Analysis of the graphs confirms the key limitations identified in short-term forecasting experiments: the model tends to generate overly optimistic and stable trends in the long term, which differ significantly

from the dynamics of real seasons. This is particularly evident in the example of abnormal growth in Fig. 1 and unrealistic form improvement in Fig. 2 for the 2025/26 season.

Experimental evaluation. To verify the accuracy of the forecasting model, three experiments were conducted with predictions for English Premier League (EPL) matches. The prediction results are presented in Tables 1-3.

Table 1

Comparison of predicted and actual EPL match results (December 4-5, 2024)

Program forecast	Game results
Newcastle United – Liverpool 0:2 (90% chance of Liverpool winning)	Newcastle United – Liverpool 3:3
Arsenal – Manchester United 3:1 або 2:1	Arsenal – Manchester United 2:0
Southampton – Chelsea 0:1 (Chelsea win)	Southampton – Chelsea 1:5
Manchester City – Forest 2:2	Manchester City – Forest 3:0
Bournemouth – Tottenham 2:2 is possible, but 2:1 is more likely	Bournemouth – Tottenham 1:0

The results demonstrate moderate accuracy (60%) in predicting the winner, but a complete inability to predict the exact score. The main reason for the discrepancies is the model's limitation in accounting for sudden changes during matches (e.g., injuries, tactical changes), which highlights its vulnerability to dynamic factors.

An attempt was made to improve accuracy by entering data on the team's previous matches into the system immediately before the predicted ones. The results are shown in Table 2.

Table 2

Impact of data collection time on prediction accuracy (December 14–15, 2024)

Program forecast (December 9)	Program forecast (December 14)	Game results (December 14-15)
Liverpool – Fulham 2:1 (the graph also predicts 1:1)	Liverpool – Fulham 3:1	Liverpool – Fulham 2:2
Manchester City - Manchester United 2:2 or 2:1 (more likely to be a draw)	Manchester City - Manchester United 2:2 or 2:1 (more likely to be a Manchester City win)	Manchester City - Manchester United 1:2
Arsenal – Everton 1:0	Arsenal – Everton 2:1	Arsenal – Everton 0:0
Chelsea - Brentford 2:0	Chelsea - Brentford 2:1	Chelsea - Brentford 2:1
Southampton – Tottenham 1:1 or 1:0	Southampton – Tottenham 1:2 or 0:1	Southampton – Tottenham 0:5

The experiment confirmed that updating data closer to the match improves predictions, but accuracy remains low (40% for the winner, 20% for goals). This indicates that even real-time data did not overcome the influence of unpredictable events (sudden changes in the lineup, team motivation), limiting the practical reliability of the system.

Another attempt to enter the results of new matches into the model is shown in Table 3.

Table 3

Results of the third experiment (December 21–22, 2024)

Program forecast	Game results
Aston Villa - Manchester City 1-1	Aston Villa - Manchester City 2:1
Crystal Palace – Arsenal 1-1	Crystal Palace – Arsenal 1:5
Manchester United - Bournemouth 3:2	Manchester United – Bournemouth 0:3
Everton – Chelsea 1:2	Everton – Chelsea 0:0
Tottenham - Liverpool 0-1	Tottenham - Liverpool 3:6

Analysis of Table 3 showed a critical drop in accuracy (20%), indicating a systemic problem with the model: its inability to take into account key contextual factors (changes in the starting lineup, weather conditions, psychological state of the teams). This confirms the hypothesis about the inadequacy of a purely statistical approach in the dynamic environment of football matches.

Conclusions. The experimental evaluation of the proposed model for predicting Premier League match results clearly revealed its key limitations. The analysis confirmed that the high dynamism of football matches and the influence of unpredictable factors (such as sudden injuries, lineup changes, motivational aspects, and weather conditions) are fundamental obstacles to achieving consistently high prediction accuracy. Even the use of advanced machine learning methods (regression, decision trees, neural networks, ensembles) did not allow for the effective consideration of the impact of these dynamic changes in real time. The accuracy of the predictions was significantly lower than expected and unstable, which highlights the fundamental complexity of modeling sporting events. The practical significance of the study lies not in a ready-made solution, but in the systematization of challenges and a clear definition of priority areas for further research: integration of real-time data (news, lineups, weather), development of mechanisms for taking into account qualitative factors (psychology, motivation), and implementation of scenario analysis to manage uncertainty. The systematization of the identified limitations can be a starting point for the development of more robust methods of sports analytics.

List of references:

1. D. Prasitio, D. Harlili, Predicting football match results with logistic regression, in: Proceedings of the 2016 International Conference On Advanced Informatics: Concepts, Theory And Application (ICAICTA), 16–19 Aug. 2016, Penang, Malaysia, 2016.
2. D. Delen, D. Cogdell, N. Kasap A comparative analysis of data mining methods in predicting NCAA bowl outcomes Int. J. Forecast., 28 (2) (2012), pp. 543-552
3. Ulmer B, Fernandez M, Peterson M. Predicting soccer match results in the english premier league. Doctoral dissertation, Doctoral dissertation, Ph. D. dissertation, Stanford. 2013.
4. Purucker M.C. Neural network quarterbacking IEEE Potentials, 15 (1996), pp. 9-15
5. N. Tax, Y.P. Joutstra Predicting the Dutch football competition using public data: A machine learning approach Trans. Knowl. Data Eng., 10 (10) (2015), pp. 1-13
6. I.T. Jolliffe Principal Component Analysis (second ed.), Springer-Verlag, Berlin (2002)
7. Marcano-Cedeno, J. Quintanilla-Dominguez, M. Cortina-Januchs, D. Andina, Feature selection using sequential forward selection and classification applying artificial metaplasticity neural network, in: 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2010, pp. 2845–2850
8. F. Kamalov, F. Thabtah A feature selection method based on ranked vector scores of features for classification Ann. Data Sci. (2017), pp. 1-20

Reviewer: Pasternak Yaroslav, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Computer Science and Cybersecurity at Lesya Ukrainka Volyn National University.

І.В. Карп

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ПЕРЕМІЩЕННЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ
В ПНЕВМОШНЕКОВОМУ ТРАНСПОРТЕРІ**

На основі аналізу графічних побудов встановлено, що кут відхилення частинки зернового матеріалу під час її руху по спіральному витку шнека змінюється в діапазоні 0...72 градуси, причому залежно від збільшення діаметра та кроку шнека відхилення частинки при зміні кута в межах 45...72 градуси має прямий характер, а в діапазоні 0...45 градусів – зворотний характер. Отримані диференційні залежності можуть бути використані для подальшого обґрунтування конструктивних та кінематичних параметрів пневмошнекових транспортних механізмів.

Ключові слова: шнековий живильник, спіральний виток, рівняння руху, кутова швидкість, кут повороту, вектор, сила, коефіцієнт, модель, параметри.

I. Karp

**MATHEMATICAL MODEL OF THE PROCESS OF GRAIN MATERIAL
TRANSPORTATION IN A PNEUMATIC CONVEYOR**

For the movement of grain materials during their post-harvest processing, pneumatic screw conveyors are used, which ensure the movement of grain over considerable distances. The results of the analysis of kinematic-dynamic processes are presented, which are characteristic of two possible cases of complex movement or movement of grain material particles along the surface of the spiral turn of the screw conveyor - in the absence of oscillatory processes of the screw drum and in the presence of screw vibration. Based on the analysis of graphic constructions, it was established that the angle of deviation of a grain material particle during its movement along the spiral turn of the screw varies in the range of 0...72 degrees, and depending on the increase in the diameter and pitch of the screw, the deviation of the particle when changing the angle within 45...72 degrees has a direct character, i.e. increases, and in the range of 0...45 degrees - an inverse character, i.e. decreases. The obtained differential dependencies or mathematical models can be used to further substantiate the structural and kinematic parameters of pneumatic screw transport mechanisms.

Key words: screw feeder, spiral turn, equation of motion, angular velocity, angle of rotation, vector, force, coefficient, model, parameters.

Постановка проблеми. Шнекові конвеєри (ШК), як окремий технічний елемент транспортних механізмів застосовуються в компоновальних схемах транспортних машин для переміщення зернових матеріалів завдяки простій конструкції та забезпечення їх доставки в будь-яку технологічну точку транспортної лінії [1-3].

На токах великих сільськогосподарських підприємств для транспортування зернових матеріалів широко застосовують пневмотранспортні установки продуктивністю 50...200 т/год, за допомогою яких матеріали переміщуються на відстань до 100 м зі швидкістю 15...40 м/с стисненого до 0,6...0,8 МПа повітря [4, 5].

Застосування такого обладнання в невеликих господарствах є економічно не вигідним через виконання невеликого обсягу транспортних робіт і, відповідно, незначну рентабельність використання таких складних і дорогих в обслуговуванні пневмотранспортних механізмів [6, 7].

Загальним недоліком роботи шнекових механізмів є те, що спіральні витки виконують не тільки повздовжній осьовий рух матеріалу, але й призводять до обертання частинок зерна, під час якого матеріал переміщується по поверхні спірального витка навколо осі шнека.

Це призводить до пошкодження матеріалу, зниження продуктивності таких механізмів та значного збільшення потужності, необхідної для здійснення процесу переміщення зернових матеріалів по трасі на задану віддал [8-10].

Таким чином, серед актуальних завдань підйомно-транспортної галузі, важливим завданням є розробка та обґрунтування раціональних параметрів мобільних малогабаритних шнекових пневмотранспортерів, які забезпечують ефективні технологічні процеси переміщення зернових матеріалів за технологічними маршрутами різної просторової конфігурації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових робіт [13-17] показав, що основна увага авторів була приділена реалізації стаціонарних процесів транспортування фізичних тіл ШК без дослідження процесів, які описують на теоретичному рівні вібрацію матеріалів, яка виникає під час їх переміщення витками шнека.

Тому вибір методики та розрахунок раціональних параметрів робочих органів пневмошнекового транспортера необхідно здійснювати на основі реалізації моделей безпосередньої кінематично-динамічної взаємодії відповідної робочої поверхні із зерновим матеріалом і урахування його фізико-механічних характеристик. Крім того, на основі відомих результатів встановлено, що існуючі конструкції робочих органів ШК не в повній мірі задовольняють функціональні вимоги до показників пошкодження зерна при забезпеченні мінімальних енерговитрат на здійснення технологічного процесу його переміщення по трасах транспортування [18, 19].

Постановка завдань. Метою роботи є дослідження процесу переміщення насіння зернових культур спіральними витками ШК з розроблення математичної моделі, яка описує функціональні зв'язки вібраційних процесів і кінематично-динамічного руху зерна у просторі прямої труби пневмошнекового конвеєра.

Викладення основного матеріалу. Розроблену схему малогабаритного пневмошнекового транспортера для переміщення зернових матеріалів на токах малих фермерських підприємств за маршрутами різної конфігурації наведено на рис. 1 [11, 12].

Пневмошнековий транспортер складається з бункера 1, який закріплений до прямої труби 5, всередині якої встановлено шнек 2 та які у комбінації утворюють ШК. За вихідним кінцем шнека у стінці кожуха закріплено штуцери 3 пневмолінії, а за ними встановлено змінні сопла або насадки з отворами. Подача повітря відбувається за допомогою пневморозподільника 4, що забезпечує в автоматичному режимі подачу стисненого повітря від компресора по шлангах, які надіті на відповідні штуцери 3. До кожуха закріплено гнучкий пневмопровід (рукав) по якому надалі транспортується зерно до місця призначення.

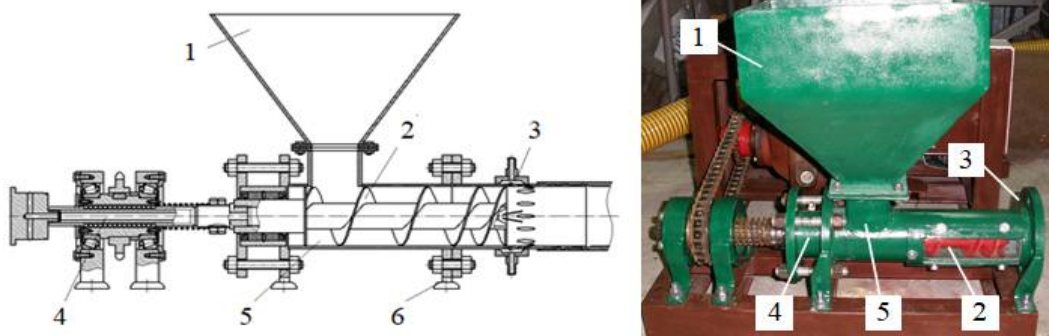


Рис. 1. Конструктивна схема пневмошнекового транспортера: 1 – бункер; 2 – шнек; 3 – штуцер пневмолінії; 4 – пневморозподільник; 5 – пряма труба (кожух); 6 – з'єднувальні фланці

Автоматичне регулювання подачею стиснутого повітря до пневмопроводу через шланги 6 (рис. 2) забезпечується пневморозподільником, який має механізм регулювання подачі повітря у шланги 6. Шліцьовий вал шнека з'єднаний із шліцьовим валом 3, встановленого у корпус 2 через кульки з можливістю осевого зміщення при збільшенні навантаження на витки шнека.

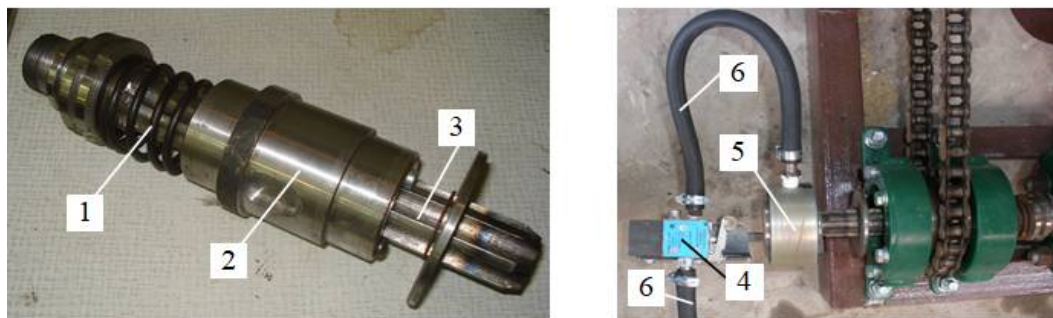


Рис. 2. Загальний вигляд механізму пневморозподільника: 1 – натискна пружина; 2 – корпус; 3 – шліцьовий вал з напівкруглими пазами; 4 – пневморозподільник; 5 – поворотний пневматичний адаптер; 6 – шланг

Механізм автоматичного регулювання процесом роботи пневморозподільника дозволяє визначати крутний момент на валу привода шнека, та регулює роботу пневмошнекового

транспортера шляхом вмикання або вимикання пневморозподільник залежно від наявного навантаження на спіральні витки шнека.

На етапі оптимізації параметрів транспортно-технічних систем, які мають робочі елементи шнекових механізмів та їх проектування доцільно спочатку побудувати математичну модель технологічного процесу роботи ШК. Це дозволить отримати теоретичні закономірності, які на аналітичному рівні описують функціональні взаємозв'язки параметрів ШК та зернового матеріалу на стадії його переміщення в просторі кожуха та обґрунтувати раціональні режими роботи ШК залежно від умов переміщення та його основних конструктивно-кінематичних параметрів [20].

Для розробки математичної моделі технологічного процесу роботи ШК розглянемо рух матеріальної частинки (зернини) суцільного нерозривного потоку зернового середовища, яка знаходиться на поверхні спірального витка 1 (рис. 3) шнека 2. Шнек встановленого консольно з зазором відносно корпусу 3 а зернина переміщується горизонтально вздовж осі обертання шнека з поступальною швидкістю в напрямку пневмопровода пневмошнекового транспортера.

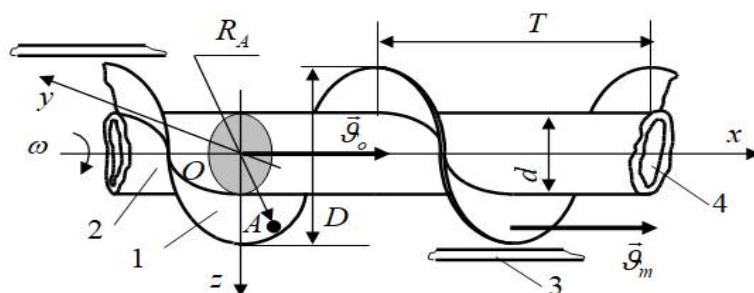


Рис. 3. Схема до розрахунку руху зернового матеріалу у шнековому конвеєрі:
1 – спіральний виток шнека; 2 – шнек; 3 – корпус (кожух); 4 – барабан

З початком контакту частинки тіла (зернини) масою m_c з поверхнею спірального витка 1 (рис. 3), вона за рахунок обертання спірального витка шнека 2 з кутовою швидкістю ω одночасно обертається навколо поперечної осі Oz та переміщується по поверхні витка в напрямку поздовжньої осі Oz . У процесі руху по спіральному витку шнека в напрямку вектора $\vec{g}_m$ осьового переміщення або в напрямку вектора $\vec{g}_o$ осьової поступальної швидкості, зернина також може одночасно ковзати по поверхні спірального витка та корпусу 3 ШК протягом деякого інтервалу часу Δt .

У цьому випадку маємо складний рух фізичного тіла, коли зернина бере участь: у відносному (обертальному) русі – по поверхні спірального витка ШК зі швидкістю $\mathcal{G}_{1c}$; при поступальному русі – одночасно разом з поворотом зернини зі швидкістю $\mathcal{G}_{2c}$ і горизонтального руху в напрямку вектора $\vec{\mathcal{G}}_m$.

На матеріальне тіло, тобто зернину масою m_c , яка знаходиться на поверхні витка ШК та переміщується по ньому, в момент часу $t = 0$ діють сила тяжіння $m_c g$, сила реакції поверхні витка N_1 та кожуха N_2 , сила тертя ковзання витка F_1 та кожуха F_2 .

Введемо нерухому просторову систему координат $Oxyz$ (рис. 3), в якій вісь Oz збігається з віссю обертання ШК, а вісь Ox – з поздовжньою віссю обертання ШК або розташована паралельно горизонтальній площині.

За проміжок часу Δt , або в момент часу t , спіральний виток 1 (рис. 3) ШК повернеться на кут повороту $\varphi(t)$, а кут повороту $\varphi(t)$ спірального витка згідно з [21] виражається залежністю

$$\varphi(t) = 2\pi\omega t + \varphi_1 = 2\pi \frac{d\varphi}{dt} + \varphi_1, \quad (1)$$

де ω – кутова швидкість обертання шнека, рад/с; $\varphi_1 = const$ – початковий кут повороту шнека в момент часу $t = 0$, рад.

Згідно з [22], поряд з обертальним рухом частинка матеріалу масою m_c , яка розташована на поверхні спірального витка 1 (рис. 3) ШК, здійснює деякий рух за рахунок плоскопаралельного руху

в площині zOy , яка перпендикулярна осі обертання барабана 4 шнека 2, тобто осі Ox вала шнека.

При $x = 0$, цей рух частинки матеріалу масою m_c можна описати канонічним рівнянням руху центру O осі вала ШК, тобто $[z_0(t); y_0(t); x_0(t)] = [z_0(t); y_0(t); 0], t \geq 0$, де координати z_0 і y_0 згідно з [23] можна записати у вигляді $z_0(t) = -f[\varphi_0(t) \cos \varphi_A(t)] + g[\varphi_0(t) \sin \varphi_0(t)]$ та у вигляді $y_0(t) = -f[\varphi_A(t) \sin \varphi_A(t)] - g[\varphi_A(t) \cos \varphi_0(t)]$.

Рівняння руху частинки матеріалу масою m_c в нерухомій системі координат Oxy згідно з класичними законами механіки [23] у векторній формі має вигляд

$$m_c \ddot{\vec{x}}_i = m_c \vec{a}_c = m_c \frac{d^2 \vec{R}_A}{dt^2} = \vec{G}_{m_c} + \sum_{i=1}^2 \vec{N}_{n_i} + \sum_{i=1}^2 \vec{F}_{m_i}, t > 0, \quad (2)$$

де компоненти залежності (2), тобто бігучий вектор $\vec{R}_A$ положення частинки в площині zOy , або зв'язок між векторним і координатним режимами руху частинки, векторний запис сили тяжіння частинки $\vec{G}_{m_c}$, векторне значення сумарної реакції $\sum_{i=1}^2 \vec{N}_i$ поверхонь і сумарної сили тертя ковзання

$\sum_{i=1}^2 \vec{F}_{m_i}$ частинки по поверхнях визначаються як:

$$\vec{R}_A(t) = [x_A(t); y_A(t); z_A(t)] = ix(t) + jy(t) + kz(t); \vec{G}_{m_c} = (m_c g; 0; -m_c g); \vec{N}_i = \vec{n}_i \mu_i, \quad (3)$$

де i, j, k – координати відповідних осей системи координат; $\vec{n}_i$ – одиничний вектор, перпендикулярний до площини відповідної поверхні P_i , або одинична нормаль до поверхні P_i , $i = 1, 2$;

$$\vec{F}_{m_i} = -f_i m_c \vec{a}_{c_i} = -f_i |\vec{N}_i| \left(\left(\frac{d\vec{R}_A}{dt} - \vec{V}_i \right) / \left| \frac{d\vec{R}_A}{dt} - \vec{V}_i \right| \right) = -f_i |\vec{N}_i| \left(\left(\frac{d\vec{R}_A}{dt} - \vec{V}_i \right) / \left| \frac{d\vec{R}_A}{dt} - \vec{V}_i \right| \right), \quad (4)$$

де μ_i – реакція в'язі відповідної площини; f_i – коефіцієнт тертя ковзання поверхні; V_i – швидкість руху матеріальної частинки масою m_c вздовж поверхні P_i в точці $\vec{R}_A(t)$.

Розв'язання задачі зводиться до знаходження реакцій в'язі μ_i відповідної поверхні площини P_i , або в нашому випадку – до знаходження μ_1 і μ_2 – відповідно, реакцій в'язі поверхні спірального витка 1 шнека 2 і поверхні корпусу 3 ШК.

Для цього спочатку запишемо рівняння поверхні P_1 спірального витка 1 шнека 2 та поверхні P_2 кожуха 3, які згідно з [24] мають вигляд

$$\left. \begin{aligned} P_1(0, 5D; R; \varphi; x) &\equiv x + (T/2\pi)(\varphi - \varphi_0) = 0; \\ P_2(x; y; z) &\equiv z^2 + y^2 - 0,25D^2 = 0 \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

де D – діаметр шнека, м; T – крок гвинтової лінії шнека, м.

Тоді положення одиничних векторів $\vec{n}_1$ і $\vec{n}_2$, які перпендикулярні до площин відповідних контактних поверхонь частинок матеріалу, будуть визначатися як

$$\left. \begin{aligned} \vec{n}_1 &= (-T \sin \varphi; T \cos \varphi; \pi D / c(0, 5D)); \\ \vec{n}_2 &= (-\cos \varphi; \sin \varphi; 0) \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

де $c(0, 5D) = \sqrt{T^2 + \pi^2 D^2} = \pi D \sqrt{\tan^2 \beta + 1}$ – параметр шнека; $T = \pi D \tan \beta$, β – кут підйому гвинтової лінії витків спіралі шнека, град.

Враховуючи канонічне рівняння (1) обертання ШК і поступальний рух частинки, отримуємо

$$\vec{q}_1 = \frac{d}{dt} [0, 5D \cos \varphi_0(t); 0, 5D \sin \varphi_0(t); 0] + \frac{d}{dt} [z_0(t); y_0(t); 0], \quad (7)$$

або

$$\vec{g}_1 = \left(-2\pi \frac{d\varphi}{dt} \cdot y + z'_o(t); y'_o(t) + 2\pi \frac{d\varphi}{dt} \cdot z; 0 \right). \quad (8)$$

Потім, щоб знайти реакцію μ_1 в'язі спіральної поверхні витка шнека і реакцію μ_2 в'язі поверхні кожуха ШК, ми множимо записані скалярні значення відповідних компонентів рівняння (2) на відповідні значення одиничних векторів $\vec{n}_1$ і $\vec{n}_2$ з рівняння (6).

В результаті отримуємо:

- за умови $i = 1$, або за умови вібрації частинки тільки на поверхні спірального витка

$$0 = -\frac{T}{c(0,5D)} m_c g \sin \varphi - \frac{\pi D}{c(0,5D)} m_c g + \mu_1 - f_2 \mu_2 \frac{\pi D T}{c(0,5D) |0,5\dot{\vec{D}}|} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) + f_1 \mu_1 T \frac{[-z'_o(t) \sin \varphi + y'_o(t) \cos \varphi]}{c(0,5D) |0,5\dot{\vec{D}} - \vec{g}_1|}, \quad (9)$$

або враховуючи (8) і той факт, що $\dot{\vec{D}} = d\vec{D}/dt$, $c(0,5D) = \pi D \sqrt{tg^2 \beta + 1} = \pi D / \cos \beta$,

$$0 = -m_c g (\sin \varphi \sin \beta + \cos \beta) + \mu_1 - f_2 \mu_2 \frac{\pi D \sin \beta}{|d\vec{D}/dt|} (d\varphi/dt) + f_1 \mu_1 \sin \beta \frac{[-z'_o(t) \sin \varphi + y'_o(t) \cos \varphi]}{|0,5(d\vec{D}/dt) - (d/dt)[0,5 \cos \varphi_o(t); 0,5 \sin \varphi_o(t)] - (d/dt)t[z_o]}|} \quad ; \quad (10)$$

- за умови $i = 2$, або одночасної вібрації частинки матеріалу на поверхні спірального витка та кожуха ШК

$$m_c a_c = 0,5 m_c D (\dot{\varphi})^2 = 0,5 D m_c \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = -m_c g \cos \varphi + \mu_2 - \frac{f_1 \mu_1 [z'_o(t) \cos \varphi + y'_o(t) \sin \varphi]}{|0,5\dot{\vec{D}} - \vec{g}_1|}, \quad (11)$$

або з урахуванням (8) і того факту, що $\dot{\vec{D}} = d\vec{D}/dt$

$$0,5 D m_c \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = -m_c g \cos \varphi + \mu_1 - \frac{f_1 \mu_2 [z'_o(t) \cos \varphi + y'_o(t) \sin \varphi]}{|0,5 \frac{d\vec{D}}{dt} - \frac{d}{dt}[0,5 \cos \varphi_o(t); 0,5 \sin \varphi_o(t)] - \frac{d}{dt}[z_o(t); y_o(t); 0]}|} \quad . \quad (12)$$

Залежності (10), (12) являють собою систему рівнянь, розв'язок якої щодо невідомих реакцій в'язі поверхні спірального витка μ_1 шнека з поверхнею корпусу μ_2 ШК має вигляд:

$$\mu_1 = \frac{m_c g \sin \beta (\sin \varphi + m_c g) - f_2 \mu_2 \frac{\pi D \sin \beta}{|0,5 \frac{d\vec{D}}{dt}|} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)}{1 + f_1 \sin \beta \frac{[-z'_o(t) \sin \varphi + y'_o(t) \cos \varphi]}{|0,5 \frac{d\vec{D}}{dt} - \frac{d}{dt}[0,5 \cos \varphi_o(t); 0,5 \sin \varphi_o(t)] - \frac{d}{dt}[z_o]}|}}; \quad (13)$$

$$\mu_2 = m_c \left[0,5D \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + g \cos \varphi \right] + \frac{f_1 \mu_1 \left[z'_o(t) \cos \varphi + y'_o(t) \sin \varphi \right]}{\left| 0,5 \left(\frac{d\bar{D}}{dt} \right) - \frac{d}{dt} [0,5 \cos \varphi_o(t); 0,5 \sin \varphi_o(t)] - \frac{d}{dt} [z_o(t); y_o(t); 0] \right|} \quad (14)$$

Підставляючи значення реакцій μ_2 в'язі поверхні корпусу ШК із залежності (14) у рівняння (13), отримуємо залежність для визначення реакції μ_1 в'язі поверхні спірального витка шнека

$$\mu_1 = m_c \left\{ 0,5D \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 f_2 + g [\sin \varphi \sin \beta + \cos \beta + f_2 \cos \varphi] \right\} / \left[\frac{\left(\frac{d\bar{D}}{dt} \right)}{2\pi D \sin \beta \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)} + \frac{f_1 \{ \sin \beta [-z'_o(t) \sin \varphi + y'_o(t) \cos \varphi] \} - f_1 f_2 [z'_o(t) \sin \varphi + y'_o(t) \cos \varphi]}{\left| 0,5 \left(\frac{d\bar{D}}{dt} \right) - \frac{d}{dt} [0,5 \cos \varphi_o(t); 0,5 \sin \varphi_o(t)] - \frac{d}{dt} [z_o(t); y_o(t); 0] \right|} \right] \quad (15)$$

В кінцевому випадку з рівняння (2) руху матеріальної частинки масою m_c знаходимо

$$m_c T \ddot{\varphi} = 2\pi m_c g - \frac{\mu_1}{c(0,5D)} (2\pi)^2 0,5D - f_2 \mu_2 \frac{T(\dot{\varphi} - 2\pi\omega)}{\left| 0,5 \dot{\bar{D}} \right|} - f_1 \mu_1 \frac{T(\dot{\varphi} - 2\pi\omega)}{\left| 0,5 \dot{\bar{D}} - \dot{\bar{g}}_1 \right|}, \quad (16)$$

або

$$m_c \pi D \operatorname{tg} \beta \left(\frac{d^2 \varphi}{dt^2} \right) = 2\pi (m_c g - \mu_1 \cos \beta) - 2\pi D (\operatorname{tg} \beta - 1) \left(\frac{d\varphi}{dt} \right) \times \left[f_2 \mu_2 \left| \frac{d\bar{D}}{dt} \right|^{-1} - f_1 \mu_1 \left(\left| \frac{d\bar{D}}{dt} - 2 \frac{d}{dt} [0,5 \cos \varphi_o(t); 0,5 \sin \varphi_o(t)] - 2 \frac{d}{dt} [z_o(t); y_o(t); 0] \right|^{-1} \right) \right] \quad (17)$$

Якщо вібрація зернини відсутня, то залежності (14) і (17) істотно спрощуються.

У цьому випадку ми отримуємо:

$$\mu_1 = m_c \left\{ \frac{2\pi f_2 D \sin \beta \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)}{\left| \frac{d\bar{D}}{dt} \right|} \left[0,5D \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + g \cos \varphi \right] + g (\sin \varphi \sin \beta + \cos \beta) \right\}; \quad (18)$$

$$\mu_2 = m_c \left[0,5D \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + g \cos \varphi \right]. \quad (19)$$

Таким чином, отримані диференціальні залежності (13), (14), (17) є математичною моделлю, яка характеризує технологічний процес роботи ШК і може бути використана для подальшого обґрунтування конструктивно-кінематичних параметрів пневмошнекового транспортера.

Для повнішого опису технологічного процесу роботи ШК диференціальні залежності (10), (18), (19) необхідно доповнити заданими початковими умовами: $\varphi(0) = \varphi_o$; $\dot{\varphi}(0) = d\varphi/dt = \dot{\varphi}_1$.

При цьому необхідно зазначити, що математична модель (9), (12) є адекватною лише за умови $\mu_i > 0$.

Якщо ця умова не виконується і $\mu_i < 0$, то матеріальна частинка (зернина) втрачає контакт з поверхнею і рівняння (2) не адекватно описує реальний процес руху матеріальної частинки масою

m_c в ШК.

Також необхідно додати, що залежності (18), (19) можуть мати стаціонарні розв'язки відносно реакцій в'язі μ_{P_i} відповідних площин і кута повороту φ_{P_i} , які відповідають іншим точкам спокою:

$$\mu_{1P_i} = m_c g \left[\frac{T}{c(0,5D)} \sin \varphi_{P_i} + \frac{2\pi 0,5D}{c(0,5D)} (1 + f_2 \cos \varphi_{P_i}) \right]; \quad (20)$$

$$\mu_{2P_i} = m_c g \cos \varphi_{P_i}; \quad (21)$$

$$0 = 2\pi m_c g - \frac{\mu_{1P_i}}{c(0,5D)} (2\pi) 0,5D + 2\pi f_2 \mu_{2P_i} + 2\pi f_2 \mu_{2P_i} T / c(0,5D). \quad (22)$$

$$\left. \begin{aligned} \mu_{1P_i} &= m_c g (\sin \varphi_{P_i} \sin \beta + \cos \beta + f_2 \cos \varphi_{P_i} \cos \beta); \\ \mu_{2P_i} &= m_c g \cos \varphi_{P_i}; \\ m_c g - \mu_{1P_i} \cos \beta + f_2 \mu_{2P_i} (1 + \sin \beta) &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (23)$$

Для визначення φ_{P_i} виключимо із системи рівнянь (23) значення реакції зв'язку μ_{iP_i} .

У результаті розв'язання (23) отримуємо залежність

$$\begin{aligned} \cos \varphi_{P_i} \left(1 + \operatorname{ctg} \varphi_{P_i} \left\{ \operatorname{ctg} \beta + [\pi D \sin \beta (f_2 \sin \beta - \cos \beta)]^{-1} \right\} \right) = \\ = \left\{ \operatorname{ctg} \beta - [\pi D \sin \beta (f_2 \sin \beta - \cos \beta)]^{-1} \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

Із системи рівнянь (23) заміною компоненти $\sin \varphi_{P_i} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{P_i}}$ та введенням позначення $\cos \varphi_{P_i} = x$ одержуємо канонічне рівняння другого степеня, розв'язок якого відносно φ_{P_i} має вигляд

$$\begin{aligned} \sin \varphi_{P_{1,2}} = - \frac{f_2 [\cos \beta (\cos \beta - T f_1 \cos \beta / \pi D f_2) + 1]}{\left(T^2 \cos^2 \beta / \pi^2 D^2 + f_2^2 [\cos \beta (\cos \beta - T f_1 \cos \beta / \pi D f_2) + 1]^2 \right)^{1/2}} \pm \\ \pm \frac{T \cos \beta}{\pi D} \sqrt{f_2^2 [\cos \beta (\cos \beta - T f_1 \cos \beta / \pi D f_2) + 1]^2 - \cos^2 \beta} \end{aligned} \quad (25)$$

Відповідно до рівняння (24) 3D графічні залежності були побудовані як функція $\sin \varphi_{P_i} = f(D, T)$, рис. 4.

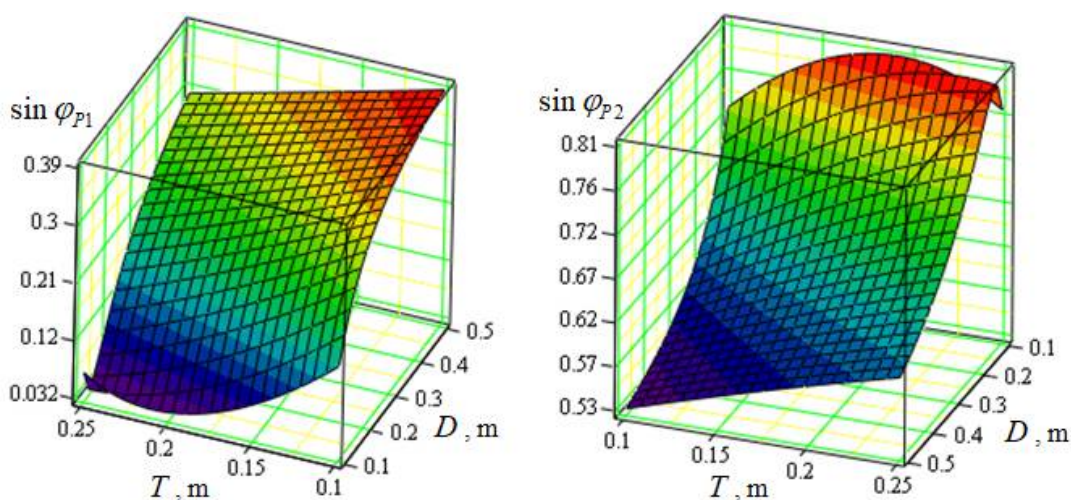


Рис. 4. Залежність зміни кута відхилення φ_{P_i} матеріальної частинки від D і T як функція $\sin \varphi_{P_i} = f(D, T)$

На основі аналізу графічних побудов встановлено, що кут відхилення φ_{1p} частинки зерна під час її руху по спіральному витку шнека змінюється в діапазоні $0 \dots 72$ град., причому залежно від збільшення діаметра D шнека та кроку T шнека відхилення частинки при зміні кута в межах $45 \dots 72$ град. має прямий характер, а в діапазоні $0 \dots 45$ градусів – зворотний характер.

У цьому випадку за умови $\mu_{ir1} > 0$ можна ідентифікувати набір допустимих параметрів моделі, виходячи з точки зору її адекватності та стійкості стаціонарних рішень безвібраційного процесу роботи ШК.

Чисельне дослідження математичної моделі (18), (19) реалізовано за допомогою прикладної програми для персонального комп'ютера, а в результаті заміни залежність (18) приведена до системи $\dot{\varphi}(t) = \dot{\psi}(t)$ диференціальних рівнянь першого порядку.

Висновки.

1. Запропоновано методологію та принцип розробки математичних моделей, що функціонально описують процес руху зернового матеріалу в шнековому конвеєрі пневмошнекового транспортера з урахуванням можливих вібраційних процесів.

2. На аналітичному рівні визначено сили реакції спірального витка шнека та корпусу шнекового конвеєра, величина яких функціонально залежить від кута повороту та кутової швидкості шнека.

3. Результати дослідження доцільно використовувати в процесі оптимізації конструктивно-кінематичних параметрів і режимів роботи шнекових конвеєрних механізмів.

Список використаних джерел

1. Hevko R.B., Baranovsky V.M., Lyashuk O.L., Pohrishchuk B.V., Gumeniuk Y.O. et al. (2018). The influence of bulk material flow on technical and economical performance of a screw conveyor INMATEH–Agricultural Engineering, 56 (3/2018), 175–184.
2. Lech M. (2001). Mass flow rate measurement in vertical pneumatic conveying of solid. Powder Technology, 114, 1–3, 55–58.
3. Baranovsky Viktor, Gritsay Yury, Marinenko Sergey. (2019). Experimental investigations of the homogeneity coefficient of root crops crushed particles. Scientific Journal of TNTU (Tern.), 94, 2, 80–89.
4. Pankiv V.R., Tokarchuk O.A. (2017). Investigation of constructive geometrical and filling coefficients of combined grinding screw conveyor. INMATEH–Agricultural engineering, 51, 1/2017, 59–68.
5. Merritt A.S., Mair R.J. (2015). No access Mechanics of tunnelling machine screw conveyors: model tests. Géotechnique, 56, 9, 605–615.
6. Pankiv Vitalii. Throughput capability of the combined screw chopper conveyor. Scientific Journal of TNTU (Tern.). 2017. Vol. 85. No. 1. P. 69–79.
7. Hevko R.B., Dzyura V.O., Romanovsky R.M. Mathematical model of the pneumatic-screw conveyor screw mechanism operation. INMATEH–Agricultural Engineering. 2014. Vol. 44. No. 3. P. 103–110.
8. Nilsson L.G. On the vertical screw conveyor for non-cohesive buек materials. Acela polytechnic Scandinavia. Stockholm. 1971. 96 p.
9. Baranovsky V., Pankiv M., Komar R., Berezhenko B., Korol O. Mathematical model of the srew conveyor loading hopper. Scientific Journal of TNTU (Tern.). 2021. Vol. 104 (4). P. 109–122.
10. Hevko R.B., Klendiy M.B., Klendiy O.M. Investigation of a transfer branch of a flexible screw conveyor. INMATEH–Agricultural Engineering. 2016. Vol. 48. No. 1/2016. P. 29–34.
11. Hevko R.B., Yazlyuk B.O., Pankiv V.R. et al. Feasibility study of mixture transportation and stirring process in continuous-flow conveyors. INMATEH–Agricultural Engineering. 2017. Vol. 51. No. 1/2017. P. 49–58.
12. Olt J., Bulgakov V., Trokhaniak O., Klendii M., Gadzalo I.A., Ptashnik M., Tkachenko M. Harrow with screw-type operating tools: Optimization of design and process parameters. Agronomy Research. 2022. Vol. 20. No. 4. P. 751–763.
13. Karetin V., Baranovsky V., Stukhlyak P., Kurko A. The results of experimental studies transfer coefficient inertial torque coupling screw conveyor. Innovative Solution in Modern Science. 2020. Vol. 5 (41). P. 85–96.
14. Baranovsky V., Grytsay Y., Berezhenko B. Experimental studies of the coefficient of crushing of root crops with a screw conveyor-crusher. Innovative Solution in Modern Science. 2019. Vol. 4 (31). P. 20–

36.

15.Hevko R.B., Rozum R.I., Klendiy O.M. Development of design and investigation of operation processes of loading pipes of screw conveyors. INMATEH – Agricultural Engineering. 2016. Vol. 50. No. 3. P. 89–94.

16.Aulin V.V., Pankov A.O., Zamota T.M., Lyashuk O.L., Hryniv A.V., Tykhyi A.A., Kuzyk A.V. Development of mechatronic module for the seeding control system. INMATEH – Agricultural Engineering. 2019. Vol. 59. No. 3. P. 1–8.

17.Baranovsky V., Gritsai Y. Experimental research on productivity of auger root cutter conveyor. Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. 2019. Vol. 15(3).

18.Hevko R.B., Klendiy O.M. The investigation of the process of a screw conveyor safety device actuation. INMATEH. Agricultural engineering. 2014. Vol. 42. No. 1. P. 55–60.

19.Romanovsky R.M., Baranovsky V.M., Hevko R.B., Dzyura V.O. et al. Justification of rational parameters of a pneumoconveyor screw feeder. INMATEH –Agricultural Engineering.2018. Vol. 54 (1/2018).P. 15–24.

20.Bulgakov V., Olt J., Ivanovs S., Trokhaniak O., Gadzalo Ja., Adamchuk V., Chernovol M., Pascuzzi S. Santoro F., Arak M. Research of a contact stresses in swivel elements of flexible shaft in screw conveyor for transportation of agricultural materials. Estonian Academic Agricultural Society. Agraarteadus. 2022. Vol. 33. No. 1. P. 67–73.

21.Dolgunin V.S. Segregation Modeling of particle rapid gravity flow / V.S. Dolgunin, A.A. Ukolov // Powder Technology. – 1995. – Vol. 83. – P. 95.

22.Experimental and analytical research on gravity flows of particulate solids / V.N. Dolgunin, V.J. Borschov, P.A. Ivanov, A.M. Klimov // 4-th Wordl Congress of Particle Technology Full text of paper in SD-Rom. Sidney, 2002.

23. Baranovsky V., Karp I., Salo Y., Berezhenko B., Marushchak P. Analysis of the process of material movement in a screw conveyor. Scientific Journal of TNTU (Tern.). 2025. Vol. 117. No 1. P. 5–17.

24.Shen H.H., Ackermann N.I. Constitutive Relationships for Fluid–Solid Mixtures. Dev. Engineering Mechanik – ASCE. 1982. Vol. 108(1). P. 748.

25.Ackerman N.I., Shen H.H. Stresses in rapidly Fluid–Solid Mixtures. // Dev. Engineering Mechanik – ASCE. 1982. Vol. 108(3). P. 95–113.

26.Welshcof G. Pneumatische Forderung bei grossen fordergut-konzentrationen. Dusseldorf : VDI-Verlag GMBH, 1962. 492 S.

Рецензент: Барановський Віктор Миколайович, професор кафедри інжинірингу машинобудівних технологій, доктор технічних наук, професор.

Б. В. Петришин, Ю. І. Озимок
Національний лісотехнічний університет України

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГОСТРОТИ НОЖА НА ЯКІСТЬ СТРУГАНОГО ШПОНУ

Наведено умови забезпечення отримання якісного струганого шпону. Проаналізовано особливості загострювання ножів шпоностругальних верстатів, встановлено недоліки процесу готування ножів до роботи, які знижують його продуктивність. Проведено дослідження шорсткості виготовленого струганого шпону на верстаті Cremon TZE 40. Побудовано діаграму залежності шорсткості поверхні від радіуса заокруглення різальної кромки ножа та кількості подвійних ходів ванчеса.

Ключові слова: шпоностругальний верстат, ніж, притискна лінійка, шорсткість поверхні шпону, ванчес.

B. Petryshyn, Yu. Ozymok

STUDY OF THE IMPACT OF BLADE SHARPNESS ON SLICED VENEER QUALITY

This study outlines the conditions necessary to produce high-quality sliced veneer. We analyzed the specifics of sharpening knives for veneer slicing machines and identified deficiencies in the knife preparation process that reduce productivity. Research was conducted on the surface roughness of sliced veneer produced on a Cremona TZE 40 machine. A diagram was then constructed to show the relationship between surface roughness and the knife's cutting edge radius, as well as the number of double strokes of the flitch.

Key words: slicing machine, knife, pressure bar, veneer surface roughness, workpiece.

Вступ. Струганий шпон є одним із найважливіших матеріалів у деревообробній промисловості. Його отримують шляхом стругання деревини на тонкі листи, які зберігають природну структуру і текстуру волокон. Завдяки високим декоративним властивостям, шпон широко використовується у виробництві меблів, облицюванні плитних матеріалів, виготовленні дверей, панелей та інших елементів інтер'єру.

Технологія його виготовлення вимагає ретельного підбору сировини, дотримання температурно-вологісних режимів підготовки деревини, точного налаштування обладнання та оптимального кута загострення струганих ножів.

Якість струганого шпону залежить не лише від технічного стану обладнання, а й від параметрів обробки, якості різального інструменту та професійності обслуговуючого персоналу. Тому вивчення особливостей цього процесу є актуальним для підвищення продуктивності виробництва, зниження витрат матеріалів та забезпечення стабільної якості готової продукції.

Постановка завдань: Одним із ключових показників якості струганого шпону є шорсткість його поверхні, яка безпосередньо впливає на подальше склеювання, оздоблення та експлуатаційні властивості готової продукції.

На формування шорсткості шпону впливають різні чинники: властивості деревини, технічний стан шпоностругального верстата, геометрія та ступінь загострення ножів, режими різання тощо. Невідповідність хоча б одного з цих параметрів може знизити якість шпону, що своєю чергою впливає на загальну якість кінцевого продукту.

У зв'язку з цим актуальним є завдання забезпечення стабільного отримання струганого шпону з оптимальними показниками шорсткості шляхом оптимізації технологічного процесу, вибору ефективного різального інструменту та дотримання відповідних режимів обробки.

Виклад основного матеріалу. Забезпечення нормальної роботи всіх вузлів та систем верстатів для отримання якісного шпону з технічного боку досягається точністю виготовлення верстатів, їх налагодженням та підготовлення різального інструменту.

Підготовка шпоностругального верстата до роботи включає встановлення ножа і притискної лінійки, регулювання положення кулачків, що обмежують хід супорта (при зубчастій передачі), перевірку упорів проти вильоту супорта, налагодження затискних пристроїв, справність мастильних систем і таке інше.

Технічне налагодження пристрою для винесення листів шпону з порожнини супорта характеризується перевіркою механізму приводу, ступеня натягу тягових органів (пасів) та їх руху без пробуксовки, перевірки якості поверхні шківів (відсутність оливи), зшивки пасів, перевірки механізму підйому, а також систем безпеки.

Якщо тягові органи виконані у вигляді ланцюгів, то ступінь натягу не перевіряється, оскільки вона забезпечується за рахунок жорсткого кінематичного зв'язку.

Налагодження включає також визначення режиму роботи верстата - число ходів супорта і кількість ванчесів, які стругають одночасно.

Розмірне налаштування шпоностругального верстата пов'язане з його налагодженням і полягає в розрахунку необхідних відстаней між лезом ножа і кромкою притискної лінійки, налаштуванні подачі на розрахункову висоту підйому стола за один холостий або подвійний хід супорта.

Забезпечення заданої товщини шпону залежить від геометричної точності верстата, яка визначається взаємним розташуванням повзунів та напрямних, робочих переміщень ножової та притискної траверс, а також від жорсткості системи верстат-інструмент-ванчес. Остання умова є необхідною, тому що в процесі стругання на ванчес діють не тільки сили різання, але і їх горизонтальні та вертикальні складові, що призводить до зміни взаємного положення платформи, супорта та ванчеса. Для забезпечення високої якості шпону перед початком кожної зміни необхідно ставити загострений ніж (тонкий або товстий), правильність загострення якого визначається прямолінійністю леза по всій площині.

Загострювання шпоностругальних ножів є складним і багатоетапним процесом. У ході його виконання необхідно враховувати специфічні конструктивні особливості цих інструментів — зокрема, малий кут загострення ($\beta = 18...21^\circ$) та велику площу задньої поверхні. Через значну довжину ножів їх загострювання виконується на спеціалізованому обладнанні. Досягнення високої якості загострювання можливе лише за умови правильного підбору абразивного інструмента та дотримання оптимальних режимів оброблення. Вибір абразивного круга є одним з ключових етапів підготовки до загострення. При цьому потрібно враховувати такі параметри, як матеріал ножа, спосіб його охолодження під час оброблення, а також конструктивні характеристики інструмента.

Для загострювання шпоностругальних ножів зазвичай використовуються суцільні чашкові абразивні круги відповідно до ДСТУ ISO 603-6:2019. Рекомендовані розміри кругів: діаметр — 150–250 мм, товщина — 63–100 мм. Абразивним матеріалом слугує електрокорунд, зв'язка може бути керамічною або бакелітовою, твердість — від CM2 до CT1, зернистість — 16–40 [2].

Інтенсивність процесу загострювання такими кругами призводить до підвищення температури на поверхні ножа, що негативно впливає на якість загострювання та знижує стійкість інструмента до спрацювання. Підготовка ножів до роботи займає значний час – як на саме загострення, так і на заміну абразивних кругів. Це суттєво позначається на загальній продуктивності процесу.

Притискну лінійку змінюють значно рідше (один раз на місяць), але після установки ножа її обов'язково регулюють для досягання необхідного обтискання. Отримання шпону заданої товщини також залежить від налаштування механізму підйому стола.

Стругальні ножі використовуються для отримання струганого шпону на шпоностругальних верстатах. Виготовляються ножі довжиною до 5500 мм, шириною $B = 150...265$ мм і товщиною $S = 4...22$ мм (за звичай 15 мм). Для кріплення в супорті ножі мають прорізи. Конструкції ножів стругальних верстатів наведено на рис. 1 [2].

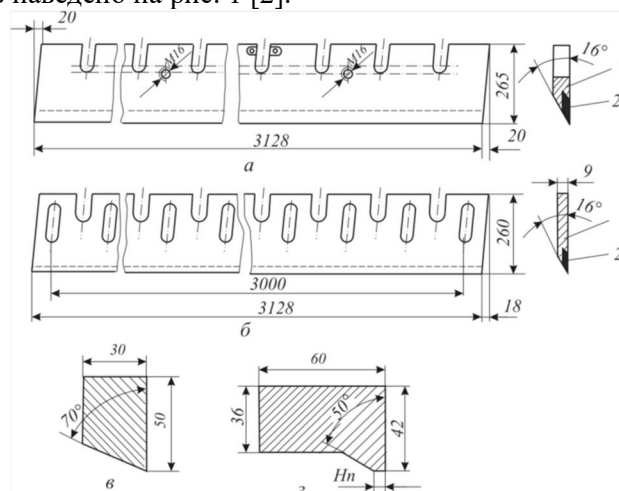


Рис. 1 Конструкції ножів і притискних лінійок шпоностругальних верстатів: а – ніж до чеського верстата ФММ-3100 товстий; б – те ж тонкий; в, г – поперечні перерізи притискних лінійок до шпоностругальних верстатів: 1 – корпус ножа; 2 – робоча (різальна) частина

Прорізи під болти, що виходять на поздовжню поверхню ножа, не перпендикулярні до неї, а розміщені під кутом 5...10°. Це зумовлено нахиленим розміщенням супорта шпоностругального верстата на напрямних. Товсті ножі виготовляють з двошарової сталі (компауд). Робоча частина - з легованої сталі типу 9Х5ВФ, 9ХС, корпус - з м'якої сталі 15. Товщина робочої частини складає від 1/4 до 1/3 товщини ножа, а ширина - від 1/3 до 1/2 ширини ножа. Твердість HRC робочої частини ножа повинна становити 56...62 одиниці.

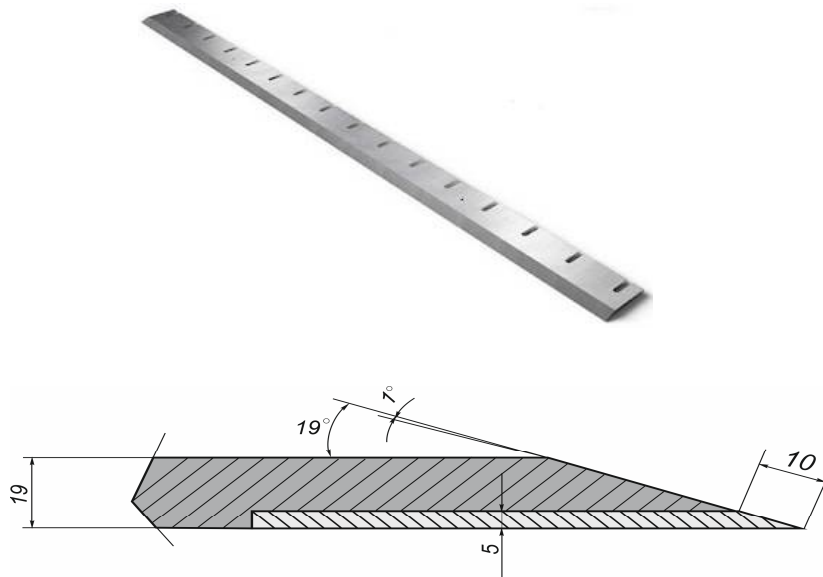


Рис. 2 Загальний вигляд ножа вертикального шпоностругального верстата Cremona TZE 40, який використовувався під час експерименту: *а* – загальний вигляд; *б* – схема з лінійними та кутовими параметрами.

Процес стругання шпону проходив за наступних умов: порода деревини – дуб; вологість деревини – 60%; довжина заготовки – 4000 мм; товщина шпону – 0,5 мм; ширина листа шпону – 20 мм; кількість подвійних ходів за хвилину 20...80 ходів/хв. Експеримент виконувався спочатку гострим ножом радіус заокруглення різальної кромки становив $\rho=10$ мкм, а потім в затупленім, радіус заокруглення різальної кромки становив $\rho=80$ мкм.

Експериментальні дослідження шорсткості струганого шпону

Дослідження шорсткості виготовленого струганого шпону на верстаті Cremon TZE 40 виконаємо у вигляді активного експерименту за В-планом з двома чинниками [3].

На основі аналізу чинників впливу на шорсткість струганого шпону встановлено, що найбільший вплив серед усіх наявних чинників має кількість подвійних ходів n (хв^{-1}) механізму різання за одну хвилину. Також чинником вибираємо гостроту ножа шпоностругального верстата, яка характеризується радіусом заокруглення ріжучої кромки ρ (мкм). З літератури відомо, що зі збільшенням затупленості інструменту якість оброблення деревини знижується. Обґрунтування вибору чинників описано вище. Параметром оцінювання прийнято шорсткість обробленої поверхні $R_{m \max}$.

Отже, в результаті експериментальних досліджень необхідно встановити таку залежність:

$$R_{m \max} = f(n; \rho);$$

Область визначення кількості подвійних ходів становить 20...90 ходів/хв. Враховуючи реальні режими, при яких здійснюється стругання шпону на виробництві, область інтересу вибираємо в межах 20...80 ходів/хв.

Гострота ножа шпоностругального верстата визначається радіусом заокруглення різальної кромки, значення якого можуть бути в межах 10...80 мкм. Саме ці значення варто прийняти за область інтересу, оскільки вони визначають реальний період тривкості інструменту.

Зведені дані області визначення та області інтересу основних чинників показано в табл. 1, а в табл. 2. Розпишемо область інтересу по рівнях.

Табл. 1

Області визначення та області інтересу основних чинників впливу на шорсткість шпону

Назва чинника	Познач.	Од. вимір.	Значення			
			Область визначення		Область інтересу	
			мін.	макс.	мін.	макс.
Кількість подвійних ходів	n	ход./хв	20	90	20	80
Радіус заокруглення ножа	ρ	мкм	10	100	10	80

В більшості випадків під час дослідження процесів механічного оброблення деревини зв'язок між чинниками і вихідними параметрами з достатньою точністю можна описати рівнянням не вище другого порядку.

Рівняння регресії в кодових значеннях для досліджуваної залежності має вигляд [3]:

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (1)$$

де, b_0, b_1, b_2, b_{12} – коефіцієнти рівняння регресії.

Для планування експерименту вибираємо В-план, так як він має порівняно високі характеристики точності коефіцієнтів рівняння регресії. Особливістю В-плану є те, що зоряне плече у всіх випадках дорівнює одиниці (-1).

Табл. 2

Область інтересу основних чинників впливу на шорсткість шпону

Чинник	Основний рівень	Верхній рівень	Нижній рівень	Інтервал зміни	Кодове значення чинника
Кількість подвійних ходів	50	80	20	30	X_1
Радіус заокруглення леза	45	80	10	35	X_2

Реалізація алгоритму оброблення результатів багаточинникового експерименту у вигляді прикладної програми на ЕОМ забезпечує високу швидкість та точність виконання громіздких розрахунків і виключає можливість помилок. Використання для розроблення даної програми середовища MS Excel дозволяє у зручній формі виводити проміжні результати поетапного виконання розрахунків, що забезпечує можливість їх послідовного аналізу на кожному з етапів.

Методика визначення шорсткості обробленої поверхні

В результаті проведення досліджень відповідно до плану експерименту, отримано взірці шпону (рис. 3) при різних значеннях чинників впливу відповідно до номера досліджу.



Рис. 3 Взірці шпону отримані під час проведення експериментальних досліджень

Отримані взірці шпону розглядались з допомогою мікроскопа для вимірювання шорсткості ТСП 4 (рис. 4) у лабораторії кафедри технологічних машин і технічного сервісу.

Для оброблення отриманих результатів дослідження шорсткості поверхні струганого шпону потрібно застосувати прикладну програму *matplan* у середовищі Excel, що дозволить отримати рівняння регресії та побудувати графічні залежності.



Рис. 4 Вимірювання шорсткості шпону за допомогою мікроскопа ТСП 4

Результати дослідження шорсткості поверхні шпону

Результати експериментальних досліджень, виконаного за В-планом другого порядку відповідно до підготовленої методики, показано у табл. 3. Оброблення результатів експериментальних досліджень виконано за допомогою прикладної програми *matplan* у середовищі Excel.

Табл. 3

Результати експериментальних досліджень шорсткості поверхні шпону, виконаного за В-планом

№ досл.	Кодові значення чинників		Натуральні значення чинників		$R_{m \max}$, мкм			
	X_1	X_2	n , ход./хв	ρ , мкм	Результати повторень дослідів			Сер. знач.
					1	2	3	
1	-1	-1	20	10	35	30	40	35
2	+1	-1	80	10	45	50	40	45
3	-1	+1	20	40	65	60	70	65
4	+1	+1	80	40	80	85	90	85

Рівняння для якості поверхні струганого шпону отримане під час проведених експериментів в кодових значеннях має вигляд:

$$R_{m \max} = 57,5 + 7,5X_1 + 17,5X_2 + 2,5X_1X_2 \quad (2)$$

Умова адекватності одержаного рівняння виконується, тому вважаємо що результати рівняння регресії з достатньою точністю узгоджені з результатами експерименту.

Отже, за одержаним рівнянням можна аналізувати величину впливу кожного з чинників на значення параметра шорсткості шпону струганого шпону, а також прогнозувати величину кожного з параметрів при будь-яких значеннях чинників, що знаходяться в межах між верхнім (+1) та нижнім (-1) рівнями.

На основі аналізу рівняння регресії для визначення шорсткості шпону можна виділити таке:

- величина першого чинника (кількості ходів) впливає на якість шпону у 2,3 рази менше, ніж величина другого чинника (гостроти інструменту);
- із збільшенням коефіцієнта і першого, і другого чинників рівняння регресії, які мають додатне значення якість шпону погіршуватиметься
- мінімального значення шорсткості шпону можна досягти під час роботи гострим ножом при мінімальній кількості подвійних ходів/хвилину;
- найбільшою шорсткістю поверхні шпону буде в процесі стругання при максимальних значеннях величин радіуса заокруглення ріжучої кромки ножа та кількості подвійних ходів/хв стола з ванчесом;
- якщо значення обидвох чинників знаходитимуться на нульових рівнях, шорсткість поверхні струганого шпону на верстаті Cremona TZE 40 становитиме 57,5 мкм, що і відповідає значенню вільного члена одержаного рівняння;

- коефіцієнт b_{12} свідчить про те, що існує взаємодія чинників, тобто радіус заокруглення ріжучої кромки ножа та кількість подвійних ходів ванчеса впливають один на одного.

Щоб на основі рівняння регресії в кодових значеннях чинників отримати рівняння регресії в натуральних значеннях чинників, скористаємось формулою згідно методики планування експерименту.

Рівняння регресії шорсткості в натуральних значеннях чинників має вигляд:

$$R_{m \max} = 53,571 - 0,857n + 0,952\rho + 0,024n\rho \quad (3)$$

Рівняння регресії в натуральних значеннях чинників дає можливість побудувати діаграму залежності шорсткості поверхні від впливу цих чинників, за якою можна провести більш детальний аналіз.

Використовуючи рівняння регресії у натуральних значеннях виконуємо за допомогою програми MS Excel побудову діаграми залежності шорсткості поверхні радіуса заокруглення різальної кромки ножа та кількості подвійних ходів ванчеса (рис. 5).

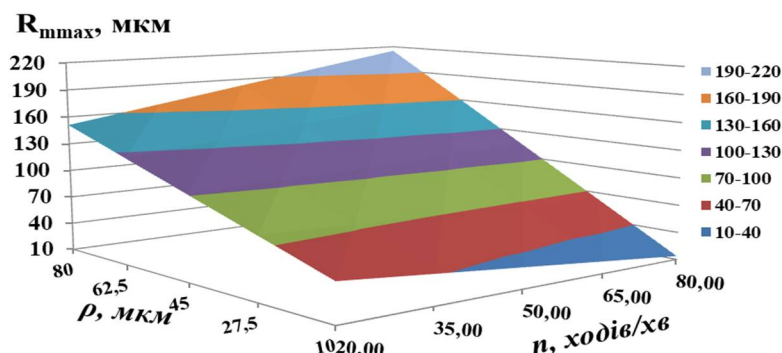


Рис. 5 Діаграма залежності шорсткості поверхні радіуса заокруглення різальної кромки ножа та кількості подвійних ходів ванчеса

З діаграми шорсткості поверхні видно, що за умови мінімальних значень чинників впливу видно, що значення шорсткості є найменшим і становить 13,73 мкм. Під час роботи гострим ножом, із збільшенням кількості подвійних ходів/хв, шорсткість поверхні дещо знижується. Тоді як під час роботи затупленим ножом, із збільшенням кількості подвійних ходів/хв, шорсткість поверхні збільшується. Тобто, умовою забезпечення найякіснішої поверхні шпону можна вважати стругання шпону гострим ножом при максимальній кількості подвійних ходів (на максимальній швидкості різання). По мірі збільшення затуплення ножа якість поверхні шпону поступово погіршується.

З діаграми видно що гостра ножа має значно більший вплив на шорсткість поверхні шпону, порівняно з кількістю подвійних ходів. Враховуючи вимоги провідних європейських виробників меблевої продукції до шорсткості шпону на рівні 100-120 мкм та аналізуючи отримані результати досліджень можна зробити висновок, що для отримання якісного шпону потрібно щоб ніж працював в межах періоду стійкості 10...60 мкм.

Дані результати отримано після роботи ножа впродовж 4 год, коли радіус заокруглення леза ножа становив приблизно 80 мкм. Після цих чотирьох годин роботи ніж на підприємстві знімають для перегострення. З вище сказаного випливає, що для отримання якісного шпону ніж потрібно знімати після 3 год роботи, коли радіус заокруглення різальної кромки становить близько 60 мкм.

Також для збільшення періоду стійкості ножа варто розглядати способи зміцнення поверхні його різальної частини, загострення ножа кругами з первною робочою поверхнею [7].

Висновки:

1. Визначено основні чинники впливу на шорсткість поверхні шпону для проведення експериментальних досліджень: кількість подвійних ходів/хв та радіус заокруглення леза ножа.

2. На основі отриманих результатів експерименту на шпоностругальному верстаті встановлено, що для забезпечення найякіснішої поверхні шпону потрібно різати гострим ножом при максимальній кількості подвійних ходів (на максимальній швидкості різання). Після 2 годин роботи ножа для отримання якісного шпону рекомендуємо знижувати швидкість різання.

3. Враховуючи вимоги провідних європейських виробників меблевої продукції до шорсткості шпону на рівні 100-120 мкм та аналізуючи отримані результати досліджень можна зробити

висновок, що для отримання якісного шпону потрібно щоб ніж працював в межах періоду стійкості 10...60 мкм.

4. Відповідно для отримання якісного шпону ніж потрібно знімати після 3 год роботи, коли радіус заокруглення леза ножа становить близько 60 мкм. Отже, потрібно розробити науково-обґрунтовані способи підвищення періоду стійкості шпоностругального ножа для можливості стругання шпону з високою якістю впродовж робочої зміни (8 год).

Список використаних джерел:

1. Кірик М. Д. Механічне оброблення деревини та деревних матеріалів: Підручник для вищих навчальних закладів / М. Кірик – Львів: КН, 2006. – 412с.
2. Кірик М. Д., Григор'єв А. С. Підготовлення дереворізальних інструментів до роботи та їх експлуатація: Підручник для вищих навчальних закладів / М. Кірик, А. Григор'єв – Львів: НЛТУ України, 2013. – 342с.
3. Пилипчук М. І., Григор'єв А. С., Шостак В. В. Основи наукових досліджень: Підручник / М. І. Пилипчук, А. С. Григор'єв, В. Шостак – Львів: Видавництво «Знання», 2007. – 270с.
4. Білей П. В., Довга Н. Д., Ханик Я. М. та інш. Методологія наукових досліджень технологічних процесів: Навчальний посібник / П. В. Білей, Н. Д. Довга, Я. М. Ханик та інш. – Л.: Панорама, 2003. – 182с.
5. Озимок Ю. І., Бень О. І. Шостак В. В. Досліджування температури на поверхні загострювання луцильних ножів. Науковий вісник НЛТУ України: збірн. наук. праць. Львів. 2020, том 30, №1. – С. 115-120.
6. Озимок Ю. І., Бень О. І. Шостак В. В. Вплив температури, що виникає на поверхні загострювання луцильних ножів, на мікротвердість леза. Збірник матеріалів IV міжнародної науково-практичної конференції "Прикладні науково-технічні дослідження" 2020. – С. 63-65 (м. Івано-Франківськ 2020).
7. Yuriy Ozymok, Ben Ihor, Shostak Volodymyr. Substantiation of regimes applied when sharpening veneer peeling lathe knives by a multi-cup abrasive disk. Journal PRO LIGNO, Brasov, Romania, 16 (4), 2020.
8. Шостак В. В., Савчук Я. І., Ковальчук Г. М., Озимок Ю. І., Савич М. М. Основи розрахунку та конструкції дерево обробного обладнання: підручник / В. В. Шостак, Я. І. Савчук, Г. М. Ковальчук, Ю. І. Озимок, М. М. Савич: за ред. В. В. Шостака. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. – 392 с.

Б. З. Барабаш, І. Т. Ребезнюк

Національний лісотехнічний університет України

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВСТАТКОВАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ В БАРАБАНИХ ПОДРІБНЮВАЧАХ ДЕРЕВИНИ

Проаналізовано шляхи удосконалювання принципової схеми барабаних подрібнювачів деревини задля того щоб отримувати якнайбільшого відсотка технологічних трісок потрібних розмірів і якості, насамперед для вироблення паливних гранул. Зазначено, що складниками отримування деревинних трісок певних розмірів у барабаних подрібнювачах слугує низка чинників, які загалом можна об'єднати у два: режим різання та конструкція камери подрібнювання технологічних трісок.

Описано особливості конструкції виробленого експериментального устаткування, на якому буде можна з високим ступенем точності дослідити складники вдосконалювання барабанного подрібнювача деревини.

Ключові слова: барабаний подрібнювач деревини, режим різання, камера подрібнювання, технологічні тріски, експериментальне устаткування.

B. Z. Barabash, I. T. Rebezniuk

EXPERIMENTAL EQUIPMENT FOR DETERMINATION OF RATIONAL CUTTING MODES IN DRUM WOOD CHIPPERS

The ways of improving the schematic diagram of drum chippers of wood are analysed in order to obtain the largest possible percentage of technological chips of the right size and quality, primarily for the production of fuel pellets. It is noted that the components of obtaining wood chips of certain sizes in drum chippers are a number of factors that can generally be combined into two: the cutting mode and the design of the chipping chamber of technological chips.

The features of the design of the experimental equipment produced are described, on which it will be possible to study the components of improving the drum chipper of wood with a high degree of accuracy.

Keywords: drum wood chipper, cutting mode, chipping chamber, technological chips, experimental equipment.

Interpretation of the Problem.

Since the production of the first choppers for wood processing (the second half of the 19th century), their designs have been constantly improved using established cutting schemes, primarily in accordance with the need to obtain chips of certain sizes.

Due to a number of advantages of drum choppers [1] compared to circular ones, they are designed and produced as both mobile and stationary. Mobile equipment can be used directly in the forest at wood harvesting sites, where both tree trunks and branches, knots and other wood residues are chipped on it. After chipping on such equipment, chips of relatively large sizes up to 200 mm are obtained, which are used as fuel or rechipped to be used for the production of wood fuel pellets.

Stationary drum chippers are installed at enterprises as part of technological lines. Typically, wood is chipped on such chippers into chips with dimensions not larger than 25 mm × 25 mm × 2 mm. The resulting chips are dried, then they are rechipped on hammer mills or chipping machines or disintegrators to obtain fractions of no more than 6 mm. It is from chips of this size that wood fuel pellets are produced.

The components of obtaining wood chips of certain sizes in drum chippers are several factors: the speed of feeding the material, the angle of feeding the wood, the speed of cutting, the number of knives on the drum, the presence of bedknives, the design of the perforated sieve. In general, two components can be distinguished: the cutting mode and the design of the chipping chamber.

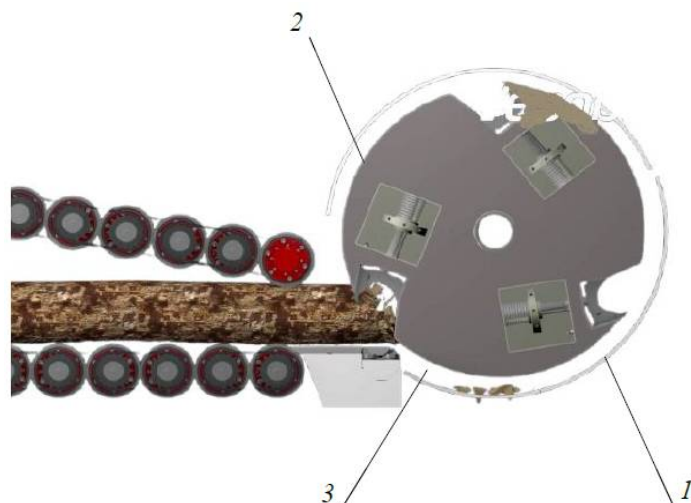
Therefore, it is necessary to first investigate whether it is possible to obtain, by adjusting the wood cutting modes and improving the design and arrangement of the components of the chipping chamber of technological chips, only chips no larger than 6 mm in size as a result of chipping wood in drum chippers.

Analysis of Recent Research and Publications.

Today, the common scheme of a drum wood chipper is (Fig. 1.1) [2] the one in which a steel perforated sieve of plate arc shape 1 located at a certain equal distance from the cylindrical surface of the knife drum 2 of the chipper is used to screen out the homogeneous fraction of technological chips. The inner working surface of the sieve 1 and the cylindrical surface of the knife drum 2 limited on both sides the chipping chamber of technological chips 3.

The disadvantage of this design is the low productivity of obtaining chips of given sizes, since a certain percentage of chips of large sizes that need to be rechipped are retained in the chipping chamber after cutting wood.

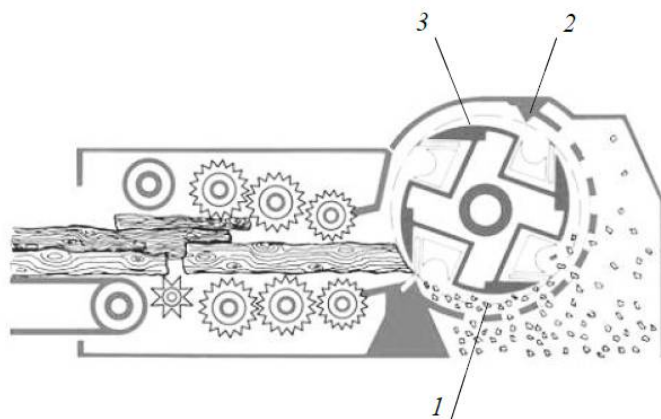
To rechip technological chips faster, chippers are designed and produced according to the scheme (Fig. 1.2), in which the chipping chamber 1 in its upper part is limited by the bedknife 2 [3]. With this design of the chipper, the technological chips fly out of the chipping chamber less, hit the edges and surfaces of the bedknife 2 less, are partially rechipped and sifted through the sieve under the action of air flows and centrifugal force.



1—sieve; 2—cylindrical surface of the knife drum;
3—chipping chamber of technological chips.

Fig. 1.1. Common design scheme of a drum wood chipper [2]

The rear surface of the cutting knife of the drum 3 is made according to the Archimedes spiral. The percentage of technological chips of large sizes that need to be rechipped in such a structure of the chipping chamber, compared to the previous version of the chamber design (see Fig. 1.1) is somewhat smaller, but is still high.

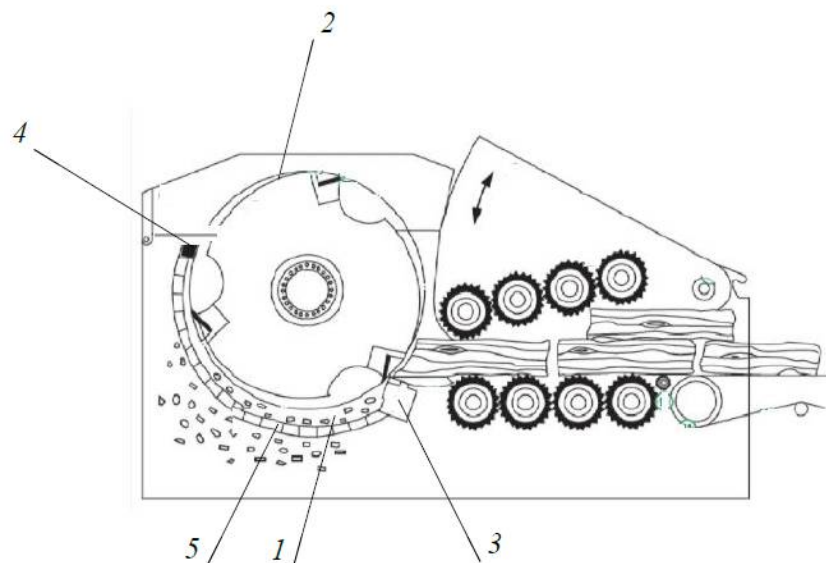


1—chipping chamber; 2—upper bedknife; 3—working surface of the drum.

Fig. 1.2. Design scheme of a drum wood chipper, the chipping chamber of which is limited from the outside by the upper bedknife [3]

The next step in improving the design of the chipping chamber of the drum wood chipper is the location of the sieve relative to the working surface of the drum [4]. In this design of the chipper (Fig. 1.3), the chipping chamber of technological chips 1 is formed by: the rear surfaces of the cutting knife of the drum 2 made according to the Archimedes spiral; the lower bedknife (in the cutting area) 3; the upper bedknife 4; the steel perforated sieve 5, having a plate arc shape, envelops the working surface of the knife drum 2 and is installed at different distances from the cylindrical surface of rotation of the cutting edges of the knives: the largest one is near the lower bedknife 3, the smallest one is near the upper bedknife 4. This arrangement of the sieve determines the formation of the edges of the holes as if in the form of microstairs,

which rechip the technological chips in the chipping chamber as micro-bedknives. In this sieve arrangement, the number of technological chips of large sizes decreases, but their chipping is also insufficient.



1—chipping chamber of technological chips; 2—working surface of the drum; 3—lower bedknife; 4—upper bedknife; 5—sieve.

Fig. 1.3. Design scheme of a drum wood chipper with a special sieve arrangement [4]

Based on the analysis of the structures of the chipping chamber, it follows that it is necessary to create in it, in addition to the upper bedknife, several components that will act as mini-bedknives and will accelerate the rechipping of chips to the desired fraction. Such a task can be solved by improving the design of the sieve.

Setting the Task.

The solution of the task set is achieved by forming the sieve of the drum wood chipper as a stepped plate structure, the steps of which work as additional mini-bedknives that reschip the resulting chips. [5, 6].

Sieve 1 of a drum wood chipper (Fig. 1.4) is made of steel, has an arc shape, and is located at a certain distance from the cylindrical surface of movement of the cutting edges of the knives 2 of the drum 3, limiting from the outside together with bedknives 4, 5 the chipping chamber of technological chips 6. The sieve 1 is formed from rectangular lattice plate sections 7 interconnected by adjacent superposition of the longitudinal edge 8 of one section 7 on the longitudinal edge of the other section 7, creating an integral structure. Due to this connection of the sections 7, the inner working surface of the sieve 1 has a step-like shape, on which the steps 9 are located opposite the direction of movement of the chips.

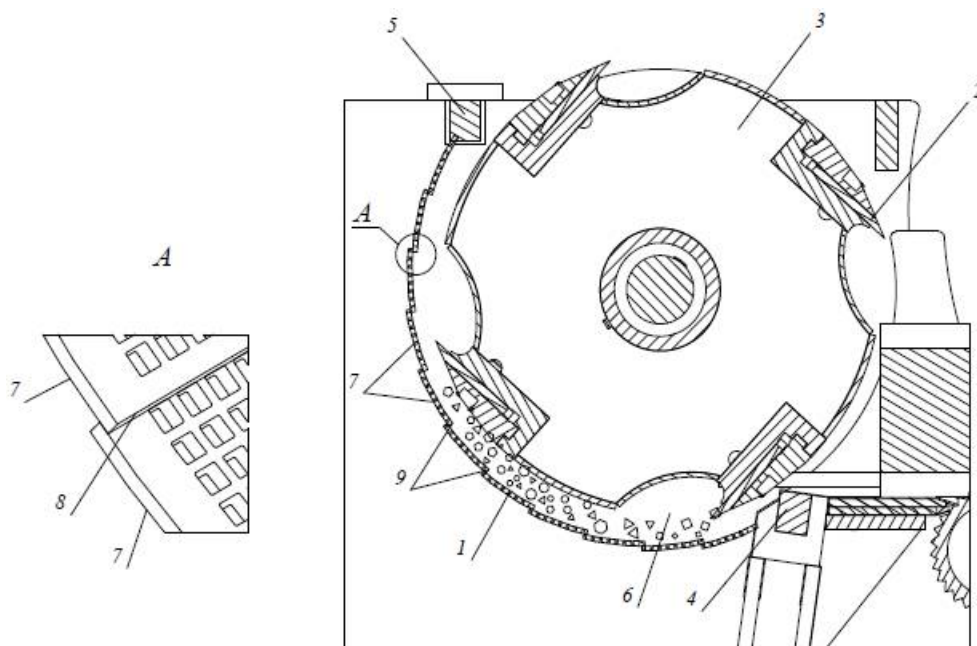
After the initial cutting of wood with a cutting knife 2, the resulting chips enter the chipping chamber 6, from where most of the chips pass through the holes of the plate sections 6 of the sieve 1. The steps 9 formed on the inner surface of the sieve 1, working as additional mini-bedknives, rechip the resulting chips of large sizes to fractions of less than 6 mm, necessary for the production of fuel pellets.

The proposed design of the sieve makes it possible to obtain better results of wood chipping compared to known methods due to the stepping design of the sieve, the steps of which work as mini-bedknives that rechip the resulting chips to the above dimensions. To investigate how the use of a stepped plate sieve and wood cutting modes will affect the performance of chipping wood into technological chips of the desired fractions, it is necessary to develop special experimental equipment.

The purpose of the work is to develop a working model of a drum chipper of wood on the basis of the analysis of the process of cutting wood on drum chippers of wood, the study of their design, the principle of operation and the main parameters affecting the size and quality of the resulting chips, on which it will be possible to study with a high degree of accuracy, while rejecting all side factors as much as possible, the components of improving the equipment.

Solving the Task.

Experimental equipment is a working model of a drum chipper of wood, which has all the features of a commercial drum machine, and in structural terms, in order to thoroughly investigate the process of chipping wood into technological chips, it has a number of features (Fig. 1.5).



1—sieve; 2—cutting knife; 3—knife drum; 4—lower bedknife; 5—upper bedknife; 6—chipping chamber; 7—plate section; 8—longitudinal edge of the plate section; 9—steps.

Fig. 1.4. The structure of a drum wood chipper with a stepped plate sieve [4]

The box-shaped *frame 1* is welded from steel plates 12 mm thick with jumpers inside and a welded base flange with junction plates compatible with the third side rack, which form a rigid frame that can withstand not only heavy mechanical loads, but also significantly absorb vibration and noise during operation. To observe the movement of chips in and around the chipping chamber 2, the side of the frame is made of transparent plexiglass. A hinged cover 3 is installed above the knife drum.

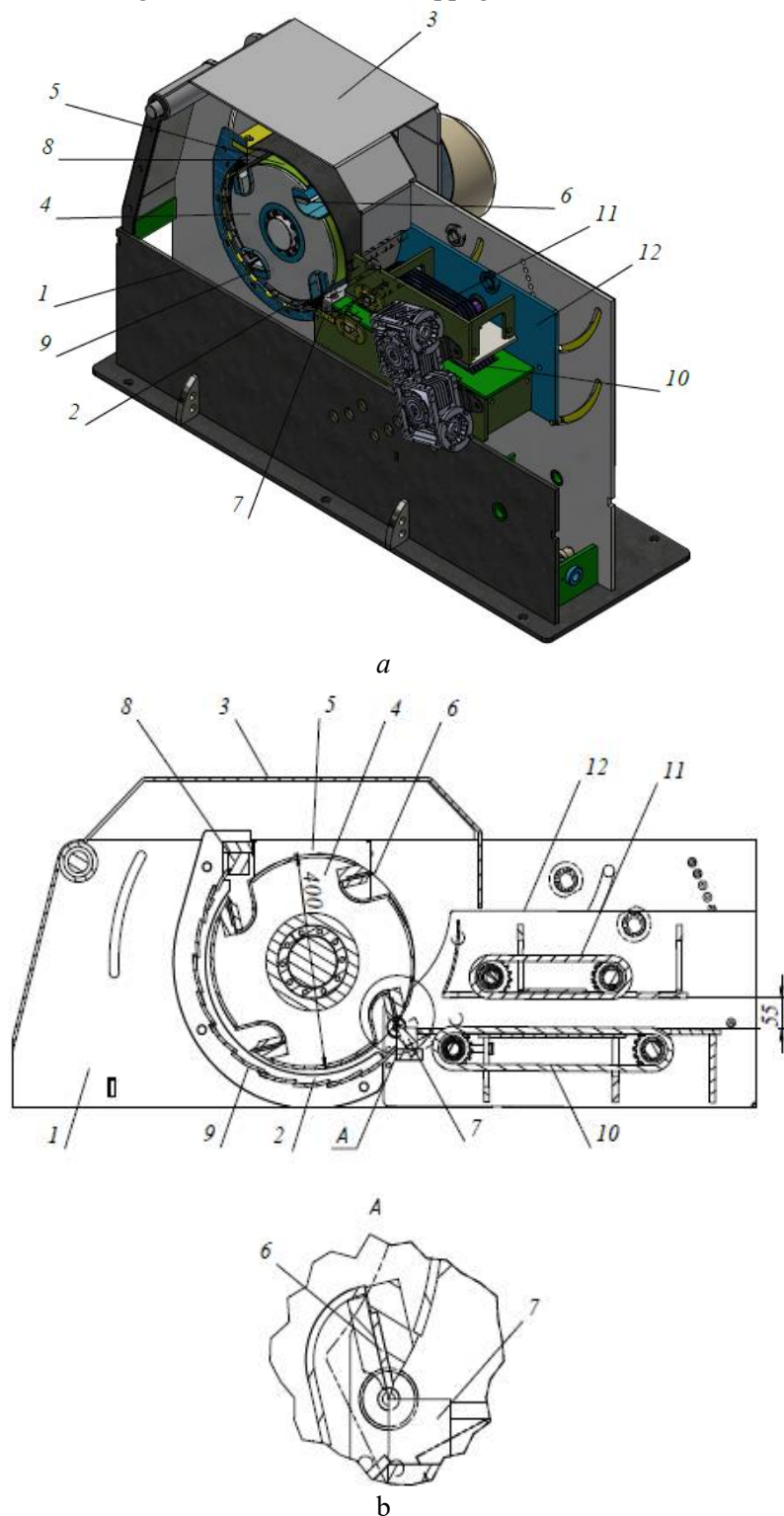
The *cutting mechanism* is a four-knife welded drum 4 with a diameter of $\varnothing = 400$ mm, which is cantilever mounted on the working shaft. The rear surfaces 5 of the cutting knives 6 of the drum 4 are made according to the Archimedes spiral.

The shaft on radial ball bearings rotates in a flanged H-shaped housing fixed to two cheeks of the frame, which is driven by an electric motor $N = 15$ kW, $n = 1,460$ rpm through a V-belt transmitter. The main cutting process takes place at the 'wood-knife-bedknife' interaction site.

Thanks to the frequency converter, all processes can be investigated at different cutting speeds within 50 m/s.

The *chipping chamber* is a limited space where technological chips get into after being cut from wood. In the design of the experimental chipper produced (see Fig. 1.5), the chipping chamber of technological chips is formed by: the rear surface of the knife of the drum 5; the lower bedknife 7; the upper bedknife 8; the stepped plate sieve 9, which has an arc shape made of plate steel sections, envelops the working surface of the knife drum 5 and is installed at the same distances from the cylindrical surface of rotation of the cutting edges of the knives throughout the length of enveloping the surface of the drum. The fundamental difference of the new scheme of the cutting process is that the sieve, located between the lower and upper bedknives, not only acts as the sifter of chipped raw materials, but also actively participates in the chipping process due to the cutting edges of each section. It turns out that the stepped sectional sieve simultaneously performs the function of a number of mini-bedknives. To experimentally investigate the effect of the number of plate sections on the performance of wood chipping, a plate sieve and three plate sieves with the same cell of $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ and with different number of sections were developed and produced: 3, 7 (Fig. 1.6), 11. The sieves are designed so that they can be installed at different distances from the cylindrical surface of rotation of the cutting edges of the knives along the entire length of enveloping the drum surface.

The feed mechanism has structural differences from the mechanisms of typical drum chippers. In developing such a mechanism, the main attention was paid to preventing the impact of all negative side factors on the cutting process, such as: uneven filling of the feeder neck; intermittent nature of the feed due to large dynamic loads in the cutting area, and, as a result, slippage of the feed rollers and conveyor belt.



1—frame; 2—chipping chamber; 3—hinged cover; 4—knife drum; 5—rear surface of the drum knife; 6—cutting knife; 7—lower bedknife; 8—upper bedknife; 9—sieve; 10—lower feed chain; 11—upper feed chain; 12—feed table.

Fig. 1.5. Experimental drum chipper: a—general view; b—schematic diagram

Based on this, in the feeding mechanism (see Fig. 1.5), the lower *10* and upper *11* special six-row chains with a pitch of 12.7 mm with sharp hooks on the outer side, directed at a certain angle to the direction of movement, are used. These chains are mounted in the work table *12*, the location of which can be changed from ground (horizontal) to inclined at an angle of 30° , that is, the feed angle of wood can be changed.

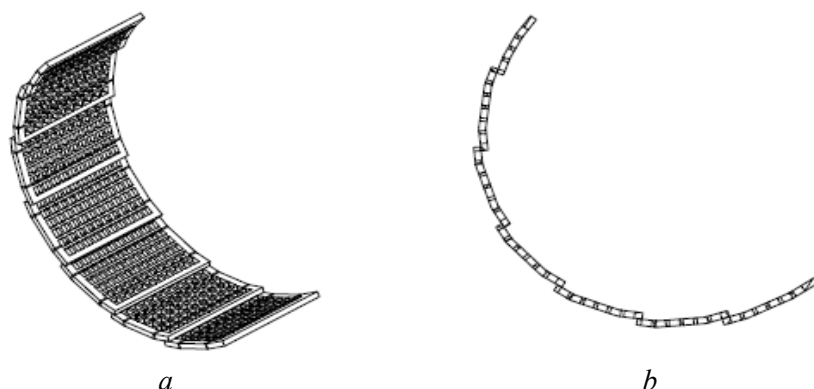


Fig. 1.6. Stepped plate sieve: *a*—general view; *b*—side view

The thickness of the blank is regulated: 50 ± 1 mm. The distance between the lower *10* and the upper *11* feed chains is unchanged. Therefore, by feeding the calibrated raw material, the upper and lower feed chains drive their hooks into the wood in mutually opposite directions, securely fixing it, thereby preventing any axial displacement. This design of the mechanism makes it possible to objectively investigate cutting processes in a wide range of feed speeds (up to 4 m/min). The lower and upper feed chains are moved by two worm motor reducers $i=100$ and electric motors $N=250$ W; $n=885$ rpm.

Automatic machines are installed on the *control panel*, including the input machine, frequency converters, relays of cutting and feeding mechanisms. On the panel, there is a control button, frequency regulators of cutting and feeding motors, a digital data display. To control the operating mode of the drum, a frequency converter is used, which operates in the vector mode of controlling the motor rotation speed and makes it possible to accurately adjust the drum rotation speed in the range from 0 to 2,500 rpm.

Conclusions

The experimental drum chipper produced makes it possible to study the following with a high degree of accuracy:

- 1 To compare the efficiency of the sieves of the plate form and the stepped structure, namely:
 - a) To analyse fraction by fraction in mass equivalent wood chips with the largest size of 6.0 mm.
 - b) To determine the energy consumption per unit mass of products (per-unit cutting work).
- 2 To determine the effect of cutting speed on per-unit cutting work and quality of products of the desired fraction.
- 3 To investigate the influence of the number of sections of the stepped sieve on the technological parameters.
- 4 To investigate the effect of the distance between the knife drum and the sieve on the productivity of the technological process.
- 5 To set the rational feed angle of wood in the drum chipper.

References:

- 1 Rebezniuk, I. T., Barabash, B. Z. Development of the design of drum wood-cutting machines. *Bulletin of KhNADU*, issue 101, vol. 2, 2023. P. 99–103 [in Ukrainian].
- 2 Vecoplan chipping machines (Germany). Wood chipping. Principle of operation. Accessed at: <https://www.youtube.com/watch?v=tYiHvrZCJUE&list=PLdF2be0FyTNKnyBDcWj4zEvMuNBDzY-rs&index=1> (last accessed 25.03.2025).
- 3 Rudnick&Enners. Maschinen- und Anlagenbau GmbH. Chipping equipment. Accessed at: <https://www.rudnick-enners.com/ru/produkte/zerkleinerung/index.html> (last accessed 25.03.2025).
- 4 HAAS DRUM CHIPPER HTH. Type HTH. Systems and concepts for all applications: HHAS Recycling-systems. Accessed at: https://haas-recycling.de/wp-content/uploads/2018/01/HAAS-Recycling_leaflet-HTH-Drum-Chipper_UK_20190802.pdf (last accessed 25.03.2025).

5 Barabash, B. Z. Improving the design of a sieve of a drum wood chipper. *Innovative solutions to improve the efficiency of construction, road-building, lifting-and-shifting machines*. All-Ukrainian Scientific and Practical Conference For Young Scientists and Students. 16 October 2024: collection of articles and abstracts. Kharkiv: KhNADU, 2024. P. 204–207 [in Ukrainian].

6 The sieve of a drum wood chipper: patent for utility model No. 158361, Ukraine, International Patent Classification (2025.01) B27L 11/00 B02C 18/00. No. u2024 04112; application 16.08.24; published on 22.01.25. Bull. No. 4. p. 4 [in Ukrainian].

7 Rebezniuk, Ihor. Ukrainian scientific word usage: textbook. Lviv: Spolom, 2022, p. 400 [in Ukrainian].

8 DSTU 3966-2009. Terminology. Principles and rules for the development of standards for terms and definitions of concepts. [Valid from 01.07.2010]. Official edition. Kyiv: State Standard of Ukraine, 2010, p. 31 [in Ukrainian].

9 DSTU 2233:2021. Cutting tools. Terms and definitions. [Valid from 01.09.2022]. Official edition. Kyiv: SE 'UkrNDNC', 2022, p. 38 [in Ukrainian].

10 DSTU 2249:2021. Machining by cutting. Terms, definitions, and designations. [Valid from 01.09.2022]. Official edition. Kyiv: SE 'UkrNDNC', 2022, p. 54 [in Ukrainian].

11 DSTU 2654:2021. Wood processing equipment. Terms and definitions. [Valid from 01.07.2022]. Official edition. Kyiv: SE 'UkrNDNC', 2022, p. 19 [in Ukrainian].

Рецензент: Гасій О., доктор технічних наук, професор кафедри прикладної механіки і технології машинобудування.

Л. Ю. Федік, Ю. В. Федорусь
Луцький національний технічний університет

ВПЛИВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ НА ОПТИМІЗАЦІЮ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

Стаття досліджує роль штучного інтелекту в оптимізації логістичних процесів у харчовій промисловості України. Розглядаються автоматизація складів, прогнозування попиту, моніторинг транспортування та інтеграція IoT у логістичні системи. Описані технологічні рішення сприяють зменшенню харчових відходів, підвищенню ефективності управління запасами та зниженню витрат. Використання інтелектуальних платформ забезпечує гнучкість і стабільність постачань у сучасних ринкових умовах.

Ключові слова: штучний інтелект, логістика, харчова промисловість, автоматизація складів, прогнозування попиту, моніторинг транспортування, інтеграція IoT, управління запасами, мінімізація харчових відходів, ефективність логістики, зниження витрат, конкурентоспроможність, сталий розвиток.

L. Y. Fedik, Y. V. Fedorus

THE IMPACT OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE ON THE OPTIMIZATION OF LOGISTICS PROCESSES IN THE FOOD INDUSTRY OF UKRAINE

The article analyzes the application of artificial intelligence in logistics processes within Ukraine's food industry, specifically warehouse automation, demand forecasting, and transportation condition monitoring. The integration of AI with IoT and robotic platforms facilitates the creation of intelligent logistics ecosystems that optimize inventory management and minimize food waste. The use of analytical tools, such as Power BI and Tableau, enables companies to efficiently process large data sets and improve forecasting accuracy. The described technological solutions help reduce costs, enhance logistics efficiency, and contribute to the sustainable development of the industry. AI plays a key role in shaping competitive logistics strategies, allowing enterprises to adapt to modern global standards and market challenges.

Keywords: artificial intelligence, logistics, food industry, warehouse automation, demand forecasting, transportation monitoring, IoT integration, inventory management, food waste minimization, logistics efficiency, cost reduction, competitiveness, sustainable development.

Постановка проблеми. Харчова промисловість є стратегічно важливою галуззю економіки, що відіграє ключову роль у забезпеченні населення продуктами харчування. Постійне збільшення попиту на високоякісну та безпечну продукцію, а також необхідність удосконалення логістичних процесів, сприяють актуалізації впровадження сучасних технологій, зокрема штучного інтелекту. В умовах постійного зростання споживчих очікувань та загострення конкуренції, ефективність і інноваційність стають визначальними факторами успіху. Штучний інтелект виступає одним із найперспективніших інструментів для вирішення цих завдань. На сучасному етапі розвитку харчова промисловість активно впроваджує штучний інтелект для трансформації логістичних процесів. Це дозволяє знизити витрати на транспортування та складування до 30%, підвищити точність прогнозування попиту до 85% та скоротити харчові відходи на 20–25%. Інтеграція роботизованих систем із штучним інтелектом сприяє збільшенню продуктивності складів на 40%, забезпечуючи високий рівень точності, швидкості та безперебійності роботи. У статті розглядаються ключові аспекти впливу штучного інтелекту на логістичні процеси в харчовій промисловості, що сприяють підвищенню її ефективності, економічної вигоди та екологічної сталості [1-3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження підтверджують важливу роль штучного інтелекту у вдосконаленні логістичних процесів. Автоматизація складів та прогнозування попиту дозволяють компаніям оптимізувати управління запасами та скоротити витрати. У дослідженні Кирлик Н. Ю. (2021) розглядаються методи аналізу даних, що підвищують точність прогнозів, а також алгоритми машинного навчання для контролю інформаційних потоків.

Дослідження Якимишина Л. Я. (2024) акцентує увагу на впливі IoT, автономного транспорту та роботизації на ефективність логістичних процесів. Використання інтелектуальних сенсорних систем та автономних перевізників дозволяє підприємствам оперативно адаптувати маршрути й підвищувати продуктивність доставки. Визначено, що технології AI суттєво зменшують операційні ризики та покращують управління транспортними ресурсами [4; 5].

У роботі Фаловича Н. та Дубчака О. (2023) детально аналізуються ключові аспекти застосування AI у логістиці, зокрема оптимізація запасів, прогнозування попиту та планування маршрутів. Дослідження показують, що AI дозволяє скорочувати витрати на зберігання та транспортування шляхом використання адаптивних моделей прогнозування.

Публікація Скіцька В.І. (2023) розглядає перспективи логістики 5.0, де AI інтегрується з людським управлінням для досягнення сталого розвитку. Аналізуються соціальні та етичні аспекти впровадження інтелектуальних систем, а також виклики у забезпеченні екологічної відповідальності та ефективного використання ресурсів [6; 7].

Ці дослідження демонструють, що розвиток штучного інтелекту в логістиці сприяє автоматизації, підвищенню точності прогнозування та ефективності управління ресурсами.

Формулювання цілей статті. Дослідження спрямоване на аналіз впливу технологій штучного інтелекту на оптимізацію логістичних процесів у харчовій промисловості України. Зокрема, оцінюється ефективність автоматизованих систем управління запасами, прогнозування попиту та моніторингу транспортування. Особливу увагу приділено інтеграції розумних екосистем на основі IoT та роботизованих систем, що сприяють підвищенню ефективності логістичних операцій. Досліджуються екологічні перспективи штучного інтелекту, зокрема його можливості у мінімізації харчових відходів та скороченні викидів CO₂, що сприяє сталому розвитку галузі.

Викладення основного матеріалу. Штучний інтелект вже активно впроваджується в харчову промисловість, створюючи умови для значного підвищення ефективності процесів та зменшення втрат. Яскравий приклад такого застосування:

1. Автоматизовані склади: роботизовані системи, керовані штучним інтелектом, оптимізують управління запасами та виконання замовлень у максимально короткі терміни. Це забезпечує суттєве зростання продуктивності та зменшення витрат;

2. Динамічне ціноутворення: штучний інтелект забезпечує можливість коригування цін на продукти в режимі реального часу, враховуючи фактори строку придатності та сезонності. Завдяки цьому продукти з близьким терміном придатності можуть реалізовуватися зі знижками, що дозволяє значно скоротити втрати та оптимізувати прибутковість;

3. Контроль строків придатності: великі супермаркети впроваджують системи штучного інтелекту для автоматизованого моніторингу строків придатності продукції. Це сприяє мінімізації втрат і оптимізації управління запасами, підвищуючи ефективність логістичних процесів;

4. Контроль умов транспортування: сучасні системи штучного інтелекту обробляють дані із сенсорів, встановлених у вантажівках, щоб гарантувати підтримання оптимальних умов, таких як температура та вологість. Це особливо важливо для продуктів із коротким терміном придатності, наприклад, морепродуктів чи свіжих овочів, забезпечуючи їх якість під час транспортування;

5. Сортивання та пакування продуктів: організації, що займаються виробництвом замороженої продукції, впроваджують роботизовані системи та AI-камери для високоточного сортування продуктів відповідно до їх форми, розмірів і якості. Це дозволяє мінімізувати вплив людського фактора і підвищити ефективність виробничих процесів [8].

Штучний інтелект значно полегшує процес прогнозування попиту, аналізуючи дані про продажі, сезонні тенденції та споживчі вподобання. Завдяки цьому можна точно визначати оптимальну кількість продукції, запобігаючи надлишкам чи дефіциту. Наприклад, AI-алгоритми здатні передбачити зростання попиту на морозиво в спекотний період, що дозволяє ефективніше планувати виробництво та організовувати логістичні операції.

Системи прогнозування попиту є ключовим елементом сучасного управління ланцюгами постачання, оскільки вони допомагають мінімізувати ризики, пов'язані з дефіцитом або надлишком продукції. Одним із найефективніших інструментів у цій галузі є платформа SAP Integrated Business Planning, яка забезпечує точне прогнозування та оптимізацію процесів у ланцюзі постачання. Ця платформа забезпечує високоефективне прогнозування попиту та оптимізацію управління запасами, що дозволяє бізнесу швидко реагувати на зміну ринкових умов. Її інтеграція з ERP-системами значно підвищує точність прогнозів і сприяє ефективному розподілу ресурсів, оптимізуючи всі етапи управління ланцюгами постачання. Завдяки аналізу історичних даних, сезонних змін та ринкових тенденцій, компанії отримують можливість значно скоротити втрати продукції. Використання алгоритмів машинного навчання забезпечує високий рівень точності прогнозування, який досягає 85%, що сприяє ефективному управлінню ланцюгами постачання та оптимізації ресурсів.

Серед відомих програм у сфері прогнозування попиту варто виділити платформу Blue Yonder. Вона вирізняється своєю здатністю створювати точні прогнози завдяки аналізу продажів, динаміки ринку та кліматичних змін. Платформа враховує сезонні фактори та поведінку споживачів у режимі

реального часу, що забезпечує високий рівень точності та оперативності прогнозування. Blue Yonder надає потужні інструменти для автоматизації планування поставок і розробки сценаріїв, що сприяють уникненню ризиків у ланцюгах постачання. Її впровадження дозволяє компаніям швидко адаптуватися до змін попиту, забезпечувати ефективне управління запасами та знижувати фінансові втрати до мінімуму [9; 10].

Отже, як SAP Integrated Business Planning, так і Blue Yonder виступають стратегічними рішеннями для прогнозування попиту, що дозволяють бізнесу ефективно реагувати на сучасні виклики. Ці платформи сприяють адаптації до динамічних змін ринку та значно підвищують ефективність управління логістичними процесами.

Аналіз історичних даних, сезонних змін і ринкових трендів сприяє ефективнішому управлінню запасами та зменшенню втрат продукції. Завдяки впровадженню алгоритмів машинного навчання досягається точність прогнозування на рівні 85%, що дозволяє знизити втрати на 15–25% і покращити загальну ефективність ланцюгів постачання.

SAP Integrated Business Planning є оптимальним вибором для великих корпорацій, які оперують глобальними ланцюгами постачання. Платформа надає необхідну гнучкість та можливість масштабування, що відповідає потребам складних операцій. Однак для малого бізнесу її впровадження може бути обтяжливим через значні фінансові витрати та складність адаптації до специфічних вимог. Незважаючи на ці виклики, SAP Integrated Business Planning залишається ключовим інструментом для оптимізації постачання та підвищення ефективності роботи великих компаній [11].

Штучний інтелект (ШІ) відкриває нові горизонти в оптимізації логістичних процесів, пропонуючи різноманітні програмні рішення. До найбільш популярних платформ, активно застосовуваних у сфері харчової логістики, належать SAP Integrated Business Planning, Blue Yonder та інші. Ці інструменти допомагають ефективно управляти запасами, прогнозувати попит та зменшувати втрати, забезпечуючи конкурентоспроможність бізнесу.

Автоматизація складів є невід’ємною частиною інтеграції штучного інтелекту в сучасний бізнес. Системи управління складом (Warehouse Management Systems, WMS) відіграють центральну роль у підвищенні ефективності роботи складів. Завдяки використанню алгоритмів AI, ці системи оптимізують управління запасами, автоматизують процес сортування продукції та забезпечують ефективне планування операцій на складі. Роботизовані системи, інтегровані зі штучним інтелектом, виконують такі завдання, як сортування, пакування та розміщення продукції, забезпечуючи її ефективне зберігання. Це сприяє суттєвому підвищенню продуктивності складу, скороченню витрат на ручну працю та точному контролю строків придатності товарів. Завдяки цим технологіям можна оперативно вилучати з обігу непридатні товари або проводити акційні пропозиції для їх швидшого продажу, що мінімізує втрати.

Інтеграція WMS із ERP-системами забезпечує синхронізацію даних та підвищує ефективність управління складськими операціями. Використання RFID-технологій дозволяє відстежувати продукцію в режимі реального часу з високою точністю, оптимізуючи управління запасами. Крім того, ці рішення враховують специфічні температурні режими складських приміщень, що сприяє збереженню якості продукції. Oracle WMS Cloud є одним із провідних інструментів для автоматизації складування, який активно використовується у великих логістичних центрах. Завдяки своїй функціональності та адаптивності ця платформа забезпечує високий рівень ефективності в управлінні складськими операціями, оптимізуючи роботу складу й підвищуючи продуктивність [12; 13].

Впровадження WMS у бізнес-процеси сприяє значному підвищенню ефективності складу, забезпечуючи зростання продуктивності на 25–50%. Використання RFID-технологій дозволяє досягти до 99% точності відстеження товарів, що є критично важливим для якісного управління запасами. Автоматизація процесів також скорочує час обробки замовлень на 30%, що сприяє оптимізації операційної діяльності та зниженню витрат. У мережі супермаркетів Carrefour впровадження WMS продемонструвало вражаючі результати: час обробки замовлень зменшився на 25%, а рівень помилок під час інвентаризації значно скоротився. Oracle WMS Cloud також відіграє важливу роль у вдосконаленні логістичних процесів, сприяючи зниженню втрат продукції та прискоренню виконання замовлень, що підвищує ефективність і рентабельність бізнесу [14].

Робототехнічне програмне забезпечення (RPA), наприклад, ABB RobotStudio, відіграє ключову роль в автоматизації процесів сортування та пакування на виробничих лініях. Впровадження RPA дозволило виробничим центрам Coca-Cola скоротити час, необхідний на

пакування, на 30%, а також значно покращити якість виконання рутинних завдань, що сприяє підвищенню загальної ефективності виробничих процесів [15].

Оптимізація транспортної логістики за допомогою штучного інтелекту є важливим кроком до підвищення ефективності процесів доставки. AI аналізує дорожні умови, термін придатності продукції та витрати на паливо, щоб визначити найшвидші та економічно вигідні маршрути. Це дозволяє значно прискорити доставку, зберігаючи якість товарів і скорочуючи витрати. Моніторинг умов транспортування, таких як температура та вологість, є критично важливим для забезпечення якості свіжих продуктів, зокрема фруктів і морепродуктів. Ці товари потребують особливого підходу до зберігання під час перевезення, адже навіть незначні відхилення від оптимальних параметрів можуть вплинути на їх свіжість. Завдяки використанню технологій штучного інтелекту та сенсорних систем забезпечується контроль та корегування умов транспортування в режимі реального часу.

Впровадження сучасних платформ на основі штучного інтелекту здійснює революційний вплив на логістичні процеси. Завдяки цим рішенням здійснюється моніторинг ключових параметрів транспортування в реальному часі, таких як температура, вологість і місцезнаходження вантажу. Це забезпечує не тільки збереження якості продукції, але й істотно вдосконалює управління ланцюгами постачання, роблячи їх більш гнучкими та ефективними [16; 17].

Fresh Food Planner – інноваційна програма, розроблена спеціально для супермаркетів, яка автоматизує контроль строків придатності продукції. Система використовує інтегровані дані для прийняття рішень щодо проведення акцій зі знижками або утилізації товарів, що сприяє мінімізації харчових відходів і забезпечує ефективне управління запасами.

Robotics Process Automation (RPA) – робототехнічне програмне забезпечення, наприклад ABB RobotStudio, яке активно застосовується для вдосконалення автоматизованих ліній сортування та пакування продукції. Завдяки цим системам досягається висока швидкість та точність операцій, що істотно знижує ризик виникнення помилок і покращує загальну ефективність виробничих процесів.

Zeo Route Planner – це потужний сучасний інструмент для оптимізації маршрутів доставки, що базується на алгоритмах штучного інтелекту. Платформа враховує кількість зупинок, пріоритетність доставки та доступність водіїв, що дозволяє формувати найбільш ефективні маршрути. Крім цього, Zeo Route Planner надає функції автоматизації управління водіями та забезпечує можливість відстеження виконання маршрутів у реальному часі, сприяючи підвищенню продуктивності логістичних процесів [18-20].

Використання цієї платформи дозволяє значно скоротити витрати на паливо та покращити ефективність логістичних процесів, що робить його особливо цінним інструментом для стартапів та малих і середніх підприємств. Попри обмежену функціональність для великих корпорацій, ця платформа виступає ідеальним рішенням для бізнесу, орієнтованого на інновації, забезпечуючи оптимізацію доставки та підвищення конкурентоспроможності.

Системи управління транспортом (Transportation Management Systems, TMS) відіграють ключову роль у вдосконаленні логістичних операцій. Вони дозволяють автоматизувати планування маршрутів, здійснювати моніторинг умов транспортування та проводити детальний аналіз витрат на логістику. Завдяки цьому, TMS сприяють оптимізації процесів доставки, скорочуючи час транспортування і зменшуючи витрати, що підвищує загальну ефективність ланцюгів постачання. Інтеграція TMS з GPS-трекерами та IoT-сенсорами відкриває нові можливості для управління логістикою, особливо у сфері транспортування швидкопсувних продуктів. Завдяки цим технологіям забезпечується контроль температури та вологості під час перевезення, що гарантує збереження якості товарів. До того ж, TMS аналізують екологічний вплив транспортувань, оптимізуючи маршрути для зменшення викидів CO₂, що робить їх особливо актуальними в умовах зростання попиту на екологічно відповідальні рішення [21].

Зокрема, компанія FedEx активно використовує системи управління транспортом (TMS) для моніторингу глобальних логістичних операцій, що дає змогу обробляти до 12 мільйонів відправлень щоденно з високою точністю доставки. Інтеграція TMS допомагає зменшити витрати на транспорт на 10–20%, а завдяки вдосконаленому плануванню маршрутів із урахуванням дорожніх умов вдається скоротити витрати на паливо на 15%. Таке використання технологій забезпечує оптимізацію процесів і зміцнює позиції компанії на ринку. Компанія DHL також активно застосовує системи управління транспортом (TMS) для автоматизації процесів маршрутизації міжнародних поставок. Це дозволяє ефективно оптимізувати шляхи доставки, що сприяє значному скороченню витрат на паливо. Завдяки впровадженню таких технологій, DHL забезпечує високий рівень

продуктивності логістичних операцій та підвищує конкурентоспроможність на глобальному ринку [22; 23].

Системи управління транспортом (TMS) представляють собою універсальне та багатофункціональне рішення для покращення логістичних операцій. Ці системи дозволяють не тільки ефективно мінімізувати витрати, але й забезпечують високий рівень контролю за умовами перевезення, такими як температура, вологість і строки доставки. Вони є незамінними для транспортування швидкопсувних продуктів, гнучко адаптуючись до глобальних викликів та потреб сучасних логістичних ланцюгів, підтримуючи ефективність та якість обслуговування.

Системи управління транспортом (TMS) відкривають можливості для максимальної оптимізації маршрутів доставки завдяки врахуванню таких ключових факторів, як витрати, погодні умови та строки доставки. Це дозволяє компаніям досягати більш ефективного транспортування, значно скорочуючи час і витрати на логістичні процеси. Крім того, інтеграція TMS сприяє підвищенню прозорості перевезень і стабільності операцій, що є критично важливим для сучасного бізнесу, орієнтованого на високу якість і ефективність.

Oracle Transportation Management є провідною платформою для оптимізації логістичних процесів, зокрема планування маршрутів доставки та управління транспортними засобами. Система аналізує реальні дорожні умови, витрати на паливо та терміновість поставок, забезпечуючи точне планування маршрутів. Це допомагає мінімізувати витрати та підвищити ефективність доставки, що є вирішальним фактором для сучасного бізнесу. Oracle Transportation Management дозволяє скоротити витрати на паливо до 15%, сприяючи вдосконаленню продуктивності логістичних процесів. Проте варто зазначити, що інтеграція цієї платформи потребує значних фінансових і технічних ресурсів, що може створити складнощі для компаній із обмеженим бюджетом. Незважаючи на це, система є ідеальним вибором для транспортних компаній та логістичних операторів, які прагнуть оптимізувати свої глобальні ланцюги постачання та забезпечити високий рівень ефективності [24; 25].

Високоєфективною платформою, яка надає можливість моніторингу умов транспортування продукції в реальному часі є AWS IoT. Вона дозволяє відстежувати критично важливі параметри, включаючи температуру, вологість та місцезнаходження вантажів. Завдяки цій технології забезпечується контроль якості продукції на кожному етапі логістичного ланцюга, мінімізуючи ризики та підвищуючи ефективність транспортування. Інтеграція IoT-технологій дозволяє компаніям суттєво зменшити втрати продукції, скорочуючи їх на 20–25%. Ці рішення підтримують оптимальні умови для транспортування, особливо для швидкопсувних товарів, таких як фрукти, овочі та морепродукти. Завдяки постійному моніторингу та контролю ключових параметрів, таких як температура і вологість, забезпечується збереження свіжості продукції на всіх етапах логістичного процесу [26].

AWS IoT не лише здійснює моніторинг, але й активно збирає та аналізує дані про умови зберігання і місцезнаходження вантажів. Це гарантує стабільність якості продукції навіть під час тривалих транспортувань, що є критично важливим для швидкопсувних товарів. Однак слід враховувати, що ефективність платформи залежить від стабільного інтернет-з'єднання, а це може стати обмеженням у регіонах із поганим покриттям, створюючи виклики для повноцінної інтеграції. Незважаючи на можливі обмеження, AWS IoT залишається оптимальним рішенням для транспортування продукції, яка потребує строгого контролю умов зберігання. Інтеграція цієї платформи в логістичні процеси не тільки покращує якість доставки, але й сприяє суттєвій оптимізації всього ланцюга постачання, підвищуючи його ефективність та надійність.

Інтелектуальні системи управління логістикою дійсно є інноваційними рішеннями, які інтегрують функціонал WMS, TMS та інструментів прогнозування попиту в єдину платформу. Вони забезпечують централізований контроль за всіма логістичними процесами, включаючи оптимізацію витрат, аналіз продуктивності, автоматизацію вибору постачальників і оцінку ризиків у ланцюгу постачання. Завдяки їх використанню компанії отримують можливість ефективно реагувати на зміну ринкових умов і забезпечувати стабільність та конкурентоспроможність своїх операцій. Впровадження інтелектуальних логістичних систем дозволяє компаніям значно зменшити час простой, скоротивши його на 15–30%, а також підвищити прозорість ланцюга постачання до 80%. Вражаючий приклад – компанія Nestlé, яка активно використовує ці технології для оптимізації міжнародних поставок. Завдяки їх інтеграції Nestlé вдалося скоротити логістичні витрати на 10%, одночасно забезпечуючи ефективність і стабільність своїх операцій [27].

У компанії Danone впровадження інтелектуальних систем управління логістикою стало важливим кроком до вдосконалення транспортування молочних продуктів. Завдяки оптимізації маршрутів вдалося скоротити витрати на транспортування на 10%, що забезпечує підвищення ефективності та економічності логістичних процесів. Такі інновації допомагають компанії підтримувати високу якість своєї продукції та досягати більш стійких результатів у глобальному масштабі. Інтелектуальні платформи, які інтегрують складське управління, прогнозування попиту та транспортні процеси, виступають потужним інструментом для оптимізації логістичних операцій. Завдяки їх поєднанню компанії досягають максимальної ефективності, що дозволяє скоротити витрати, підвищити прозорість процесів та мінімізувати ризики у складних міжнародних ланцюгах постачання. Ці технології забезпечують гнучкість і стабільність, які є вирішальними в умовах глобальної конкуренції [28].

Системи управління ланцюгом постачання (SCM) відіграють вирішальну роль у забезпеченні ефективної координації між постачальниками та споживачами. Вони дозволяють компаніям оперативно адаптуватися до змін ринкових умов, оптимізувати взаємодію в рамках логістичного процесу і створювати резервні плани для зменшення ризиків у разі непередбачених збоїв. Завдяки використанню SCM значно підвищується стійкість і гнучкість ланцюгів постачання, що є критично важливим для сучасного бізнесу. Інтеграція штучного інтелекту у системи управління ланцюгом постачання (SCM) відкриває широкі можливості для оптимізації. Завдяки автоматизованому аналізу даних AI здатний оцінювати альтернативні маршрути поставок, допомагаючи мінімізувати логістичні витрати та підвищити швидкість реакції на зміни. Комплексне управління закупівлями стає значно ефективнішим, а час прийняття рішень скорочується на 30–50%, що сприяє більшій гнучкості та стійкості ланцюгів постачання.

Unilever активно використовує системи управління ланцюгом постачання (SCM) для координації своєї масштабної логістичної мережі, яка охоплює понад 190 країн. Завдяки інтеграції цих технологій компанії вдалося скоротити час простоїв на 30%, покращити ефективність взаємодії між постачальниками та споживачами, а також зменшити втрати у постачанні на 20%. Це демонструє, як впровадження SCM сприяє досягненню оптимальної продуктивності та забезпечує стабільність операцій на глобальному рівні. Системи управління ланцюгом постачання (SCM) надають можливість більш точної оптимізації маршрутів поставок, беручи до уваги дорожні умови та терміновість замовлень. Це сприяє прозорості процесів і стабільності на кожному етапі постачання, допомагаючи уникнути затримок і мінімізувати ризики. Завдяки таким функціям SCM стають незамінними для побудови ефективних і надійних логістичних операцій [29; 30].

Системи управління ланцюгом постачання (SCM) надають можливість більш точної оптимізації маршрутів поставок, беручи до уваги дорожні умови та терміновість замовлень. Це сприяє прозорості процесів і стабільності на кожному етапі постачання, допомагаючи уникнути затримок і мінімізувати ризики. Завдяки таким функціям SCM стають незамінними для побудови ефективних і надійних логістичних операцій.

Fresh Food Planner – це високотехнологічний інструмент, який підтримує принципи сталого управління ресурсами в роздрібній торгівлі, зокрема в супермаркетах. Завдяки функціоналу платформи стає можливим оперативний контроль термінів придатності товарів, аналіз їх поточного стану та прийняття обґрунтованих рішень щодо застосування знижок або утилізації продукції з невеликим залишковим терміном зберігання. Це допомагає зменшити харчові відходи і оптимізувати управління запасами [31].

Програми аналітики та звітності, такі як Tableau і Power BI, є незамінними інструментами для управління даними в сучасному бізнесі. Вони забезпечують ефективну візуалізацію інформації, деталізований аналіз операцій та підтримують процес прийняття стратегічних рішень. Завдяки інтеграції алгоритмів штучного інтелекту ці платформи дозволяють автоматизувати створення інтерактивних звітів, виявляти проблемні зони та прогнозувати довгострокові тренди, що допомагає компаніям залишатися конкурентоспроможними в умовах динамічного ринку. Coca-Cola демонструє успішне використання Power BI для вдосконалення моніторингу та аналітики ланцюга постачання. Завдяки цьому інструменту компанія змогла скоротити час, необхідний на аналітичну роботу, на 20%, а також значно покращити точність стратегічного планування, досягнувши показника в 90%. Таке ефективне впровадження технологій сприяє підвищенню продуктивності та оптимізації логістичних процесів, що забезпечує стабільність і конкурентну перевагу на глобальному рівні [32; 33].

Інтеграція сучасних аналітичних систем, таких як Tableau і Power BI, дозволяє суттєво зменшити час, необхідний для створення звітів, на 40% завдяки автоматизації аналізу даних. Ці платформи не лише оптимізують операційну ефективність, але й забезпечують глибокий та всебічний аналіз великих масивів інформації. Це особливо важливо для прийняття обґрунтованих стратегічних рішень, що допомагають компаніям залишатися конкурентоспроможними та адаптуватися до швидких змін ринкових умов. Інтеграція таких інструментів, як Tableau та Power BI, надає бізнесу потужні можливості для прогнозування потенційних проблем, аналізу ефективності доставки продукції та адаптації до змін ринкових умов. Завдяки їхнім аналітичним функціям компанії можуть підтримувати високий рівень точності прогнозів, що допомагає оптимізувати логістичні процеси, мінімізувати ризики та приймати стратегічно обґрунтовані рішення в динамічних ринкових умовах.

Інтеграція таких інструментів, як Tableau та Power BI, надає бізнесу потужні можливості для прогнозування потенційних проблем, аналізу ефективності доставки продукції та адаптації до змін ринкових умов. Завдяки їхнім аналітичним функціям компанії можуть підтримувати високий рівень точності прогнозів, що допомагає оптимізувати логістичні процеси, мінімізувати ризики та приймати стратегічно обґрунтовані рішення в динамічних ринкових умовах [34].

Компанія Maersk демонструє успішне використання AWS IoT для моніторингу контейнерів, зокрема тих, що містять морепродукти, забезпечуючи збереження їхньої свіжості навіть під час тривалих транспортувань. Завдяки інтеграції таких передових технологій компанія не тільки підвищує ефективність поставок, але й зменшує втрати продукції, дотримуючи високих стандартів якості. Це стає ключовим фактором у складних міжнародних перевезеннях, допомагаючи Maersk підтримувати лідерські позиції на ринку.

Штучний інтелект стає ключовим компонентом у вдосконаленні енергоефективності на складах, оптимізуючи роботу систем охолодження та вентиляції. Завдяки інтелектуальним алгоритмам AI можна точно налаштовувати параметри цих систем, враховуючи температурні умови, вологість та обсяги продукції. Це допомагає суттєво скоротити витрати енергії, підтримуючи принципи сталого розвитку, а також знижуючи вплив на довкілля [35; 36].

Висновки. Штучний інтелект значно покращує логістичні процеси у харчовій промисловості України. Він допомагає краще управляти запасами, прогнозувати попит і контролювати транспортування. Інтеграція IoT і автоматизованих систем робить постачання гнучкішим і стабільнішим, а використання AI сприяє зменшенню харчових відходів і скороченню витрат. Також технології штучного інтелекту допомагають знизити викиди CO₂, що позитивно впливає на екологію. Гармонійне поєднання інновацій, економічної ефективності та екологічної відповідальності стане вирішальним фактором у формуванні конкурентоспроможної, технологічно передової та сталої логістичної системи. Однак для повноцінного впровадження AI потрібно вирішити питання законодавства, фінансування та етичних норм.

Список використаних джерел:

1. AI у харчовій промисловості [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [AI in the Food Industry](#).
2. Штучний інтелект у логістиці харчових продуктів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [AI-Driven Logistics](#).
3. Оптимізація логістики за допомогою AI [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Artificial Intelligence in Logistics Optimization](#).
4. Кирлик Н. Ю. Штучний інтелект та його використання в логістичних процесах // Актуальні проблеми економіки. – 2021. – № 9-10 (243-244). – С. 59-66. – [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://eco-science.net/wp-content/uploads/2021/12/9-10.21.topik_Kyrlyk-N.Yu.59-66.pdf.
5. Якимішин Л. Я. Інновації у логістиці: вплив технологій на ефективність та конкурентоспроможність підприємства. – С. 88-98. – [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/46773/2/ColMon_2024_Iakimishin_L_Ia-Innovatsii_u_lohistrysi_88-98.pdf.
6. Фалович Н., Дубчак О. Впровадження штучного інтелекту в логістиці: майбутнє логістичної галузі. – С. 143-144. – [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/44609/2/MTEMSTE_2023_Falovych_N-Implementation_of_artificial_143-144.pdf.
7. Скіцько В. І. Логістика 5.0: синергія штучного інтелекту та людини в контексті сталого розвитку // Бізнесінформ. – 2023. – № 11. – С. 174-179. – [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.business-inform.net/export_pdf/business-inform-2023-11_0-pages-174_179.pdf.
8. Потужні застосування AI у харчовій промисловості [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [AI in the Food Industry](#).

9. Chung S.H. та ін. Applications of Artificial Intelligence in Logistics and Supply Chain Management [Електронний ресурс] / S.H. Chung, J.W. Lee, M. Kim. – 2020. – Режим доступу: [Scopus](#).
10. Blue Yonder Demand Planning [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Demand Planning Software | Blue Yonder](#).
11. SAP Integrated Business Planning [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [SAP IBP | Integrated Business Planning Software for Supply Chain](#).
12. AI в управлінні складом: вплив та застосування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [AI in Warehouse Management: Impacts and Use Cases - Oracle](#).
13. Oracle WMS Cloud: інтеграція з ERP-системами [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Integration with Cloud WMS - Oracle Help Center](#).
14. Carrefour Spain: інтеграція WMS для оптимізації виконання замовлень [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Carrefour Spain WMS Case Study](#).
15. Автоматизація процесів у Coca-Cola за допомогою RPA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Coca-Cola: Successful RPA Process Automation](#).
16. Journal of Food Engineering. AI Integration for Food Transportation and Safety Monitoring [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: [ScienceDirect](#).
17. He M., Chen X. AI and IoT-Based Smart Ecosystems in Food Logistics [Електронний ресурс] / M. He, X. Chen. – 2021. – Режим доступу: [Springer](#).
18. Fresh Inventory Software RELEX Solutions [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Fresh Inventory Software](#).
19. ABB RobotStudio: автоматизація сортування та пакування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Packaging and Palletizing | ABB Robotics](#).
20. Zeo Route Planner: оптимізація маршрутів доставки [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Route Optimization | Zeo Route Planner](#).
21. Zhang Y. та ін. Sustainability and Artificial Intelligence in Food Supply Chains [Електронний ресурс] / Y. Zhang, L. Wang, K. Liu. – 2022. – Режим доступу: [Springer](#).
22. FedEx Transportation Management Services [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [FedEx TMS](#).
23. DHL Transportation Management System (TMS) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [DHL TMS](#).
24. SAP Transportation Management [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [SAP TMS](#).
25. Oracle Transportation Management [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Transportation Management - Oracle](#).
26. AWS IoT для моніторингу умов транспортування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [AWS IoT Transportation Monitoring](#).
27. Nestlé та цифрова трансформація логістики [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Cargoo and Nestlé: Shortlisted for Supply Chain Excellence Award](#).
28. Danone: цифрова трансформація логістики [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Danone Shifts to Pull-Based Supply Chain Model](#).
29. Що таке AI у ланцюгах постачання? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [IBM AI in Supply Chain](#).
30. Unilever's Supply Chain Management [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Supply Chain Analysis of Unilever](#).
31. Fresh Food Planner: сталий роздрібний контроль [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Fresh Inventory Software | RELEX Solutions](#).
32. Tableau vs Power BI: порівняння аналітичних платформ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Power BI vs Tableau: Which is The Better Business Intelligence Tool](#).
33. Coca-Cola та аналітика ланцюга постачання за допомогою Power BI [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Coca-Cola Case Study - Driving Business Insights with Power BI](#).
34. Порівняльний аналіз Tableau та Power BI [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Tableau vs Power BI](#).
35. Maersk та IoT-моніторинг контейнерів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Maersk Upgrades IoT Connectivity Across Its Fleet](#).
36. AI та енергоефективність складів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [AI and Environmental Impact: Sustainable Warehousing Technology](#).

О.П. Манойленко¹, Д.М. Безуглий¹, В.А. Горобець¹, В.С. Пуць², А.С. Алексєєвцев¹**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЗНАЧЕНЬ ФУНКЦІЙ ПОЛОЖЕННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ МАШИН ЛАНЦЮГОВОГО СТІБКА ТИПУ 101 ТА ПОБУДОВА ЇХ СИНХРОГРАМИ***Київський національний університет технологій та дизайну¹**Луцький національний технічний університет²*

У роботі досліджено процес формування однопіткового ланцюгового стібка типу 101 в умовах змінних його технологічних параметрів. Для швейної машини типу GK-9-2 експериментально визначені функції положення робочих органів – голки $S(\varphi)$ зубчастої рейки $T(\varphi)$, розширювача $L(\varphi)$ та $Z(\varphi)$ ниткоподавача $U(\varphi)$, а також функції дійсної $P(\varphi)$ і необхідної $P'(\varphi)$ подачі нитки за один цикл обертання головного вала. Для всіх функцій побудовано апроксимаційні поліноми 6-го порядку з високим ступенем достовірності ($R^2 = 0,998 \div 0,9999$) та похибкою не більше $\pm 0,25$ мм або $\pm 1,5^\circ$ за кутовими координатами.

Порівняння результатів, отриманих графічним та аналітичним методами дозволило провести верифікацію моделей і уточнити ключові моменти взаємодії виконавчих органів (захоплення петлі-напуску та її “заколу” голкою). Побудовані функції використано для моделювання процесу шивання із врахуванням змін товщини матеріалу й довжини стібка, що дозволило сформулювати узагальнену синхрограму роботи машини.

Аналіз функцій $P(\varphi)$ і $P'(\varphi)$ виявив значні розбіжності: при мінімальній товщині матеріалу та короткому стібку перевищення дійсної подачі нитки становить 64,4%, а при максимальних значеннях – її недостача сягає 6,2%. Причиною є фіксований закон подачі в повзунному механізмі, який не передбачає регулювання.

Отримані результати підкреслюють доцільність розроблення адаптивних механізмів подачі нитки, здатних змінювати її величину залежно від технологічних параметрів. Представлені аналітичні моделі можуть бути використані як база для подальшого проєктування механізмів, які забезпечать надійне з'єднання шарів багатшарових текстильних композицій.

Ключові слова: однопітковий ланцюговий стібок типу 101; подача нитки; швейна машина; синхрограма; розширювач; функція подачі нитки; технологічні параметри стібка; армування наскрізним шиванням; механізм подачі нитки; товщина матеріалу; довжина стібка, поліноміальні функції.

O.P. Manoylenko, D.M. Bezuglyi, V.A. Gorobets, V.S. Puts, A.S. Aliksieievets

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE VALUES OF THE FUNCTIONS OF THE POSITION OF THE WORKING BODIES OF CHAIN STITCH MACHINES OF TYPE 101 AND CONSTRUCTION OF THEIR SYNCHROGRAMS

The paper investigates the process of forming a single-thread chain stitch of type 101 under conditions of variable technological parameters. For the GK-9-2 type sewing machine, the functions of the position of the working bodies - the needle $S(\varphi)$, the gear rack $T(\varphi)$, the expander $L(\varphi)$ and $Z(\varphi)$, the thread feeder $U(\varphi)$, as well as the functions of the actual $P(\varphi)$ and the required $P'(\varphi)$ thread feed per one cycle of rotation of the main shaft - were experimentally determined. Approximation polynomials of the 6th order with a high degree of reliability ($R^2 = 0.998 \div 0.9999$) and an error of no more than ± 0.25 mm or $\pm 1.5^\circ$ in angular coordinates were constructed for all functions.

Comparison of the results obtained by graphical and analytical methods allowed us to verify the models and clarify the key points of interaction between the actuators (gripping the loop and its “stabbing” with the needle). The constructed functions were used to model the stitching process, taking into account changes in material thickness and stitch length, which made it possible to form a generalized synchronization of the machine.

The analysis of the functions $P(\varphi)$ and $P'(\varphi)$ revealed significant discrepancies: at the minimum material thickness and short stitch, the excess of the actual thread feed is 64.4%, and at the maximum values, its shortage reaches 6.2%. The reason is the fixed feed law in the slider mechanism, which does not provide for adjustment.

The obtained results emphasize the feasibility of developing adaptive mechanisms for thread feeding that can change its value depending on technological parameters. The presented analytical models can be used as a basis for further designing mechanisms that will ensure reliable connection of layers of multilayer textile compositions.

Keywords: single-thread chain stitch type 101; thread feed; sewing machine; synchronogram; expander; thread feed function; technological parameters of the stitch; reinforcement by through stitching; thread feed mechanism; material thickness; stitch length, polynomial functions.

Постановка проблем. Сучасні тенденції у галузі створення багатшарових композиційних матеріалів дедалі частіше передбачають використання технологій з механічним армування текстильних преформ за допомогою швейних операцій [1–10]. Одним із перспективних методів такого армування є застосування однопіткових ланцюгових стібків типу 101 [1–7], які забезпечують надійне пошарове закріплення текстильної основи крізь усю її товщину. Завдяки технологічній гнучкості та меншій вибагливості до умов шиття, стібки типу 101 стали актуальними для зшивання сухих армованих текстильних преформ, призначених для подальшого просочення полімерами в матрицях.

Проте, застосування відомих швейних машин одониткового стібка в промислових умовах потребує удосконалення їх механізмів для того, щоб вони були здатні забезпечувати необхідну якість технологічного процесу, зокрема стійкість утворення стібка при зміні його технологічних параметрів: товщини матеріалу, довжини стібка та зусилля затягування нитки. Зміна останніх під час виконання операції ускладнює транспортування матеріалу та вимагає коригування подачі нитки безпосередньо при формуванні стібка. Це, в свою чергу, потребує узгодженої роботи робочих органів (голки, розширювача та зубчастої рейки) машини та регульованої подачі нитки відповідно до умов зшивання, що дозволить мінімізувати відхилення від заданих значень і гарантувати якість з'єднання текстильних армованих елементів.

У цьому контексті актуальними є дослідження закономірностей утворення ланцюгового стібка типу 101 та проєктування механізмів, що забезпечують стабільну роботу при зміні технологічних параметрів. Реалізація таких рішень є важливою передумовою для якісного виготовлення багат шарових текстильних армованих елементів, які застосовуються у виробках з композиційних матеріалів.

Одним із ключових елементів у досягненні зазначеної мети є розроблення механізму подачі нитки, з можливістю миттєвої адаптації під технологічні параметри стібка. Цей механізм зазвичай розробляється на завершальному етапі проєктування машини, тому виникає потреба в узгодженні роботи усіх робочих органів машини та визначенні технологічних факторів, що впливають на формування стібка, зокрема параметрів, які визначають закон і величину необхідної подачі нитки [11].

Метою дослідження є розроблення методики проєктування синхрограм швейних машин ланцюгового стібка типу 101. Методика базується на експериментальному визначенні функцій положення виконавчих органів (голки, розширювача та зубчастої рейки), подальшій апроксимації цих функцій поліноміальними моделями та перевірці їх адекватності шляхом порівняння з фактичними переміщеннями. На основі отриманих моделей передбачається виявлення закономірностей впливу товщини матеріалу й довжини стібка на фазову взаємодію механізмів, що забезпечує підґрунтя для розроблення раціональних функцій дійсної та необхідної подачі нитки і є основою для проєктування механізмів, здатних до адаптації під умови зшивання багат шарових текстильних преформ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання стібка типу 101 у технологіях пошарового з'єднання композиційних пакетів, зокрема при виготовленні текстильних преформ, обумовлено простотою процесу його утворення, економічністю у витраті нитки та здатністю забезпечувати наскрізне армування матеріалу [1-8]. Ці ж переваги роблять його придатним для автоматизованих операцій у виробництві багат шарових конструкцій, що підтверджено у роботах [9, 10].

Разом з тим, дослідження [1, 5, 6] свідчать, що порівняно з двонитковим стібком типу 401, стібком типу 101 поступається в рівномірності розподілу навантаження, однак характеризується простотою налаштування механізмів та адаптивністю до варіативних умов зшивання.

В літературних джерелах в основному виконаний аналіз багатониткових ланцюгових стібків класу 400. З метою забезпечення стабільності структури ланцюгових стібків класу 400 у літературі [11, 12] значну увагу приділено впливу зміни регульованих параметрів на функцію дійсної подачі нитки та впливу товщини матеріалів на необхідну подачу нитки в процесі утворення стібка. При цьому встановлено, що значне відхилення функції фактичної подачі нитки від необхідної істотно впливає на якість ниткового з'єднання і його структуру [13, 14]. В аналогічних дослідженнях [15-17] проаналізовано функції дійсної та необхідної подачі нитки, що дозволяє оцінити вплив технологічних параметрів на якість формування ниткового з'єднання. Водночас систематизовані дослідження процесів утворення одониткового ланцюгового стібка типу 101 практично не представлені в науковій літературі, що ускладнює розроблення відповідних механізмів швейних машин для його реалізації.

Особливість проєктування швейних машин ланцюгового стібка різних типів полягає у побудові синхрограм роботи машин, які дозволяють визначити основні параметри механізмів і робочих органів [15]. Такі циклограми розроблені для типових швейних машин ланцюгового стібка і враховують особливості процесу їх утворення. Синхрограми, наведені в роботах [15-17], призначені для проєктування швейних машин ланцюгового стібка типів 401 та 402, а визначення параметрів механізмів аналогічних машин з реверсивним переміщенням матеріалу представлено в [17]. Для проєктування спеціальних швейних машин ланцюгового одониткового стібка типу 101

відповідні синхрограми наведено в роботі [18], для машин потайного ланцюгового стібка типу 103 — у роботах [19–21], а для машин, що утворюють зигзагоподібні стібки, — у роботах [22, 23], зокрема для нових способів їх утворення — у [24–27].

Водночас наявні синхрограми здебільшого використовуються для визначення геометричних параметрів взаємодії робочих органів, зокрема мінімальних ходів, довжини вістря голки, носика розширювача (петельника) тощо, і не враховують впливу змін технологічних параметрів [28]. Відсутність у сучасних дослідженнях аналітичного врахування впливу товщини матеріалів та довжини стібка на синхрограму ускладнює побудову математичної моделі необхідної подачі нитки й розроблення механізмів подачі нитки, здатних забезпечити автоматичне регулювання її величини залежно від умов зшивання багатошарових текстильних матеріалів [29–31].

Відомі методики не дозволяють визначити параметри окремих механізмів швейних машин для утворення одониткового ланцюгового стібка типу 101, оскільки бракує опису не лише законів руху робочих органів, а відомостей про параметри їхньої взаємодії. Зокрема, для кулачкових механізмів розширювача, що забезпечують його переміщення у поздовжньому та поперечному напрямках, відсутні аналітичні залежності для визначення функцій положення робочих органів, що ускладнює аналіз і синтез цих механізмів. Водночас визначення функцій положення робочих органів у аналітичній формі ускладнене через відсутність точних геометричних характеристик ведучих ланок. Крім того, у наявних джерелах не представлено синхрограм машин зазначеного типу з розширювачем, що має складну просторову траєкторію.

Ці обставини обумовлюють необхідність створення нової методики проєктування механізмів швейних машин для утворення одониткового ланцюгового стібка типу 101, орієнтованої на умови армування багатошарових матеріалів або виготовлення об'ємних текстильних виробів.

Об'єкти та методи дослідження. Об'єктами досліджень були базові машин конструктивного ряду GK-9 (GK9-2, Gk9-10, GK9-18A, GK9-202, GK 9-500, GK9-801, Gk9-886, GK9-890C, GK-9000A), Gk26-1A, GK 35 GK 35-8), GK-3700, KP3000, RG-900D (RZ-668, RG-555) [32, 33], які широко застосовуються на підприємствах легкої й харчової промисловості. Процес виконання ланцюгового стібка на цих машинах здійснюється голкою, зубчастою рейкою розширювачем та механізмом подачі нитки. При цьому механізм розширювача містить два кінематичних ланцюги кулачкового типу і забезпечує просторовий рух розширювачу з вистоем.

У межах дослідження експериментально визначені значення функцій положення робочих органів швейної машини GK-9-2 (рис. 1) при мінімальних і максимальних значеннях технологічних параметрів стібка — товщини матеріалу (m) та довжини стібка (t).

Окрім функцій положення робочих органів, вихідними даними для побудови синхрограми є також характерні моменти процесу утворення стібка та технологічні параметри зшивних матеріалів, які впливають на фазову взаємодію робочих органів механізмів, відповідні значення наведено в таблиці 1.

Табл. 1

Моменти процесу утворення одониткового ланцюгового стібка

Поз.	Моменти процесу утворення одониткового ланцюгового стібка	Значення кута повороту головного валу
φ_0	Крайнє верхнє положення голки та крайнє праве положення розширювача	$0^\circ (360^\circ)$
$\varphi_{t.e.}$	Закінчення транспортування матеріалу	40°
$\varphi_{1,2}$	Вістря входить в матеріали m_1 та m_2	$35-40^\circ$
φ_B	Вістря голки виконує «закол» попередньої петлі нитки	172°
φ	Крайнє нижнє положення голки	180°
φ_A	Утворення «петлі напуску» і захоплення носиком розширювача	220°
$\varphi_{t.s.}$	Початок переміщення матеріалу	315°

Функції положення робочих органів визначено шляхом апроксимації експериментальних даних за методикою [34], результати якої наведено в таб. 2.

Для оцінки роботи механізмів подачі нитки визначено діаграми подачі нитки за методикою [11], при граничних значеннях технологічних параметрів стібка, з використанням експериментальної установки на базі швейної машини GK-9-2 (рис. 2, 3).

Табл. 2

Значення поліноміальних моделей функцій положення робочих органів швейної машини GK-9-2 при різних значеннях параметрів стібка

Поліноміальна модель функції положення робочих органів	Діапазон значень ϕ	Коефіцієнт детермінації
$S(\phi) = 0.0891 \cdot \phi^6 - 0.00438 \cdot \phi^5 + 0.00347 \cdot \phi^4 - 1.33 \cdot 10^{-5} \cdot \phi^3 - 2.06 \cdot 10^{-8} \cdot \phi^2 + 1.26 \cdot 10^{-10} \cdot \phi - 1.12 \cdot 10^{-13}$	0-360	$R^2 = 0,9997$
$Z(\phi) = -5.38 \cdot 10^{-11} \cdot \phi^6 + 7.96 \cdot 10^{-8} \cdot \phi^5 - 4.24 \cdot 10^{-5} \cdot \phi^4 + 0.0102 \cdot \phi^3 - 1.233 \cdot \phi^2 + 67.16 \cdot \phi - 1191.87$	60-230	$R^2 = 0.9978$
$L(\phi) = -8.479 \cdot 10^{-11} \cdot \phi^6 + 9.639 \cdot 10^{-8} \cdot \phi^5 - 4.422 \cdot 10^{-5} \cdot \phi^4 + 1.044 \cdot 10^{-2} \cdot \phi^3 - 1.337 \cdot \phi^2 + 86.005 \cdot \phi - 1944.642$	125-265	$R^2 = 0.9991$
$T(\phi)_{\max} = 6.42 \cdot 10^{-14} \cdot \phi^6 - 1.70 \cdot 10^{-10} \cdot \phi^5 + 1.18 \cdot 10^{-7} \cdot \phi^4 - 2.99 \cdot 10^{-5} \cdot \phi^3 + 2.26 \cdot 10^{-3} \cdot \phi^2 + 3.74 \cdot 10^{-2} \cdot \phi + 0.382$	0-360	$R^2 = 0.9971$
$T(\phi)_{\min} = -1.41 \cdot 10^{-14} \cdot \phi^6 - 4.78 \cdot 10^{-11} \cdot \phi^5 + 4.81 \cdot 10^{-8} \cdot \phi^4 - 1.27 \cdot 10^{-5} \cdot \phi^3 + 6.97 \cdot 10^{-4} \cdot \phi^2 + 4.41 \cdot 10^{-2} \cdot \phi + 0.168$	0-360	$R^2 = 0.9981$

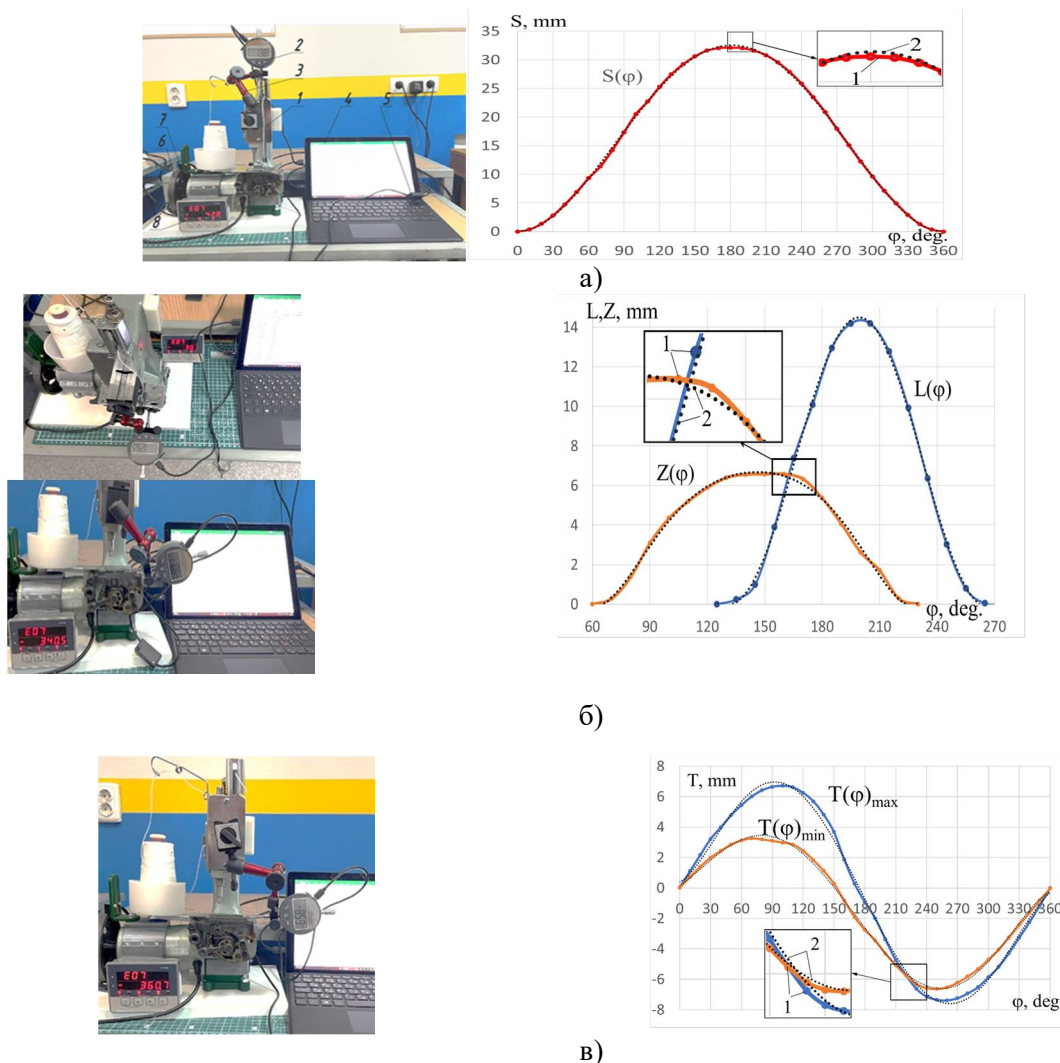


Рис. 1. Експериментальне дослідження функцій положення робочих органів: а – голки $S(\phi)$, б –розширювача вздовж $L(\phi)$ та поперек $Z(\phi)$ строчки, в – рейки вздовж строчки $T(\phi)$, 1 – експериментальні дані, 2 – апроксимовані дані

© О.П. Манойленко, Д.М. Безуглий, В.А. Горобець, В.С. Пуць, А.С. Алексєєв

Синхрограма робочих органів машини GK-9-2 ланцюгового стібка типу 101, що враховує мінімальні і максимальні технологічні параметри машини m та t приведена на рис. 4. Моменти взаємодії робочих органів голки з розширювачем в процесі захоплення «петлі-напуску» та «заколу» відповідно показані на ній точками А та В. На синхрограмі за початкове положення голки прийнято її верхнє крайнє положення (рис. 4). Орієнтацію осі ординат для функції положення голки задано у зворотному напрямку (вниз), що забезпечує коректну відповідність між напрямком руху голки та моментами її взаємодії з матеріалом у фазі проколу.

З метою оцінки точності отриманих значень функцій положення робочих органів визначено кутові положення головного вала машини при параметрах (рис. 4) як аналітичним шляхом — за поліноміальними функціями (табл. 2), так і графічно — за побудованою синхрограмою, отримані значення порівнюються для виявлення узгодженості методів.



1 – швейна машина GK-9-2, 2 – індикатор, 3 – штатив, 4 – персональний комп'ютер (ноутбук), 5 – кнопка, 6 – магнітний маховик, 7 – датчик, 8 – цифровий дисплей для виміру кута повороту головного вала машини

Рис. 2. Експериментальне дослідження функцій подачі нитки: а – дійсної подачі нитки $P(\phi)$, б – необхідної подачі нитки $P'(\phi)$

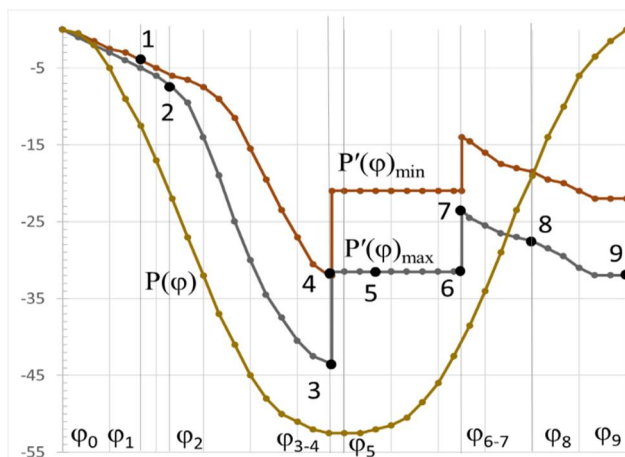


Рис. 3. Діаграми подачі нитки: $P(\phi)$ – дійсної подачі нитки; $P'(\phi)_{\max}$ – необхідної подачі нитки при максимальних $P'(\phi)_{\min}$ та мінімальних $P'(\phi)_{\min}$ значення технологічних параметрів

Розрахункове значення величини переміщення голки в матеріалі $S_{m1,2}$, визначається технологічними параметрами — товщини матеріалу $m_{1,2}$, а також конструктивних параметрів машини (для голки ф. Raly, модель GK9, №230 – $h=8$ мм, геометричні характеристики для швейної машини GK-9-2: $e=4$ мм, $S_t=4$ мм, $a=2$ мм, $c=4$ мм, $\delta_1=1$ мм) [15]:

$$S_m = m + S_A + a + e + \delta_1 + c + h, \quad (1)$$

де: S_A – необхідна величина переміщення голки для утворення «петлі-напуску» ($S_A \approx 3$ мм);

Гарантований «закол» голкою попередньої петлі відбувається в момент, коли її вістря перебуває на рівні S_B відносно носика розширювача (рис. 4), і це положення визначається відповідним виразом:

$$S_B = S_A + a + e + h, \quad (2)$$

Зазначений параметр забезпечує розташування вістря голки нижче площини попередньої петлі, яка визначається кутом α та залежить від положення розширювача і довжини стібка t (рис. 4). В цей же час в настановах з експлуатації машини GK-9-2 «закол» гарантується положенням розширювача L_B L_X при його крайньому правому положенні (рис. 4) таким чином щоб відстань від його задньої частини до вісі голки складала 1,5 мм.

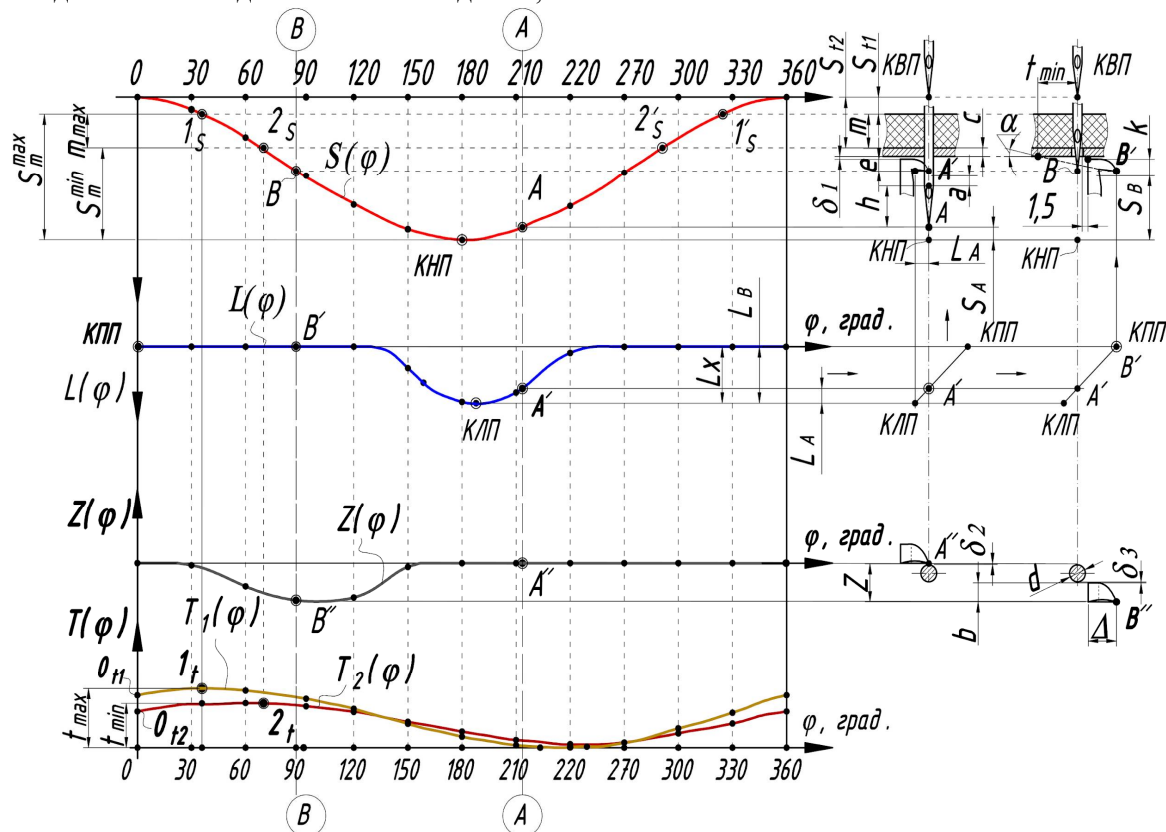


Рис. 4. Синхрограма робочих органів швейної машини GK-9-2 ланцюгового стібка типу 101 з ковним розширювачем

Окрім цього параметри взаємодії розширювача повинні забезпечувати надійне захоплення «петлі-напуску» та «закол» голкою попередньої петлі голкової нитки у характерних точках А та В. Таким чином, параметри взаємодії розширювача вздовж строчки визначається з синхрограми:

$$L(\varphi_A) = L_A = 3,5 \text{ мм}, \quad L(\varphi_B) = L_B = L(\varphi_A) + \Delta + 1,5 \text{ мм}, \quad (3)$$

де: $L(\varphi_B), L(\varphi_A)$ – величина переміщення розширювача відповідно в моменти взаємодії А та В.

$\varphi_{A,B}$ – кути повороту головного вала, що характеризують моменти взаємодії А та В.

Δ – довжина носика розширювача ($\Delta = 7 \text{ мм}$).

В свою чергу положення розширювача поперек строчки характеризується величиною Z_{AB} між миттєвими моментами взаємодії А та В залежить тільки від конструктивних параметрів голки та розширювача і повинен забезпечувати умову:

$$Z_{AB} = d + b + \delta_2 + \delta_3, \quad (4)$$

де d – діаметр голки ($d \approx 2,3 \text{ мм}$);

b – товщина розширювача ($b = 4,0 \text{ мм}$);

$\delta_{2,3}$ – зазор між розширювачем голкою, відповідно моменти взаємодії В та А ($\delta_2 \approx \delta_3 = 0,1 \text{ мм}$).

Визначення моментів взаємодії A і B робочих органів та величини переміщення голки в матеріалі $S_{m1,2}$ при утворенні стібка типу 101 за різних параметрів m і t дозволяє оцінити функціональні характеристики машини GK-9-2.

Параметри $S_{m1,2}$, $S_{1,2}$, $S_{A,B}$, $L_{A,B}$, $Z_{A,B}$, та величини ходів S_x , L_x , Z_x , $T_{x1,2}$ робочих органів синхрограми визначено на основі геометричних характеристик швейної машини, її налаштувань, а також за розрахунками (1–3), відповідні дані узагальнено в таблиці 3. Аналітичне обчислення поліноміальних моделей функцій положення головного вала виконано з використанням чисельного методу в середовищі Microsoft Excel (інструмент Solver) з допустимим відхиленням $\varepsilon=10^{-6}$. Така точність гарантує стійкість та збіжність обчислювального процесу в межах вимог до розв’язання нелінійних алгебраїчних рівнянь в інженерних цілях.

Результати обрахунків (моменти процесу утворення стібка: $\varphi_{1,2}$, $\varphi_{A,B}$, $\varphi_{A,B}$, $\varphi_{A,B}$) отримані обома методами, занесено до таблиці 3 з метою їхнього зіставлення та оцінки точності апроксимаційних моделей функцій положення робочих органів.

Табл. 3

Значення параметрів взаємодії робочих органів та величини їхніх ходів												
Розрахункові параметри, мм	S_1	S_2	S_A	S_B	L_A	L_B	Z_{AB}	S_x	L_x	Z_x	T_1	T_2
	4,0	12,0	3,0	17,0	3,5	11,0	6,5	32,13	14,5	6,67	7,5	5
Кутові параметри, град.	φ_1	φ_2	φ_A	φ_B	φ_A	φ_B	φ_B	φ_{max}			φ_1	φ_2
Графічно	36,05°	68,54	219,32°	84,52°	220°	144,15°	150	180°	189,15°	150	3,67	2,249
	323,93	291,46									3,89	-2,83
Аналітично	37,12°	70,24°	221,55°	84,62°	221,26°	144,8°	146,45	181,1°	189,15°	146,45	3,45	2,2
	323,92	291,55									-3,71	-2,83
Відхилення, %	2,9	2,48	1,0	0,11	0,56	0,44	2,42	0,71	0	2,42	0,22	1,8
	0	0,03									0,17	0

Висновки

1. Аналіз отриманих результатів підтверджує доцільність використання поліноміальних моделей 6-го порядку для аналітичного опису функцій положення робочих органів $S(\varphi)$, $L(\varphi)$, $Z(\varphi)$, $T(\varphi)$ швейної машини типу GK-9-2, оскільки значення коефіцієнту детермінації близький до одиниці $R^2=0,998\div 0,9999$. Актуальність застосування поліноміальних моделей для побудови синхрограм швейних машин одноститкового ланцюгового стібка підтверджена порівнянням результатів графічного (емпіричного) та аналітичного (поліноміального) методів, що дозволило оцінити точність цих моделей. Аналіз результатів величини ходів показав, практично 100% збіжність, з експериментальними значеннями аналітичних даних. Це також підтверджується зокрема, визначення ключових моментів – початку й кінця транспортування матеріалу (φ_1 , φ_2), моментів «заколу» (φ_B) та захоплення петлі-напуску (φ_A) – показало відхилення між методами в межах $0,1^\circ\div 2,9^\circ$, що є прийнятним у рамках інженерної точності. Найбільше відхилення, зафіксоване для кута φ_1 , становить 2,9%, але в абсолютному значенні не перевищує $\pm 1,1^\circ$, що підтверджує доцільність підходів.

2. Аналіз функцій дійсної $P(\varphi)$ та необхідної $P'(\varphi)$ подачі нитки виявив суттєві розбіжності між їх значеннями залежно від технологічних параметрів. При мінімальній товщині матеріалу та довжині стібка дійсна подача $P(\varphi)$ перевищує необхідну $P'(\varphi)$ на 64,4% (52,6 мм проти 32 мм), що призводить до ослаблення ниткового з’єднання. Натомість при максимальних значеннях – дійсна подача на 6,2% менша за необхідну, що може призводити до пропусків стібків. Таке відхилення пояснюється тим, що в механізмі подачі нитки (мод. 1.1.1.3 [35]) конструкцією не передбачено регулювання величиною чи законом подачі нитки. Отримані результати підкреслюють доцільність удосконалення як конструкції механізму подачі нитки

3. Важливо зазначити, що побудовані функції та синхрограма дозволили визначити не лише моменти взаємодії робочих органів, а й величини їхніх ходів для різних комбінацій товщини

матеріалів і довжини стібка. Таким чином, сформовані моделі можуть бути застосовані як основа для побудови автоматичних систем подачі нитки з урахуванням змін технологічних параметрів. Це відкриває перспективи вдосконалення існуючих механізмів, а також розробки нових типів машин, здатних забезпечувати стабільну якість стібків при зшиванні багатопарових текстильних матеріалів.

Література

1. NASA Technical Reports Server. (1997). Handbook of Analytical Methods for Textile Composites. NASA Reference Publication 1370. Retrieved from <https://ntrs.nasa.gov/citations/19970017583>
2. Gnaba I, Legrand X, Wang P, Soulat D. Through-the-thickness reinforcement for composite structures: A review. *Journal of Industrial Textiles*. 2018;49(1):71-96. doi:10.1177/1528083718772299
3. Piekłak, Katarzyna. (2024). Directionally Oriented Reinforcements of Warp-Knitted Fabrics for Composite Preforms. *Materials*. 17. 5221. 10.3390/ma17215221.
4. Ogale, Amol & Mitschang, P.. (2004). Tailoring of Textile Preforms for Fibre-reinforced Polymer Composites. *Journal of Industrial Textiles - J IND TEXT*. 34. 77-96. 10.1177/1528083704046949.
5. Orlovskiy, B. V., Manoilenko, O. P., & Bezuhlyi, D. M. (2023). Object-oriented analysis of frame 3D textile structures. *Journal of Engineering Sciences*, 9(1), 1–5. [https://doi.org/10.21272/jes.2023.10\(2\).c4](https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(2).c4)
6. McDonnell, C., Hayes, S., & Potluri, P. (2021). Investigation into the tensile properties of ISO-401 double-thread chain-stitched glass-fibre composites. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 4(2), 203–209. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.11.001>
7. Wang, X., Li, H., Zhang, Y., Guan, Y., Yan, S., & Zhai, J. (2024). Compressive failure characteristics of 3D four-directional braided composites with prefabricated holes. *Materials*, 17, 3821. <https://doi.org/10.3390/ma17153821>
8. Lee, B., Herszberg, I., Bannister, M. K., & Curiskis, J. I. (1997). The effect of weft binder path length on the architecture of multi-layer woven carbon preforms. *Textile Composites and Characterisation*, 5, 260–269. Available at: https://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM11proceedings/papers/ICCM11_V5_27.pdf
9. Wang, P., Legrand, X., & Soulat, D. (2017). Three-dimensional textile preform using advanced textile technologies for composite manufacturing. In: *Textiles for Advanced Applications*, 161–189. <https://doi.org/10.5772/intechopen.68175>
10. Fristedt, T. (2012). Novel fiber placement technologies for composite applications. *LayStitch ACCE Conference Proceedings*, 8–14. Retrieved from <https://www.tailoredfiberplacement.com/laystitch-acce-2012.pdf>
11. Манойленко О. П. Розробка механізмів подачі голкової нитки сточувальних машин ланцюгового стібка: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.10 – машини легкої промисловості / О. П. Манойленко. – Київ: КНУТД, 2008. – 24 с.
12. Manoilenko O. (2020). Topological analysis and synthesis of machine chain stitches. *Vlákna a textil (Fibres and Textiles)*, Vol. 27, № 4, December, 58–69. http://vat.ft.tul.cz/2020/4/VaT_2020_4_8.pdf
13. ISO 4916:1991 Textiles Seam types Classification and terminology
14. DSTU ISO 4915: 2015 Textile materials. Types of seams
15. Пищиков В. О. Проективання швейних машин [Текст] : навч. посіб. для студ. вищих навч. закладів / В. О. Пищиков, Б. В. Орловський. – Київ: Формат, 2007. – 320 с.
16. Горобець В. А. Аналіз і синтез механізмів голки та петельника машин багатониткового плоского ланцюгового стібка: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.10 – машини легкої промисловості / В. А. Горобець. – Київ: КТІЛП, 1980. – 20 с.
17. Єгоров В. В. Розробка машини двониткового ланцюгового стібка з реверсивним переміщенням матеріалів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.10 – машини легкої промисловості / В. В. Єгоров. – Київ: КТІЛП, 1983. – 20 с.
18. Глобенко С. М. Розробка машини для зшивання пакетів з гофрованими середніми шарами: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.10 – машини легкої промисловості / С. М. Глобенко. – Київ: КНУТД, 1984. – 20 с.
19. Манойленко О. П. Дослідження процесу ниткоподачі нитки швейних машин потайного одноститкового ланцюгового стібка / О. П. Манойленко, В. А. Горобець // *Технології та дизайн*. - 2011. - № 1 https://er.knutd.edu.ua/bitstream/123456789/2895/1/td_2011_N1_05.pdf
20. Горобець В. А. Аналіз взаємодії робочих органів швейної машини потайного ланцюгового стібка. Повідомлення 1 / В. А. Горобець, О. П. Манойленко, В. М. Дворжак // *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. – 2010. – Т. 4, № 5. – С. 29–33.

- 21.Горобець В. А. Аналіз взаємодії робочих органів швейної машини потайного ланцюгового стібка. Повідомлення 2 / В. А. Горобець, О. П. Манойленко, В. М. Дворжак // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2011. – № 3. – С. 9–16.
- 22.Машенцев С. В. Розробка петлеутворюючих механізмів машин двониткового ланцюгового зигзаг-стібка: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.05.10 – машини легкої промисловості / С. В. Машенцев. – Київ: КНУТД, 1985. – 24 с.
- 23.Манойленко О. П. Проектування механізмів швейних машин для реалізації триниткового ланцюгового зигзагоподібного стібка [Текст] / О. П. Манойленко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія "Технічні науки". - 2015. - № 6 (92). - С. 91-99.
- 24.Горобець В. А. Новий спосіб утворення плоского ланцюгового стібка та визначення параметрів робочих органів [Текст] / В. А. Горобець, О. П. Манойленко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Технічні науки. - 2016. - № 6 (104). - С. 34-46.
- 25.Горобець В. А. Розробка нових способів утворення багатониткових ланцюгових стібків та обладнання для їх реалізації [Електронний ресурс] / В. А. Горобець, О. П. Манойленко // Технології та дизайн. - 2013. - № 2 (7).
- 26.Горобець В. А. Розробка нових способів утворення машин багатониткових ланцюгових стібків та обладнання для їх реалізації [Текст] / В. А. Горобець, О. П. Манойленко // Технології та дизайн. - 2012. - № 3 (4).
- 27.Спосіб утворення чотирьохниткового плоского ланцюгового стібка: пат. України О.П. Манойленко, В.А. Горобець; заявник та патентовласник «КНУТД». № 76292; від 25.12.12, Бюл. № 24 – 4 с. 4
- 28.Безуглий Д. М., Манойленко О. П. Експериментальне дослідження впливу технологічних факторів стібка на функцію необхідної подачі нитки // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2025) : матеріали тез доповідей XV Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Чернігів, 22–23 трав. 2025 р.) : у 2 т. / Нац. ун-т «Чернігівська політехніка» [та ін.] ; відп. за вип.: А. Л. Приступа [та ін.]. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2025. – Т. 1. – С. 246–247.
- 29.Горобець В.А., Манойленко О.П. Оптимізаційний синтез механізмів подачі нитки сточувальних машин ланцюгового стібка // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – 2008. – № 1. – С. 72–77.
- 30.Manoilenko O., Horobets V., Dvorzhak V., Kovalov Y., I. Kniaziev & Shkvyra V (2023)/ Research of variable parameters of needle thread take-up mechanisms and development of recommendations for adjusting multi-thread chain stitch sewing machines. *Fibres and Textiles*, 30(5), 52-60 <https://doi.org/10.15240/tul/008/2023-5-006>.
- 31.Manoilenko, O., Dvorzhak, V., Horobets, V., & Panasiuk, I. (2024). Assessing the impact of sewing machine thread take-up mechanism parameters on the magnitude and nature of thread take-up. *Engineering Technological Systems*, 6(1) (132), 64–75. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.315129>
- 32.Jinzhifeng (Tianjin) Automation Technology Co., Ltd. (n.d.). Jinzhifeng Automation Technology. Retrieved February 13, 2025, from <http://www.jzf-tj.com/en/>
- 33.HeBei QingGong Sewing Machine Co., Ltd. (n.d.). HeBei QingGong sewing machine Co., Ltd. Retrieved February 13, 2025, from <https://www.qgfr.com/en/>
- 34.Клепко, В. Ю., & Голець, В. Л. (2009). Метод найменших квадратів. У Вища математика в прикладах і задачах (2-ге видання, с. 358). Центр учбової літератури. 594 с.
- 35.Манойленко О.П., Горобець В.А., Дворжак В.М., Писаренко Д.Д., Билик К.А. (2022). Аналітичний огляд та розроблення класифікації механізмів подачі голкових ниток швейних машин ланцюгового стібка. *Технології та інженірінг*, № 4 (9), 35 -47. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.4.3>

С.В. Ягелюк, В.І. Часніков

Луцький національний технічний університет

ВИКОРИСТАННЯ БІОРОЗКЛАДНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ЦЕЛЮЛОЗИ ОЛІЙНОГО ЛЬОНУ ДЛЯ ХАРЧОВОЇ УПАКОВКИ

У статті досліджено перспективи використання біорозкладних матеріалів на основі целюлози олійного льону для виготовлення харчової упаковки. Перехід до циркулярної економіки та необхідність зменшення обсягів пластикових відходів зумовлюють активний пошук альтернативних екологічно безпечних рішень у пакувальній галузі. Методологія дослідження охоплює аналіз сучасних тенденцій у виробництві біополімерних матеріалів, оцінку фізико-механічних властивостей біорозкладних матеріалів із целюлози олійного льону та прогноз їх впровадження на ринку. Проведено порівняльний аналіз властивостей целюлози олійного льону у зіставленні з іншими природними біополімерами. Значну увагу приділено можливим сферам застосування льонової целюлози в різних галузях промисловості. У дослідженні показано високий вихід біоволокон з ацетату целюлози, які стійкі до впливу кислотного та сольового середовищ, що робить їх перспективними для використання в харчовій та медичній промисловості. Аналіз життєвого циклу льонових волокон підтверджує їхні екологічні переваги та мінімальний вплив на довкілля. Результати свідчать про те, що застосування біорозкладних матеріалів на основі олійного льону є ефективним засобом зменшення залежності від синтетичних полімерів. Дослідження сприяє впровадженню інноваційних, екологічно безпечних технологій в українській пакувальній індустрії, що, своєю чергою, сприяє скороченню пластикових відходів. Використання целюлози олійного льону може суттєво покращити екологічну ситуацію та сприяти сталому розвитку аграрного сектору шляхом створення замкнутого циклу виробництва, в якому всі компоненти рослини використовуються без утворення відходів.

Ключові слова: біорозкладна упаковка, олійний льон, льонова целюлоза, сталі матеріали, біосировні полімери, циркулярна економіка, харчова упаковка, утилізація сільськогосподарських відходів

S. Yaheliuk, V. Chasnikov

USE OF BIODEGRADABLE MATERIALS FROM OIL FLAX CELLULOSE FOR FOOD PACKAGING

The article explores the prospects of using biodegradable materials based on oil flax cellulose for food packaging. The transition to a circular economy and the need to reduce plastic waste drive the development of alternative environmentally friendly solutions in the packaging industry. The research methodology includes an analysis of current trends in biopolymer material production, an assessment of the physicochemical properties of biodegradable materials derived from oil flax cellulose, and a forecast of their market implementation. A comparative analysis was conducted to evaluate the properties of oil flax cellulose against other natural biopolymers. Significant attention is given to the potential applications of oil flax cellulose in various industrial sectors. The study demonstrates a high yield of cellulose acetate biofibers, that exhibit resistance to acidic and saline environments, making them promising for use in the food and medical industries. The life cycle analysis of flax fiber confirms its environmental benefits and minimal ecological impact. The results indicate that using biodegradable materials based on oil flax is an effective tool for reducing dependence on synthetic polymers. The research contributes to the implementation of innovative environmentally safe technologies in Ukraine's packaging industry, thus contributing to the reduction of plastic waste. The utilization of oil flax cellulose can significantly improve the ecological situation and promote sustainable development in the agricultural sector by creating a closed-loop production system that fully utilizes all plant components without generating waste.

Keywords: biodegradable packaging, oil flax, flax cellulose, sustainable materials, bio-based polymers, circular economy, food packaging, agricultural waste utilization

Introduction. The transition to a circular economy and the reduction of waste have led to increased production and consumption of biopolymer-based packaging solutions. In developed countries, there is a growing trend of scientific research, development, and innovation for packaging materials aimed at minimizing environmental impact.

Since 2022, due to the full-scale invasion of the Russian Federation, Ukrainian agricultural producers have faced significant risks and have been forced to seek new opportunities to ensure the sustainability and development of agribusiness. One of the niche technical crops that has gained increasing relevance under wartime conditions is oil flax. This is a relatively uncommon technical crop that yields two types of valuable products simultaneously: seeds and fiber. The efficient utilization of all parts of the plant contributes to the creation of environmentally friendly products while reducing environmental impact, aligning Ukraine with European eco-standards.

Thus, the production of food packaging from oil flax cellulose presents a highly promising direction for agribusiness in Ukraine, given its projected high profitability and environmental benefits.

Analysis of recent studies. A review of recent scientific publications indicates an increasing interest among researchers in the development and utilization of oil flax as a promising raw material for

producing various materials. O. Havrylenko and B. Plishyvyi conducted a study analyzing the current state and future prospects of the global market for biodegradable packaging materials [1]. T. Tovstanova and I. Polyakova examined the agrobiological aspects of oil flax cultivation in Ukraine. They identified optimal growth conditions, including soil composition, climatic factors, and agronomic practices. Their research is significant, as the quality of raw materials for cellulose production largely depends on cultivation conditions [2]. S. Yaheliuk and V. Didukh analyzed the current state of oil flax and fiber flax processing, identifying key directions for utilizing the obtained products. They emphasized the environmental advantages of flax cellulose and its potential in the production of biodegradable materials. This study is crucial for understanding the prospects of flax cellulose applications in the packaging industry [3]. O. Fursa, A. Arkhip, and V. Yevtushenko examined the technological properties of oil flax straw and its suitability for cellulose processing. They discovered that due to its chemical composition and physical characteristics, this raw material can be used to produce environmentally friendly packaging materials. Their research contributes to improving technologies for processing oil flax straw into biodegradable materials [4].

The study conducted by N. A. Mostafa and co-authors focused on an efficient method for obtaining cellulose acetate biofibers from flax and cotton linters. The process yielded 81% for flax and 54% for cotton. The resulting bioplastics are characterized by biodegradability and resistance to acidic and saline environments, making them promising for applications in the food and medical industries [5]. A study led by Baley examined the properties of flax fibers for use in composite materials. The authors analyzed the mechanical characteristics, structure, and influence of various factors on fiber quality, highlighting their potential in the production of environmentally friendly materials [6]. R. Kumar and co-authors conducted an analysis of the bioenergy potential of livestock waste and agricultural residues in India. Their study emphasizes the possibility of using these waste materials for energy and material production, including biodegradable packaging, contributing to reduced reliance on traditional energy and material sources [7]. A. Gómez-Campos and colleagues presented a life cycle analysis of flax fiber intended for technical textiles. Their research covers all stages of flax fiber production and utilization, emphasizing its environmental advantages and potential to reduce ecological impact [8]. N. M. Stark and L. M. Matua reviewed contemporary trends in bio-based packaging materials. The authors analyzed different types of biopolymers, their properties, and application prospects, emphasizing the importance of developing sustainable packaging solutions to mitigate environmental damage [9]. Boyko G. and co-authors explored modifications of hemp and its potential industrial applications. The authors examined its properties for biomedical and industrial purposes. [10]. They investigated the renewed interest in hemp as a sustainable material. The authors emphasized that due to its natural properties and environmental benefits, hemp has become an attractive choice for consumers and is gaining new relevance in modern sustainability-oriented developments. A. Kulma and co-authors analyzed biotechnological approaches to flax cultivation and processing in Europe and China. Their research covered genetic modifications aimed at increasing the content of beneficial compounds in flax, such as polyhydroxybutyrate, which can be used in biodegradable plastic production. The authors stressed the importance of international collaboration in flax research for the advancement of new materials and products [11]. Yaheliuk, S and co-authors investigated the potential of converting agricultural waste into value-added products. The authors analyzed the economic and environmental benefits of this approach, highlighting the potential of flax waste for producing eco-friendly packaging materials. This study underscores the importance of sustainable practices in agriculture and industry [12]. P. Gupta and co-authors (2022) reviewed current trends in the development of biodegradable packaging films using plant-based and food waste. The authors discussed various methods for obtaining and modifying these films, their properties, and potential applications. Special attention was given to the use of flax cellulose waste as a promising material for sustainable packaging solutions [13].

These studies highlight the wide range of possibilities for utilizing flax and its by-products in biomedical and industrial applications, fostering the development of sustainable and eco-friendly materials. This represents a crucial step toward sustainable development and reducing environmental impact.

The aim of this article is to explore and analyze scientific approaches to the development and application of biodegradable materials based on cellulose derived from oil flax.

Materials and Methods. The research methodology employs a comprehensive approach that integrates analytical, experimental, and predictive methods to assess the effectiveness of using oil flax cellulose in the production of biodegradable packaging materials.

A review of literature sources enabled an evaluation of current trends in biopolymer material production and identified the prospects of using oil flax as a raw material for packaging. Scientific

publications were analyzed to highlight the chemical and physical properties of flax cellulose, along with experimental findings related to its processing.

Experimental methods included the assessment of the physicochemical properties of the obtained materials, particularly their strength, flexibility, and moisture resistance. The research was conducted in accordance with international packaging material evaluation standards.

The primary data sources for the analysis included the State Statistics Service of Ukraine, which provided information on oil flax cultivation and processing volumes.[14] To visualize the results, a graphical method was employed, allowing for the tracking of trends in the production and utilization of biodegradable packaging materials based on oil flax. A forecasting method was used to estimate the potential adoption of oil flax cellulose packaging materials in Ukraine and possible development scenarios for this industry until 2030. The predictions were based on statistical reports and econometric models that accounted for demand trends and environmental regulatory changes. The selected timeframe for the study (2010–2023) was chosen to analyze long-term trends in oil flax cultivation and its application in the packaging industry.

The obtained results provide insights into the efficiency of using oil flax cellulose for producing environmentally friendly packaging materials, contributing to the implementation of a circular economy in Ukraine's agricultural sector.

Results. The development of the bio-packaging industry is particularly relevant for Ukraine due to growing environmental challenges and the urgent need to reduce the use of conventional plastics. According to the State Statistics Service of Ukraine, as of 2023, the country generates over 2 million tons of plastic waste annually, of which only 7% are recycled [14].

Flax has historically been one of the oldest cultivated crops in modern Ukraine, grown primarily for its fibers. Flax fibers were widely used for producing textiles, cords, ropes, and other essential goods, playing a significant role in household and industrial activities. The peak of flax cultivation occurred in the 19th century. Following Ukraine's independence, this sector experienced a gradual decline, but in the last decade, a slow revival of flax cultivation has been observed. Modern flax farming in Ukraine is now primarily focused on oil flax cultivation.

To analyze trends, we examine data from the State Statistics Service of Ukraine on sown area dynamics, production trends, and yield changes [14].

Until 2010, oil flax cultivation areas remained relatively small (around 2,000–4,000 hectares). However, there was a sharp increase, reaching 58,900 hectares in 2010 and further expanding to 62,200 hectares by 2015. In 2020, a significant decline in cultivated areas occurred, dropping to 13,800 hectares. However, in 2021–2022, the areas began to increase again, reaching 33,100 hectares by 2022.

The primary driver of this growth has been agricultural enterprises, whereas households and small-scale farms have almost ceased flax cultivation since 2015 (see figure).

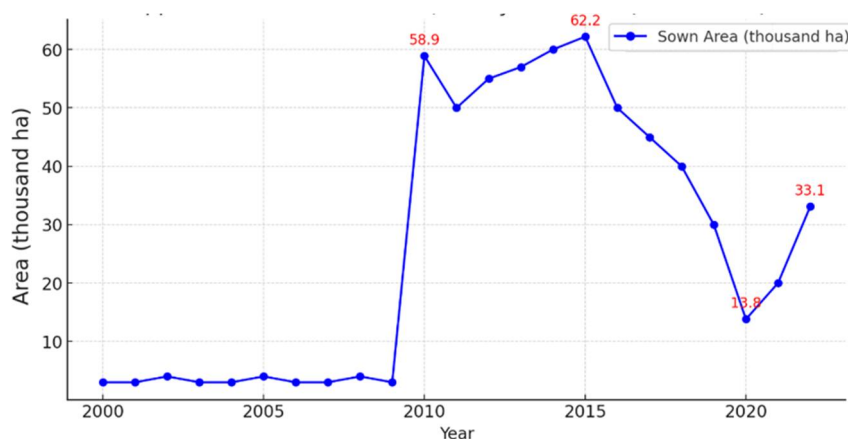


Fig. 1. Dynamics of Oil Flax Sown Areas (thousand hectares)

Source: Compiled by the authors using [5]

Between 2010 and 2015, oil flax experienced a peak in production, but after 2020, dynamics of sown areas, production volumes, and yields declined. The primary contribution to oil flax cultivation and production was made by agricultural enterprises, while households and small farms nearly ceased cultivation after 2015 due to lower levels of mechanization and technology. However, in the last two years,

signs of industry recovery have emerged, indicating the potential for a new development cycle. Enterprises play a dominant role in this process.

Forecasting oil flax production in Ukraine during wartime conditions remains a complex task due to numerous uncertainties. However, based on available data and econometric modeling methods, some projections can be made. By 2022, oil flax sown areas were increasing, and data for 2022–2023 indicate a 20% growth in sown areas compared to the previous season, reaching the highest level in the past five years. This demonstrates a degree of resilience in the industry despite the war. The expansion of sown areas could lead to higher production volumes, provided that weather conditions are favorable and major military conflicts do not disrupt key agricultural regions. Yields are expected to remain at previous levels or slightly decrease due to potential difficulties in accessing resources and equipment.

These findings are supported by a study by Yaheliuk, S., Fomych, M., & Rechun, O., which highlights the increased relevance of oil flax production under wartime conditions. The author characterizes the fluctuating dynamics of oil flax production in Ukraine, contrasting it with the dominance of cash crops. The study reveals that nearly 70% of oil flax is sold within Ukraine for domestic processing, and purchase prices for oil flax have traditionally remained high [15].

Thus, despite challenges posed by the war, oil flax production in Ukraine shows signs of resilience. The increase in sown areas in 2022 and 2023 indicates that farmers are adapting to new conditions. However, for a more accurate forecast, it is crucial to consider further developments in the military situation and its impact on the agricultural sector.

Oil flax is a promising raw material for biodegradable packaging materials due to its high cellulose content in its stems. Notably, flax straw contains up to 50% cellulose, making it suitable for the production of various types of paper and cardboard [7].

The cellulose derived from oil flax offers several advantages over other natural biopolymers (see Table).

Table 1.

Comparative Analysis of Oil Flax Cellulose with Other Natural Biopolymers

Biopolymer	Main characteristic	Advantage	Disadvantage
Oil flax cellulose	High strength, biodegradability, resistance to moisture and chemical exposure	Environmentally friendly, can be used in the production of bioplastics	Requires special processing
Wood-derived cellulose	High strength and durability	Suitable for creating paper, textiles	Requires significant water and energy consumption
Starch	Easy to decompose, affordable	Cheap raw materials, environmental friendliness	Low strength, high hygroscopicity
Chitin and chitosan	Antimicrobial properties, biocompatibility	Used in medicine and food industry	High cost, need for special processing

Source: compiled by the authors based on multiple sources

Oil flax cellulose is one of the most promising biopolymers, widely used in industry due to its unique physicochemical properties. According to Baley et al. (2019), the main characteristics of this cellulose include:

- High cellulose content – up to 80% in processed flax fibers.
- High mechanical strength – flax fibers exhibit superior mechanical properties compared to wood cellulose [6].
- Studies by Mostafa et al. confirm that flax cellulose has good moisture resistance and acid resistance [5].
- Cellulose decomposes naturally by microorganisms without generating harmful residues [16].

The use of oil flax cellulose has significant potential in the packaging and textile industries due to its unique properties. Further advancements in processing technologies will promote broader applications of this material.

The extraction of cellulose from oil flax involves several key stages:

- Mechanical processing – shredding stems to separate the fiber portion.

- Chemical treatment – using alkaline solutions (NaOH, H₂O₂) to remove lignin and hemicellulose.
- Filtration and washing – cleaning fibers from chemical reagents.
- Drying and grinding – obtaining final cellulose in the form of powder or fibers.

Research indicates that efficient mechanical processing includes initial stem mixing, pre-drying, repeated retting, and optimal blending of fibers from different stem parts. Additional fiber purification steps can enhance product quality but may increase production costs.

In industrial flax production, key processing steps include breaking and scutching, which determine fiber quality. Pre-crushing of stems facilitates easier removal of shives. However, intensive mechanical processing can damage the fibers, highlighting the need for improved equipment.

According to Y. Berezovsky, one limiting factor is the lack of affordable equipment for small- and medium-scale producers. Manufacturers are advised to implement double-pass processing of raw materials, which enhances fiber quality. However, this technique disrupts process continuity, necessitating the development of low-cost processing methods [17].

Improving oil flax processing technologies will contribute to:

- Higher long-fiber yield
- Reduced waste
- Expanded industrial applications

These advancements will strengthen the role of oil flax cellulose in the development of sustainable and biodegradable materials across various industries.

Oil flax cellulose exhibits high mechanical strength, flexibility, and resistance to chemical exposure. Due to its structural properties, it can be used as a base material for bioplastics and packaging, reducing dependence on synthetic polymers. A life cycle analysis of flax fiber has confirmed its environmental benefits and minimal ecological impact. Flax can be processed into cellulose acetate biofibers with an 81% yield, which are characterized by high biodegradability and resistance to acidic and saline environments. This makes them promising for applications in the food and medical industries. Additionally, research has explored the potential use of flax waste for biogas and alternative fuel production, further enhancing the environmental efficiency of this crop [15]. Oil flax cellulose possesses unique properties that distinguish it from other natural biopolymers. Wood-derived cellulose is known for its high durability and strength, making it suitable for paper and textile production. However, its manufacturing process requires significant water and energy consumption, limiting its environmental sustainability. Flax fibers have high mechanical strength and ecological advantages, allowing their use in composite materials. Oil flax cellulose stands out for its high strength, flexibility, and resistance to chemicals, making it an ideal material for biodegradable products, including paper, textiles, and bioplastics. Thus, using oil flax for biodegradable packaging materials represents an environmentally friendly solution, reducing dependence on synthetic polymers and minimizing negative environmental impact.

Oil flax cellulose is a promising material for eco-friendly products. It can be applied in various industries, including paper production, textiles, and composites. Unlike synthetic materials, flax cellulose contains no artificial additives, simplifying its biodegradation process.

Flax cellulose decomposes naturally with the help of microorganisms such as bacteria and fungi, which break it down into simpler compounds. The byproducts of cellulose decomposition do not harm the environment—instead, they return to the soil, enhancing fertility and supporting the natural nutrient cycle.

Microorganisms release enzymes that break down cellulose into simple sugars, which are easily absorbed by other organisms. This accelerates and completes the biodegradation process, making flax cellulose an excellent alternative to traditional polymers.

According to researchers, by 2030, the biodegradable packaging market is expected to reach 22 million tons, driven by stricter environmental regulations. The food industry alone is projected to account for over 42% of this demand. Ukraine has significant agricultural potential, which can be leveraged to develop biodegradable packaging materials. The advantages of bio-based packaging from oil flax include substantial environmental benefits. Producing bio-packaging from agricultural waste significantly reduces CO₂ emissions compared to traditional polymer materials. In EU countries, the implementation of biodegradable packaging technologies has already led to reduced taxation on environmentally friendly products. These findings highlight the growing importance of oil flax cellulose as a sustainable alternative to conventional packaging, with significant economic and environmental benefits.

The obtained results confirm the promising potential of using oil flax in the production of biodegradable packaging materials. An important aspect is that the production of such materials helps reduce environmental impact and contributes to the development of the circular economy. A review of

scientific sources indicates the high potential of oil flax cellulose as an alternative to synthetic polymer materials.

Research has shown that biofibers derived from flax exhibit high strength, moisture resistance, and environmental safety. These properties make them suitable for various applications, including packaging materials, textiles, and bioplastics. At the same time, it is essential to consider the specifics of cellulose extraction and processing, as they directly impact the final material properties.

The study highlights the importance of considering the mechanical characteristics of flax fibers when developing composite materials. This opens up new opportunities for using flax cellulose in packaging solutions for the food and pharmaceutical industries. Additionally, flax waste has been proven to be a valuable raw material for bioenergy, supporting sustainable development strategies. A life cycle analysis of flax confirms that its use contributes to reducing negative environmental impact.

A comparative analysis of oil flax cellulose with other natural biopolymers, such as wood cellulose, starch, and chitosan, has demonstrated its competitiveness. It has better mechanical properties than starch and is more environmentally friendly than chitosan, which is derived from animal-based raw materials. However, for large-scale adoption, it is necessary to improve flax processing technologies and develop cost-effective methods for cellulose extraction.

Future research should focus on optimizing cellulose extraction technologies, enhancing its mechanical properties, and evaluating its long-term environmental benefits. An important direction is the implementation of innovative cellulose modification methods, which will improve its strength, barrier properties, and biodegradability.

Additionally, it is advisable to explore the possibility of combining oil flax cellulose with other natural biopolymers to develop materials with enhanced properties. This opens the door to the development of hybrid bioplastics, which could replace traditional petrochemical polymers in various industrial applications.

Conclusions

Today, various countries are exploring ways to maximize the full potential of flax, as disposal through burning poses both an environmental and economic challenge worldwide. With a well-structured and stable approach, and considering the current unstable conditions, Ukraine has strong prospects for profitable agribusiness and processing activities aimed at producing high-value-added products.

The dynamics of oil flax production in Ukraine show a trend toward recovery after a decline, creating favorable conditions for further development. Using oil flax cellulose for food packaging is an environmentally friendly solution that helps reduce dependence on synthetic polymers and minimize environmental impact.

The use of biodegradable materials derived from oil flax is an effective strategy for reducing reliance on synthetic polymers. These materials exhibit high strength, flexibility, and rapid biodegradation without producing harmful residues. Ukraine has great potential for utilizing oil flax cellulose in the production of biodegradable packaging materials. A review of scientific research indicates a growing interest in this topic, particularly in agrobiological aspects of flax cultivation, processing technologies for its straw, and methods for obtaining high-quality cellulose.

Thus, the production of biodegradable packaging materials based on oil flax cellulose represents a promising direction for agribusiness, aligning with modern environmental trends and promoting the sustainable development of the country. The utilization of oil flax cellulose can significantly improve the environmental situation and contribute to the sustainable development of the agricultural sector by establishing a closed-loop production system where all parts of the plant are used without waste.

References

1. Havrylenko, O., Plishyvyi, B. (2023) World trends in the development of the market of biodegradable packaging materials. *Scientific Bulletin of Uzhhorod National University*. 47. C. 160-165. URL: http://www.visnyk-econom.uzhnu.uz.ua/archive/47_2023ua/30.pdf (accessed 02.02.2025).
2. Tovstanova T.G., Poliakova I.O. Agrobiological features of oil flax cultivation in Ukraine // *Agronom*. 2007. № 24. C. 156-157.
3. Yaheliuk S.V., Didukh V.F. Directions of use of oil flax and flax-dolgunts processing products. *Commodity Bulletin*. 2020. T. 1, № 13. C. 292-305. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2310-5283-2020-13-25> (accessed 02.02.2025).
4. Fursa O., Arkhip A., Yevtushenko V. Suitability of oil flax straw for processing into fibre. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2024. T. 331, № 1. C. 343-346. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-331-52> (accessed 02.02.2025).

5. Production of biodegradable plastic from agricultural wastes / N. A. Mostafa et al. *Arabian Journal of Chemistry*. 2018. Vol. 11, no. 4. P. 546-553. URL: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.04.008> (date of access: 14.02.2025).
6. Baley, C., Gomina, M., Breard, J., Bourmaud, A., Drapier, S., Ferreira, M., Le Duigou, A., Liotier, P.J., Ouagne, P., Soulat, D., & Davies, P. (2019). Characteristics of flax fibres for the manufacture of composite materials. *International Journal of Material Formation*, 12, 1023-1052. doi: 10.1007/s12289-018-1455-y.
7. Kumar R, Kumar V and Nagpur AS (2023). Bioenergy potential of available livestock wastes and crop residues: an analysis of 602 rural districts in India. *Science of The Total Environment*, 889, article number 163974. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163974.
8. Gómez-Campos, A., Viallé, C., Rui, A., Sablayrolles, C., and Hamelin, L. (2021). Linseed fibre for technical textiles: a life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 281, article number 125177. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.125177
9. Stark N. M., Matuana L. M. Trends in sustainable biobased packaging materials: a mini review. *Materials Today Sustainability*. 2021. Vol. 15. P. 100084. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2021.100084> (date of access: 14.02.2025).
10. Boyko, G.; Evtushenko, V.; Berezovsky, Y.; Fursa, O.; Yaheliuk, S.; Holovenko, T.; Maksimchenko, Y.; Kraglik, V.; Kapitonov, A.; Momotok, E. (2023) Dependence of hydrophobic properties of textile material on the anatomical structure of hemp fibers in its basic. *AD ALTA-Journal of Interdisciplinary Research*. 13(2), 234-237 Special Issue. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:001027993900038>
11. Kulma, A., Zhuk, M., Dovgy, S., Qiu, C., Wang, Y., Jankauskene, S., Preisner, M., Kostin, K., & Szopa, J. (2015). Biotechnology of fibrous flax in Europe and China. *Technical Crops and Products*, 68, 50-59. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.08.032>
12. Yaheliuk, S., Didukh, V., Boyko, G. (2020) The improved technology of biomass processing to obtain products of various applications. *Agricultural machines* No 45 p. 155-164
13. Gupta, P., Toksha, B., & Rahaman, M. (2022). A Review on Biodegradable Packaging Films from Vegetative and Food Waste. *The Chemical Record*, 22(7), e202100326. <https://doi.org/10.1002/tcr.202100326>
14. State Statistics Service. <https://www.ukrstat.gov.ua/>. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (accessed 14.02.2025).
15. Yaheliuk, S., Fomych, M., & Rechun, O. (2024). Global market trends of grain and industrial crops. *Commodity Bulletin*, 17(1), 134-145. doi: 10.62763/ef/1.2024.134. (date of access: 02.02.2025).
16. Stark N. M., Matuana L. M. Trends in sustainable biobased packaging materials: a mini review. *Materials Today Sustainability*. 2021. Vol. 15. P. 100084. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2021.100084> (date of access: 14.02.2025).
17. Berezovsky Y. V. Application of New Technical Decisions in the Industrial flax Production. *Science and innovation*. 2016. Vol. 12, no. 4. P. 51-68. URL: <https://doi.org/10.15407/scin12.04.051> (date of access: 14.02.2025).

О.А. Мікуліч, Т.В. Фурс, Н.Ю. Семенишин, О.І. Гулай, В.Я. Шемет
Луцький національний технічний університет

ВПЛИВ СИЛІКОНОВОЇ ДОБАВКИ НА СТРУКТУРУ І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПІНОПОЛІУРЕТАНІВ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Різноманітність застосування пінополіуретанів (ППУ) є причиною того, що вивчення зв'язків між їх структурою і властивостями в даний час є популярною темою досліджень серед науково-дослідних інститутів і компаній. Тому такий напрямок досліджень ППУ, як модифікування, нині

має продовження, і ці розробки затребувані щодо реалізації або покращення окремих практичних рішень у застосуванні пінополіуретанів.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

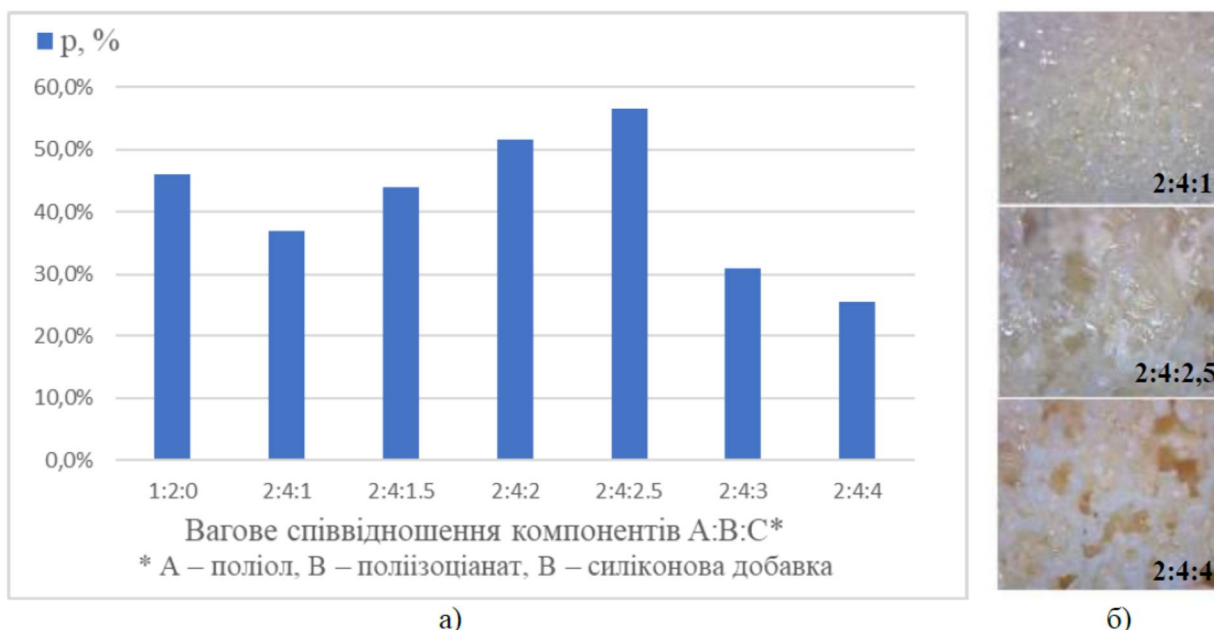


Рис. 1. Пористість (а) та мікроструктура ППУ (×30), модифікованого силіконом (б)

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

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

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

При подальшому збільшенні навантажень лінійні залежності між силою стиску і деформаціями зразків порушуються. Деформації зростають значно швидше від навантаження. Для усіх дослідних зразків фіксується зона загальної текучості. Втім, значення межі текучості ППУ

залежить від вмісту каучукової добавки (дані представлені у таблиці 5). Зі збільшенням вмісту силікону від 1 до 4 вагових часток у суміші компонентів значення межі текучості поліуретанової піни зростає в межах 1,23-2,34 МПа.

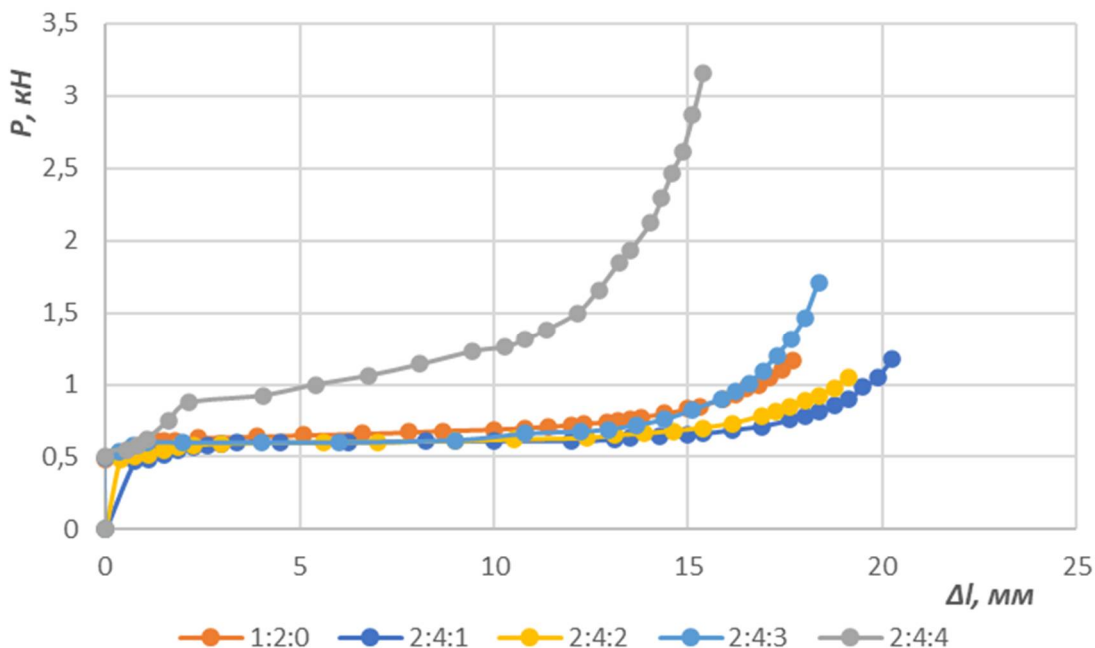


Рис. 2. Діаграми навантаження дослідних зразків ППУ

За аналізом деформаційної поведінки зразків ППУ при статичному стисканні встановлено, що збільшення вмісту силіконової добавки призводить також до підвищення твердості і крихкості та зниження пластичності ППУ, що особливо виражено при вмісті силікону більше 2 мас.ч. Зовнішній вигляд стиснених зразків ППУ в порядку зростання мас. ч. силікону 0, 1, 1,5, 2, 2,5, 3, 4 представлені на рис. 3.



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

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

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

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

Механічні та міцнісні характеристики модифікацій пінополіуретану

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

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

Висновки

1. Встановлено, що при модифікуванні ППУ добавка силікону входить у структуру піноматеріалу гетерогенно, утворюючи самостійну фазу.

2. Модифікування силіконом призводить до зміни мікроструктури ППУ. При цьому відбувається видозміна морфології пор від сферичної форми комірок до довільної асиметричної та зміна величини пористості матеріалу. Чим більший вміст силікону, тим більш виражена така видозміна структури матеріалу.

3. Зі збільшенням частки силікону кількість відкритих пор в отриманій піні збільшується. Однак, у цьому випадку товщина стінок комірок пор збільшується, що сприяє зміцненню отриманого матеріалу. У випадку високого вмісту силіконової добавки (від 2 до 4 вагових часток) підвищується твердість та крихкість піноматеріалу.

4. Збільшення частки модифікатора в поліол-ізоціанатній суміші компонентів, поряд зі збільшенням міцності та механічних характеристик, призводить до зниження пластичних характеристик піноматеріалів.

5. Модифікація пінополіуретанів силіконовою добавкою в оптимальному співвідношенні компонентів дозволяє отримати піноматеріали з вищими значеннями механічних та міцнісних характеристик й з іншим типом пористості (переважно змішаний тип пористості) порівняно з вихідним немодифікованим матеріалом.

6. Підходи, описані в роботі, можуть бути використані для виготовлення конструкційних елементів з піноматеріалів із заданими характеристиками.

Список використаних джерел

1. Ates, M., Karadag, S., Eker, A. A., & Eker, B. (2022). Polyurethane foam materials and their industrial applications. *Polymer International*, 71(10), 1157-1163. DOI: [10.1002/pi.6441](https://doi.org/10.1002/pi.6441)
2. Т.В. Фурс, О.В. Сад, О.А. Мікуліч, О.І. Гулай, В.Я. Шемет. Технологічні аспекти одержання пінополіуретану способом заливки. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2024, № 78. С. 37-42. <https://doi.org/10.36910/775.24153966.2024.78.5>
3. Gama, N. V., Ferreira, A., & Barros-Timmons, A. (2018). Polyurethane Foams: Past, Present, and Future. *Materials*, 11(10), 1841. <https://doi.org/10.3390/ma11101841>
4. Stanzione, M., Oliviero, M., Cocco, M., et al. Tuning of polyurethane foam mechanical and thermal properties using ball-milled cellulose, *Carbohydrate Polymers*, 231, 2020, 115772, <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115772>
5. Baferani, A.H., Keshavarz, R., Asadi, M. and Ohadi, A.R. (2018), Effects of Silicone Surfactant on the Properties of Open-Cell Flexible Polyurethane Foams. *Adv. Polym. Technol.*, 37: 71-83. <https://doi.org/10.1002/adv.21643>
6. Kosmela P., Zedler L., Formela K., Haponiuk J., Piszczyk L. The latest developments in the field of polyurethane foams containing inexpensive and environmentally friendly modifiers. *J CCT*. Vol. 10, No. 4(s), 2016, pp. 571 – 580. <https://doi.org/10.23939/chcht10.04si.571>
7. Pott R.W., Howe C.J., Dennis J.S. The purification of crude glycerol derived from biodiesel manufacture and its use as a substrate by *Rhodospseudomonas palustris* to produce hydrogen. *Bioresour Technol.* 2014;152:464-470. doi:10.1016/j.biortech.2013.10.094

8. Hejna A., Kosmela P., Formela K. et al.: Potential applications of crude glycerol in polymer technology—Current state and perspectives. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 2016, 66, 449-475. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.020>
9. Xie J., Hse C., Shupe T. et al. Extraction and characterization of holocellulose fibers by microwave-assisted selective liquefaction of bamboo. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2014, 131, 40207. <https://doi.org/10.1002/app.43394>
10. Xiu, S., Shahbazi, A., Wallace, C.W., Wang, L., & Cheng, D. (2011). Enhanced bio-oil production from swine manure co-liquefaction with crude glycerol. *Energy Conversion and Management*, 52, 1004-1009.
11. Gayathri R., Vasanthakumari R. and Padmanabhan C. Sound absorption, Thermal and Mechanical behavior of Polyurethane foam modified with Nano silica, Nano clay and Crumb rubber fillers. *Int. J. Eng. Sci.*, 2013, 4, 302.
12. Guide, P. MDI and TDI: Safety, Health and the Environment. A Source Book and Practical Guide; John Wiley & Sons Ltd.: New York, NY, USA, 2003; ISBN 0471958123.
13. Shufen, L.; Zhi, J.; Kaijun, Y.; Shuqin, Y.; Chow, W.K. Studies on the thermal behavior of polyurethanes. *Polym. Plast. Technol. Eng.* 2006, 45, 95–108.
14. Wypych, G. Handbook of Foaming and Blowing Agents; ChemTec Publishing: Toronto, ON, Canada, 2017.
15. Thirumal, M., Khastgir, D., Singha, N.K., Manjunath, B.S. and Naik, Y.P. (2008), Effect of foam density on the properties of water blown rigid polyurethane foam. *J. Appl. Polym. Sci.*, 108: 1810-1817. <https://doi.org/10.1002/app.27712>
16. Mikulich O.A., Zaiakin D.K. Porus material software analysis. *Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi*. Lutsk, LNTU. 2024, V. 21. C. 121-127.

І. С. Кондіус, Л. Ю. Федік, Т. Ю. Голіков
Луцький національний технічний університет

АПАРАТНІ ПЛАТФОРМИ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ БПЛА: ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТА ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО РІШЕННЯ

У статті розглядаються найбільш оптимальні апаратні платформи для керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА). Аналізуються ключові аспекти вибору контролерів польоту, включаючи продуктивність, підтримку периферійних пристроїв, енергоспоживання та сумісність із системами реального часу. Особливу увагу приділено стабільності живлення та можливостям інтеграції з датчиками, камерами й комунікаційними модулями. Оцінюється придатність платформ ESP32, Teensy 4.1 та STM32 «Blue Pill» для складних дронів, порівняно з альтернативними рішеннями, такими як Raspberry Pi, Arduino Uno та BeagleBone Black. Робиться висновок щодо необхідності якісного проєктування живлення для забезпечення стабільності й ефективності роботи дрона.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, керуюча плата, стабільність живлення, RTOS, периферія, ШІМ, датчики, телеметрія, ESP32, Teensy 4.1, STM32, Raspberry Pi, Arduino, енергоспоживання, розширюваність, польотна система.

I.S. Kondius, L. Yu. Fedik, T. Yu. Holikov

HARDWARE PLATFORMS FOR AUTOMATED UAV CONTROL: COMPARATIVE ANALYSIS AND OPTIMAL SOLUTION SELECTION

This article examines the most optimal hardware platforms for controlling unmanned aerial vehicles (UAVs). It explores essential factors in selecting flight controllers, including computational performance, peripheral support, energy efficiency, and real-time operating system (RTOS) compatibility. Special emphasis is placed on power stability, integration with sensors, cameras, and communication modules, and ensuring seamless operation in challenging conditions. The suitability of ESP32, Teensy 4.1, and STM32 «Blue Pill» for advanced drone applications is assessed, comparing them with alternatives like Raspberry Pi, Arduino Uno, and BeagleBone Black. The analysis highlights the advantages and limitations of each platform in terms of power management, connectivity, and responsiveness. The conclusion underscores the necessity of proper power system design, including high-quality voltage regulators such as UBEC and PDB, to ensure flight stability and efficiency.

Keywords: unmanned aerial vehicle, flight controller, power stability, RTOS, peripherals, PWM, sensors, telemetry, ESP32, Teensy 4.1, STM32, Raspberry Pi, Arduino, energy efficiency, expandability, flight system.

Постановка проблеми. У сучасних умовах розвитку безпілотних літальних апаратів (БПЛА) особливу роль відіграє автоматизована система керування, що забезпечує стабільність польоту, продуктивність, ефективне енергоспоживання та інтеграцію з периферійними пристроями. Для досягнення оптимальної роботи таких систем необхідно вибрати апаратну платформу, яка відповідатиме технічним вимогам та забезпечуватиме реалізацію алгоритмів керування в реальному часі.

Основною проблемою є збалансування обчислювальної потужності, енергоефективності та розширюваності платформи. В умовах автоматизованого керування критично важливо враховувати сумісність апаратної частини з операційними системами реального часу (RTOS), що забезпечують стабільну роботу польотних алгоритмів, а також підтримку високошвидкісної обробки даних від сенсорів та модулів зв'язку [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останні дослідження в галузі бортового обладнання та методів керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА) охоплюють важливі аспекти, які впливають на ефективність та надійність їх роботи.

Дослідження військової академії Одеси (Маміч В. та ін., 2023) зосереджується на аналізі конструкції та функціональності систем навігації, телеметрії, зв'язку та управління. Значну увагу приділено стабільності живлення та інтеграції сенсорів, що забезпечує коректну роботу апаратів у складних умовах експлуатації [2].

Робота Державного науково-дослідного інституту авіації (Самойленко О. В. та ін., 2021) досліджує механізми управління групами БПЛА, включаючи алгоритми автоматичного керування та координацію з пілотованими апаратами. Визначено ключові аспекти ефективності групового польоту, особливо щодо синхронізації та обміну даними між дронами [3].

У публікації дослідників Львівської політехніки (Микийчук М. М., Зіганшин Н. С., 2019) акцентується увага на методах автономної навігації та стандартизації управління. Розглянуто перспективи розвитку технологій, що сприятиме підвищенню ефективності безпілотних систем [4].

Актуальні наукові роботи та розробки у сфері автоматизованого керування безпілотними літальними апаратами (БПЛА) акцентують увагу на ролі операційних систем реального часу (RTOS), що забезпечують стабільність і продуктивність автономних польотів.

Компанія Espressif представила ESP-Drone, що реалізує прошивку для квадрокоптерів на базі ESP32 ([Espressif Systems](#)). Проект підтримує стабілізацію, утримання висоти, позиціонування, а також інтеграцію з мобільними додатками та джойстиками. Завдяки використанню FreeRTOS платформа забезпечує точне управління та швидку обробку даних від сенсорів і модулів зв'язку [5].

Обстеження інтеграції ядра FreeRTOS на платформі Teensy 4.1, яка базується на ARM Cortex-M7 ([Sandmann T., GitHub](#)) зосереджені на налаштуванні параметрів ядра, оптимізації енергоефективності та підвищенні продуктивності у реальному часі, що критично важливо для керування автономними БПЛА [6].

Ці дослідження демонструють тенденцію до застосування RTOS у керуванні безпілотними апаратами, що сприяє підвищенню стабільності польотних алгоритмів, ефективності обробки даних та розширенню можливостей інтеграції з периферійними пристроями.

Формулювання цілей статті. Метою статті є порівняльний аналіз апаратних платформ для автоматизованого керування БПЛА, визначення найбільш збалансованих рішень з точки зору продуктивності, енергоспоживання та сумісності з RTOS. Також розглядається роль стабільного живлення та способи його оптимізації у польотних системах.

Процес створення індивідуального дрона передбачає ретельний вибір апаратної платформи, адже саме вона визначає швидкість реагування системи, можливість інтеграції датчиків, комунікаційні функції та загальну стабільність польоту.

Залежно від вимог до продуктивності, керування в реальному часі та можливостей бездротового зв'язку, розробники обирають різні типи плат. Деякі платформи забезпечують високий рівень обчислювальної потужності та сумісність із периферійними пристроями – такими як GPS, інерційні вимірювальні одиниці (IMU) чи драйвери двигунів, що є ключовими компонентами в повітряній робототехніці [7; 8].

Неправильний вибір апаратної платформи може призвести до затримок в обробці даних, нестабільності польоту або обмежень у подальшій модифікації та розширенні функціоналу дрона. Враховуючи широкий вибір доступних апаратних рішень – від Arduino для початкового рівня до STM32 та ESP32 для професійних проєктів – важливо провести порівняльний аналіз їхніх характеристик.

Для успішної інтеграції керуючої плати у саморобний дрон необхідно враховувати технічні характеристики периферійних пристроїв, із якими вона взаємодіє. Регулятори швидкості двигунів (ESC) підтримують різні протоколи керування, такі як PWM, OneShot або DShot. Вони працюють у широкому діапазоні напруг – від 5 до 25 вольт, а їхні струмові показники можуть сягати 20–60 ампер, забезпечуючи плавне й точне регулювання обертів безщіткових двигунів. Важливо, щоб плата керування могла передавати сигнали до ESC у відповідному форматі для коректного управління [7; 9].

Інерційні вимірювальні блоки (IMU), що складаються з тривісних гіроскопів, акселерометрів і магнітометрів, забезпечують критично важливі дані про орієнтацію та рух дрона. Найпоширеніші модулі, такі як MPU-6050 або MPU-9250, використовують інтерфейси I2C або SPI і мають частоту оновлення до 1000 Гц, що дозволяє отримувати точні та швидкі показники для стабілізації польоту.

Для визначення положення у просторі використовуються GPS-модулі, які зазвичай працюють через UART або I2C інтерфейси. Популярні моделі, такі як Ublox NEO-6M або NEO-M8N, забезпечують точність позиціонування близько 2,5 метра і підтримують оновлення координат з частотою від одного до десяти разів на секунду. Вони також сумісні з супутниковими системами GLONASS, Galileo та SBAS, що дозволяє підвищити надійність сигналу.

Камери часто інтегруються у дрони для потокової передачі відео та розпізнавання об'єктів. Модулі на базі OV2640 або Raspberry Pi Camera Module V2 підключаються через SPI, USB або CSI інтерфейси та можуть забезпечувати роздільну здатність від VGA до HD. Це дозволяє

використовувати їх як для базового відеоспостереження, так і для складних систем обробки зображень.

Телеметричні системи, що застосовуються для дистанційного контролю та передачі даних, зазвичай працюють на частотах 433 МГц або 2,4 ГГц і використовують протоколи MAVLink, FrSky чи SBUS. Вони підключаються через UART або SPI і можуть забезпечувати зв'язок на відстані від кількох сотень метрів до декількох кілометрів, що є критично важливим для безпечного керування дроном на великій дистанції [1-4; 8-10].

Таким чином, вибір плати керування для кастомного дрона має враховувати не лише її власні технічні можливості, а й сумісність із ключовими периферійними пристроями. Збалансоване поєднання апаратних характеристик та периферії гарантує надійну роботу, стабільність польоту та ефективне виконання поставлених завдань, що особливо важливо при створенні власної безпілотної системи.

У рамках дослідження для порівняння було обрано кілька найбільш поширених плат розробки, орієнтованих на їхню актуальність у сфері самостійного конструювання дронів.

До аналізу були обрані найпоширеніші платформи, що мають актуальність у сфері самостійного конструювання дронів.

Зокрема: 1. Arduino Uno – популярна плата початкового рівня, що відзначається простотою використання та широкою популярністю в освітньому середовищі;

2. ESP8266 та ESP32 – мікроконтролери з інтегрованим бездротовим зв'язком, що забезпечують вдале поєднання вартості та обчислювальної продуктивності;

3. Teensy 4.1 – високопродуктивна плата з підтримкою керування в режимі реального часу, що підходить для систем із підвищеними вимогами до швидкості обробки сигналів;

4. STM32 «Blue Pill» – недорога плата на базі мікроконтролера промислового класу, яка часто застосовується в системах керування польотом;

5. Raspberry Pi 4 – одноплатний комп'ютер із високою обчислювальною потужністю, розширеними можливостями підключення периферії та підтримкою ОС Linux;

6. BBC micro:bit – навчальна платформа з вбудованими датчиками та спрощеним середовищем програмування, орієнтована на освітні цілі;

7. Particle Photon – мікроконтролер, оптимізований для IoT-рішень із хмарною інтеграцією;

8. BeagleBone Black – потужна плата для вбудованих систем, що підтримує запуск Linux і пропонує широкі комунікаційні можливості.

Кожна з представлених платформ має власні переваги та обмеження, що робить їх доцільними для порівняльної оцінки у сфері розробки безпілотних літальних апаратів.

Простота налаштування та інтеграції є одним із ключових чинників у розробці дронів, особливо в індивідуальних або експериментальних проєктах, де важливими залишаються швидке прототипування та надійне з'єднання компонентів.

Плати, що полегшують підключення основних модулів – таких як регулятори швидкості, сенсори та комунікаційні інтерфейси – дають змогу скоротити час підготовки системи, зменшити ймовірність помилок у схемі з'єднань та зосередитися на розробці логіки польоту й етапах тестування. Такий рівень доступності особливо важливий для окремих розробників або невеликих команд, які працюють в умовах обмеженого часу та ресурсів.

Arduino Uno легко налаштувати за допомогою Arduino IDE та має просту систему контактів, однак підключення кількох компонентів, специфічних для дронів (таких як регулятори рівня електроніки, гіроскопи та приймачі радіокерування), потребує зовнішніх бібліотек та ручного налаштування. Це зумовлено відсутністю вбудованих протоколів зв'язку, таких як мультиплексування CAN [12].

ESP8266 трохи складніший у налаштуванні, ніж Arduino Uno, оскільки часто потребує драйверів USB-to-Serial та налаштувань Wi-Fi. Він підтримує базову інтеграцію з датчиками та регуляторами рівня електроніки, проте обмежена кількість контактів та спільна функціональність ускладнюють підключення та налаштування програмного забезпечення для багатомодульних дронів [13].

ESP32 пропонує вбудовані Wi-Fi та Bluetooth і легко програмується через середовища Arduino або ESP-IDF. Він підтримує широкий спектр датчиків та модулів, а двоядерна архітектура спрощує керування польотом, телеметрією або потоками камер, мінімізуючи конфлікти на рівні коду [14].

Teensy 4.1 добре інтегрується через Arduino IDE та підтримує великий набір бібліотек датчиків, проте його висока швидкість та численні функції можуть здатися складними для початківців. Водночас він пропонує виняткову гнучкість для розширеної інтеграції з регуляторами рівня (ESC), інерційними вимірювальними блоками (IMU) та GPS-пристроями, особливо коли потрібна точність синхронізації [15].

STM32 «Blue Pill» має круту криву навчання, що вимагає використання таких інструментів, як STM32CubeIDE або PlatformIO з прошивкою ST-Link. Хоча ця плата дуже потужна та модульна, початкове налаштування (завантажувач, драйвери, прошивка) часто є перешкодою для звичайних користувачів або швидкого створення прототипів [16].

Raspberry Pi 4 працює під управлінням повноцінної операційної системи, тому налаштування включає прошивку SD-карти та конфігурацію Linux, що є складнішим порівняно з мікроконтролерними платами. Підключення ESC або гіроскопів потребує програмування GPIO або розширення UART, що робить його найкращим співпроцесором, а не контролером польоту [17].

BBC micro:bit орієнтований на початківців і відзначається простотою налаштування через редактори MakeCode або Python, проте він має дуже обмежену кількість контактів і не підтримує стандартні інтерфейси зв'язку для компонентів дрона. Це значно ускладнює серйозну інтеграцію без додаткових роз'ємів або адаптерів.

Particle Photon орієнтований на хмарні технології та легко налаштовується через Particle Web IDE або CLI, однак ця простота досягається ціною гнучкості. Локальна інтеграція з компонентами дрона обмежена і зазвичай вимагає спеціальної прошивки, а для уникнення проблем із затримкою її потрібно використовувати лише локально.

BeagleBone Black потребує конфігурації Linux та часто складного налаштування периферійних пристроїв (накладання дерева пристроїв, конфігурація плащів). Він потужний, але інтеграція з компонентами реального часу, такими як ESC та датчики, займає багато часу без глибоких знань Linux та апаратного забезпечення [18-20].

Різні мікроконтролери та одноплатні комп'ютери мають різний ступінь придатності до використання у системах безпілотних літальних апаратів.

Arduino Uno підходить для простих проєктів, адже вирізняється легкістю освоєння, проте має обмеження через відсутність вбудованих протоколів бездротового зв'язку.

ESP8266 та ESP32 забезпечують інтегровану Wi-Fi-комунікацію, однак ESP32, завдяки двоядерній архітектурі та більшій обчислювальній потужності, краще пристосований до складних задач.

Teensy 4.1 та STM32 відзначаються високою продуктивністю та точністю роботи у режимі реального часу, проте їх використання потребує глибшого розуміння апаратних інтерфейсів.

Raspberry Pi 4, BeagleBone Black та Particle Photon частіше застосовуються як співпроцесори або периферійні вузли через затримки в роботі з низькорівневим обладнанням або складність первинного налаштування [12; 15; 17].

У свою чергу, BBC micro:bit найкраще підходить для освітніх цілей, однак не забезпечує достатнього рівня продуктивності чи функціональної гнучкості для практичного використання у дронах.

Одним із ключових чинників у процесі створення індивідуального безпілотника є сумісність апаратних компонентів. Контролер польоту має безперешкодно взаємодіяти з такими елементами, як регулятори швидкості (ESC), інерційні вимірювальні модулі (IMU), GPS-приймачі, модулі радіокерування та камери.

Недостатня підтримка або несумісність між платою та периферією може спричинити перебої у зв'язку, нестабільну поведінку дрона під час польоту або навіть фізичне пошкодження обладнання.

Вибір плати з широкою апаратною сумісністю дає змогу покращити інтеграцію, зменшити потребу у додаткових адаптерах та спростити розробку програмного забезпечення. Це, у свою чергу, підвищує надійність і безпеку експлуатації пристрою.

Arduino Uno підтримує базову широтно-імпульсну модуляцію (ШИМ) для керування двигунами та прості датчики I2C/SPI, такі як гіроскопи або GPS-модулі. Однак його обмежені можливості вводу/виводу та пам'яті часто вимагають зовнішніх драйверів, таких як PCA9685, для керування більш ніж двома двигунами або складними сенсорними масивами [12].

ESP8266 пропонує обмежені можливості GPIO та ШІМ, що робить його придатним лише для дуже простих дронів. Він підтримує I2C та SPI, але не має спеціальної підтримки камери і має проблеми з одночасним підключенням компонентів [13].

ESP32 має високу сумісність із компонентами дронів, пропонуючи кілька каналів ШІМ, апаратні таймери, підтримку IMU та GPS через I2C/SPI/UART. Він також має вбудовану інтеграцію камери для модулів, таких як OV2640, що робить його ідеальним як для керування польотом, так і для телеметрії [14].

Teensy 4.1 вирізняється великою кількістю високоточних ШІМ-виходів, а також надійною підтримкою датчиків через UART, I2C та SPI. Крім того, він сумісний із протоколами RC, такими як SBUS та PPM. Обмежена підтримка камер доступна через USB або спеціальне підключення [15].

STM32 «Blue Pill» пропонує потужні апаратні таймери та ШІМ, вбудовану підтримку всіх поширених датчиків дронів та GPS через кілька інтерфейсів. Також він сумісний із передовими протоколами RC, що робить його відмінним варіантом для систем керування польотом у реальному часі [16].

Raspberry Pi 4 не має вбудованої ШІМ для керування двигуном, але підтримує більшість датчиків через I2C, SPI та UART. Він особливо потужний для візуальної обробки завдяки вбудованій підтримці камери CSI, хоча керування в реальному часі потребує зовнішніх модулів та ретельного налаштування ОС [17].

BBC micro:bit забезпечує мінімальний інтерфейс ШІМ та датчиків і має обмежену підтримку драйверів двигунів. Відсутність входу для камери робить його непридатним для дронів, окрім демонстраційних проєктів у навчальних класах [21].

Particle Photon підтримує базові протоколи ШІМ та стандартні протоколи датчиків, але його хмарно-орієнтований дизайн та обмежена кількість GPIO роблять його непрактичним для прямого керування двигуном або кількома датчиками в автономних дронах [22].

BeagleBone Black має розширені можливості ШІМ та вводу/виводу, що дозволяє інтегрувати двигуни й датчики. Він також підтримує камери через USB або модулі розширення, хоча складність налаштування та архітектура на базі Linux створюють труднощі для виконання завдань реального часу [23].

ESP32, STM32 та Teensy 4.1 вважаються найбільш функціональними платформами для реалізації систем керування польотом безпілотною. Вони забезпечують розширені можливості керування завдяки широтно-імпульсній модуляції (ШІМ), підтримують широкий спектр сенсорів та сумісні з камерами, що є важливим для автономних функцій.

Натомість Arduino Uno та ESP8266 мають обмежену кількість входів/виходів та менш гнучкі можливості підключення, що ускладнює їх використання у складніших конфігураціях. Raspberry Pi 4 демонструє високу продуктивність у задачах комп'ютерного зору та обробки зображень, проте поступається в задачах реального часу через відсутність детермінованої затримки.

BBC micro:bit та Particle Photon мають обмежені апаратні ресурси й орієнтовані переважно на навчальні або IoT-проєкти, що знижує їхню придатність для автономного дронобудування. BeagleBone Black, хоча й пропонує значну обчислювальну потужність, характеризується складністю конфігурації та потребою в глибоких знаннях операційної системи [12; 14-17; 22-23].

Розширюваність і модульність є ключовими аспектами при створенні дронів на замовлення, оскільки вони забезпечують адаптацію системи до змінних вимог проєкту. Модульна архітектура спрощує інтеграцію або заміну компонентів – зокрема GPS-модулів, додаткових сенсорів, камер чи телеметричних систем – без потреби повного перегляду всієї апаратної конфігурації.

Така гнучкість не лише полегшує впровадження майбутніх оновлень, але й спрощує процес налагодження, технічного обслуговування та масштабування від базового прототипу до складної багатофункціональної платформи.

Arduino Uno пропонує базові можливості розширення за допомогою екранів та перемичок, однак обмежена кількість контактів GPIO та пам'яті зменшує кількість модулів (наприклад, датчиків, дисплеїв, світлодіодів), які можна підключити одночасно без мультиплексування [12].

ESP8266 має невелику кількість GPIO та часто використовує спільні контакти між функціями (наприклад, флеш-пам'ять та I²C), що значно обмежує можливості розширення. Він краще підходить для мінімальних налаштувань або використання в парі з розширювачами вводу/виводу [13].

ESP32 є високомодульною платформою з великою кількістю контактів GPIO, кількома шинами I²C та SPI, апаратним ШІМ, а також вбудованою підтримкою Bluetooth та Wi-Fi. Вона дозволяє легко інтегрувати додаткові модулі, такі як дисплеї, телеметричні радіостанції та датчики навколишнього середовища [14].

Teensy 4.1 забезпечує велику кількість цифрових та аналогових контактів вводу/виводу, кілька UART та сумісність із бібліотеками Arduino, що робить її однією з найбільш розширюваних платформ для прецизійних дронів та мультисенсорних систем [15].

STM32 «Blue Pill» підтримує широке розширення периферійних пристроїв через I²C, SPI, UART та CAN, проте не має стандартизованих розширень plug-and-play. Вона вимагає глибшого налаштування прошивки, але може масштабуватися до складних модульних архітектур дронів [16].

Raspberry Pi 4 пропонує USB, GPIO, I²C, SPI, UART, CSI/DSI та 40-контактний роз'єм, підтримуючи широкий спектр доповнень та HAT. Це включає LiDAR, камери, модулі телеметрії та навіть співпроцесори, хоча розподіл живлення та керування GPIO потребують особливої обережності [17].

BBC micro:bit розроблений для базового розширення освітніх можливостей за допомогою периферійних роз'ємів та плат. Він обмежений простими доповненнями, такими як світлодіоди або невеликі датчики, і не підходить для модульних систем дронів [121].

Particle Photon дозволяє помірне розширення за допомогою роз'ємів та хмарно-сумісних бібліотек, проте має обмежену кількість контактів і краще підходить для завдань Інтернету речей, ніж для складного розширення в реальному часі з кількома модулями, пов'язаними з польотом [22].

BeagleBone Black має велику кількість контактів вводу/виводу та вбудовану підтримку складних розширень за допомогою плат розширення (кейпів), що робить його дуже модульним. Однак його складність та накладні витрати Linux можуть ускладнити реалізацію цього потенціалу в умовах польоту [23].

Різні апаратні платформи мають варіативну підтримку розширення. ESP32, Teensy 4.1 та Raspberry Pi 4 забезпечують високу гнучкість завдяки великій кількості входів/виходів, підтримці інтерфейсів (I²C, SPI, UART) та сумісності з численними зовнішніми модулями.

Натомість Arduino Uno та ESP8266 обмежені кількістю доступних пінів, обсягом пам'яті та обчислювальними ресурсами, що ускладнює масштабування проєкту. STM32 та BeagleBone Black мають значний потенціал розширення та масштабування, проте вимагають глибшого розуміння архітектури та складнішого програмного налаштування.

BBC micro:bit та Particle Photon більше орієнтовані на навчальні або хмароорієнтовані проєкти з обмеженою кількістю підключених модулів, тому не підходять для комплексних систем із багатокомпонентною структурою [12-15; 17].

Підтримка спільноти та якісна документація відіграють ключову роль у розробці дронів на замовлення, особливо на етапах інтеграції численних апаратних компонентів і датчиків.

Платформи з активною спільнотою користувачів та детальною технічною документацією забезпечують доступ до прикладів реалізації, бібліотек, інструкцій із підключення, а також рішень типових проблем. Така підтримка значно скорочує час розробки, знижує поріг входження та полегшує усунення непередбачуваних технічних складностей.

Для індивідуальних розробників або малих команд подібна інфраструктура знань часто є вирішальним фактором, що відрізняє успішний функціональний прототип від проєкту, який зупинився на етапі налагодження [7].

Arduino Uno має одну з найбільших та найактивніших спільнот у світі вбудованих систем, із тисячами навчальних посібників, бібліотек та форумних тем, що охоплюють усе: від базового керування двигуном до повноцінних проєктів дронів. Це робить платформу ідеальним вибором для початківців та викладачів [12].

ESP8266 підтримується активною онлайн-спільнотою, що має широку документацію, бібліотеки та проєкти з відкритим кодом. Хоча він менш досконалий порівняно з Arduino, на форумах таких як GitHub та Stack Overflow, доступно багато посібників та виправлень, пов'язаних із дронами [13].

ESP32 має переваги як від офіційної документації Espressif, так і від активної спільноти розробників. Підтримка є широкою, включаючи навчальні посібники, орієнтовані на дрони,

прикладі завдань у реальному часі, а також повну інтеграцію прошивки автопілота, наприклад за допомогою форків FreeRTOS або ArduPilot [14].

Teensy 4.1 має спеціалізовану та обізнану базу користувачів, чудову офіційну документацію та добре підтримуваний форум. Платформа сумісна з Arduino IDE, а бібліотеки, що надаються спільнотою, часто відповідають або перевершують офіційні за якістю [15].

STM32 «Blue Pill» має сильну підтримку у спільнотах вбудованих систем та аматорів, проте налаштування може бути складним через невідповідність сторонніх навчальних посібників. Офіційна документація від ST є вичерпною, але складною, часто вимагаючи попереднього досвіду для навігації [16].

Raspberry Pi 4 не має собі рівних за розміром спільноти серед одноплатних комп'ютерів, з незліченною кількістю навчальних посібників, бібліотек та інструментів plug-and-play. Хоча він не є мікроконтролером, його широко використовують у дронах для супутніх завдань, таких як комп'ютерний зір та навігація, завдяки багатій документації [17].

BBC micro:bit має відмінну документацію для освітніх цілей, із великою кількістю матеріалів для початківців та планами уроків. Проте йому бракує глибини для специфічних застосувань у дронах або розширеного апаратного інтерфейсу [21].

Particle Photon має офіційну документацію, зосереджену на хмарній інтеграції, та активну, але меншу спільноту розробників. Хоча допомога доступна для загальних проєктів Інтернету речей, ресурсів, специфічних для дронів, мало [22].

BeagleBone Black має сильну, але нішеву підтримку, із детальною офіційною документацією та деякими академічними й промисловими варіантами використання. Спільнота менша та більш технічна, що ускладнює для аматорів пошук доступних матеріалів, пов'язаних із дронами [23].

Arduino Uno має найбільшу підтримку спільноти, що робить цю платформу особливо привабливою для початківців. ESP32 також користується активною підтримкою, зокрема у спільнотах, що займаються розробкою дронів.

Teensy 4.1 та STM32 мають менші, проте більш спеціалізовані та технічно кваліфіковані спільноти користувачів, що забезпечує глибоку технічну підтримку, орієнтовану на вбудовані системи та прецизійні проєкти.

Raspberry Pi 4 вирізняється широкою базою навчальних ресурсів, орієнтованих на задачі вищого рівня, зокрема обробку зображень та складні обчислювальні процеси.

Інші платформи, такі як BBC micro:bit та Particle Photon, мають обмежену або нішеву підтримку, що ускладнює їх використання в контексті дронобудування [12; 15-17; 19].

Вибір апаратної платформи для кастомного дрона значною мірою залежить від вартості та доступності обладнання, адже ці фактори впливають на масштабованість проєкту та його економічну ефективність.

Доступні за ціною плати знижують фінансові ризики, пов'язані з відмовами обладнання або багаторазовим ітеративним проєктуванням. Це робить експерименти доступнішими для розробників з обмеженим бюджетом. Крім того, широка доступність дозволяє оперативно придбати запасні частини, що є критично важливим у випадках термінового складання або польових ремонтів.

У таких регіонах, як Україна та Європа, місцеві ціни та терміни доставки можуть суттєво впливати на швидкість реалізації проєкту та його загальну рентабельність [2; 7-8].

Arduino Uno: широко доступний як в оригінальному вигляді (500–800₴ / €12–€18), так і в клонах (250–400₴ / €6–€10). Продається на Prom.ua, AliExpress, TME та у місцевих реселерів освітнього обладнання [24-26].

ESP8266 (NodeMCU/Wemos D1 Mini): один із найдешевших варіантів (100–180₴ / €2,5–€5), доступний на AliExpress, MakersLab та в магазинах ЄС для любителів.

ESP32: коштує від 180 до 350₴ / €5–€9, залежно від типу модуля (ESP32-WROOM, WROVER тощо), доступний на Prom.ua, TME та RadioChip.

Teensy 4.1: має помірну ціну (1000–1300₴ / €24–€32). Хоча ця плата не так широко представлена в місцевих магазинах, її можна придбати через PJRC, Mouser або Digi-Key, з швидкою доставкою з ЄС.

STM32 «Blue Pill»: дуже доступна (100–200₴ / €3–€6), часто постачається зі складів ЄС або AliExpress. Якість може варіюватися, але вона залишається одним із найкращих виборів за співвідношенням ціна-продуктивність для досвідчених користувачів.

Raspberry Pi 4 стабільно доступна, а її ціна варіюється від 2500 до 4000\$ / €55–€85 залежно від версії оперативної пам'яті (від 2 ГБ до 8 ГБ). Придбати можна на Brain, Prom.ua, а також у прямих постачальників з ЄС, таких як ThePiHut та Reichelt.

BBC micro:bit продається в Україні за 550–750\$ / €13–€18. Комплекти доступні через освітні дистриб'ютори та офіційні канали ЄС, хоча він не є оптимальним варіантом для використання у дронах.

Particle Photon коштує 550–800\$ / €14–€20, але його важко знайти локально. Найчастіше імпортується через дистриб'юторів Digi-Key або SparkFun у ЄС, проте рідко зустрічається в українських магазинах виробників.

BeagleBone Black має ціну 2200–3000\$ / €50–€70, залежно від версії та постачальника. Він доступний у ЄС через Mouser, Farnell, а іноді і через Prom.ua, хоча терміни доставки зазвичай довші.

Серед розглянутих платформи ESP8266 та STM32 «Blue Pill» є найдоступнішими, їх легко придбати на популярних маркетплейсах. Arduino Uno та ESP32 також широко представлені на ринку, пропонуючи великий вибір оригінальних і сумісних плат-клонів.

Натомість Teensy 4.1 та Particle Photon є менш поширеними і мають вищу ціну, тоді як Raspberry Pi 4 та BeagleBone Black відносяться до преміального сегменту, що ускладнює логістику та збільшує терміни доставки.

BBC micro:bit займає середній ціновий діапазон, але здебільшого орієнтований на освітні цілі, а не на серйозне застосування у дронах [24–26].

Стабільність роботи дронів у різноманітних умовах навколишнього середовища є критично важливою через високу динамічність експлуатації. Контролер польоту має забезпечувати надійне функціонування в умовах вібрації, коливань живлення та змін параметрів середовища, таких як температура та висота.

Окрім цього, обробка даних у режимі реального часу гарантує миттєву реакцію на керуючі сигнали, включаючи регулювання двигунів, інтеграцію датчиків та стабілізацію платформи. Якщо плата не відповідає цим вимогам, це може спричинити затримки в обробці, нестабільність польоту або навіть аварійні збої, що робить ці критерії визначальними при виборі обладнання для кастомних дронів [1].

Arduino Uno має низьке енергоспоживання, що робить його механічно придатним для використання на дронах. Однак йому бракує операційної системи реального часу (RTOS), а його обмежена швидкість обробки (16 МГц) може призвести до повільних або нестабільних циклів керування у складних сценаріях польоту [12].

ESP8266 також компактний та енергоефективний, проте чутливий до коливань живлення і не забезпечує справжньої обробки в реальному часі. Він не ідеально підходить для багатозадачності або точної синхронізації у польоті [13].

ESP32 є високоефективною платформою, розробленою із режимами низького енергоспоживання та стійкістю до електромагнітних перешкод. Підтримує двоядерну обробку та FreeRTOS, що робить його оптимальним вибором для завдань реального часу, таких як PID-регулювання, об'єднання датчиків та телеметрія, навіть під навантаженням процесора в повітрі [14].

Teensy 4.1 є однією з найкращих платформ для роботи в реальному часі завдяки високій швидкості (600 МГц), низькій затримці та легкій конструкції. Вона чудово підходить для точної стабілізації польоту та обробки даних датчиків у режимі реального часу. Однак через високу швидкість роботи вона вимагає стабільного живлення та ретельного заземлення [15].

STM32 «Blue Pill» – це надійна плата, здатна працювати в режимі реального часу завдяки програмуванню на голому залізі або використанню RTOS (наприклад, ChibiOS). Вона забезпечує точне керування часом, добре працює в умовах вібрації та може одночасно обробляти потоки даних від кількох датчиків, що робить її ідеальним вибором для вимогливих дронів [16].

Raspberry Pi 4–потужна платформа, проте вона не безпечна для роботи в реальному часі через операційну систему Linux. Плата енергоємна, важча та може знижувати продуктивність при нагріванні. Вона чудово підходить як супутня плата для завдань комп'ютерного зору або картографування, але ненадійна для прямого керування двигуном без зовнішніх мікроконтролерів [17].

BBC micro:bit є легким та енергоефективним, проте його обчислювальні можливості недостатні для роботи в реальному часі. Він здебільшого використовується для демонстрацій у класі або для надпростих дронів, таких як судна на повітряній подушці [21].

Щодо оцінки платформ для керування польотом у реальному часі, то Particle Photon є компактним та енергоефективним, проте не призначений для критичної продуктивності в реальному часі. Він може мати затримку під час повторного підключення до Wi-Fi або хмарних функцій, що ризиковано для систем польоту [22].

BeagleBone Black, як і Raspberry Pi 4, базується на Linux, але має PRU (програмовані пристрої реального часу), що робить його краще пристосованим для керування в режимі реального часу. Однак він відносно важкий і складний, тому найкраще підходить для великих дослідницьких платформ БПЛА, а не хобі-дронів [15].

Серед розглянутих платформ найбільш придатними для задач реального часу в управлінні дроном є ESP32, Teensy 4.1 та STM32 «Blue Pill», які забезпечують достатню обчислювальну потужність, підтримку RTOS (Real-Time Operating System) та мінімальні затримки.

Arduino Uno та ESP8266 підходять переважно для простих завдань і не справляються з високими навантаженнями в реальному часі.

Raspberry Pi 4 та BeagleBone Black, через використання загальнопризначених операційних систем, мають обмеження у задачах реального часу, але можуть ефективно виконувати допоміжні обчислювальні функції.

BBC micro:bit та Particle Photon не забезпечують достатньої стабільності та точності для керування польотом у складних сценаріях [12; 13; 17; 22; 23].

Стабільна та ефективна подача енергії є необхідною для безперебійної роботи всіх бортових систем дрона. Правильне керування живленням дозволяє уникати збоїв, підтримувати продуктивність платформи та гарантувати стабільність польоту.

Під час роботи дрона коливання напруги часто виникають при розгоні двигунів або різких маневрах, що може спричинити провали живлення та електричні шуми, здатні дестабілізувати чутливі компоненти. Обрана плата повинна витримувати такі умови або легко інтегруватися із зовнішніми стабілізаторами напруги та регуляторами живлення. Недостатнє керування живленням може призводити до скидання налаштувань, втрати зв'язку або критичних збоїв системи, тому важливо обирати плату з урахуванням енергетичних потреб дрона та характеристик акумуляторної батареї [10].

Arduino Uno приймає вхідну напругу 7–12 В через VIN та має вбудовану лінійну стабілізацію напруги. Вона стабільна для датчиків освітлення та логіки керування, проте не оптимізована для високоефективного використання батареї та може перегріватися при коливаннях навантаження або в енергоємних конфігураціях [12].

ESP8266 працює на внутрішній напрузі 3,3 В та дуже чутливий до стабільності живлення. Більшість модулів (наприклад, NodeMCU) мають вбудовані LDO, проте вони не справляються з раптовими стрибками напруги від двигунів. Тому ретельний розподіл та розв'язка живлення є необхідними, щоб запобігти падінню напруги під час польоту [13].

Під час оцінки стійкості до живлення та ефективності енергоспоживання ESP32 покращує стійкість до живлення, підтримуючи широкі діапазони вхідної напруги завдяки вбудованим регуляторам. Він має режими низького енергоспоживання та виявлення падіння напруги, що забезпечує кращу стабільність у польоті. Тим не менш, як і ESP8266, він виграє від зовнішньої стабілізації напруги. Це робить його хорошим вибором для дронів, які живляться від акумулятора, у поєднанні з надійною платою розподілу живлення (UBEC або PDB) [14].

Teensy 4.1 має високе енергоспоживання через потужний 600-МГц процесор, проте ефективно обробляє енергію завдяки внутрішньому імпульсному регулятору. Він потребує регульованого входу 5 В (не чистого LiPo) та має обмежену толерантність до нестабільного живлення. Для надійності польоту рекомендується живлення від спеціального 5-вольтового BEC [15].

STM32 «Blue Pill» працює при 3,3 В, проте не має надійного вбудованого регулятора. Він очікує стабільного зовнішнього живлення, наприклад, чистого понижувального перетворювача 5 В до 3,3 В. Високий шум або пульсації можуть спричинити збої системи, тому розподіл живлення має бути ретельно спроектований при використанні в дронах [16].

Raspberry Pi 4 має високе енергоспоживання (рекомендовано 5 В при 3 А) та дуже чутливий до падіння напруги. Він не може жити безпосередньо від акумулятора дрона без ефективного високострумного ВЕС. Раптове споживання енергії від двигунів може призвести до дроселювання або перезавантаження, якщо немає буферизації [17].

Стосовно впливу живлення на роботу керуючих платформ у дронах BBC micro:bit має дуже низьке енергоспоживання (3 В–3,3 В), але його просте керування живленням не призначене для роботи з шумними або спільними шинами живлення, такими як ESC або модулі камер. Найкраще використовувати в навчальних міні-дронах, які живляться через USB або компактні регулятори напруги [21].

Particle Photon працює при 3,3 В та підтримує вхід USB або VIN. Він ефективний для Інтернету речей, але у дронах вимагає чистого та регульованого джерела живлення. Нестабільність напруги може призвести до перезавантаження, особливо при використанні хмарних функцій або високочастотного зв'язку [22].

BeagleBone Black має регульований вхід 5 В з вбудованою мікросхемою керування живленням (PMIC), але його споживання енергії в режимі очікування та активного режиму є відносно високим. Як і Raspberry Pi, він потребує добре буферизованого та регульованого джерела 5 В; краще переносить коливання навантаження, ніж Pi, але все одно вимагає ретельного планування [23].

Оцінюючи енергоживлення як критичний фактор при виборі платформи Arduino Uno та Teensy 4.1 оснащені базовими стабілізаторами напруги, але не розраховані на енергоємні конфігурації.

ESP8266 та ESP32 чутливі до коливань напруги та вимагають ретельного проектування системи живлення для забезпечення стабільної роботи.

STM32, Raspberry Pi 4, Particle Photon та BeagleBone Black потребують високоякісного та стабільного джерела живлення для коректного функціонування.

BBC micro:bit не призначений для роботи у системах із спільними енергетичними шинами дрона.

Надійне зовнішнє джерело живлення (BEC, UBEC, PDB) є необхідним для більшості платформ, особливо при високих навантаженнях під час польоту.

Найбільш збалансованими та функціональними для створення систем керування польотом виявилися ESP32, Teensy 4.1 та STM32 «Blue Pill». Ці платформи поєднують: високу обчислювальну потужність, розвинену підтримку периферії (ШІМ, UART, I2C, SPI), можливість роботи з датчиками та камерами, сумісність із RTOS, що є критично важливим для задач реального часу. ESP32 має додаткову перевагу у вигляді вбудованого Wi-Fi та Bluetooth, а Teensy 4.1 вирізняється найвищою тактовою частотою та точністю таймерів. STM32, попри низьку вартість, забезпечує стабільність та розширюваність, хоча вимагає певного досвіду для налаштування [12-17; 21-23].

Менш оптимальними варіантами виявилися:

1. Arduino Uno та ESP8266, які підходять лише для навчальних чи прототипних проєктів через обмежені ресурси та відсутність повноцінної підтримки задач реального часу;
2. Raspberry Pi 4 та BeagleBone Black мають високу обчислювальну потужність та розвинене програмне середовище, проте їхня складність у керуванні живленням та відсутність гарантій реального часу роблять їх кращими для допоміжних обчислювальних задач (наприклад, візуальної обробки або телеметрії) замість основного контролера польоту;
3. BBC micro:bit та Particle Photon через апаратні обмеження, спрощене енергоживлення та обмежені інтерфейси непридатні для складних дронів [12-17; 21-23].

Висновки. Проаналізовані платформи показали, що ESP32, Teensy 4.1 та STM32 «Blue Pill» є найбільш доцільним вибором для керування БПЛА завдяки високій продуктивності, підтримці периферії та можливостям обробки в реальному часі. Arduino Uno та ESP8266 мають обмежену придатність для складних польотних завдань. Raspberry Pi 4 та BeagleBone Black, незважаючи на обчислювальну потужність, мають обмеження через відсутність RTOS та складність управління живленням.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на оптимізації енергоспоживання, розробці адаптивних алгоритмів керування польотом та інтеграції більш складних сенсорних систем для підвищення автономності дронів. Також перспективним

напрямом є використання штучного інтелекту для оптимізації маршруту та стабілізації польотних характеристик.

Список використаних джерел.

1. Гуцул Т., Жежера І., Ткач В. **Особливості класифікації та методів вибору БПЛА** // Технічні науки та технології. 2022. № 4(30). С. 201–212. DOI: 10.25140/2411-5363-2022-4(30)-201-212. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/tnt_2022_4_24 (дата звернення: 10.06.2025).
2. Маміч В., Семчак О., Буз А., Чкалов А., Король Д. **Дослідження бортового обладнання сучасних безпілотних літальних апаратів** // UNDERWATER TECHNOLOGIES: Industrial and Civil Engineering. 2023. Вип. 13. С. 74–80. URL: <http://uwtech.knuba.edu.ua/article/view/298896> (дата звернення: 10.06.2025).
3. Самойленко О.В., Богославець С.О., Стещенко П.М., Наусенко Б.Ю. **Особливості керування спільними бойовими порядками безпілотних і пілотованих літальних апаратів** // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації. 2021. Вип. 17(24). С. 45–49. DOI: 10.54858/dndia.2021-17-7. URL: <https://znp.dndia.org.ua/index.php/znp/article/download/9/7> (дата звернення: 10.06.2025).
4. Микійчук М.М., Зіганшин Н.С. **Аналіз методів керування безпілотними літальними апаратами** // Вимірювальна техніка та метрологія. 2019. Т. 80, вип. 4. С. 37–40. DOI: 10.23939/istcmtm2019.04.00. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2020/jan/20507/005.pdf> (дата звернення: 10.06.2025).
5. Espressif Systems. **ESP-Drone: Open-source Quadcopter Firmware for ESP32** [Електронний ресурс]. Espressif Systems, 2025. URL: <https://github.com/espressif/esp-drone> (дата звернення: 10.06.2025).
6. FreeRTOS Community Forum. **Using FreeRTOS with Teensy 4.1** [Електронний ресурс] // FreeRTOS Community Forum, 2025. URL: <https://forums.freertos.org/t/using-freertos-with-teensy-4-1/22518> (дата звернення: 10.06.2025).
7. Руднєва С.В. **Створення багатофункціонального дрона для потреб ЗСУ на основі недефіцитних комплектувальних** // Електронний науковий учнівський журнал «Юний дослідник». 2024. № 1(2). [Електронний ресурс]. URL: <https://ojs.ioid.gov.ua/index.php/ejd/article/view/24> (дата звернення: 10.06.2025).
8. **Як зібрати власного FPV дрона та налаштувати його для польоту** [Електронний ресурс]. URL: <https://rozumni-ideyi.com/posts/view/yak-zibraty-vlasnoho-fpv-drona-ta-nalashtuvaty-yoho-dlya-polotu> (дата звернення: 10.06.2025).
9. Мішук Д.О., Рашківський В.П. **Програмування робототехнічних інформаційних систем: конспект лекцій**. Київ: КНУБА, 2024. 220 с. [Електронний ресурс]. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/123456789/14581> (дата звернення: 10.06.2025).
10. Сушко Д.В. **Керування, вплив та захист БПЛА** [Електронний ресурс]. URL: <https://spadok.org.ua/books/8622-30826-1-PB.pdf> (дата звернення: 10.06.2025).
11. UA Dynamics. **Теорія і практика застосування безпілотних літальних апаратів (дронів)**. 2022. [Електронний ресурс]. URL: <https://repository.gnpu.edu.ua/items/8bceb63c-ba8c-4345-ade9-d1a0f4f0c6c0> (дата звернення: 10.06.2025).
12. **Arduino Official Documentation** [Електронний ресурс]. URL: <https://www.arduino.cc/en/Guide/HomePage> (дата звернення: 09.06.2025).
13. Espressif Systems. **ESP8266 Technical Reference Manual**. 2018. [Електронний ресурс]. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp8266-technical_reference_en.pdf (дата звернення: 09.06.2025).
14. Espressif Systems. **ESP32 Official Documentation** [Електронний ресурс]. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/> (дата звернення: 09.06.2025).
15. PJRC. **Teensy 4.1 – Official Product Page** [Електронний ресурс]. URL: <https://www.pjrc.com/store/teensy41.html> (дата звернення: 09.06.2025).

16. STMicroelectronics. **STM32CubeIDE User Guide** [Електронний ресурс]. URL: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html> (дата звернення: 09.06.2025).
17. Raspberry Pi Foundation. **Raspberry Pi Documentation** [Електронний ресурс]. URL: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/> (дата звернення: 09.06.2025).
18. **Порівняння Spark/Particle з альтернативами** // Particle Community. [Електронний ресурс]. URL: <https://community.particle.io/t/comparison-of-spark-particle-to-alternatives/11594> (дата звернення: 10.06.2025).
19. **Альтернативні платформи мікроконтролерів** // Maker Pro. [Електронний ресурс]. URL: <https://maker.pro/custom/tutorial/alternative-microcontroller-platforms> (дата звернення: 10.06.2025).
20. **Різниця між BBC micro:bit та BeagleBone Black** // Electronics For You. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.electronicsforu.com/technology-trends/learn-electronics/microbit-board-beaglebone-black> (дата звернення: 10.06.2025).
21. **Документація MicroPython для BBC micro:bit** [Електронний ресурс]. URL: <https://microbit-micropython.readthedocs.io/en/v2-docs/> (дата звернення: 09.06.2025).
22. Particle.io. **Particle Photon Official Documentation** [Електронний ресурс]. URL: <https://docs.particle.io/reference/datasheets/wi-fi/photon-datasheet/> (дата звернення: 09.06.2025).
23. BeagleBoard.org. **BeagleBone Black Documentation** [Електронний ресурс]. URL: <https://beagleboard.org/black> (дата звернення: 09.06.2025).
24. **Prom.ua – Платформи та електронні компоненти для дронів** [Електронний ресурс]. URL: <https://prom.ua/> (дата звернення: 11.06.2025).
25. **AliExpress – Комплектуючі для безпілотних апаратів** [Електронний ресурс]. URL: <https://www.aliexpress.com/> (дата звернення: 11.06.2025).
26. **TME – Магазин електронних компонентів** [Електронний ресурс]. URL: <https://www.tme.eu/> (дата звернення: 11.06.2025).

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАННЯ СТАТЕЙ

Стаття надсилається до редакції збірника у паперовому варіанті з підписами авторів на адресу: 43018, м. Луцьк, вул. Львівська 75, Луцький НТУ; в електронному вигляді у форматі MS WORD – на електронну адресу: naukovi_notatki@lutsk-ntu.com.ua. Обидва варіанти повинні бути ідентичними.

Наукова стаття обов'язково повинна мати наступні необхідні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті; виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень у даному напрямку.

1. **Статтю можна подавати українською або англійською мовою.** Стаття повинна бути набрана у текстовому редакторі не нижче MS WORD 97/03 і надрукована тільки на лазерному або струйному принтері на білих листах формату А4 (297x210 мм). Нумерацію сторінок не виконувати. Обсяг статті від 4-9 сторінок.
2. Параметри сторінки: верхнє, нижнє та ліве поле – 2 см, праве поле 2,5 см. Від краю до колонтитула верхнього – 1,25 см, нижнього – 1,25 см.
3. Шапка статті: індекс УДК, ініціали та прізвища авторів розміщується на один абзац нижче шрифтом 11 пт, назва організації – набираються з нового рядка шрифтом Time New Roman 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 анотаций обов'язково вказуються ключові слова шрифтом Time New Roman Cyr, курсив, напівжирний 9 пт.
6. Основний текст розміщується на 1 см нижче анотаций, 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 ПІБ, посаду, науковий ступінь, вчене звання рецензента статті.
15. Рукописи, що не відповідають вище вказаним вимогам, не розглядаються і до друку не приймаються.

ЗРАЗОК ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ

УДК: 620.179.16

І.І. Іванов¹, П.П. Петров²

*Луцький національний технічний університет¹
Тернопільський національний технічний університет²*

НАБЛИЖЕНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОСІ КОНОЇДА, ПРЕДСТАВЛЕНОГО ДИСКРЕТНИМ КАРКАСОМ ТВІРНИХ

*Розроблено алгоритм наближеного визначення осі коноїда, представленого дискретним каркасом
спільних твірних.*

Ключові слова: вісь коноїда, дискретний каркас, твірна.

I. Ivanov, P. Petrov

AXIS APPROXIMATE DEFINITION OF CONOID DESCRIBED BY THE SET OF STRAIGHT LINES

*The algorithm of axis approximate definition of conoid described by the set of straight lines is made. The approximate
conoid axis is a line. Conoid is created by straight lines.*

Keywords: conoid axis, discretely carcass of straight lines.

Постановка проблеми. На коноїді, представленому дискретним каркасом.....

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наскільки відомо автору з.....

Постановка завдань. В роботі поставлено мету – розробити алгоритм....

Викладення основного матеріалу. Для наближеного визначення осі використовувалася така
властивість коноїдів: усі твірні поверхні перетинають її вісь [1].

формула (1)

Рисунок

Рис. 1. Назва рисунка

Назва таблиці

Табл. 1.

Висновки. В статті розроблено алгоритм наближеного....

Список використаних джерел:

ПБ, посада, науковий ступінь, вчене звання рецензентів статті.

Ціна договірна

Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки».

Комп'ютерний набір та верстка: О.Д. Клименко

Наклад 300 прим.

Веб-сайт збірника:

http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky

Довідки за e-mail: naukovi_notatki@lutsk-ntu.com.ua

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 11 від 24 червня 2025 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, 2025 р.