

Міністерство освіти та науки України

Луцький національний технічний  
університет

# НАУКОВІ НОТАТКИ

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

Випуск 77

Луцьк 2024

<b>Рік заснування:</b>	1993
<b>Проблематика:</b>	проблеми матеріалознавства, прикладної механіки, галузевого машинобудування, прикладної фізики та наноматеріалів.
<b>Періодичність:</b>	2 рази на рік
<b>ISSN:</b>	24-15-39-66
<b>Свідоцтво про державну реєстрацію:</b>	КВ №15901-4373ПР від 13.11.2019 р.
<b>Фахова реєстрація у ДАК України:</b>	<b>Включено до категорії Б</b> Переліку наукових фахових видань України за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки» за науковими спеціальностями: 105 Прикладна фізика та наноматеріали; 131 Прикладна механіка; 132 Матеріалознавство; 133 Галузеве машинобудування – від 24.09.2020 р., Наказ МОН України № 1188 та за науковими спеціальностями 113 Прикладна математика, 151 Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології – від 26.11.2020 р., Наказ МОН України № 1471. 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 <b>R30-2455</b> )
<b>Галузь знань:</b>	Технічні науки
<b>Мова видання:</b>	Українська, англійська

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.

DOI 10.36910/6775.24153966.2024.77

*В збірнику можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії*

**Веб-сайт збірника:**  
[http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi\\_notatky](http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky)

**Довідки за e-mail:** [naukovi\\_notatki@lutsk-ntu.com.ua](mailto:naukovi_notatki@lutsk-ntu.com.ua)

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 6 від 24 січня 2024 р.

© Луцький національний технічний університет, 2024 р.

## РЕДАКЦІЙНИЙ ШТАТ

*Головний редактор:*

**Рудь Віктор Дмитрович** д.т.н., проф., професор кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету

*Заступник головного редактора:*

**Шимчук Сергій Петрович** к.т.н., доц., доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету

*Відповідальний секретар:*

**Клименко Олександр Дмитрович** к.т.н., доц., доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету

*Редакційна колегія:*

**Жигуц Юрій Юрійович** д.т.н., проф., завідувач кафедри технології машинобудування Ужгородського національного університету;

**Каплун Павло Віталійович** д.т.н., доц., професор кафедри трибології, автомобілів та матеріалознавства, Хмельницького національного університету;

**Клименко Сергій Анатолійович** д.т.н., проф., заступник директора з наукової роботи Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України;

**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;

**Стельмах Олександр Устимович** д.т.н., с.н.с., професор Пекінського технологічного університету (Китай);

**Заболотний Олег Васильович** к.т.н., доц., проректор з науково-педагогічної роботи та досліджень Луцького національного технічного університету;

**Ткачук Анатолій Анатолійович** к.т.н., доц., доцент кафедри електроніки та телекомунікацій Луцького національного технічного університету;

**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;

**Баглюк Генадій Анатолієвич** д.т.н., проф., заступник директора Інституту проблем матеріалознавства ім. І. Францевича НАН України;

**Дядюра Костянтин Олександрович** д.т.н., проф., професор кафедри ПМ і ТКМ Сумського державного технічного університету;

**Єфременко Василь Георгійович** д.т.н., проф., завідувач кафедри фізики, професор кафедри матеріалознавства та перспективних технологій ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»;

**Лобода Петро Іванович** д.т.н., проф., декан інженерно-фізичного факультету НТУ "КПІ" ім. І. Сікорського;

**Уманський Олександр Павлович** д.т.н., проф., завідувач відділу матеріалознавства та інженерії високостійких поверхневих шарів Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН;

**Штерн Михайло Борисович** завідувач відділу реологічних та фізико-хімічних основ технології порошкових матеріалів Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України;

**Зайчук Наталія Петрівна** к.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету;

**Імбірович Наталія Юріївна** к.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету;

**Кашицький Віталій Павлович** к.т.н., доц., доцент кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету;

**Повстяной Олександр Юрійович** к.т.н., доц., доцент кафедри прикладної механіки Луцького національного технічного університету;

**Налобіна Олена Олександрівна** д.т.н., проф., професор кафедри будівельних, дорожніх, меліоративних, сільськогосподарських машин та обладнання Національного університету водного господарства та природокористування;

**Мартинюк Віктор Леонідович** к.т.н., доц., доцент кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету

**Пуць Віталій Степанович** к.т.н., доц., завідувач кафедри галузевого машинобудування Луцького національного технічного університету;

**Цизь Ігор Євгенович** к.т.н., доц., доцент кафедри аграрної інженерії Луцького національного технічного університету;

**Мікуліч Олена Аркадіївна** д.т.н., доц., доцент кафедри прикладної математики та механіки Луцького національного технічного університету;

**Пальчевський Богдан Олексійович** д.т.н., проф., професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету;

**Лапченко Юрій Сергійович** к.т.н., доц., доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Луцького національного технічного університету;

**Крадінова Тетяна Адамівна** к. ф.-м. н., доц., доцент кафедри фундаментальних наук Луцького національного технічного університету;

**Луцьов Сергій Валентинович** к. ф.-м. н., доц., доцент кафедри фундаментальних наук Луцького національного технічного університету;

**Федосов Сергій Анатолійович** д. ф.-м. н., проф., професор кафедри експериментальної фізики та інформаційно-вимірювальних технологій Волинського національного університету імені Лесі Українки;

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

## ЗМІСТ

<b>Зміст</b> .....	5
<b>Р.М. Пастернак</b> Структура всесвіту в евклідовому чотиривимірному просторі.....	7
<b>О.П. Чигвінцева, Ю.В. Бойко</b> Вуглепластик на основі аліфатичного поліаміду.....	13
<b>С.П. Шимчук, М.С. Півницький</b> Дослідження конструктивних та трибологічних властивостей швидкорозбірного конвеєрного ланцюга.....	17
<b>В. М. Голубець, М. І. Пашичко, Ю. С. Шуляр</b> Побудова математичних моделей для підтвердження достовірності результатів експериментальних досліджень з фрезерування деревини.....	21
<b>О.В. Солнцев, Ю.М. Кузнєцов, Ж. Хамуйєла</b> Аналіз динаміки 3д-принтера з механізмом паралельної структури.....	31
<b>Ю.Ю. Жигуц, В.Д. Рудь, В.Ф. Лазар</b> Розв'язок контактної задачі про передачу зосередженого навантаження.....	39
<b>П.О. Коробко, А.В. Кузьмов</b> Ефективні пружні властивості пористих матеріалів зі структурою інверсного опалу.....	46
<b>О.О. Налобіна, М.В. Голотюк, А.В. Шимко, О.З. Бундза, В.Л. Мартинюк, В.С. Пуць</b> Прототипування та стратегія реверс інжинірингу на прикладі інженерних задач адитивного виробництва...	51
<b>О.У. Стельмах, Р.Є. Костюнік, О.В. Куцев, С.П. Шимчук</b> Захист деталей з високоміцного чавуну від гідроабразивного зносу комбінованими екологічно безпечними методами.....	56
<b>В. В. Сергєєв</b> Моделювання твердих частинок методами HOOMD-blue Python та Монте-Карло..	61
<b>І. В. Кругляк, Д. Б. Середа, Р. Г. Кривко</b> Підвищення довговічності гвинтів натискного пристрою робочої кліті стану 650.....	67
<b>Б. П. Середа, А. М. Удод</b> Отримання багатокомпонентних хромованих покриттів на деталях, які експлуатуються в агресивних умовах еластомерного виробництва.....	73
<b>Г.М. Губаль</b> Вдосконалення створення таблиць і деяких обчислень на мові програмування LaTeX для математичних досліджень.....	78
<b>О.Б. Турчин</b> Математичне моделювання мережевих логістичних процесів.....	85
<b>О.О. Молнар, В.В. Герасимов, Ю.Ю. Жигуц</b> Комп'ютерно-орієнтовані додатки у вивченні астрономії на платформі Widows .....	91
<b>Р. М. Пастернак</b> Космологічні в'язі релятивістських корпускулярної та хвильової механік.....	98
<b>М. М. Фрідлянд</b> Зелені технології у сучасному будівництві: аналіз відновлюваних матеріалів та ефективності енергоефективних систем.....	104
<b>М. Р. Олійник, Ю. І. Озимок</b> Загальний огляд способів фрикційного оброблення різальних інструментів рубальних машин.....	113
<b>О.П. Герасимчук, О.Л. Ткачук, В.С. Пуць, А.І. Охремов</b> Отримання текстильного волокна з хвої за допомогою машини для м'яття з гідравлічним притисканням.....	120
<b>О.Б. Климовець, В.П. Кашицький</b> Механічні властивості біокомпозитних матеріалів на основі епоксиполімерної матриці.....	125
<b>О. П. Ясній, М. П. Голубовський</b> Моделювання втомної довговічності сталі QSTE340TM за сталоамплітудного навантаження методами машинного навчання.....	131
<b>В.С. Мазурок, В.П. Кашицький</b> Оптимізація складу та технології формування біокомпозитного матеріалу з вмістом наповнювачів рослинного походження .....	137
<b>С.Ф. Юхимчук, С.М. Юхимчук, Л.М. Дацюк, Т.Л. Дацюк</b> Дослідження роботи поперечного транспортера дисково-пасового льонобрального апарата.....	143
<b>В.О. Шегинський</b> Модифікація глютинових біокомпозитних матеріалів гідрофобними добавками.....	150
<b>Ю.М. Кузнєцов, А.З. Гутник</b> Сучасний стан винахідництва, виробництва, аналіз раніше виконаних досліджень і перспективи створення мотор-шпинделів.....	156
<b>О.О. Ченчева, Є.Є. Лашко, С.В. Сукач, Д.В. Рєзнік</b> Інтегральна оцінка ризиків під час оброблення високотехнологічних композиційних матеріалів.....	166
<b>Л. Ю. Федік, Ю. Л. Гунько</b> Аналіз найбільш поширених промислових роботів світових лідерів EPSON, YAMAHA I PANASONIC.....	175
<b>С.Л. Куцик, О.А. Мікуліч</b> Експериментальне дослідження зміни ефективних характеристик для елементів 3D-друку.....	181

CONTENTS

<i>Contents</i> .....	6
<b>R.M. Pasternak</b> Method of comparative experimental research of vices of different constructions.....	7
<b>O.P. Chigvintseva, Yu.V. Boyko</b> Karbon plastic based on aliphatic polyamide .....	13
<b>S.P. Shymchuk, N.S. Pivnytskyi</b> Research of the structural and tribology properties of the quickly disassembly conveyor chain .....	17
<b>V. M. Holubets, M. S. Pashechko, Yu. S. Shpuliar</b> Construction of mathematical models for confirming the reliability of the results of experimental research from wood milling.....	21
<b>O. Solntsev, Y. Kuznetsov, J. Hamuyela</b> Dynamic analysis of a 3D - printer with parallel structure mechanisms .....	31
<b>Yu. Zhiguts, V. Rudj, V. Lazar</b> Solution of the contact problem on the transmission of a concentrated load.....	39
<b>P. Korobko, A. Kuzmov</b> Effective elastic properties of porous materials with inverse opal structure.....	46
<b>O. Nalobina, M. Holotiuk, A. Shymko, O. Bundza, V. Martyniuk, V. Puts</b> On the issue of modeling the reliability of agricultural machinery.....	51
<b>O. Stelmakh, R. Kostyunik, O. Kushchev, S. Shymchuk</b> Analysis of ways of improving the quality of cleaning miniature roller bearings for precision mechanical and aerospace systems in the repair production .....	56
<b>I. Kruhliak, D. Sereda, R. Krivko</b> Increasing the durability of the screws of the pressing device of the mill stand 650.....	67
<b>B. Sereda, A. Udod</b> Obtaining multi-component chrome coatings on parts that are used in aggressive conditions of elastomer production.....	73
<b>H.M. Hubal</b> Improvement of creation of tables and some calculations in the latex programming language for mathematical research.....	78
<b>O. Turchyn</b> Analysis of the sucker-rod pump system for identifying operating modes in oil production under variable conditions based on dynamometric data and neural networks.....	85
<b>O.O. Molnar, V.V. Gerasimov, Yu.Yu. Zhiguts</b> Computer-oriented applications in the study of astronomy on the Widows platform.....	91
<b>R. Pasternak</b> Cosmological connections of relativistic particle and wave mechanics .....	98
<b>M. Fridlyand</b> Green technologies in modern construction: analysis of renewable materials, and efficiency of energy-efficient systems.....	104
<b>M. Oliyynyk, Yu. Ozymok</b> General overview of frictional processing methods for cutting tools of chopping machines.....	113
<b>O. Herasymchuk, O. Tkachuk, V. Puts, A. Okhremov</b> Obtaining textile fiber from pine needles using crushing machine with hydraulic pressure.....	120
<b>O. Klymovets, V. Kashytskyi</b> Mechanical properties of biocomposite materials based on epoxy-polymer matrix.....	125
<b>O. P. Yasniy, M. P. Holubovskiyi</b> Modelling of QSTE340TM steel lifetime under constant amplitude loading by employing machine learning methods.....	131
<b>V. Mazurok, V. Kashytskyi</b> optimization of the composition and forming technology of biocomposite material with a content of fillers of plant origin.....	137
<b>S.F. Yukhymchuk, S.M. Yukhymchuk, L.M. Datsyuk, T.L. Datsyuk</b> Study of the operation of the transverse transporter conveyor of a disc-belt flax-pulling apparatus.....	143
<b>V. Shehynskiyi</b> Modification of glutin based biocomposite materials with hydrophobic additives.....	150
<b>Y. Kuznetsov, A. Hutnyk</b> The current state of invention, production, analysis of previous research and prospects for creating motor spindles.....	156
<b>O. Chencheva, Ye. Lashko, S. Sukach, D. Rieznik</b> Integrated risk assessment during the machining of high-tech composite materials.....	166
<b>L. Fedik, Y. Hunko</b> Analysis of the most common industrial works of world leaders EPSON, YAMAXA AND PANASONIC.....	175
<b>S.L. Kutsyk, O.A. Mikulich</b> Experimental investigation of effective characteristics changing for 3D printing elements.....	181

УДК 524.8

DOI 10.36910/775.24153966.2024.77.1

Р.М. Пастернак

Луцький національний технічний університет

**СТРУКТУРА ВСЕСВІТУ В ЕВКЛІДОВОМУ ЧОТИРИВИМІРНІЙ ПРОСТОРИ**

*Аналіз постулатів релятивістської механіки показав, що простір імпульсів частинок принципово 4-вимірний, величина швидкості кожної з частинок однакова, а маса може змінюватися. Перехід апарату релятивістської корпускулярної механіки від простору-часу до однорідного 4-простору вимагав доповнення набору частинок фундаментальними частинками темної холодної матерії та темної енергії, що не спостережувалися у просторі-часі. Кожна з частинок у 4-просторі може бути описана векторною кривою (4-траєкторією), що існує від одного вузла взаємодії до іншого. Відповідно до незмінної величини 4-швидкості, параметр 4-траєкторії (час) лінійно пов'язаний з її метричною мірою. Узгодження розв'язків у 4-просторі з аналогічними у просторі-часі можливі лише при використанні виділеної за Г.А. Лоренцом інерційної системи відліку. Апарат 4-вимірної механіки частинок застосовано до аналізу структури центральносиметричного Всесвіту і встановлено причини його структурованості: секторальної – галактик, космічних комірок, та часової – первинного синтезу частинок речовини, останнього розсіювання їхньої надлишкової енергії та шару реіонізованого водню.*

*Ключові слова:* хід часу, фізичний вакуум, нативні частинки, частинки-номади.

R.M. Pasternak

**STRUCTURE OF THE UNIVERSE IN EUCLIDEAN FOUR-DIMENSIONAL SPACE**

*The analysis of the postulates of relativistic mechanics showed that the momentum space of particles is fundamentally 4-dimensional, the velocity of each particle is the same, and the mass can change. The transition of the apparatus of relativistic corpuscular mechanics from space-time to homogeneous 4-space required the addition of a set of particles with fundamental particles of cold dark matter and dark energy, which are not observed in space-time. Each of the particles in 4-space can be described by a vector curve (4-trajectory) that exists from one node of interaction to another. According to the invariant value of the 4-velocity, the 4-trajectory parameter (time) is linearly related to its metric measure. Reconciliation of solutions in 4-space with similar ones in space-time is possible only when using the method selected by G.A. Lorentz of the inertial frame of reference. The apparatus of 4-dimensional particle mechanics was applied to the analysis of the structure of the centrally symmetric universe and the reasons for its structure were established: sectoral – galaxies, cosmic cells, and temporal – the primary synthesis of four-dimensional particles, the last dissipation of their excess energy and a layer of reionized hydrogen.*

*Key words:* passage of time, physical vacuum, native particles, nomadic particles

**Постановка завдання.** Модель Фрідмана-Леметра-Робертсона-Вокера (ФЛРВ) пояснює властивості космічного мікрохвильового фону (КМФ) розширенням Всесвіту [1]; при цьому його розширення жодним чином не впливає на властивості баріонів [1]. У роботі зроблено спробу розглянути причини такої невідповідності та структурованості Всесвіту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Виконані відповідно до Стандартної космологічної моделі ( $\Lambda$ CDM) [2] розрахунки показали, що кривина Всесвіту  $\Omega_k = (0,001 \pm 0,002)$ , тобто (в межах похибки) він просторово плоский, що вступає в протиріччя з метрикою ФЛРВ [1]. Іншим важливим результатом використання  $\Lambda$ CDM-моделі було підтвердження гіпотези Ф. Цвіккі [1] існування темної матерії [2]. В результаті прецизійних вимірювань анізотропії КМФ [3] було виявлено пекулярну швидкість Сонячної системи, що становить  $v = (368 \pm 2) \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$  у напрямі на сузір'я Лева (у Нобелівській лекції Дж. Смут назвав їх «новим дослідом Майкельсона-Морлі» [3]). У [4] запропоновано альтернативний апарат релятивістської корпускулярної механіки (АРМ) в евклідовому 4-просторі, де присутні засоби опису як спостережуваних, так і неспостережуваних безпосередньо (темних) частинок [2] та міститься пов'язане з метрикою 4-простору означення ходу часу.

**Метою роботи** є адаптація можливостей поданого в [4] апарату АРМ до аналізу властивостей Всесвіту, зокрема, врахування космологічних в'язей, розгляду задач про лінійність, однорідність, динамічність та структурованість центральносиметричного [1] Всесвіту.

**1. Космічні системи відліку**

**1.1. Динамічність Всесвіту. Час.** Основними характеристиками частинок у корпускулярній релятивістській механіці є їхня повна енергія  $E$  та повновимірний імпульс  $\vec{P}$  [5], причому врахування вимірності простору імпульсів є принциповим [4]. П. Дірак висунув гіпотезу [5], що повна енергія  $E$  частинки пропорційна величині  $P$  її повновимірного імпульсу

$$E = cP, \quad (1)$$

де  $c$  – фундаментальна стала [1]. З іншого боку, відповідно до принципу А. Айнштейна, повна енергія  $E$  частинки еквівалентна її повній масі  $m$  [6]:

$$E = c^2 m. \quad (2)$$

Об'єднуючи (1) та (2), отримуємо розширений принцип еквівалентності:

$$E = cP = c^2 m. \quad (3)$$

Отже, повні маса та енергія не самостійні, а лише характеризують величину повновимірного імпульсу частинки.

Відповідно до принципу Л. Ейлера [6] повна маса  $m$  є коефіцієнтом пропорційності між колінеарними векторами повновимірного імпульсу  $\vec{P}$  та повновимірної швидкості  $\vec{V}$  частинки  $\vec{P} = m\vec{V}$ , тобто величина повновимірної швидкості усіх частинок однакова:

$$|\vec{V}| = c = \text{const}. \quad (4)$$

Якщо в просторі-часі стала  $c$  відповідає величині швидкості поширення світла у вакуумі, то в АРМ вона є космологічною сталою, що пов'язана зі швидкістю розширення Всесвіту [4].

Із наведених постулатів випливає, що вимірність простору переміщень релятивістської механіки більша від трьох. Опираючись на космологічний принцип [1], у релятивістській механіці достатньо використовувати евклідові 4-простір  $\mathbb{R}^4$  з базисом  $(\vec{\zeta}, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ , де  $\vec{\zeta}, \vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$  його орти, а частинки є векторними кривими – 4-траєкторіями [7]. Відповідно до (4), величина  $dR$  кожного з елементів  $d\vec{R}$  4-траєкторії довільної частинки пропорційна зміні її параметру  $t$  (часу) – перша космологічна в'язь:

$$dR = c dt. \quad (5)$$

*1.2. Системи відліку в динамічному Всесвіті. Різновимірні частинки.* Результати вимірювань у динамічному Всесвіті залежать від вибору системи відліку [1]. Надалі будемо розглядати дві такі системи: КСВ – космічну, виміри в якій проводять відносно Всесвіту, як цілісного космічного об'єкта, та ССВ – супутню з розширенням Всесвіту, де тіло відліку належить ССВ. Логічно допустити, що 4-вимірний швидкість  $\vec{V}$  довільної частинки в КСВ є векторною сумою її спостережуваної в ССВ складової  $\vec{U}$  та неспостережуваної в просторі-часі складової  $\vec{v}_0$  швидкості тіла відліку ССВ:

$$\vec{V} = c\vec{\chi} = v_0\vec{\zeta} + v\vec{\tau}. \quad (6)$$

Тут  $\vec{\chi}$  – одиничний вектор напряму 4-швидкості  $\vec{V}$ ,  $\vec{\tau}$  – одиничний 4-вектор, що відповідає напряму спостережуваної в ССВ швидкості  $\vec{U}$ , а  $\vec{\zeta}$  – одиничний 4-вектор напряму неспостережуваної в ССВ швидкості  $\vec{v}_0$  (власний напрям). Умовою неспостережуваності  $\vec{v}_0$  є ортогональність векторів  $\vec{\zeta}$  і  $\vec{\tau}$ :

$$(\vec{\zeta}, \vec{\tau}) = 0. \quad (7)$$

Порівняно з простором-часом, в евклідовому 4-просторі існують ширші можливості для опису частинок різних класів. Якщо в [5] класи елементарних частинок – скалярні, векторні, спінові – розрізняють за числом спінових поляризацій, то тут запропоновано їх альтернативне трактування за вимірністю (мінімальною кількістю координат, необхідних для запису їхнього імпульсу): одновимірні – частинки темної матерії (DaM, аналог скалярних у просторі-часі) [1], двовимірні – кварки та глюони [7], тривимірні частинки темної енергії (DaE, аналог векторних у просторі-часі) [1] та чотиридимірні – лептони і адрони (аналог спінових у просторі-часі) [7]. Відповідно до  $\Lambda$ CDM-моделі, частинки DaM та DaE в енергетичному вимірі сумарно складають біля 95 % матерії Всесвіту [1]. (Властивості неспостережуваних у просторі-часі частинок DaM та DaE постульовано в подальшому викладі. Зазвичай, у Всесвіті вони не взаємодіють між собою, утворюючи конденсат – фізичний вакуум [1].)

*1.3. Виділені інерційні КСВ. Нativні частинки. Античастинки та номади.* Відповідно до космологічного принципу [1] Всесвіт центральносиметричний, тобто власні напрями  $\vec{\zeta}$  КСВ повинні збігатися з напрямками  $\vec{\zeta}_s$  радіальних променів, що виходять з центру симетрії Всесвіту, а напрями поширення частинок DaM бути колінеарними їм. Таких КСВ безліч.

Враховуючи принцип Л. Ейлера та (6), 4-імпульси  $\vec{P}$  частинок в евклідовому просторі  $\mathbb{P}^4$  можна записати векторною сумою  $\vec{P} = p_0\vec{\zeta}_s + p\vec{\tau}$  їх неспостережуваних в ССВ складових  $\vec{p}_0$



(власних), та спостережуваних у ССВ складових  $\vec{p}$ . Зіставляючи темну холодну матерію з нерухомим ефіром Г.А. Лоренца [5], умовою виділеної інерційної КСВ є друга космологічна в'язь:

$$\vec{p}_0 = p_0 \vec{\varepsilon}_s = \text{const} \quad \forall t. \quad (8)$$

Для кожної КСВ за знаком скалярного добутку  $(\vec{\chi}, \vec{\varepsilon}_s)$  розрізнятимемо три різновиди частинок: власне матерії, при  $(\vec{\chi}, \vec{\varepsilon}_s) > 0$ , антиматерії, при  $(\vec{\chi}, \vec{\varepsilon}_s) < 0$  та нейтральних, при  $(\vec{\chi}, \vec{\varepsilon}_s) = 0$ .

Наслідком умов (7) та (8) є відмова від принципу загальної коваріантності [6] – кожна локальна виділена інерційна КСВ відрізнялася від інших власними (нативними) частинками, для яких  $\vec{\varepsilon} = \vec{\varepsilon}_s$ . 4-імпульс нативних частинок DaM та DaE може бути представлений в основному стані: для одновимірних DaM –  $\vec{P}_M = (p_0, \vec{0})$ , де присутня лише неспостережувана в ССВ компонента, а для тривимірних DaE –  $\vec{P}_E = (0, \vec{p})$ , де присутня лише спостережувана в ССВ складова. Відповідно до (7) напрям поширення нативних частинок DaE ортогональний до  $\vec{\varepsilon}_s$  [4]. Вони не пов'язані другою космологічною в'яззю і можуть вільно переміщуватися між різними КСВ. Зважаючи на цю особливість тривимірні частинки називатимемо номадами. Обмежившись розглядом лише інерційних КСВ, усуваємо з розгляду гравітаційну взаємодію, тому надалі частинки DaE зіставлятимемо лише з фотонами.

## 2. Часова структурованість Всесвіту

2.1. *Первинний синтез речовини. Гомогенність Всесвіту.* У роботі виходять з гіпотези, що до народження Всесвіту весь простір  $\mathbb{R}^4$  був заповнений хаосом фундаментальних частинок DaM та DaE. Взаємодіючи, зустрічні фундаментальні частинки гіпотетично могли взаємно перетворюватися: DaE + DaE ↔ DaM + анти DaM (парні частинки). З іншого боку, в результаті взаємодії частинок DaE, могли утворюватися парні лептони: DaE + DaE ↔ електрон + антиелектрон (ефект Швінгера [7]). В АРМ постулюють, що глюони та кварки утворювалися в результаті дисоціації фотона під дією частинки DaM. У рамках Стандартної моделі [7] глюону відповідає двовимірний фрагмент фотона, а кварку – гібрид його одновимірного фрагменту та частинки DaM [7]. В АРМ [4] їхні аромати та кольори пов'язують з орієнтацією складових векторів 4-імпульсів. Мінімальна енергія гібридних частинок (та античастинок) – об'єднань частинок DaM та DaE (кварків, лептонів та адронів) квантується.

У результаті первинного синтезу речовини простір  $\mathbb{R}^4$  був заповнений плазмою різновимірних частинок, а їхнє взаємоперетворення призвело до рівномірного перерозподілу матерії (в енергетичному вимірі) по кожному з чотирьох вимірів простору  $\mathbb{R}^4$  [1]. Важливо, що в позачасовому хаосі первинної плазми виникали також пари стійких частинок – електронів і позитронів та протонів і антипротонів, які при зустрічах анігілювали.

Процес народження Всесвіту почався з виникнення в околі окремих точок простору  $\mathbb{R}^4$  локальних неоднорідностей напрямів поширення одновимірних частинок. За таких умов частинки та античастинки у середньому розносилися в протилежних напрямках (наслідок СРТ-інваріантності [7]), що необоротно зменшувало кількість актів анігіляції (таких зародків могло бути безліч). Сепарація частинок та античастинок призвела до народження Всесвіту, запустивши відлік часу, а сам процес народження займав значну причинно-зв'язану область. Внаслідок сепарації частинок та античастинок матерія в центральносиметричному Всесвіті (поза областю первинного синтезу речовини) стає гомогенною - практична відсутність антиматерії (відповідно до наведеного в підрозділі 1.4 означення).

2.2. *Лінії реєстрованих подій.* На рис. 1 наведено схему перерізу простору  $\mathbb{R}^4$  Всесвіту, де точкою  $B$  позначено його центр симетрії, точкою  $C$  – місцезнаходження спостерігача, а точкою  $O$  – космічного об'єкта. Власні напрями локальних КСВ<sub>o</sub> космічного об'єкта та КСВ<sub>c</sub> спостерігача колінеарні радіальним променям, відповідно  $\vec{L}_o$  та  $\vec{L}_c$ , як наведено на рис. 1, а  $\Theta$  – кут між ними. Лінія зору спостерігача в КСВ<sub>c</sub> ортогональна до променя  $\vec{L}_c$ , як наведено на рис. 1. Вектори 4-імпульсів фотонів, що випромінюються нерухомим космічним об'єктом  $O$ , ортогональні до  $\vec{L}_o$  (нативні в КСВ<sub>o</sub>). У загальному випадку в точці  $C$  можна спостерігати лише ті космічні об'єкти, які перебувають на лінії реєстрованих подій – колі  $COBC$  діаметром, що дорівнює радіусу Габбла  $R_H = (4,235 \pm 0,002)$  Гпк [2]. Доступними оптичним спостереженням

будуть об'єкти, що знаходяться на усіх можливих лініях реєстрованих подій (в гіпероб'ємі реєстрованих подій).

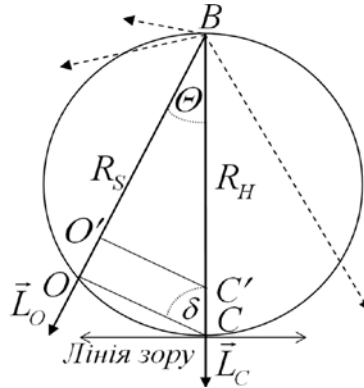


Рис. 1. Лінія реєстрованих подій

2.3. *Натуралізація частинок-номад.* Нехай у КСВ<sub>0</sub> випромінюється фотон з 4-імпульсом  $\vec{P}_0 = P_0 \vec{\xi}_0$ , для якого  $(\vec{\xi}_0, \vec{\zeta}_0) = 0$ . Тут  $\vec{\xi}_0$  – напрям поширення фотона у Всесвіті, а  $\vec{\zeta}_0$  – власний напрям КСВ<sub>0</sub>, як наведено на рис. 1. При переході фотона з системи відліку КСВ<sub>0</sub> до КСВ<sub>с</sub>, з власним напрямом  $\vec{\zeta}_с$ , для яких  $(\vec{\zeta}_с, \vec{\zeta}_0) = \cos \Theta > 0$ , фотон-мандрівник матиме надлишкову енергію  $E_0 = cp_0 = cP_0 \sin \Theta$  поряд з фотоном, породженим у КСВ<sub>с</sub>. У роботі використана гіпотеза, що в результаті взаємодії фотона-мандрівника з нерухомою чотиривимірною частинкою у КСВ<sub>с</sub>, він натуралізується, тобто стає нативним, а надлишкова енергія поглинається чотиривимірною частинкою. (Процес натуралізації фотонів фізично еквівалентний генерації частинок ДаМ.) У процесі натуралізації випромінюється (чи реєструється) новий фотон з 4-імпульсом  $\vec{P}_с = P_с \vec{\xi}_с$ , для якого  $(\vec{\xi}_с, \vec{\zeta}_с) = 0$  та

$$P_с = P_0 \cos \Theta. \quad (9)$$

2.4. *Зсув спектру випромінювання.* У спектроскопії вимірюють не величини імпульсів фотонів, а їхні частоти  $\omega$ , зв'язок між якими для нативних частинок задається формулою М. Планка  $E = cP = cp = \hbar \omega$  [6], де  $\hbar$  – стала Дірака. Відповідно до формули Планка переписемо (9) у вигляді:  $\omega_с = \omega_0 \cos \Theta$ . Оскільки в астрономії використовують параметр  $z$  відносного зсуву спектру  $z = \omega_0 / \omega_с - 1$  [1], формула (9) отримає вигляд:

$$\cos \Theta = (z + 1)^{-1}. \quad (10)$$

Космічні об'єкти спостерігають на небесній сфері [1], кожна точка якої є зображенням усієї лінії реєстрованих подій. Розосередити космічні об'єкти в просторі  $\mathbb{R}^4$  можна, вивчаючи зміни параметра  $z$ . Враховуючи, що відстань від центру симетрії  $B$  Всесвіту до космічного об'єкта  $O$   $BO = R_s$  (див. рис. 1) пов'язана з радіусом Габбла  $R_H$  та кутом  $\Theta$  (чи доповняльним  $\delta = \pi / 2 - \Theta$ ), відповідно до (10) запишемо:

$$R_s = R_H \cos \Theta = R_H \sin \delta = R_H (z + 1)^{-1}. \quad (11)$$

Процес зсуву неперервного спектру теплового випромінювання [3] аналогічний зсуву лінійчатого спектру зірок. Оскільки при реєстрації теплового випромінювання користуються поняттям його температури  $T_s$ , що пропорційна хвильовому числу, на яке припадає максимум неперервного спектру [1], формулу (11) можна переписати:

$$T_с = T_s \cos \Theta = T_s \sin \delta = T_s (z + 1)^{-1}. \quad (12)$$

Тут  $T_с = (2,72548 \pm 0,00057)$  К температура КМФ [3], яку реєструє спостерігач, а  $T_s$  – температура випромінювача. За помірними значеннями  $T_с$  та параметра  $z$  максимуму неперервного спектру можна розрахувати температуру  $T_s$  випромінювача.

2.5. *Перетворення проміжків часу.* На підтвердження гіпотези про напрями векторів 4-імпульсів фотонів розглянемо результати вимірювань тривалості спалахів наднових типу 1a (SN 1a) [1]. Якщо спалах починається в точці  $O'$ , а закінчується в точці  $O$  (див. рис. 1), то для спостерігача він почнеться в точці  $C'$ , а закінчиться в точці  $C$ . Відповідно до означення (5) проміжки часів  $\Delta t_o$  та  $\Delta t_c$  у локальних системах відліку пропорційні відрізкам  $O'O$  та  $C'C$ , що пов'язані з власними напрями двох різних КСВ (див. рис. 1). Враховуючи зв'язок (10), отримаємо:

$$\Delta t_o = \Delta t_c \cos \Theta = \Delta t_c (z+1)^{-1}. \quad (13)$$

Залежність (13) збігається з даними вимірювань тривалості спалахів SN 1a [8].

2.6. *Центральні об'єкти Всесвіту.* Усі точкові випромінювачі, що знаходяться на конкретній лінії реєстрованих подій, відображаються на небесній сфері окремими точками. Натомість центральний випромінювач (об'єкт, радіусом  $R_s$ , що охоплює усі власні напрями Всесвіту), проектується на всю небесну сферу (спостерігач знаходиться ніби всередині центрального випромінювача, тому збирати інформацію про його властивості можна з довільної точки небесної сфери та в довільних напрямках).

Для визначення розмірів центральних об'єктів Всесвіту використовують аналіз мультипольних моментів КМФ. Відповідно до [3], кутові розміри  $2\delta$  центральних об'єктів пов'язують з порядком  $\ell$  поліному Лежандра [3]:

$$\delta = \pi / (2\ell). \quad (14)$$

На рис. 2 наведено взятий із [2] графік ТТ-спектру мультипольних моментів КМФ, що містить дві принципово різні області: першу, в межах  $\ell < 30$  та другу, при  $\ell \geq 30$  (обидві вимагали окремих алгоритмів усереднення вимірів [2]).

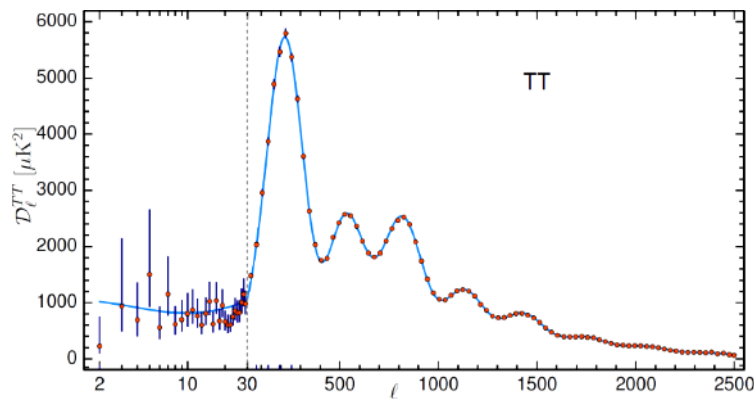


Рис. 2. ТТ-спектр мультипольних моментів КМФ

Ділянку ТТ-спектру при  $\ell < 30$  можна розділити на три якісно різні області: при  $\ell < 8$ , де спостерігаються хаотичні виміри, спричинені випромінюванням дискретних зірок і галактик, при  $8 \leq \ell < 20$ , де на спектр дискретних космічних об'єктів накладається вплив випромінювання значних об'ємів реіонізованого водню, та при  $20 \leq \ell < 30$ , де вплив реіонізованого водню відсутній. Відповідно до (14), величині  $\ell = 8$  відповідає значення кута  $\delta$  центрального об'єкта  $\delta = 0,098$  рад.

Зважаючи, що при  $\delta < 0,1$   $\sin \delta \approx \delta$ , для зручності наступних трактувань результатів вимірювань скористаємося лінеаризованими формулами (11), (12) та (14):

$$R_s = \frac{\pi}{4\ell} R_H, \quad z = \frac{4\ell}{\pi} - 1, \quad T_s = \frac{4\ell}{\pi} T_C. \quad (15)$$

Враховуючи (15), вимірам ТТ-спектру в діапазоні  $8 \leq \ell < 20$ , відповідає відносний зсув  $z$  спектру зірок в межах  $(9,2 < z < 24)$ , температури  $T_s$  центральних випромінювачів у межах  $(28 < T_s < 70)$  К та відносна відстань  $x = R_s / R_H$  від центру симетрії Всесвіту  $(0,039 < x < 0,098)$ . Порядку полінома Лежандра  $\ell = 30$  відповідають параметри  $z = 37$ ,  $T_s = 104$  К та  $R_s = 0,026 R_H$ .

При  $\ell > 30$ , переважає випромінювання, що породжене концентричними центральними об'єктами Всесвіту з кутами  $\delta < 0,026$  рад.

За таких кутів фотони КМФ поширюються по твірних конусу з кутом при вершині, меншим від  $2\delta$  та віссю, що збігається з власним напрямом  $\vec{L}_C$  КСВ. На рис. 2 першому піку (при  $\ell_1 = 210$ ) відповідає центральний випромінювач з кутовим розміром  $2\delta_1 = 7,28 \cdot 10^{-3}$  рад, а третьому, при  $\ell_3 = 860$ , (аномально високим порівняно з прогнозованим моделлю  $\Lambda$ CDM [1]), центральний випромінювач з кутовим розміром  $2\delta_3 = 1,82 \cdot 10^{-3}$  рад. Куту  $\delta_1 = 3,74 \cdot 10^{-3}$  рад. відповідає теплове випромінювання із  $z_1 = 266$ ,  $R_S = 3,74 \cdot 10^{-3} R_H$  та температурою  $T_1 = 729$  К.

Це випромінювання границі області останнього розсіяння [1], спричинене гіпотетично дисипацією кінетичної енергії речовини в космічних комірках, які лише формуються. Куту  $\delta_3 = 9,13 \cdot 10^{-4}$  рад відповідають параметри  $z_3 = 1094$ ,  $R_S = 9,13 \cdot 10^{-4} R_H$  та температура  $T_3 = 2984$  К, що близька до критичної для космологічної рекомбінації електронів та протонів [1]. Збіг значень кута  $\delta_3$ , порахованого різними способами (за космологічним зсувом та спектром мультипольних моментів КМФ) підтверджує гіпотезу лінійності Всесвіту.

### Висновки

Показано, що Всесвіт 4-вимірний, динамічний. Для його моделювання запропоновано апарат релятивістської механіки, що використовує евклідов 4-простір із виділеними принципом Лоренца інерційними космічними системами відліку. Введено поняття частинок різних вимірів та різновидів – нативних, парних та номад. Для пояснення червоного зсуву спектру зірок та космічного мікрохвильового фону запропоновано використовувати поняття натуралізації фотонів при їхньому переході між різними космічними системами відліку. Зроблено аналіз причин гомогенності матерії у Всесвіті (практичну відсутність антиматерії). Встановлено причини радіальної та часової структурованості Всесвіту.

### Література

1. Weinberg, S. (2008). *Cosmology*. Oxford University Press. 612 p.
2. Aghanim, N. et al. 12 (2007). [Planck 13] arXiv:1303.5076v3 [astro-ph.CO] 20 Mar 2014.
3. Smoot, G. F. (2007). Anisotropy of Relic Radiation. *UFN*. 177, 12, pp. 1294-1317. DOI <https://doi.org/10.3367>.
4. Pasternak, R. (2018). Means of the restrictions elimination of the space-time apparatus in relativistic mechanics *Visnyk TNTU*, No 1 (89), p. 64-71.
5. Dirac, P.A.M. (2008). *Principles of Quantum Mechanics* (4th ed.). Oxford science publications, 314 p.
6. de Wit, B., Smith, J. (1986). *Field theory in particle physics*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 502 p.
7. Derdzinski, A. (1992). *Geometry of the Standard Model of Elementary Particles*. Springer-Verlag, Berlin, 197 p.
8. Riess, A. G. et al. (2016). *Astrophys. J.* 826:56, 20 Jul. DOI <https://doi.org/10.3847/0004-637X/826/1/56>.

УДК 677.4+678.07

DOI 10.36910/775.24153966.2024.77.2

О.П. Чигвінцева, Ю.В. Бойко

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

## ВУГЛЕПЛАСТИК НА ОСНОВІ АЛІФАТИЧНОГО ПОЛІАМІДУ

Досліджено вплив температури переробки на термічні, теплофізичні, фізико-механічні і трибологічні властивості вуглепластику на основі аліфатичного поліаміду ПА-6,6. Встановлено, що оптимальний комплекс експлуатаційних характеристик має вуглепластик, відпресований при температурі 518К. Розроблений вуглепластик має високу теплопровідність і міцнісні характеристики, низькі значення питомої теплоємності, температурного коефіцієнта лінійного розширення і коефіцієнта тертя, а також гарну зносостійкість, що дозволяє рекомендувати його до застосування як матеріал конструкційного призначення

**Ключові слова:** аліфатичний поліамід, вуглецеве волокно, вуглепластик, експлуатаційні характеристики, конструкційний матеріал

O.P. Chigvintseva, Yu.V. Boyko

## CARBON PLASTIC BASED ON ALIPHATIC POLYAMIDE

The influence of the processing temperature on the thermal, thermophysical, physico-mechanical, and tribological properties of carbon fiber based on aliphatic polyamide PA-6.6 was studied. It was established that the optimal complex of operational characteristics has carbon plastic pressed at a temperature of 518K. Reinforcement of PA-6.6 with carbon fiber material allows to significantly improve the thermal and thermophysical properties of the polymer. Carbon fiber has high values of heat resistance and thermal conductivity ( $0.74-0.94 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ), good strength indexes, and almost 6 times lower temperature coefficient of linear expansion compared to the original polymer. The low coefficient of friction and high wear resistance and the PV performance criterion of the developed material make it possible to recommend it for use as a material for structural purposes in the field of mechanical engineering.

**Key words:** aliphatic polyamide, carbon fiber, carbon plastic, performance characteristics, constructional materials

**Постановка проблеми.** Комплекс покращених технологічних і експлуатаційних характеристик полімерних композиційних матеріалів забезпечує їх широке застосування у різноманітних галузях техніки. Особливе місце серед пластиків конструкційного призначення займають полімерні композиційні матеріали.

Аліфатичний поліамід марки ПА-6,6 (полігексаметиленадипамід) відрізняється своєю довговічністю і зносостійкістю, температуростійкістю (до  $+140^\circ\text{C}$  градусів) і міцністю при розтягуванні. Він стійкий до корозії, дії палива, мастил, жирів, більшості органічних розчинників і лугів, що робить його незамінним матеріалом для виготовлення виробів, що працюють в складних умовах експлуатації, де потрібна висока механічна міцність, жорсткість, термо- і хімічна стійкість.

Поліаміди і композити на їх основі використовуються як конструкційні, електроізоляційні і антифрикційні матеріали у електротехнічній, радіотехнічній, автомобільній, авіаційній, приладобудівній і медичній промисловості. Із них виготовляють корпусні деталі електро- та пневмоінструментів, будівельно-оздоблювальних та інших машин, що працюють в умовах ударних навантажень і вібрацій, деталі шахтного електроустаткування, залізничні втулки-прокладки, меблеві колеса, петлі та інші навантажені деталі меблів. В автомобільній промисловості із поліамідів виготовляють навантажені теплостійкі деталі автотранспортних засобів; зубчасті колеса, схильні до підвищених механічних і теплових навантажень; основи навантажених приладів та ін. [1].

**Мета роботи.** З метою створення нового композиційного матеріалу конструкційного призначення ПА-6,6 армували вуглецевим волокнистим матеріалом марки Урал Тр 3/2-15 у кількості 40 мас. %.

**Викладення основного матеріалу.** На початковому етапі досліджень вивчали вплив температури пресування теплофізичні властивості вуглепластика. Зразки полімерного композиту виготовляли за температур 513, 518 и 523 К. Результати досліджень показали, що у всьому дослідженому температурному інтервалі (323-573К) питома теплоємність вуглепластиків зі зростанням температури пресування збільшувалась (рис. 1а). Звертав на себе увагу той факт, що в області високих температур інтенсивність зростання теплоємності з підвищенням температури пресування істотно зменшувалась. На усіх температурних кривих при температурі 548К чітко проявлявся стрибок теплоємності, який відповідав температурі розм'якшення вуглепластиків.

Вплив температури пресування на коефіцієнти тепло- і температуропровідності досліджених матеріалів проявлявся у вигляді зворотної залежності: збільшення температури переробки вуглепластиків від 513 до 528К понижало тепло- та температуропровідність у дослідженому температурному інтервалі відповідно в 1,1-1,3 та 1,9-1,4 рази (рис. 1б, в).

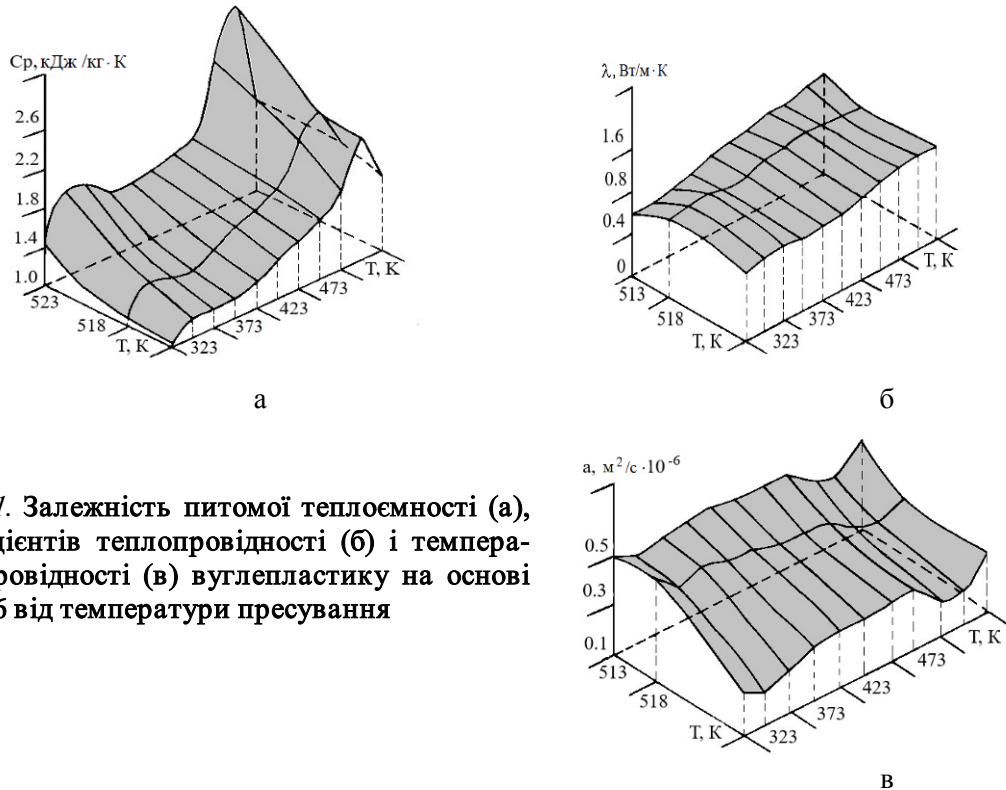


Рис. 1. Залежність питомої теплоємності (а), коефіцієнтів теплопровідності (б) і температуропровідності (в) вуглепластику на основі ПА-6,6 від температури пресування

Встановлено, що найбільш оптимальний комплекс теплофізичних досліджень мав вуглепластик, отриманий методом компресійного пресування за температури 518 К. Зразки цього вуглепластику мали низьку питому теплоємність в усьому дослідженому температурному інтервалі (1,1-18 кДж/кг · К) і високі значення коефіцієнта теплопровідності (0,74-0,94 Вт/м · К).

Розрахунок температурного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР), здійснений по кривим залежності відносного подовження зразка від температури (рис. 2), показав, що даний показник зі зростанням температури збільшився, а температура склування вуглепластика становила 516 К (табл. 1).

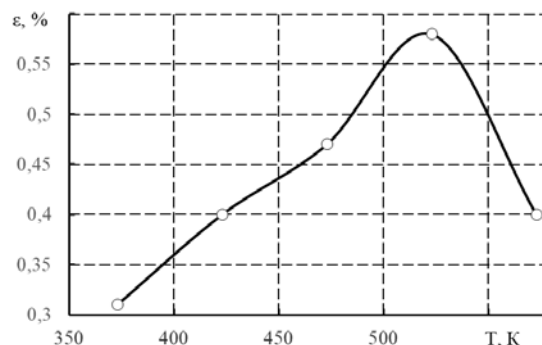


Рис. 2. Крива залежності відносного подовження вуглепластика на основі ПА-6,6 від температури

Порівняльний аналіз даних розрахунку ТКЛР вихідного полімеру і вуглепластику при інтервалі температур 298-323 К показав, що армування ПА-6,6 вуглецевим волокнистим матеріалом марки Урал Тр 3/2-15 знизило даний показник майже у 6 разів [3].

Одним з ефективних методів прогнозування поведінки матеріалів в умовах високих температур, є термогравіметричний метод аналізу. Відомо [2], що термостійкість визначається тією температурною межею, при якій починається термічна або термоокислювальна деструкція матеріалу, яка

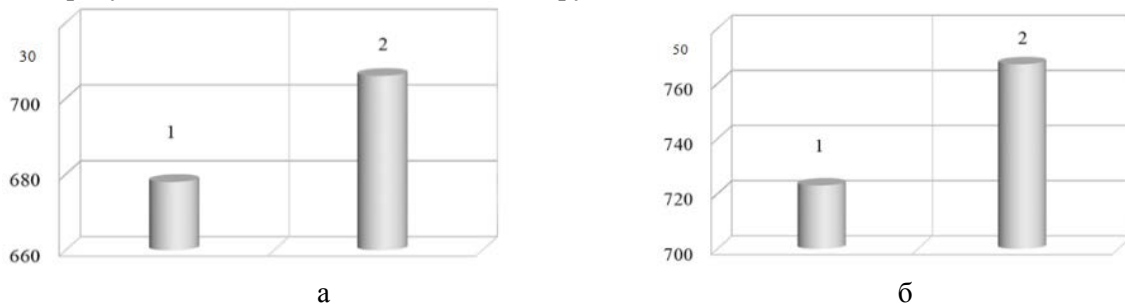
супроводжується виділенням летких продуктів. Внаслідок цього відбувається втрата маси досліджених зразків, що лежить в основі термогравіметричного аналізу.

Табл. 1.

**Термічний коефіцієнт лінійного розширення вуглепластику на основі ПА-6,6**

Температурний інтервал, К									T <sub>ст.</sub> , К
298-323	298-348	298-373	298-398	298-423	298-448	298-473	298-498	298-523	
15,1	23,0	22,8	28,8	30,2	31,5	32,3	33,2	33,7	516

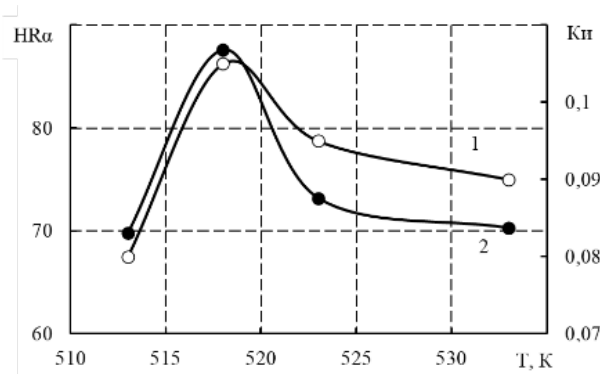
Дані термогравіметричного аналізу (рис. 3) показали, що армування ПА-6,6 вуглецевим волокнистим матеріалом марки Урал Тр 3/2-15 дозволило істотно підвищити його термостійкість: температура, що відповідала 30 і 50%-вій втраті маси зразків для вуглепластику відповідно була на 23 і 44 градуси вища, ніж для вихідного полімеру.



**Рис. 3. Температури що відповідають 30 і 50%-вій втраті маси (T<sub>30</sub> і T<sub>50</sub>) зразків ПА-6,6 (1) і вуглепластику на його основі (2)**

Крім поліпшених теплофізичних властивостей, вуглепластик, перероблений за температури 518 К, мав покращені фізико-механічні і трибологічні характеристики. Зокрема, розроблений матеріал мав порівняно з ПА-6,6 на 20 % більш високі міцнісні показники: межа міцності при стисненні складала 110 МПа, робота руйнування – 718 кДж, модуль пружності при стиканні становив 2750 МПа [3].

Слід зазначити, що спостерігалась гарна кореляція між залежністю відносної зносостійкості і твердості за Роквеллом вуглепластика від температури переробки (рис. 4): вказані показники мали максимальне значення для зразків, відпресованих за температури 518К.



**Рис. 4. Залежність відносної зносостійкості (1) і твердості за Роквеллом (2) вуглепластика на основі ПА-6,6 від температури переробки**

Дані щодо впливу температури переробки на тертя та знос розробленого вуглепластику представлені у таблиці 2.

Отримані результати свідчили про те, що кращі трибологічні характеристики мав вуглепластик, відпресований за температури 518 К, тому подальші дослідження щодо впливу режимів експлуатації на коефіцієнт тертя і інтенсивність лінійного зносу здійснювали на зразках, від пресованих при зазначеній температурі (рис. 5).

Табл. 2.

## Вплив температури переробки на триботехнічні характеристики вуглепластика на основі ПА-6,6

Температура пресування, К	Інтенсивність лінійного зношування, $\times 10^{-8}$	Коефіцієнт тертя
503	0,18	0,19
518	0,16	0,18

Примітка: тертя та знос вуглепластика здійснювали по контртілу зі сталі 45 (твердість 45-48 HRC, шорсткість  $Ra = 0,16-0,32$  мкм) при питомому тиску 0,4 МПа та швидкості ковзання 1 м/с, шлях тертя становив 1000 м.

Аналіз даних трибологічних досліджень свідчив про те, що зміна режимів експлуатації суттєво впливала на процеси тертя та зношування вуглепластику. Покращені трибологічні властивості мали зразки, що експлуатувались при швидкості ковзання 1,5 м/с. В усьому інтервалі навантажень матеріал мав низький коефіцієнт тертя (0,13-0,28) і незначний знос. В умовах досліджень при швидкості ковзання 2,0 м/с і навантаженні понад 1МПа зразки вуглепластику катастрофічно зношувались і матеріал втратив свою працездатність (рис. 4б). Згідно з отриманими даними, максимальне допустиме значення критерію працездатності  $PV$  для вуглепластику становило 2,0 МПа·м/с, в той час як для ПА-6,6 він не перевищував 1,8 МПа·м/с.

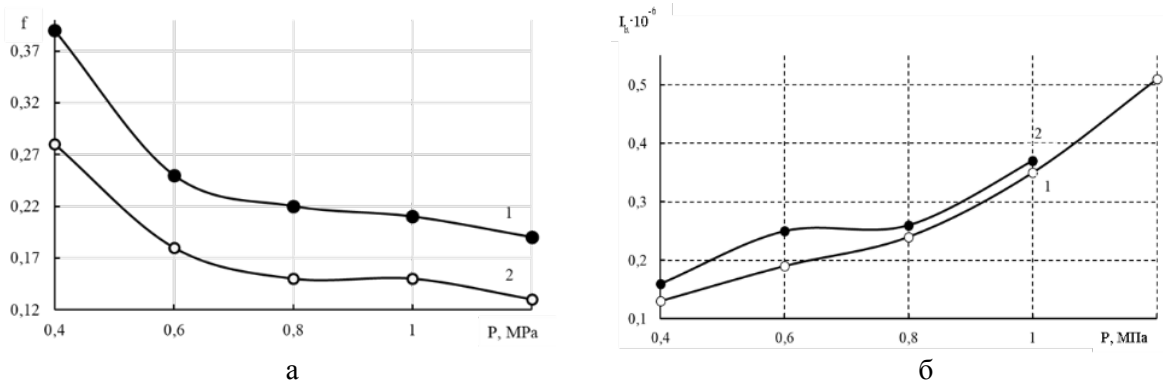


Рис. 5. Вплив питомого тиску (P) та швидкості ковзання (крива 1 – 1,5 м/с, крива 2 – 2,0 м/с) на коефіцієнт тертя (f) і інтенсивність лінійного зносу ( $I_h$ ) вуглепластику на основі ПА-6,6

**Висновки.** Таким чином, дані проведених термічних, теплофізичних, фізико-механічних і трибологічних досліджень свідчили про те, що оптимальний комплекс властивостей мав вуглепластик, відпресований за температури 518К. В цілому, розроблений вуглепластик на основі ПА-6,6 і вуглецевого волокнистого матеріалу марки Урал Тр 3/2-15 мав високу теплопровідність і міцнісні характеристики, низькі значення питомої теплоємності, температурного коефіцієнта лінійного розширення і коефіцієнта тертя, а також гарну зносостійкість, що дозволило рекомендувати його до застосування як матеріал конструкційного призначення в галузі машинобудування.

## Список використаних джерел:

- [1] Кацнельсон М.Ю., Балаев Г.А. Пластические массы. Свойства и применение: Справочник. Л.: Химия, 1978. 384 с.
- [2] Коршак В.В. Термостойкие полимеры. М.: Наука, 1969. С. 25.
- [3] Chigvintseva O.P., Boyko Y.V., Gupalo S.I. Carbon fiber for structural purposes based on aliphatic polyamide // The XXIII International Scientific and Practical Conference «Scientific trends, solutions, theories and methods of development», June 12 – 14. Bilbao, Spain. P. 291-295.

## Рецензенти:

**О.Д. Деркач**, завідувач кафедри експлуатації машинно-тракторного парку Дніпровського державного аграрно-економічного університету, к.т.н., доцент

**О.С. Кабат**, завідувач кафедри інноваційної інженерії ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», д.т.н, професор



УДК 621.891

DOI 10.36910/775.24153966.2024.77.3

С.П. Шимчук, М.С. Півницький

Луцький національний технічний університет

**ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКТИВНИХ ТА ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШВИДКОРОЗБІРНОГО КОНВЕЄРНОГО ЛАНЦЮГА**

*В роботі досліджено конструктивні та трибологічні властивості ланцюгової передачі, що складається з швидкокорозбірного конвеєрного ланцюга та зірочки. В ході чого змодельовано відповідну ланцюгову передачу та розглянуто особливості контактної взаємодії в ланках такого ланцюга й між ланцюгом і зірочкою. Досліджено зносостійкість в парі тертя зірочка-ланцюг, що виготовляється з вибраних конструкційних матеріалів.*

*Ключові слова:* ланцюг, ланцюгова передача, ланка, зносостійкість, пара тертя

S.P. Shymchuk, N.S. Pivnytskyi

**RESEARCH OF THE STRUCTURAL AND TRIBOLOGY PROPERTIES OF THE QUICKLY DISASSEMBLY CONVEYOR CHAIN**

*The work investigates the structural and tribological properties of a chain transmission consisting of a quick-dismountable conveyor chain and a sprocket. In the course of such a study, such a chain transmission was modeled and the features of the contact interaction in the links of such a chain and between the chain and the sprocket were considered. The wear resistance of the sprocket-chain friction pair, which is made of recommended structural materials, was studied.*

*Keywords:* chain, chain transmission, link, wear resistance, friction pair

**Вступ.** Приводні ланцюги та ланцюгові передачі дуже широко використовуються в транспорті, сільськогосподарському машинобудуванні, лісовому господарстві, гірничодобувній промисловості та інших галузях машинобудування і транспорту. Такі передачі призначені для передачі руху і, залежно від конструкції ланцюга та кінематичних параметрів передачі загалом, можуть працювати в широкому діапазоні швидкостей та навантажень. Так, наприклад, за високих швидкостей обертання працюють ланцюги в автомобільних двигунах, а за відносно низьких швидкостей та при високих контактних навантаженнях й значних тягових зусиллях – в конвеєрах.

**Аналіз спеціальної наукової літератури.** В спеціальній науковій літературі ланцюговим передачам приділяється достатньо уваги [1 – 5], що показує інтерес до таких досліджень та сприяє їх практичній реалізації. Проте, як показує літературний та патентний пошук більшість дослідників, в основному приділяє увагу модернізації таких передач [4], заміні матеріалів, з яких виготовляються елементи ланцюгових передач [6]. Детально висвітлені питання, що стосуються розробки конструктивно нових видів ланцюгів в науковій літературі зустрічаються набагато рідше [5].

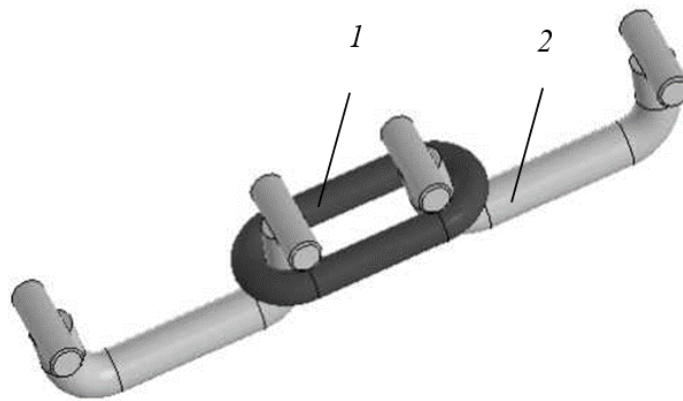
**Постановка завдань дослідження.** Дослідити основні експлуатаційні властивості швидкокорозбірного конвеєрного ланцюга, що рекомендується для використання при невеликих швидкостях обертання.

**Методика дослідження.** Моделювання та дослідження міцнісних характеристик було виконано з використанням програмного продукту типу SolidWorks [3]. Випробування на тертя та зношування було виконано за умови сухого тертя, при лінійному контактуванні досліджуваних поверхонь [7 – 10]. Досліджувані зразки виготовлялися з конструкційних матеріалів, що розглядаються як матеріали для виготовлення розробленого ланцюга.

**Результати дослідження.** Ланцюг досліджуваної конструкції, рекомендується використовувати в ланцюгових передачах різних конвеєрів на підприємствах та обладнанні лісопереробної, сільськогосподарської та гірничодобувної галузей. Також може використовуватись при виробництві мінеральної вати (таке виробництво супроводжується високими температурами та іншими агресивними умовами роботи, зокрема й підвищеним абразивним зношуванням).

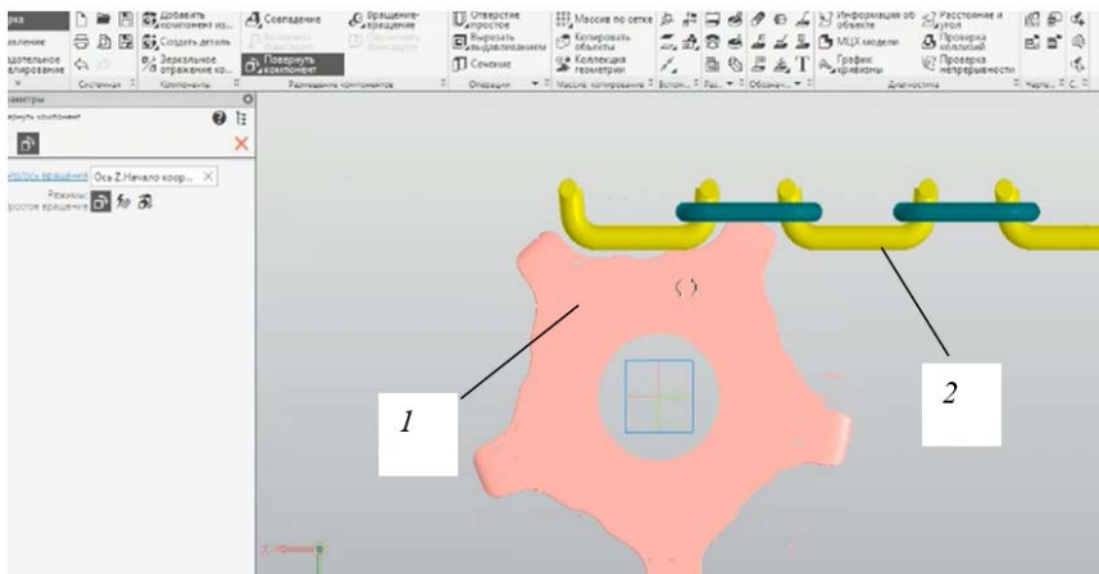
Модель ланцюга наведено на рис. 1. Досліджуваний ланцюг складається з двох типів, конструктивно різних між собою ланок. Це овальні ланки 1, які з'єднуються між собою проміжними ланками «С»-подібної форми (ланки 2). Для запобігання саморозбиранню ланок ланцюга, при роботі чи інших можливих варіантах зменшення необхідного натягу передачі, на кінцях ланок 2 приварюються, чи кріпляться іншим способом, спеціальні запобіжні поперечини. Ланки з'єднуються між собою без додаткових кріпильних елементів.

Моделювання розробленої ланцюгової передачі виконували в середовищі SolidWorks (рис. 2). Розрахунок ланцюгової передачі відбувається по відомих методиках [11 – 13].



**Рис. 1. Модель досліджуваного ланцюга:  
1 – овальні ланки; 2 – «С»-подібні ланки**

Під час роботи, ланки ланцюга, контактують між собою в точці контакту та завдяки особливій конструкції попереджують виникнення розгинаючих сил, що дає змогу виготовити ланцюг покращеної металоемкості. Така конструкція дозволяє ланці з'єднання працювати тільки на розтяг і дає можливість значно зменшити вагу цієї ланки порівняно з відомими аналогами, а овальній ланці надійно контактувати з зірочкою. Довжина овальної ланки має бути більшою від радіусу заокруглення.



**Рис. 2. Результати моделювання розробленої ланцюгової передачі в середовищі  
SolidWorks:  
1 – зірочка; 2 – ланцюг**

В робочому стані ланцюга діє сила розтягу  $N$  (рис. 3). Під дією цієї сили передається тягове зусилля від джерела руху до робочого органу. При навантаженні, у з'єднувальній ланці, за рахунок кута  $\alpha$  і поперечини  $A$ , виникає сила розтягу  $N_1$ . Через заклинювання поперечини  $A$  з площиною овальної ланки  $B$  у поздовжній частині з'єднувальної ланки діє лише сила розтягу  $N$ , а у вертикальній частині – сила  $N_1$ .

Моделювання контактної взаємодії при терті спряжених поверхонь ланцюга було виконано за методикою [7 – 10], при лінійному контактуванні зразків з вибраних для дослідження матеріалів. Ширина контакту становила 3 мм. Дослідження проводились при контактному навантаженні  $P=20$  Н. Частота обертання контрзразка  $\omega$ , в усіх випадках становила 185 об/хв. Сумарний шлях тертя становив 4500 м.

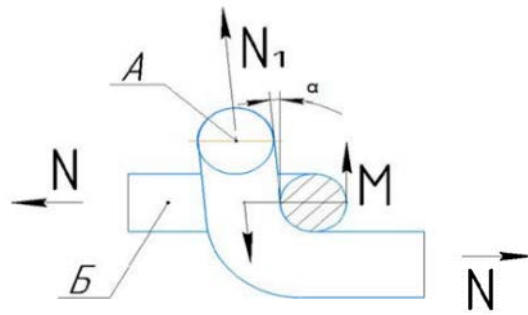


Рис. 3. Схема дії сил у зачепленні досліджуваного ланцюга між з'єднувальними ланками

Тертя, у досліджуваній системі, виникає між поверхнями овальних та проміжних ланок «С»-подібної форми ланцюга, а також між поверхнями ланок ланцюга та зірочкою. Враховуючи матеріали, з яких доцільно виготовляти ланцюгову передачу такого типу [14, 15], дослідимо наступні пари тертя: сталь 40Х – сталь 40Х, сталь 45 – сталь 45, сталь 35 – сталь 35, сталь 40Х – сталь 45. За критерій зносостійкості, було вибрано величину лінійного зносу нерухомого плоского зразка, вимірюваного за допомогою профілографа-профілометра Калібр М-201.

Результати дослідження наведено в таблиці 1.

Табл. 1.

Залежності величини зношування вибраних спряжень матеріалів досліджуваного ланцюга від вибраних умов тертя

Матеріал пари тертя		Величина сумарного лінійного зносу I, мкм
Матеріал зразка	Матеріал контрзразка	
Сталь 40Х	Сталь 40Х	6,3
Сталь 45	Сталь 45	7,5
Сталь 35	Сталь 35	8,2
Сталь 40Х	Сталь 45	7

### Висновки.

Досліджено конструктивні параметри та експлуатаційні характеристики швидкозбірного конвеєрного ланцюга.

В ході досліджень розроблено модель такого ланцюга, приведено схему дії сил у зачепленні досліджуваного ланцюга між з'єднувальними ланками.

Результати трибологічних досліджень свідчать, що для виготовлення запропонованої ланцюгової передачі, можна використовувати усі розглянуті спряження матеріалів, проте найбільш доцільно використовувати спряження сталь 40Х – сталь 40Х та сталь 40Х – сталь 45.

### Список використаних джерел:

1. Пилипенко О.І., Полуян А.В. Побудова моделей і порівняльний аналіз кінематики ланцюгових передач в металевому та полімерному виконанні //Наукові нотатки. – 2013. – №. 41 (2). – С. 96-102.
2. Пилипенко О.І., Степенко А.П., Козар І.Ф. Вплив похибок виготовлення ланцюгів на контактну взаємодію елементів ланцюгових передач з різних матеріалів. Вісник Чернігівського технологічного інституту №3. Машинобудування. Електроніка. Чернігів, 1997. – С.75-84.

3. Пилипенко О.І., Полуян А.В. 3D-моделювання кінематики ланцюгової передачі за допомогою програмного комплексу SolidWorks. – Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «АВІА-2013» 21-23 травня 2013 року, м. Київ. – Том 1, С. 3.10 – 3.13.
4. С.П. Шимчук, М.С. Півницький, Н.П. Зайчук. Використання ланцюгових передач в різних галузях сучасного машинобудування // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. - Луцьк: Луцький НТУ - 2021. – Випуск 72, с. 170-174.
5. М.С. Півницький, С.П. Шимчук Розробка конструкції швидкорозбірного ланцюга для роботи за невеликих швидкостей обертання // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. - Луцьк: Луцький НТУ - 2023. – Випуск 76, с. 183-186.
6. С.П. Шимчук. Проблема імпортозаміщення матеріалів конструкційного призначення машинобудівними підприємствами України / С.П. Шимчук, Н.П. Зайчук, М.С. Півницький, І.В. Орловський, Яцек Щот // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. - Луцьк: Луцький НТУ - 2023. – Випуск 75, с. 92-94.
7. Стельмах О.У. Особливості зношування сталі ШХ15 в режимі граничного тертя: монографія / О.У. Стельмах, Р.Є. Костюнік, С.П. Шимчук, Н.П. Зайчук. – Луцьк : Вежа-Друк, 2013. – 160 с.
8. Стельмах А.У., Сидоренко О.Ю., Костюнік Р.Є. Методика ідентифікації ГСМ по противоизносным и антифрикционным свойствам с учетом реальных условий их работы // Технологические системы. – Киев: ЗАО «Компания «Индустриальные технологии». – 2002. – №3. – С.96 – 101.
9. Шимчук С.П. Прилад тертя для дослідження конструкційних і мастильних матеріалів при односторонньому і реверсивному терті / С.П. Шимчук // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Випуск 41, частина 2. Луцьк, 2013. – с.262-268.
10. Шимчук С.П. Прилад для дослідження тертя ковзання в умовах вібрації. / Шимчук С.П., Селезньов Е.Л., Шимчук Ю.П., Микитюк О.О. // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки» за галузями знань «Технічні науки». Випуск № 49. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2015., 190 – 193 с.
11. Павлице В. Основи конструювання та розрахунок деталей машин: Підручник. Львів: Афіша, 2003. – 560 с.
12. Коновалюк Д.М., Ковальчук Р.М. Деталі машин: Підручник. – Вид. 2-ге. – К.: Кондор, 2004. – 584 с.
13. Писаренко Г.С. Опір матеріалів / Г.С. Писаренко, О.Я. Квітка, Е.С. Уманський. – К.: Вища школа, 2004. – 635 с.
14. Технологія конструкційних матеріалів: Підручник / М.А.Сологуб, І.О.Рожнецький, О.І.Некоз та ін. – К.: Вища школа, 2002. – 374 с.
15. Гарнець В. М. Конструкційне матеріалознавство / В. М. Гарнець, В. М. Коваленко. – К.: Либідь, 2007. – 384 с.

В. М. Голубець<sup>1</sup>, М. І. Пашечко<sup>2</sup>, Ю. С. Шпуляр<sup>1</sup>

## ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПІДТВЕРДЖЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ФРЕЗЕРУВАННЯ ДЕРЕВИНИ

<sup>1</sup> Національний лісотехнічний університет України

<sup>2</sup> Люблінський технічний університет "Люблінська політехніка"

*Проаналізовано вплив замірів багатьох параметрів в процесі лабораторних тестувань на достовірність отриманих експериментальних даних. Приведено структуру та фізико-механічні властивості деревини як конструкційного матеріалу. Звернено увагу на підвищення ресурсу роботи дереворізального інструменту при різанні деревини, зокрема, найбільш простою і ефективною технологією електроіскрового легування. Описано фізичну суть такої технології. Запропоновано метод інтерполяції і побудовано математичні моделі (функціональні залежності) зміни моменту опору різання при фрезеруванні деревини дисковими фрезами із сталі 9XC з нанесеними на робочу частину зубців електродами із порошкових дротів електроіскровими покриттями різного фазового складу. Підтверджено, що відповідність між експериментальними значеннями даних моменту опору різання лежить в межах від 1 до 3 %.*

*Ключові слова:* достовірність результатів, деревина, дереворізальний інструмент, порошковий дріт, електроіскрове покриття, момент опору різання, метод інтерполяції, математична модель.

V. M. Holubets, M. S. Pashechko, Yu. S. Shpuljar

## CONSTRUCTION OF MATHEMATICAL MODELS FOR CONFIRMING THE RELIABILITY OF THE RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH FROM WOOD MILLING

*When conducting experimental scientific research, there is always a need to determine the accuracy of the obtained results to prove their reliability. Particular attention is paid to this in case of technical sciences, since the process of experiments involves many factors, parameters and other characteristics of the products subject to research. So, for example, in the specialties "Materials Science", "Industrial Mechanical Engineering", "Friction and Wear in Machines", and ultimately in many others, when conducting laboratory, bench or operational testing of certain characteristics of materials, modes of technological processes and processing, or surface hardening, a great number of parameters belonging to the object of research are covered. In addition to conducting a large number of experimental studies, numerical-tabular and numerical-graphical values of the studied quantities are always obtained. In this regard, there is a need to build mathematical models of the dependence of experimental studies, and sometimes even observations of the technological process, because it is not known in advance whether each of them is absolutely reliable due to the influence of a number of side factors that are considered random. Random factors include measurement errors, as well as factors resulting from the impossibility or expediency of perfectly accurate observance of the experimental conditions of each of the experimental values.*

*It is relevant, for example, to consider the methodology for constructing mathematical models in relation to the correspondence between the obtained experimental data [2] for the case of laboratory testing of the cutting resistance moment (CRM) during milling of oak and pine along and across the grain, depending on the dry or moist state, using a disc-shaped cutter made of 9XC steel with electrospark coatings applied to the teeth, where analyzed was the effect of ESC of different structural-phase states, obtained by electrodes from both T15K6 hard alloy and flux-cored wires of the Fe-Mn-B-C and Fe-Cr-B-C system, on the strength indicators of milling wood materials in comparison with 9XC steel, hardened and low-tempered, (without strengthening of teeth).*

*The refore, there is a need to describe the studied process in some way, i.e. to present it in a certain mathematical relationship (mathematical model).*

*Key words:* reliability of results, wood, wood-cutting tool, flux-cored wire, electrospark coating, cutting resistance moment, interpolation method, mathematical model.

**Вступ.** При проведенні експериментальних наукових досліджень завжди виникає потреба визначення точності отриманих результатів для підтвердження їх достовірності. Особливо звертається на це увага для технічних наук, оскільки у процесі експериментів приймають участь безліч чинників, параметрів та інших характеристик виробів, що підлягають дослідженням. Так, наприклад, у спеціальностях «Матеріалознавство», «Галузеве машинобудування», «Тертя та зношування в машинах», зрештою і у багатьох інших, при проведенні лабораторних, стендових чи експлуатаційних тестувань певних характеристик матеріалів, режимів технологічних процесів і обробки, або поверхневого зміцнення охоплюється величезна кількість параметрів, що належать об'єкту досліджень. Крім проведення багатьох кількостей експериментальних досліджень, завжди отримуються чисельно-табличні та чисельно-графічні значення досліджуваних величин. У зв'язку з цим виникає необхідність побудови математичних моделей залежності експериментальних досліджень, а іноді навіть спостережень технологічного процесу, бо наперед невідомо, чи кожне із

них є абсолютно достовірним внаслідок впливу ряду побічних факторів, які прийнято вважати випадковими. До випадкових факторів відносяться похибки вимірювання, а також фактори, що впливають з неможливості чи доцільності ідеально точного дотримання умов експерименту кожного з експериментальних значень.

Актуальним, наприклад, є розгляд методики побудови математичних моделей стосовно відповідності між отриманими експериментальними даними [2] для випадку лабораторних тестувань моменту опору різання  $M_r$  під час фрезерування дуба і сосни вздовж і поперек волокон залежно від сухого або вологого стану дисковою фасонною фрезою зі сталі 9ХС з нанесеними на зубці електроіскрових покриттів, де проаналізовано вплив ЕП різного структурно-фазового стану, отриманих електродами як з твердого сплаву Т15К6, так і порошкових дрітків системи Fe-Mn-B-C і Fe-Cr-B-C на силові показники фрезерування деревинних матеріалів в порівнянні зі сталлю 9ХС загартованою і низьковідпущеною (без зміцнення зубів). Відзначимо, що впродовж лабораторних тестувань одночасно фіксувалися зміни моменту опору індуктивним здавачем. Також записувалися вимірювальні параметри, зокрема, час, покази давача, та постійні фрези, а саме радіус, питоме навантаження, площа контакту зі зразком. Далі будувалися залежності моменту опору різання  $M_r$  від часу досліджень. На них визначалися етапи технологічного процесу: холостий хід фрези до початку контакту з деревиною, початок контакту, області різання, розвантаження та холостий хід після контакту.  $M_r$  обчислювали за певною формулою та будувалися гістограми залежностей  $M_r$  для кожного виду покриттів. Таким чином було встановлено, що найбільшого зниження  $M_r$  досягнуто під час фрезерування інструментом, зміцненим електродом комбінованим ПДГ (ПД 80Х20Р3Т системи Fe-Cr-B-C з додатком графіту МПГ-7). Виявлено, що в усіх випадках різання деревини вздовж волокон показник  $M_r$  є більшим ніж при різанні поперек волокон. Збільшення  $M_r$  зафіксовано також для дуба і сосни у вологому стані порівняно із сухим станом.

Тому постає потреба якимось чином описати досліджуваний процес, тобто представити його у певній математичній залежності (математичній моделі). В одних випадках така залежність може бути строго визначеною, тобто функціональною, а в інших - вона не є такою тісною і носить стохастичний характер. Отже задача встановлення типу залежності однієї величини від іншої є важливою, як в науковому, так і в практичному плані, при цьому не залежно від того чи є матеріал металічного стану, чи неметалічного.

**Мета роботи.** Встановлення відповідності між отриманими експериментальними даними силових показників у процесі різання деревини та побудованими моделями (функціональними залежностями) для підтвердження достовірності результатів досліджень.

**Характеристика деревини.** Деревина доволі відома як неметалевий матеріал [1]. Частка її у сучасних конструкціях зростає за рахунок зменшення у них частки металів. Деревинні матеріали повністю або частково виготовляють із деревини. Їх застосовують у будівництві, меблевій промисловості, рідше в машинобудуванні, суднобудуванні та багатьох інших галузях. Деревинні матеріали мають невелику густину, порівняно високу механічну міцність, надійно з'єднуються клеєм, шурупами, цвяхами, добре фарбуються, мають гарний текстурний рисунок й добрі теплоізоляційні властивості. До негативних властивостей деревинних матеріалів належать гігроскопічність, що спричиняє зміну розмірів, схильність до гниття, горіння і розтріскування. Щоб захистити деревину від гниття, її просочують розчинами солей (NaF, ZnCl<sub>2</sub>, CuSO<sub>4</sub> та ін.), покривають лакофарбними матеріалами, а елементи конструкцій, що контактують з вологою, захищають гідроізоляцією. Щоб знизити ризик займання на деревину наносять вогнезахисні фарби, або просочують її антипіренами (солі фосфорної чи борної кислот).

Деревина як матеріал рослинного походження і як конструкційний матеріал складається у сухому стані з ~ 50 % целюлози (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub> природного полімеру лінійної будови, ~ 25 % геліцелюлози і ~ 25 % високов'язкої рідини густосітчастої будови – лігніну. Крім перелічених речовин у свіжозрізаному дереві є ще багато води. Деревина має волокнисту будову стовбура, характеризується анізотропією, тому макроструктуру доцільно розглядати у трьох перетинах: поперечному перпендикулярно до осі стовбура й до волокон, радіальному вздовж стовбура через його вісь і тангентальному паралельно до осі стовбура на деякій від неї відстані. До механічних властивостей, крім міцності, слід віднести високий опір ударним і вібраційним навантаженням, а також опір згину твердих порід, наприклад, дуба (листяної породи) при ударних навантаженнях в 1,5...3 рази вищий, ніж для м'яких (хвойних порід) – сосни. Невелика питома маса деревини, як фізична властивість  $\gamma = 0,34 - 0,98$  г/см<sup>3</sup> та залежить від вологості (суха деревина приймається з

вологістю до 10 %, волога – до 40 %). Отже деревина характеризується високою питомою міцністю, а також малою теплопровідністю і в 20 разів має менший, ніж у сталі температурний коефіцієнт лінійного розширення. До фізичних властивостей деревини належить також здатність до усихання і до водопоглинання, тепло- й електропровідність. Деревина має високу хімічну стійкість до деяких кислот, солей, мастил, газів.

Для порівняння наведемо основні фізико-механічні властивості твердої породи, наприклад дуба, в порівнянні з м'якою сосною: більша густина  $\gamma = 723 \text{ кг/м}^3$  проти 534 у сосни, границя міцності на розтяг вздовж волокон  $G_m = 145 \text{ МПа}$  проти 103; торцева твердість  $HV = 67,5 \text{ МПа}$  проти 28,5.

Проте обмаль даних про фрикційну поведінку деревини в умовах її контактної взаємодії при терті ковзання, про абсолютні значення величин зносу і коефіцієнта тертя та механізм зношування [3, 4].

До позитивних переваг деревини слід віднести факт легкого оброблення її різанням. При цьому використовуються інструменти різних груп сталей (вуглецевих, легованих, швидкорізальних високолегованих) та твердих сплавів груп ВК і ТК. Дані про їх характеристики (марки, прогартовуваність, теплостійкість, діаметр інструменту, термічну обробку, твердість, структуру, допустиму швидкість різання, вид інструменту або оброблення) подано у [5, 6]. Певний інтерес проявляється до проведення досліджень контактної взаємодії різального інструменту на силові показники при різанні деревини.

Актуальною при цьому постає необхідність підвищення ресурсу роботи дереворізального інструменту, оскільки витрати на його придбання та загострювання є досить значними. Інтенсифікація режимів оброблення деревини можлива при застосуванні твердих сплавів. Але їх використання значно підвищує вартість і ускладнює технологію виготовлення. Тому вигіднішим є застосування методів поверхневого зміцнення для підвищення зносостійкості різальних лез інструментів, виготовлених з однорідного матеріалу. Матеріал інструменту повинен мати необхідні технологічні властивості, зокрема хорошу оброблюваність різанням і тиском, термостійкість, прогартовуваність, стійкість до деформацій та утворення тріщин і певні властивості щодо шліфування.

Зміцнення лез інструментів та відновлення вихідних розмірів деталей відбувається шляхом нанесення на їх поверхню шару покриття, що відрізняється від основи підвищеними механічними характеристиками. Одним із шляхів зменшення витрат на вирішення цих проблем є обґрунтування вибору недорогих матеріалів та способів, які використовують у технологічному процесі зміцнення чи відновлення.

Найбільш простим і ефективним методом нанесення на робочі поверхні лез метало- та дереворізальних інструментів покриттів певного хімічного складу, який дає можливість значно підвищити їх зносостійкість, є електроіскрове легування.

**Сутність технології електроіскрового легування.** Основні переваги технології електроіскрового легування (ЕІЛ) полягають у можливості переносу на поверхню металів і сплавів будь-яких струмопровідних матеріалів, у високій міцності адгезії шару з основою, локальному нанесенні електроіскрового покриття без помітної деформації деталі, уникненні необхідності нагріву всього об'єму виробу.

Принципово метод ґрунтується на використанні електричної енергії, що виділяється миттєво і характеризується високою температурою каналу іскри (до  $1000^\circ\text{C}$ ) та іонізацією міжелектродного проміжку. Оскільки під час одиночного розряду протікають короткі за часом імпульси електричного струму від  $10^{-3}$  до  $10^{-5} \text{ сек.}$ , то відвід тепла не забезпечується теплопровідністю металу і тому його малі об'єми зазнають коливань температури від температури кипіння металів до  $20 \dots 30^\circ \text{C}$ .

Схема процесу ЕІЛ представлена на рис. 1.

Сутність його полягає у наступному. При зближенні електродів 1 і 2 збільшується напруженість електричного поля. Відстань між електродами 5...20 мм буде достатня для виникнення електричного розряду (зона 3), під час якого утворюється канал наскрізної провідності.

Сфокусований потік електронів 4 з катода 2 потрапляє на поверхню анода 1 і за рахунок виділення теплової енергії (тобто система миттєво звільнює накопичену енергію) проходить випаровування 5 найбільш розігрітої частини анода, а від анода відриваються частини 7 (краплі) розплавленого металу, які рухаються до катода 2 зі швидкістю, що є більшою за швидкість руху

анода. Ці продукти викидаються у міжелектродний простір 3. Більш віддалена частина електрода 6 і, відповідно, менш розігріта, оплавлюється.

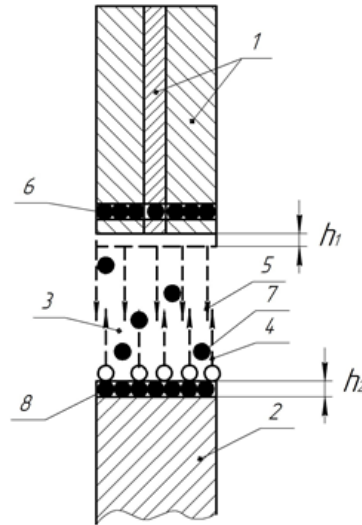


Рис. 1. Схема процесу електроіскрового легування: 1 – анод (комбінований електрод ПДГ [2])

2 – катод (деталь), 3 – зона розряду, 4 – потік електронів з катода до поверхні анода, 5 – потік випаровування найбільше розігрітої частини електроду в зоні розряду, 6 – оплавлена більш віддалена і менш розігріта частина електрода, 7 – продукт оплавленої частини в міжелектродному просторі, 8 – електроіскрове покриття;  $h_1$  – об'єм витраченого аноду в процесі легування,  $h_2$  – об'єм відкладеного шару на катоді за час легування в повітряному середовищі на 9-му режимі роботи

При механічному контакті електродів 1 і 2 частинки 7 зварюються між собою, частинки анода дифундують в метал катода, відбувається взаємодія між обома частинами. Після цього анод відводиться, а на катоді залишається шар 8 міцно зчеплених з катодом частинок аноду (електроіскрове покриття).

Наведене вище свідчить про зміни у структурі поверхневого шару металу: подрібнюється структура, підвищується твердість металу. Завдяки високій іонізації міжелектродного проміжку створюються умови для хімічної взаємодії, що веде до зміни фазового складу поверхневого шару. При ЕІЛ на повітрі утворюються оксиди і в меншій мірі нітриди металів, які беруть участь у технологічному процесі легування. В хімічну взаємодію з матеріалом катода вступають також і компоненти матеріалу анода, на поверхні металу утворюється новий шар зі зміненою структурою, яка не визначається при дії на неї стандартними травниками - так званий «білий шар». При легуванні чистих металів під шаром знаходиться область термічного впливу тобто область відпущеного металу і білий шар (дві області), при легуванні сталевих виробів - 3 області: білий шар, область збагачена вуглецем і область термічного впливу.

**Методика побудови математичних моделей досліджуваних процесів.** Зупинимося на побудові їх функціональних залежностей (аналітичних формул), яким на даний час, присвячено великий обсяг наукових та навчальних розробок. Математичним апаратом цих методик є методи інтерполяції та апроксимації, які широко описані у всіх підручниках, що стосуються висвітлення чисельних методів. Зокрема, метод інтерполяції полягає в тому, що у більшості випадків для відображення функціональної залежності досліджуваного технологічного процесу використовують многочлени Лагранжа або Ньютона. Проте ці формули мають певні недоліки. Формула Лагранжа є досить громіздкою і не настільки загальною, оскільки, якщо виникає потреба у покращенні точності інтерполяції, то при збільшенні експериментальних значень, потрібно наново проводити всі обчислення, бо на одну із змінних формули Лагранжа вони не зберігаються. Стосовно формули Ньютона - то тут не маємо тих проблем, вона є досить зручною, проте у випадку, якщо значення експериментальних даних, які є аргументами змінних формули і утворюють арифметичну прогресію, то не завжди можемо про них так стверджувати.

Вважаємо, що у деяких випадках, де не вимагається висока точність збіжності побудованих функціональних залежностей з експериментальними, можемо інтерполювати ці залежності у вигляді звичайного многочлена певного порядку, проте не вище п'ятого, оскільки з ростом кількості вузлів інтерполяції росте і степінь многочлена. Але від цього, взагалі кажучи, інтерполяційний



многочлен не стає більш точним наближенням табличної функції. Більше того, з таким многочленом важче працювати через його громіздкість.

Нехай величина  $y$  функціонально залежить від деякої величини  $x$ . Це означає, що кожному значенню  $x$  з певної множини  $X$  відповідає одне значення  $y$  із множини  $Y$ . На практиці часто є невідомою залежність між  $x$  і  $y$ , тобто неможливо записати цю залежність у вигляді  $y = f(x)$ . Якщо ж таку залежність і можна встановити, то в багатьох випадках функція  $f(x)$  є настільки складною, що її використання в подальших практичних обчисленнях є недоцільним. Дуже поширеним і практично важливим випадком, коли вид зв'язку між величинами  $x$  і  $y$  є невідомий, є задання відповідності деяких значень величин  $x_i$  величинам  $y_i$  у вигляді таблиці.

Як правило, таблично задані функції виникають в результаті обчислень при експериментальних дослідженнях. Часто потрібно знайти чому рівна величина  $y$  при значеннях величини  $x$ , відмінних від значень  $x_i$ . Отримати такі значення можна лише шляхом складних обчислень або проведенням дорогих експериментів. Тому потрібно вміти хоча б приблизно знаходити значення  $y$  при будь-якому значенні  $x$  із деякої множини  $X$ , маючи в наявності лише деяку кількість значень величини  $x$ .

Це можемо здійснити згідно методів інтерполяції або апроксимації, причому метод апроксимації доцільно застосовувати у випадку великої кількості експериментальних значень досліджуваного процесу.

Розглянемо суть методу інтерполяції, тобто побудови математичної моделі (формули функціональної залежності) для таблично заданих експериментальних значень досліджуваного процесу.

Побудуємо математичну модель за допомогою звичайного многочлена, степінь якого на  $1$  менша від кількості вузлів, тобто якщо вузлів маємо  $n$ , то це буде многочлен  $n-1$  порядку. В практичних задачах такий випадок інтерполяції зустрічається дуже часто.

Нехай заданий таблично деякий досліджуваний процес, тобто функція  $y(x)$ :

Табл. 1

$x_i$	$x_1$	$x_2$	...		$x_n$
$y_i$	$y_1$	$y_2$	...		$y_n$

Побудуємо математичну модель цього процесу, який відповідатиме наближенню  $g(x)$ :

$$g(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 x^2 + \dots + a_{n-1} x^{n-1}, \quad (1)$$

причому будемо вимагати, щоби в точках  $(x_i, y_i)$  (інакше вони ще називаються вузлами інтерполяції) значення многочлена  $g(x)$  співпадали із значеннями таблично заданої функції, тобто щоби виконувались умови:

$$g(x_i) = y_i, i = \overline{1, n} \quad (2)$$

При цьому вважається, що всі точки  $x_i$  є різні:  $x_i \neq x_j$  при  $i \neq j$ . Графічно це означає, що графік многочлена  $g(x)$  проходить через точки з координатами  $(x_i, y_i)$  (рис. 2).

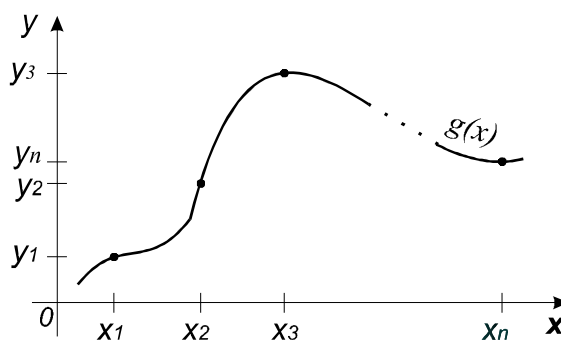


Рис. 2.

Таким чином, при інтерполяції за ступінь близькості таблично заданої функції та інтерполянти  $g(x)$  береться умова співпадання їх значень у вузлах інтерполяції  $x_i$ . Запишемо умови (2) в розгорнутому вигляді:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_1^2 + \dots + a_{n-1} x_1^{n-1} = y_1; \\ a_0 + a_1 x_2 + a_2 x_2^2 + \dots + a_{n-1} x_2^{n-1} = y_2; \\ \dots\dots\dots \\ a_0 + a_1 x_n + a_2 x_n^2 + \dots + a_{n-1} x_n^{n-1} = y_n. \end{cases} \quad (3)$$

Система (3) є системою  $n$  рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів  $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}$  многочлена  $g(x)$  і завжди має єдиний розв'язок. Знайшовши з системи (3) коефіцієнти  $a_0, a_1, \dots, a_{n-1}$  і підставивши їх в  $g(x)$ , отримаємо конкретний вигляд інтерполянти. Таким чином, основна технічна проблема, яка виникає на шляху інтерполяції таблично заданої функції, є розв'язування систем лінійних алгебраїчних рівнянь.

**Побудова математичних моделей (функціональних залежностей) при встановленні зміни моменту опору різання  $M_p$ .** Згідно запропонованого методу побудовані графіки та математичні моделі на основі обробки експериментальних досліджень усереднених значень зміни моменту ( $M_p$ ) опору різання зубців фрези сталі 9ХС в процесі фрезерування дуба у сухому чи вологому станах, поперек (ПВ) і вздовж (ВВ) волокон, приведених в [2].

Прийемо, що  $x_1$  – 9ХС без ЕПП,  $x_2$  – з нанесеним ЕПП електродом із Т15К6,  $x_3$  – ПД1 (система Fe-Mn-B-C),  $x_4$  – ПД (система Fe-Cr-B-C),  $x_5$  – ПДГ система (Fe-Cr-B-C + графіт МПГ-7). Навантаження  $P$  від 0 до 3 МПа, швидкість різання  $V=0,67$  м/с.

Оскільки, маємо 5 вузлів (експериментальних значень залежно від виду покриттів), то математична модель для досліджуваного процесу буде мати вигляд многочлена четвертого порядку:  $g(x) = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4$ .

Табл. 2

Тип матеріалу	9ХС	Т15К6	ПД1	ПД	ПДГ
	1	2	3	4	5
$M_p$	0,01	0,008	0,006	0,006	0,0025

Підставивши значення  $x_i$  у вираз многочлена, одержимо наступну систему рівнянь для знаходження коефіцієнтів  $a_i$  ( $i = 0-4$ ) запропонованої моделі:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 0,01; \\ a_0 + 2a_1 + 4a_2 + 8a_3 + 16a_4 = 0,008; \\ a_0 + 3a_1 + 9a_2 + 27a_3 + 81a_4 = 0,006; \\ a_0 + 4a_1 + 16a_2 + 64a_3 + 256a_4 = 0,006; \\ a_0 + 5a_1 + 25a_2 + 125a_3 + 625a_4 = 0,0025. \end{cases}$$

Математична модель для дуба сухого, поперек волокон (ПВ):

$$M_p = 0,0070 + 0,0032 \cdot x - 0,0029 \cdot x^2 + 0,0008 \cdot x^3 - 0,0001 \cdot x^4$$

Графічний вигляд зміни значень  $M_p$  у даному процесі згідно побудованої математичної моделі (рис. 3 а).

Аналогічно попередньому дослідженню, розглянемо процес різання вздовж волокон (ВВ), тобто подаємо математичну модель та її графічну реалізацію.

Математична модель для дуба сухого (ВВ):

$$M_p = 0,0080 + 0,006 \cdot x - 0,005 \cdot x^2 + 0,0014 \cdot x^3 - 0,0001 \cdot x^4$$

Графічний вигляд зміни значень  $M_p$  згідно побудованої моделі (рис. 3 б).

Побудовано математичні моделі на основі обробки експериментальних досліджень усереднених значень зміни моменту ( $M_p$ ) опору різання зубців фрези сталі 9ХС в процесі фрезерування дуба у вологому стані, поперек (ПВ) і вздовж (ВВ) волокон, та наведена їх графічна інтерпретація.

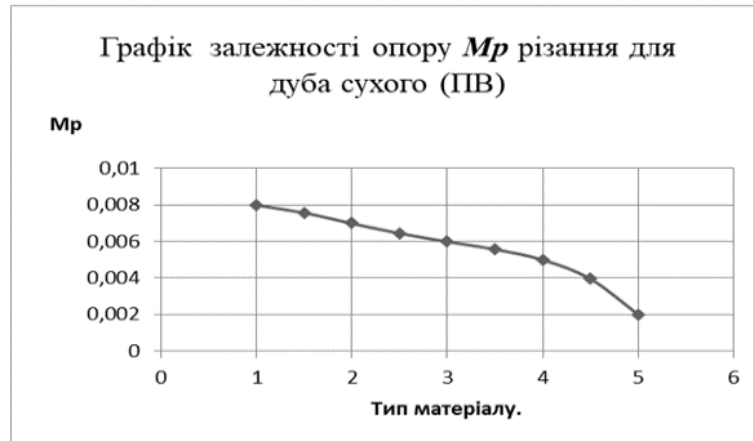
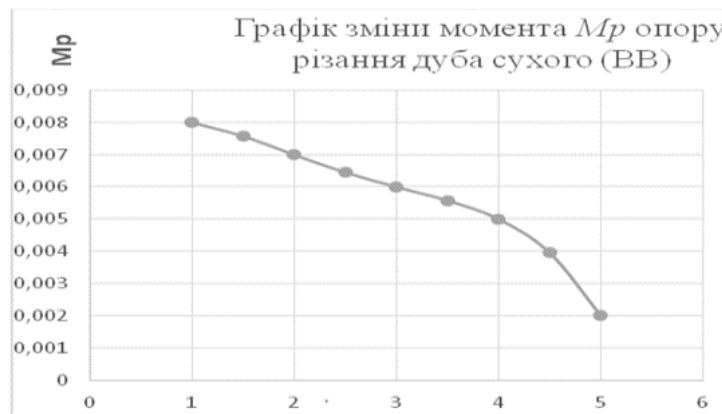


Рис. 3 а

Математична модель для дуба вологого (ПВ):

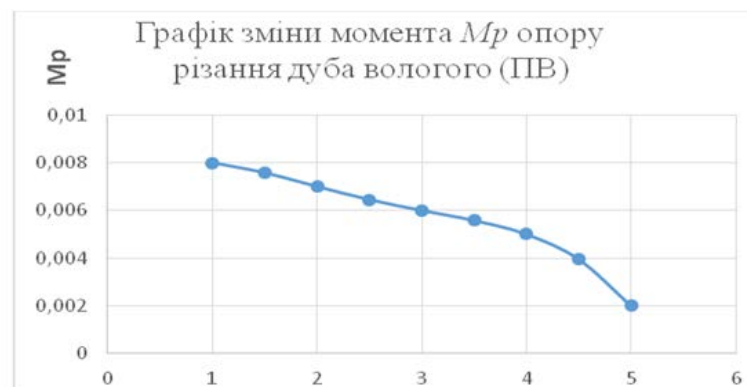
$$M_r = 0,130 - 0,216 \cdot x + 0,150 \cdot x^2 - 0,043 \cdot x^3 + 0,004 \cdot x^4$$



Тип матеріалу

Рис. 3 б

Графічна інтерпретація математичної моделі (рис. 4 а):



Тип матеріалу

Рис. 4 а

Математична модель для дуба вологого (ВВ)

$$M_r = 0,300 + 0,0045 \cdot x - 0,0061 \cdot x^2 + 0,0018 \cdot x^3 - 0,0001 \cdot x^4.$$

Графічний вигляд згідно побудованої математичної моделі має наступний вигляд (рис. 4 б):

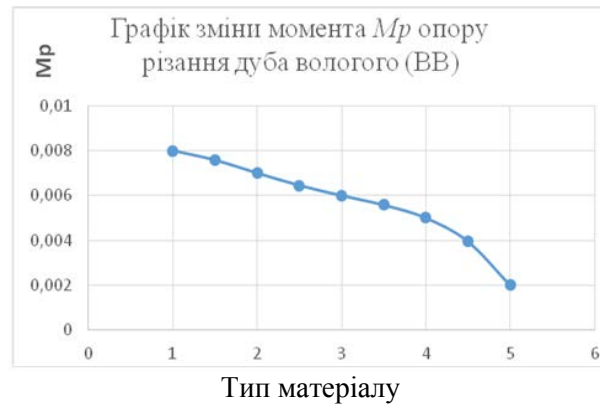


Рис. 4 б

Побудовано математичні моделі на основі обробки експериментальних досліджень усереднених значень зміни моменту ( $M_r$ ) опору різання зубців фрези сталі 9ХС в процесі фрезерування сосни у вологому стані, поперек (ПВ) і вздовж (ВВ) волокон, та наведена їх графічна інтерпретація.

Математична модель для сосни сухої (ПВ):

$$M_r = 0,0020 + 0,0023 \cdot x - 0,0016 \cdot x^2 + 0,0004 \cdot x^3 - 0,0001 \cdot x^4.$$

Графічна інтерпретація математичної моделі (рис. 5 а):

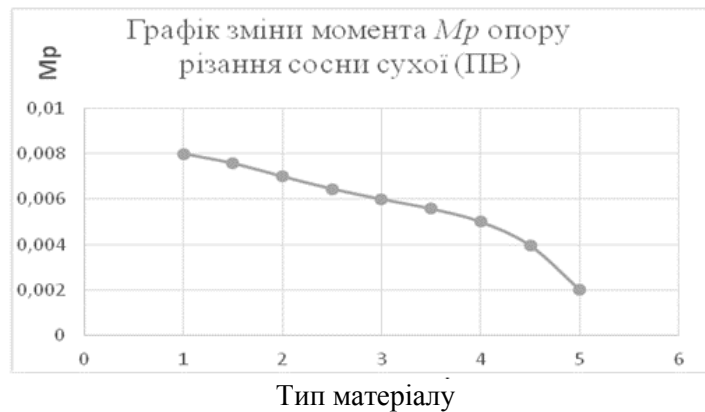


Рис. 5 а

Математична модель для сосни сухої (ВВ):

$$M_r = 0,0016 + 0,0042 \cdot x - 0,0030 \cdot x^2 + 0,0008 \cdot x^3 - 0,0001 \cdot x^4.$$

Графічна інтерпретація математичної моделі (рис. 5 б):

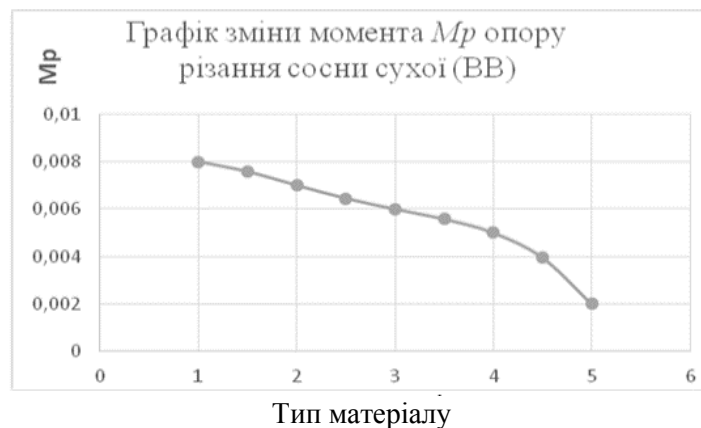
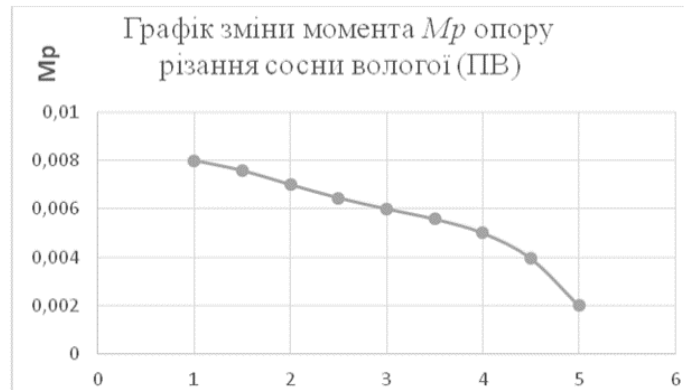


Рис. 5 б

Математична модель для сосни вологої (ПВ):

$$M_p = 0,0050 + 0,0014 \cdot x - 0,0021 \cdot x^2 + 0,0007 \cdot x^3 - 0,0001 \cdot x^4.$$

Графічна інтерпретація математичної моделі (рис. 6 а):



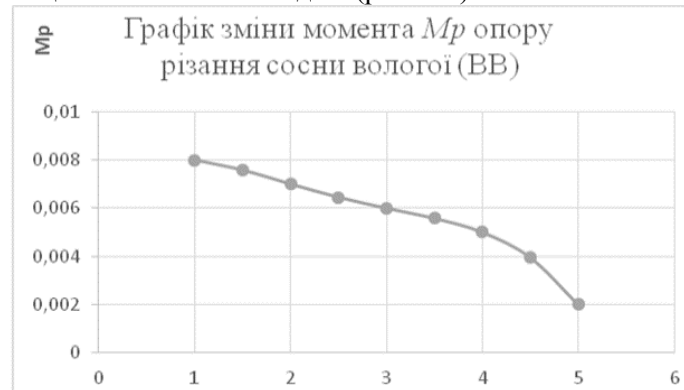
Тип матеріалу

Рис. 6 а

Математична модель для сосни вологої (ВВ):

$$M_p = 0,0020 + 0,0023 \cdot x - 0,0016 \cdot x^2 + 0,0004 \cdot x^3 - 0,0001 \cdot x^4.$$

Графічна інтерпретація математичної моделі (рис. 6 б):



Тип матеріалу

Рис. 6 б

Аналогічний підхід для встановлення достовірності отриманих експериментальних даних можливий для результатів роботи [3] по встановленню закономірностей фрикційної поведінки трибологічних характеристик (величин зносу і коефіцієнтів тертя) інструментальної сталі 9ХС після гартування і низького відпуску з нанесеними на робочу поверхню електродами з порошкових дрітків ЕПІ в контакт з деревиною залежно від породи (листяна, хвойна), її вологості (суха, волога) та напрямку волокон (вздовж, поперек) при зворотно-поступальному рухові.

**Висновок:** На підставі аналізу побудованих математичних моделей та відповідних їм графічних інтерпретацій можемо констатувати, що відповідність між експериментальними значеннями даних моменту опору різання в процесі фрезерування дисковими фасонними фрезами зі зміцненими електроіскровими покриттями зубцями дуба і сосни у сухому і вологому стані, вздовж і поперек волокон, та побудованими моделями (функціональними залежностями) лежить в межах від 1% до 3%.

### Література

1. Василь Попович. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: Навч. посібник для ВНЗ: у 2-х кн. Книга 1. (Частина I, II, III). – Львів: Вид-во Папуга, 2003. – 264 с.
2. Голубець В. М. Вплив електроіскрових покриттів інструментів на силові показники процесу фрезерування деревинних матеріалів / Голубець В. М., Гвоздецький В. М., Пашечко М. І., Шпуляр Ю. С // Фіз.-хім. механіка матеріалів, 2022, том 58, № 6. - С. 115-120.

3. Голубець В. М. Зносостійкість електроіскрових покриттів отриманих із порошкових дротів у контакті з деревиною / Голубець В. М., Пашечко М. І., Гончар І. М., Шпуляр Ю. С., Гасій О.Б. // Проблеми тертя та зношування. – К.: НАУ. – 2022, №2. – С. 4-18.
4. Білоус О.В. Технологічні засади підвищення зносостійкості дереворізального інструменту комплексною електроіскровою і лазерною обробкою: Автореф. ... дис. канд. техн. наук. – Хмельницький: ХНУ, 2002.
5. Голубець В. М., Пашечко М. І., Гасій О.Б., Шпуляр Ю. С. Електродні матеріали для електроіскрового легування у контексті трибоматеріалознавства: монографія / Львів: ВД «Панорама», 2023. – 104 с.
6. Кірик М. Д. Інструмент для оброблення деревини та деревних матеріалів: навч. посібн. – Львів. – Коломия, 1999. – 190 с.

УДК:621.9.06(072):62-231

DOI 10.36910/775.24153966.2024.77.5

О.В. Солнцев<sup>1</sup>, Ю.М. Кузнєцов<sup>1</sup>, Ж. Хамуйєла<sup>2</sup><sup>1</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»<sup>2</sup>Університету Агоштинью Нето, Ангола**АНАЛІЗ ДИНАМІКИ 3Д-ПРИНТЕРА З МЕХАНІЗМОМ ПАРАРЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ**

*Розглянуті особливості динамічного аналізу 3Д-принтера з механізмами паралельної структури, моделювання динамічних процесів систем твердих тіл в ADAMS, числове моделювання контакту з виокремленням IMPACT функції та створення моделей для частотного аналізу.*

*Ключові слова:* аналіз динаміки, симуляція систем з твердих тіл, 3Д-принтер, паралельна кінематика, числова оптимізація.

**O. Solntsev, Y. Kuznetsov, J. Hamuyela****DYNAMIC ANALYSIS OF A 3D - PRINTER WITH PARALLEL STRUCTURE MECHANISMS**

*The focus is on some features of dynamic modelling of 3D printer with mechanisms of parallel structure, modeling dynamic processes in ADAMS, numerical modeling of contact and using the IMPACT function for contact modeling, model building for vibration analysis and modal analysis*

*Key words:* dynamic analysis, multy body system simulation, 3D-printer, parallel kinematics, numeric optimization

Some features of dynamic modeling in Autodesk Inventor CAD. The object of research into the dynamics of parallel structure mechanisms (PSS) [4] is a mathematical description of the forces and moments acting on it in the form of equations of motion, in other words, the creation and analysis of a dynamic model with a closed kinematic chain [3,7]. These equations are necessary for solving the direct and inverse problem of dynamics [2], synthesis of control laws, and evaluation of the quality of the mechanism design. In general, the preparation of the dynamic calculation model includes the following works: simplification of the composite model; creation of mechanical connections; determination of the loading scheme of model elements. To speed up the modeling process and make it more reliable, before adding connections and forces (in the extreme case after that), it is necessary to perform the following definitions: the features of the assembly of the node and the purpose of modeling; the most important (from the point of view of dynamic analysis) assembly components. In this way, the finished assembly should be simplified to a model for analysis [8]. In the Autodesk Inventor environment, this can easily be done using the Suppress command. Fig.1 shows the model after simplification, which is completely ready for dynamic modeling.



**Fig. 1. Triglidge-based 3D printer model before and after simplification**

Using the "Automatically convert dependencies to standard connections" command, which is enabled by default in the "Dynamic Modeling Parameters" dialog box in the form of a checkbox with the caption "Automatically convert dependencies to standard connections" (The program automatically converts component structural connections into standard Connections made using automatic transformation

can be edited later by changing the direction vectors of the main part and the attached one. Let's check the correctness of the automatic generation of connections in the model using the "Model state" command (Fig. 2)

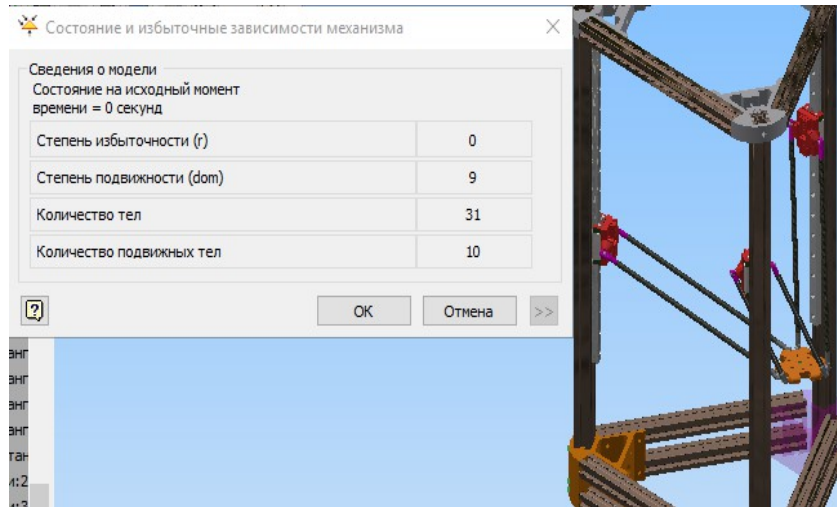


Fig. 2. Verification and structural analysis of the mechanism in Autodesk Inventor

As can be seen from Fig. 2, the number of degrees of mobility is 9. This is the correct value, because 3 of them are the movement of the platform and 6 are excess degrees of freedom in the rods around their own axis, due to the use of spherical joints, not cardan joints. Thus, after starting the dynamic simulation, 6 spherical joints were automatically created in the hinges, with the further possibility of their editing (Fig. 3, a) and 3 prismatic joints between rails and carriages. (Fig. 3, b). So in fig. 3, b. it can be seen that the corresponding lower planes of the parts are selected as the origin of the coordinate system of each element of the connection, the Z axis is directed upwards.

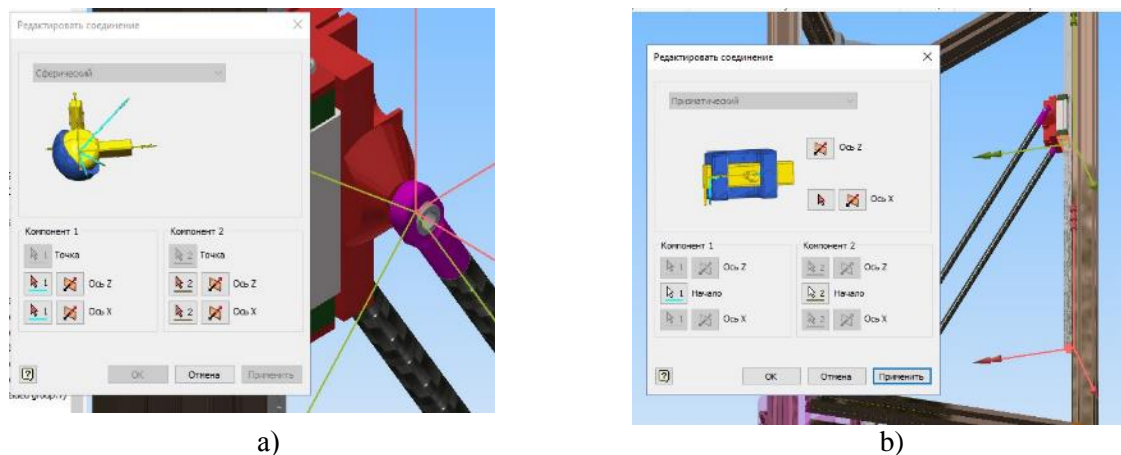
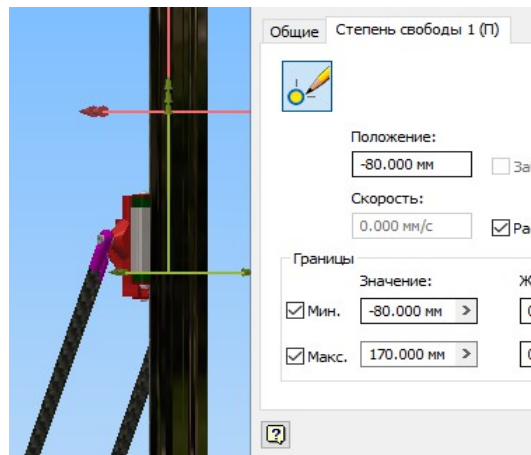


Fig. 3. Editing of automatically generated connections: a-spherical; b-prismatic

In the dynamic modeling module, types of kinematic connections are available, implementing all existing classes of kinematic pairs: - standard connections ("Rotation", "Prismatic", "Cylindrical", "Spherical", "Flat", "Point - segment", "Segment - plane", "Point - plane", "Space", "Welded"); - rolling joints ("Cylinder on plane", "Cylinder on cylinder", "Cylinder in cylinder", "Cylinder-curve", "Belt", "Cone on plane", "Cone on cone", "Cone in cone", "Screw", "Worm gear"); - sliding joints ("Cylinder on plane", "Cylinder on cylinder", "Cylinder in cylinder", "Cylinder-curve", "Point-curve"); - 2D contact connections ("2D contact"); power connections ("Spring / shock absorber / jack", "3D contact"). Next, configure the connection properties using the "Connection Properties" tab. For prismatic connections, we will accept the following restrictions and settings. To limit the mobility of carriages along the rail, we set the minimum and maximum position settings so that the position of the working body (carriage) in these extremes corresponded to the minimum and maximum at the points of the working space along the Z axis (Fig. 4). After creating a connection (by inserting or transforming structural connections), the correct operation of the mechanism can be checked in two ways. After using the "State and redundant mechanism dependencies"



mode to eliminate redundant dependencies, you can perform a check of the new solution. The mechanism can also be activated without running the simulation. There are several such ways of putting the mechanism into action. One of them involves the use of the "Dynamic movement" function (Fig. 5).



**Fig. 4. Determination of the minimum and maximum position of the carriage**

Other methods are described below. Dynamic movement of the part (simplified mode). To activate the mechanism, use the drag function, which is available both in the environment for working with assembly models and in the dynamic modeling environment. This mode is similar to the Dynamic Motion mode. For example, it is not possible to control the damping of the overall motion. If the drag parts are connected to the joints, their behavior is limited by the degrees of freedom. However, you can drag and drop details that are not connected to connections.

The mechanism should be carefully studied to find out the observed type of movement. To set the mechanism in motion, it is necessary: - In the graphics window, select a point on the part that should move. - Press and hold the left mouse button to move the part. - To stop the movement of the part, simply release the mouse button. In the graphic window, the part will be displayed in the position in which it was at the moment when the mouse button was released. - Kinematic movement. The mechanism can be activated by changing the initial position of the degree of freedom of the standard connection. This process allows you to check the correctness of the kinematic function of the mechanism and determine the tolerances for correct operation. For the correctness of the further modeling, we set the internal forces in the connections, so there are certain frictional forces in the spherical joints and guides, which should be taken into account. Thus, the result of the work done in the dynamic modeling environment is a prepared model for further dynamic modeling.



**Fig. 5. Checking the functionality of the model without using the function "Dynamic movement"**

### Modeling of dynamic processes in ADAMS

ADAMS is a software product from MSC Corporation for dynamic and kinematic analysis of rigid body systems. Main features and advantages of ADAMS: • Development of calculation models of the researched products, taking into account the features of their design to the maximum extent, including the high identity of the appearance, which in many cases facilitates the construction of models, their adjustment and analysis of the obtained results; • Calculate product parameters that determine their performance and accuracy (movement, speed and acceleration of product components, operating loads, dimensions of the space required for moving parts of the machine, etc.); • Perform parameter optimization. One of the tasks that arose during the execution was the optimization of the 3D printer and the creation of a multi-purpose small-sized robotic platform based on it based on the modular principle. So, for example, the implementation of the possibility of replacing such a module as a tool presents us with the following task. Let there be two tools A nozzle with an extruder for printing and an adaptive gripper [1,6]. In this way, it is necessary to "tear off" the printed sample from the surface and transfer it with the help of a gripper to a given position, which may go beyond the working area of the robot's printing. In order to simulate the separation and gripping process, it was necessary to recreate a flexible grip (Fig. 6).



Fig. 6. Adaptive gripping device, a – working prototype, b – ADAMS model

ADAMS allows modeling: multi-contact; dynamic friction; contact between three-dimensional solid geometry; contact between two-dimensional geometries. The Adams solver (C++) has two geometry engines that it uses for 3D contacts. It uses Parasolid, a geometry toolkit with EDS / Unigraphics and RAPID. Currently, RAPID is the default, and Adams Solver (C++) supports version 2.01. Adams Solver distinguishes some geometries as analytic. The following contact types are fully analytical. These two geometries are considered analytically: sphere by sphere; cylinder by cylinder. Numerical methods must be used to model the grip of an arbitrary object with an adaptive grip. Contact modeling can be conventionally divided into two stages. The first is the simulation of the normal component of the force and the second is the simulation of the tangential force. Fig. 7 shows the components of the contact modeling function in ADAMS.

Two models are available in Adams Solver (C++) to calculate the normal force: IMPACT function model;

Coefficient of restitution or POISSON model. Both models result from the regularization of normal contact constraints. Penalty regularization is a modeling technique in mechanics in which a constraint is applied mathematically by applying forces along the gradient of the constraint. The magnitude is a function of constraint violation.

Contact between solid bodies theoretically requires that the two bodies do not penetrate each other. This can be expressed as a one-sided (inequality) constraint. The contact force is the force associated with the application of this constraint. Processing these auxiliary constraints is usually carried out in one of two ways - either by introducing Lagrange multipliers or by regularizing fines. For contact problems, the latter technique has the advantage of simplicity; no additional equations or variables are introduced. This is particularly useful for intermittent contact and algorithmic control of active and inactive conditions associated with unilateral constraints. In addition, the concept is easily interpreted from a physical point of view. For example, the magnitude of the reaction contact force is equal to the product of the stiffness of the material and the penetration between the contacting bodies, similar to the spring force. For these reasons, the Adams (C++) solver uses penalty regularization to enforce all contact constraints.

Adams Solver (C++) uses a relatively simple model based on friction velocity for contacts (Fig. 9). Indication of friction behavior is optional. The figure below shows how the coefficient of friction varies with sliding speed.

```

CONTACT=id ,JGEOM=i41[... ,ida]
      ,JGEOM=i42[... ,ida]
      ,TYPE=(contact_type)
}
IMPACT
.STIFFNESS=r
.EXPONENT=r
.DAMPING=r
.DMAX=r
}
COULOMB_FRICTION=(On/Off/DYNAMICS_ONLY)
.MU_STATIC=r
.MU_DYNAMIC=r
.STICTION_TRANSITION_VELOCITY=r
.FRICTION_TRANSITION_VELOCITY=r
}
NORMAL_ROUTINE=lib:func
FRICTION_ROUTINE=lib:func
}
NORMAL_FUNCTION=USER(r1 [... ,r30])
FRICTION_FUNCTION=USER(r1 [... ,r30])
FACE_CONTACT_BOTTOM= True/False
FACE_CONTACT_TOP= True/False
}
JFLIP_GEOM=i4a,... ,ids
JFLIP_GEOM=i4b,... ,ids
}
JFLEX=i41
JEDGE=i42
JGEOM=i43
}
JFLEX=i41
JEDGE=i42
JFLEX=i43
JEDGE=i44
}
IMPACT
.STIFFNESS=r
.EXPONENT=r
.DAMPING=r
.DMAX=r
}
COULOMB_FRICTION=(On/Off/DYNAMICS_ONLY)
.MU_STATIC=r
.MU_DYNAMIC=r
.STICTION_TRANSITION_VELOCITY=r
.FRICTION_TRANSITION_VELOCITY=r
}

```

Fig. 7. Elements of the contact function IMPACT in ADAMS

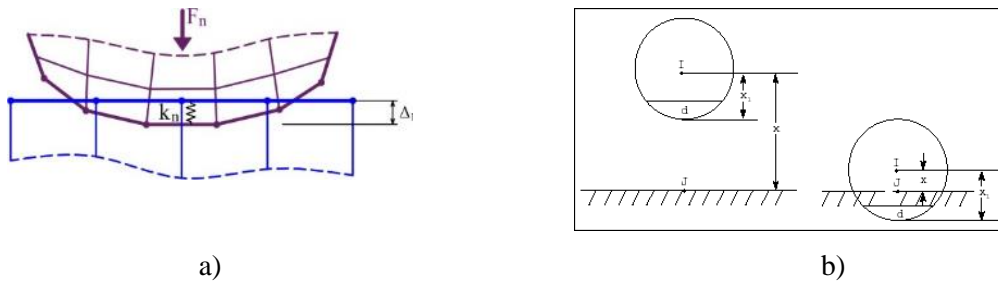


Fig. 8. Numerical simulation of contact (a) and use of the IMPACT function for contact simulation (b)

**Model development for vibration and modal analysis**

Signal analysis is the process of determining the system's response to an unknown, in general, disturbance and presenting them in a form that is easy to understand. System analysis is a method of determining the characteristic properties of systems. It can be conducted by disrupting the system by measuring forces and determining the response/force ratio (sensitivity). For linear systems, this ratio is an independent parameter characteristic of these systems. This parameter remains constant regardless of whether the system is in an excited or quiescent state. The frequency characteristic of a given output channel is the dependence of the amplitude of the output signal of the device or transmission, amplification or signal processing system on the frequency of the input signal of constant amplitude. To calculate the frequency response, the linearized model is represented as:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{s}\mathbf{x}(s) &= \mathbf{A} \mathbf{x}(s) + \mathbf{B} \mathbf{u}(s) \\
 \mathbf{y}(s) &= \mathbf{C} \mathbf{x}(s) + \mathbf{D} \mathbf{u}(s),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

where:  $s$  - Laplace variable;  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{D}$  - state matrices for a linearized model;  $\mathbf{x}(s)$  - the Laplace transform of the linearization states;  $\mathbf{u}(s)$  and  $\mathbf{y}(s)$  - Laplace transformations of input and output channels.

Frequency response is calculated by:

$$\mathbf{H}(s) = \frac{\mathbf{y}(s)}{\mathbf{u}(s)} = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} + \mathbf{D}
 \tag{2}$$

The main problem in vibration analysis is the construction of an appropriate mathematical model.

It should reflect all important moving masses and elastic elements. Concepts and models shown in fig. 10.

Fig. 11 shows the frequency response in the low-frequency range for a 3D - printer with a ball-screw pair (BSP) instead of belt transmission [5].

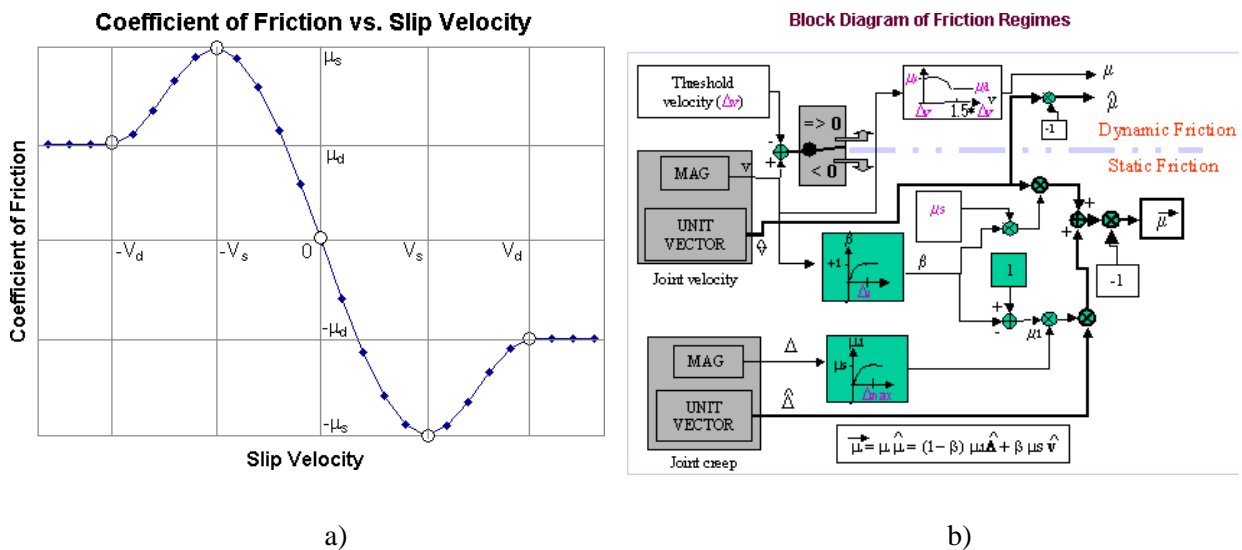


Fig. 9. Modeling contact friction in ADAMS. Friction coefficient vs slip velocity chart (a), block diagram (b)

The model with modal parameters is shown in Fig. 12. It is built using two parameters that can be obtained from the results of measuring frequency characteristics. In Fig. 12, the function  $H(\omega)$  is determined by the coordinates of the pole ( $p$ ) and subtraction ( $R$ ) and their complex related values ( $p^*$  and  $R^*$ ). The pole and offset coordinate, in turn, is determined through spatial parameters. The pole coordinate is a complex quantity. The numerical value of its real part ( $\sigma$ ) represents the damping rate of oscillations. This is shown on the graph of the dependence of the impulse response on time. In the frequency domain,  $\sigma$  is half the bandwidth (-3 dB) of the peak of the frequency response. The imaginary part of the pole coordinate represents the modal frequency - the natural frequency of freely damped oscillations ( $\omega_d$ ). The subtraction in the case of a system with one degree of freedom is a dummy value that reflects the intensity of the oscillation mode. Fig. 12 shows all modes of oscillations of a triglide-based 3D - printer.

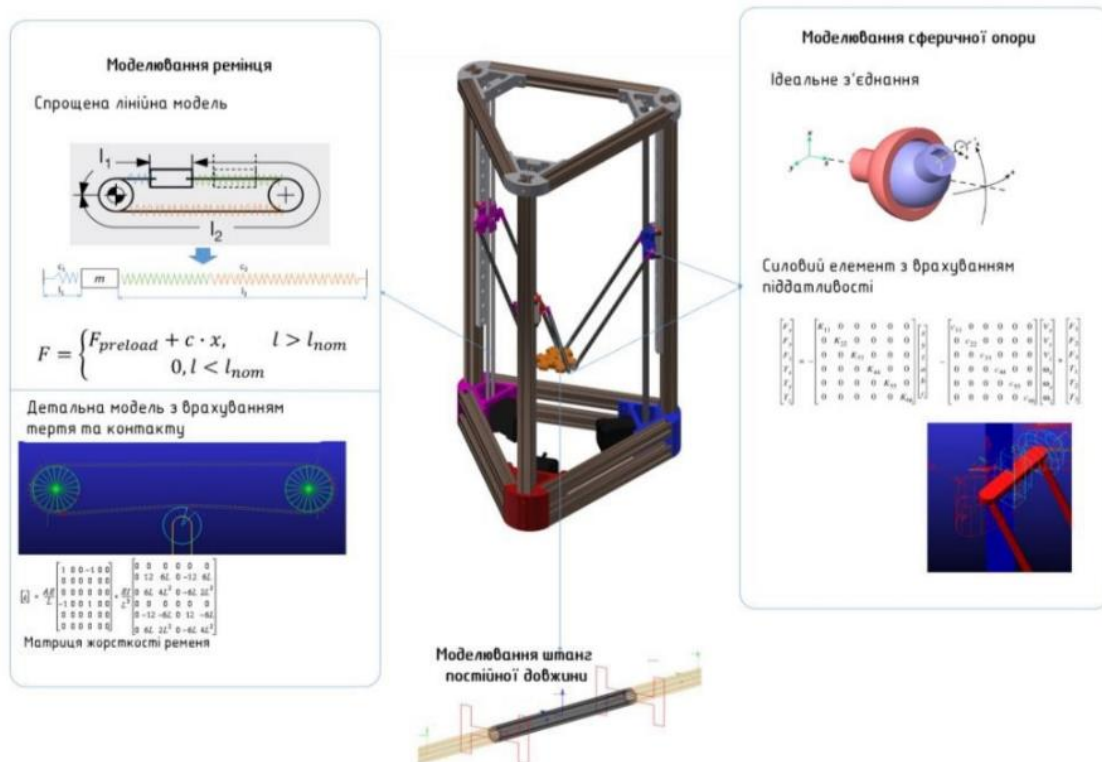


Fig. 10. Some concepts and submodels (submodels) for the implementation of dynamic analysis

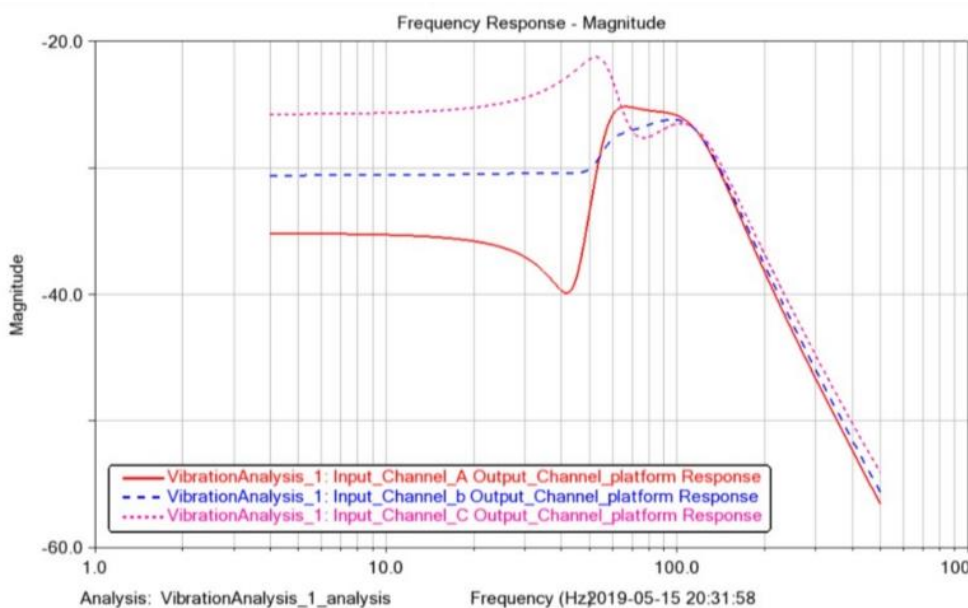


Fig. 11. Frequency response for a triglide-based 3D - printer with KGP in low frequency range

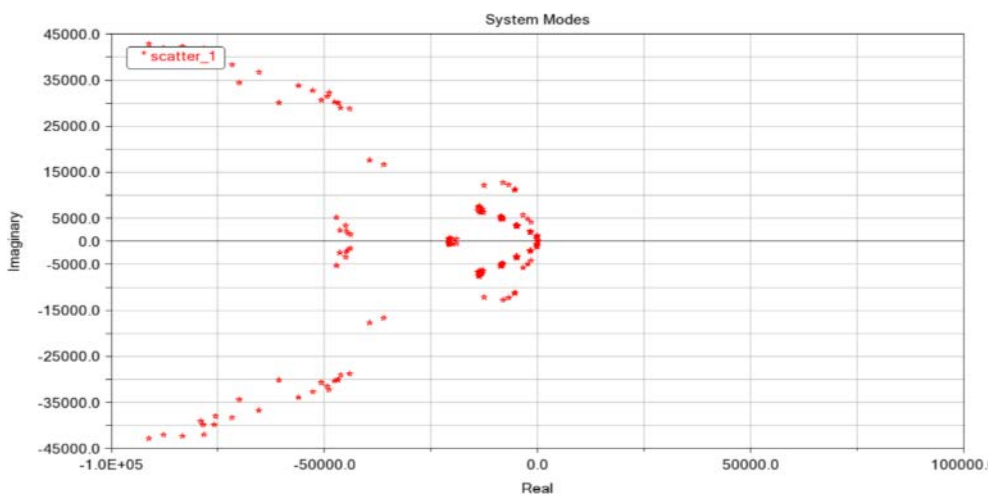
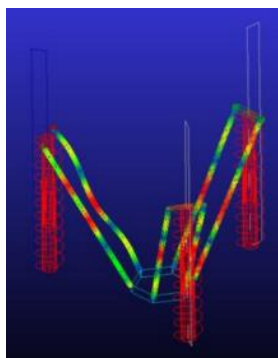


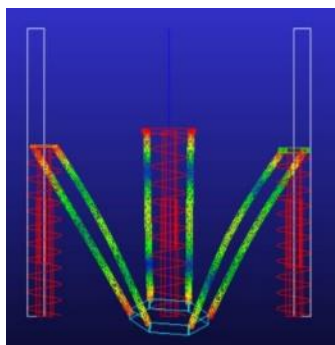
Fig. 12. All modes of oscillations of a triglide-based 3D - printer

Fig 13 shows some forms of modes from the working frequency range.



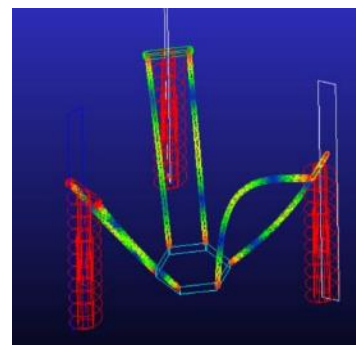
$$\omega_d = 561 \text{ Hz};$$

$$\varepsilon = 40\%$$



$$\omega_d = 3300 \text{ Hz};$$

$$\varepsilon = 80\%$$



$$\omega_d = 1175 \text{ Hz};$$

$$\varepsilon = 14\%$$

Fig 13. Some 3D printer vibration modes with corresponding frequencies and relative damping

**REFERENCES**

1. Zlenko M.A. Additive technologies in machine building: a manual for engineers / M.A. Zlenko, M.V. Nagaitsev, V.M. Dovbysh - M.: SSC of the Russian Federation FSUE "NAMY", 2015. 220 p.
2. Kinematics, dynamics and accuracy of mechanisms: reference book; in a row, Ph.D. H.V. Kreinina. - M.: Mashinostroiye, 1984-224 p.
3. Kudynov V.A. Dynamics of machine tools. - M.: Mashinostroiye, 1967. - 359 p.
4. Kuznetsov Yu.M. Layouts of machines with mechanisms of a parallel structure/ [Ed. Yu.M. Kuznetsova] Yu.M. Kuznetsov, D.O. Dmitriev, G.Yu. Dinevich. – Kherson: PP Vyshemirskyi V.S., 2009. – 456 p.
5. Kuznetsov Yu.M. The current state, prospects for the development and production of metal-cutting machines in Ukraine // AINU News No. 1 (44), 2011. – pp. 2-12.
6. Integrated technologies of accelerated prototyping and manufacturing. Monograph. Ed. L.L. Tavazhnyanskogo, A.I. Hrabchenko. - Kharkiv: OAO "Model of the Universe", 2002. - 140s.
7. Orlykov M.L. Dynamics of machine tools. 2nd ed., revised. and additional - K.: Higher school. Holovnoe in-vo, 1989. - 272 p.
8. Solntsev O.V., Kuznetsov Yu.M. Creation of a triglide-based 3D printer using the method of morphological analysis // Collection of theses of scientific reports of the II All-Ukrainian Internet Conference in Severodonetsk, April 27-28, 2017 – Severodonetsk: Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2017. – 172 p.
9. Nocedal, George; Wright, Stephen J. Numerical Optimization. — 2nd edition. — USA: Springer, 2006. — ISBN 978-0-387-30303-1
10. Avriel, Mordecai. Nonlinear Programming: Analysis and Methods. — Dover Publishing, 2003.

УДК: 539.3

DOI 10.36910/775.24153966.2024.77.6

Ю.Ю. Жигуц<sup>1</sup>, В.Д. Рудь<sup>2</sup>, В.Ф. Лазар<sup>3</sup>

ДВНЗ «Ужгородський національний університет»<sup>1</sup>  
Луцький національний технічний університет<sup>2</sup>  
Мукачівський державний університет<sup>3</sup>

## РОЗВ'ЯЗОК КОНТАКТНОЇ ЗАДАЧІ ПРО ПЕРЕДАЧУ ЗОСЕРЕДЖЕНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

В роботі розглянуто розв'язок плоскої контактної задачі на основі лінеаризованої теорії пружності про передачу навантаження за допомогою нескінченного неоднорідного стрингера до двох защемлених одною гранню пружних смуг при наявності початкових (або залишкових) напружень. Авторами виконано дослідження у загальному вигляді для дуже великих початкових деформацій і розглянуто деякі варіанти теорії малих початкових деформацій при умові довільної структури пружного потенціалу. З використанням інтегрального перетворення Фур'є вдалося одержати розв'язок основних інтегро-диференціальних рівнянь і представити його у вигляді квазірегулярних нескінченних систем. Крім цього досліджено вплив існуючих початкових (залишкових) напружень для пружних смуг на закон розподілу дійсних контактних напружень за лінією з нескінченим неоднорідним стрингером.

Наявні початкові напруження у таких системах смуг призводять до якісної зміни закону розподілу контактних напружень, а саме при стискуванні контактні напруження суттєво зменшуються (а для розтягування – збільшуються), таким чином переміщення при стискуванні суттєво зростають, а при розтягуванні – зменшуються. Кількісний характер впливу початкових напружень у високоеластичних матеріалах при порівнянні з жорсткішими матеріалами має аналогічний характер, що і якісний.

Ключові слова: лінеаризована теорія пружності, початкові (залишкові) напруження, контактні задачі, інтегральне перетворення Фур'є.

Yu. Zhiguts, V. Rudj, V. Lazar

## SOLUTION OF THE CONTACT PROBLEM ON THE TRANSMISSION OF A CONCENTRATED LOAD

The paper considers the solution of the plane contact problem based on the linearized theory of elasticity about the load transfer using an infinite non-uniform stringer to two elastic strips clamped by one face in the presence of initial (or residual) stresses. The authors performed a general study for very large initial deformations and considered some variants of the theory of small initial deformations under the condition of an arbitrary structure of the elastic potential. Using the integral Fourier transform, it was possible to obtain the solution of the main integro-differential equations and present it in the form of quasi-regular infinite systems. In addition, the influence of existing initial (residual) stresses for elastic strips on the distribution law of actual contact stresses along a line with an infinite non-homogeneous stringer was investigated.

The initial stresses present in such strip systems lead to a qualitative change in the law of distribution of contact stresses, namely, during compression, the contact stresses significantly decrease (and for stretching, they increase), thus, displacements during compression significantly increase, and during stretching, they decrease. The quantitative nature of the influence of the initial stresses in highly elastic materials when compared with stiffer materials has a similar nature to the qualitative one.

Key words: contact problems, the linearized elasticity theory resiliency, resilient protective strap, initial (residual) tension, initial deformations.

**Introduction.** Despite the large amount of literature in which contact problems of the linearized theory of elasticity are considered [1,2], research on the problems of elastic contact interaction of bodies with initial stresses in our country and abroad appeared relatively recently. Only recently, the study of the contact interaction of prestressed bodies has gained special interest in connection with the introduction into practice of new artificial materials that can withstand large initial deformations. In practice, residual stresses (for example, technological ones) are artificially created to compensate or adjust them in structural elements during operation, as well as to increase strength and stability. This is justified by the fact that when solving the problem of contact interaction of elastic bodies with initial stresses, the linear theory of elasticity used cannot take into account the influence of these stresses. To ensure the calculation of the entire process, they can be taken into account using the linearized theory of elasticity [1,3-6]. Taking into account the initial stresses within the framework of the linearized theory of elasticity leads to new formulations of problems of the interaction of deformed bodies, which differ significantly from the formulations of classical problems of the theory of elasticity. And although when solving these problems, the system of basic differential equations, expressions that are used to determine the components of the stress tensor and for which the entire structure of the boundary conditions differs significantly from the corresponding systems of the described equations of the stress tensor of the theory of elasticity, by their nature and structure, they are related to ordinary contact mixed problems [6-8]. This paper shows a possible variant of setting up and

using a general method of solving the problem for an arbitrary form of elastic potentials, which is provided in a general form for theories of large initial strains, as well as the use of some types of problems from the theory of small initial strains.

When setting the specified tasks in the cited works, an assumption was made, namely, the contact interaction of bodies with initial stresses and elastic stringers is carried out immediately after the initial stress state occurs; external loads in the elastic overlay cause a perturbation of the stressed deformation state with a value much smaller than the value of the initial stressed state; the initial stress state of one of the interacting bodies has a structure that can be considered homogeneous; the solution of linearized problems of the theory of elasticity related to the contact interaction of stressed bodies and overlays is unique [6].

In fact, in the work using the relations of the linearized theory of elasticity [1, 8-10] solutions to the problem of the contact interaction of a heterogeneous stringer with pre-stressed tapes are proposed. The study was conducted in a general form for compressible and incompressible bodies using the theory of initial deformations with an arbitrary structure of the elastic potential.

Using [1,4,6,10], we will perform the calculation in the coordinates of the initial deformed state,  $y_i$ , which are related to the Lagrangian coordinates  $x_i$  by the relations  $y_i = \lambda_i x_i$ , ( $i = 1,2$ ) where  $\lambda_i$  – are the elongation coefficients that determine the change in the coordinates of the initial state in the directions of the coordinate axes. When conditions 1–4 are fulfilled in the area of contact  $L_k\{a_k, b_k\}$  for elastic overlays and an elastic strip with residual stresses, the boundary conditions apply at

$$y_2 = 0 \quad u(y_1) = u_1(y_1); v(y_1) = u_2(y_1); \forall(y_1) \in L_k. \quad (1)$$

$$\frac{du}{dy_1} = \frac{du_1}{dy_1}; \frac{dv}{dy_1} = \frac{du_2}{dy_1}; \forall(y_1) \in L_k \quad (2)$$

Boundary conditions (1) and (2) together with conditions (1–4)

$$p = \int_{a_k}^{y_1} \tau(t) dt, \dots \dots \dots (3)$$

complete the formulation of linearized problems about the contact interaction of elastic overlays ( $a_k = -\infty; b_k = +\infty$ ) that reinforce the elastic strip.

**Statement of the problem and basic solving equations.** Let the infinite elastic strips of thickness with the initial stresses are pinched by faces, and their other faces are connected to each other by an infinite inhomogeneous elastic stringer of small thickness  $h$  (Fig. 1).

The infinite prestressed strips reinforced  $H$  in this way are under the action of the distributed horizontal forces  $y_2 = \pm H$  of intensity applied to the connecting infinite non-homogeneous stringer according to  $h$  (Fig. 1). It is necessary to establish the laws of distribution of normal  $p(y_1)$  and horizontal  $q(y_1)$  stresses in the area of contact.

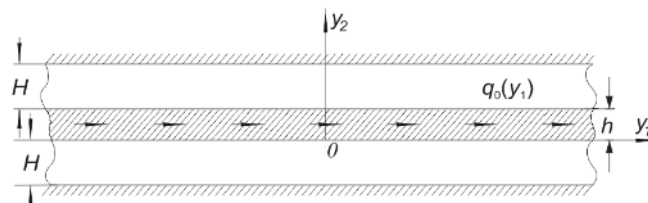


Fig. 1. Diagram of the distribution of horizontal forces applied to a prestressed strip reinforced with a stringer

When the area of contact with the stringer is investigated, we assume that under the action applied load and tangential stresses, it stretches or compresses like a rod in a uniaxial stress state [11]. We also assume that along the horizontal axis there are vertical elastic movements of steel. The last assumption is due to the small thickness of the stringer, since its changes from point to point in the process of deformation are insignificant and can be neglected.

Let us denote the intensities of normal and tangential contact stresses acting along the line of connection of the stringer with elastic prestressed strips  $p(y_1)$  and  $q(y_1)$ , and  $u_1(y_1)$  vertical and  $u_2(y_1)$  horizontal displacements respectively.

Let's move on to obtaining the main systems of solving equations for the given problem. To this end, we first consider the equilibrium of the stringer.

From the condition of equilibrium  $(-\infty, x)$ , we get parts of the stringer

$$\sigma_{y_1 y_1}(y_1) = \frac{1}{h} \int_{-\infty}^{y_1} [q(t) - q_0(t)] dt, \quad (-\infty < y_1 < \infty). \quad (4)$$



This means that the cross-section of the stringer is rectangular, the width of which is equal to unity, and the  $\sigma_{y_1 y_1}$  axial stress in the direction of the axis. According to Hooke's law, we will determine the axial tension and equilibrium of the stringer  $Oy_1$ .

From the condition of equilibrium, we get parts of the stringer

$$\sigma_{y_1 y_1}(y_1) = E_1 \varepsilon_{y_1, y_1}(y_1), \quad (5)$$

$$\text{where } \varepsilon_{y_1, y_1}(y_1) = \frac{du(y_1)}{dy_1}, \quad (6)$$

here  $u(y_1)$  - horizontal displacements of points of the elastic stringer,  $E_1$  - modulus of elasticity of the stringer.

Taking into account (4) – (6), we find

$$\frac{du(y_1)}{dy_1} = \frac{1}{E_1 h} \int_{-\infty}^{y_1} [q(t) - q_0(t)] dt, \quad (-\infty < y_1 < \infty). \quad (7)$$

With the established assumption that the stringer bends in the vertical direction, it is possible to write

$$D \frac{d^4 v(y_1)}{dy_1^4} = p(y_1) - p_0(y_1), \quad (-\infty < y_1 < \infty). \quad (8)$$

here  $v(y_1)$  – vertical movements of stringer points;  $D$  – bending stiffness of the stringer;  $p_0(y_1), p(y_1)$  – intensity of vertical forces.

Existing conditions at the line of contact of stringer with elastic bands

$$u(y_1) = u_1(y_1), v(y_1) = u_2(y_1), \forall y_1 \in (-\infty < y_1 < \infty), \quad (9)$$

where  $u_1(y_1), u_2(y_1)$  is the displacement of points in elastic bands with initial stresses. Let's determine the law of distribution of normal and tangential contact stresses along the connection line of the stringer with the prestressed tapes.

To determine the movements and stresses along the line of contact of the stringer with the strips, we will set the boundary conditions of the problem for the edges of the strips. free from pinching with initial stresses from the force  $P$  applied at an angle  $\alpha_0$  [4,6,11]

$$\tilde{Q}_{22}(y_1, 0) = -P\delta(y_1) \sin \alpha_0; \tilde{Q}_{11}(y_1, 0) = -P\delta(y_1) \cos \alpha_0; \quad (10)$$

$$u_1(y_1 - t) = 0; u_2(y_1 - t) = 0; \quad (-\infty < y_1 < \infty), \quad (11)$$

where is the Dirac delta function.

As a result of solving the given problem, the impact function from the action of the tangential force (at  $\alpha_0 = 0$ ) for equal roots of the characteristic equation [1] ( $n_1 = n_2$ ) are as follows:

$$h_{21}(y_1) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty H_{21}(\alpha) \sin \alpha y_1 d\alpha, \quad (12)$$

$$h_{22}(y_1) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty H_{22}(\alpha) \cos \alpha y_1 d\alpha.$$

For unequal roots ( $n_1 \neq n_2$ ) we can write

$$h_{21}(y_1) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \tilde{H}_{21}(\alpha) \sin \alpha y_1 d\alpha, \quad (13)$$

$$h_{22}(y_1) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \tilde{H}_{22}(\alpha) \cos \alpha y_1 d\alpha.$$

For unequal roots ( $n_1 \neq n_2$ ) we can write

$$h_{21}(y_1) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \tilde{H}_{21}(\alpha) \sin \alpha y_1 d\alpha, \quad (14)$$

$$h_{22}(y_1) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \tilde{H}_{22}(\alpha) \cos \alpha y_1 d\alpha.$$

The kernels  $H_{ij}(\alpha)$  and  $\tilde{H}_{ij}(\alpha)$  respectively have the form [1,12,13]:

for  $n_1 = n_2$

$$H_{21}(\alpha) = m_0[-(s+1)(s_1 \xi(\alpha) - \alpha \phi_1) + ch^2 \alpha \phi_1 - s_1 sh^2 \alpha \phi_1 - s] = \\ = m_0[-(s+1)(s_1 sha \phi_1 cha \phi_1 - \alpha \phi_1) + ch^2 \alpha \phi_1 - s_1 sh^2 \alpha \phi_1 - s] \cdot \Delta_1^{-1}(\alpha), \quad (15)$$

$$H_{22}(\alpha) = i \frac{m_0 m_1}{\sqrt{n_1}} [s \cdot s_1 ch^2 \alpha \phi_1 + (\alpha \phi_1)^2 - \alpha \phi_1 \xi(\alpha) - s_1^2 sh^2(\alpha \phi_1) - s \cdot s_1] \cdot \Delta_1^{-1}(\alpha),$$

for  $n_1 \neq n_2$

$$\tilde{H}_{21}(\alpha) = m_0[-ss_1(\alpha \phi_1) \xi_2(\alpha) - s \xi_3(\alpha) + s(\alpha \phi_1) \xi_2(\alpha) + \xi_3(\alpha)] \cdot \Delta_2^{-1}(\alpha), \tilde{H}_{22}(\alpha) = \\ = i \frac{m_0 m_1}{\sqrt{n_1}} [1 - s_1 ch(2\alpha \phi_2) + ss_1 \xi_1(\alpha) + s\alpha \phi_1 \xi_4(\alpha) + ss_1(\alpha \phi_1)^2 sh^2 \alpha \phi_1 - \\ - ss_1 ch^2 \alpha \phi_{21} - s_1^2(\alpha \phi_1) \xi_4(\alpha) + \xi_3(\alpha)] \cdot \Delta_2^{-1}(\alpha), \quad (16)$$

here  $n_1$  and  $n_2$  are the roots of the defining equation [1,13]. The quantities appearing in formulas (13), (14), (15), (16) are expressed in terms of the known parameters of the initial stress state [1,14].

**Solving the system of recurrent equations.** We apply the principle of superposition to determine the displacement of the points of the elastic band in the direction  $0y_1$  and  $0y_2$  under the simultaneous action of normal and tangential stresses for compressible and incompressible bodies for potentials of an arbitrary structure [1]

$$\begin{aligned} u_1(y_1) &= \int_{-\infty}^{\infty} h_{11}(|y_1 - \tau|)p(\tau)d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} h_{12}(|y_1 - \tau|)q(\tau)d\tau, \\ u_2(y_1) &= \int_{-\infty}^{\infty} h_{21}(|y_1 - \tau|)p(\tau)d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} h_{22}(|y_1 - \tau|)q(\tau)d\tau. \end{aligned} \quad (17)$$

Following [1,9], according to the system of equations

$$\begin{aligned} \frac{du_2(y_1)}{dy_1} &= 0, \quad (-\infty < y_1 < \infty) \\ E_1(y_1) \frac{du_1(y_1)}{dy_1} &= \frac{1}{h} \int_{-\infty}^{y_1} [2q(t) - q_0(t)]dt. \end{aligned} \quad (18)$$

Assuming that the heterogeneity of the stringer varies according to the law

$$E_1(y_1) = E[(1 + \delta f(y_1))], \quad (-\infty < y_1 < \infty), \quad (19)$$

where  $f(y_1)$  is known function,  $\delta$  is small parameter.

Using the contact boundary conditions (9) and presenting the unknown contact stresses  $p_0(y_1)$ ,  $q_0(y_1)$  in the form of series of a small parameter

$$q_0(y_1) = \sum_{k=0}^{\infty} \delta^k q^{(k)}(y_1), \quad (-\infty < y_1 < \infty), \quad (20)$$

let's write the system of solutions of recurrent systems of equations

$$\frac{du_2^{(0)}(y_1)}{d(y_1)} = 0, \quad (-\infty < y_1 < \infty) \quad (21)$$

$$E_0 h \frac{d^2 u_1^{(0)}(y_1)}{d(y_1)^2} = 2q^{(0)}(y_1) - q_0(y_1),$$

$$\frac{du_2^{(k)}(y_1)}{d(y_1)} = 0, \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (-\infty < y_1 < \infty), \quad (22)$$

$$E_0 h \frac{d^2 u_1^{(k)}(y_1)}{d(y_1)^2} = 2q^{(k)}(y_1) - q_0^{(k-1)}(y_1),$$

where

$$\begin{aligned} q_0^{(k-1)}(y_1) &= hE_0 \frac{d}{d(y_1)} \left[ f(y_1) \frac{du_2^{(k-1)}(y_1)}{d(y_1)} \right], \quad (k = 1, 2, \dots), \\ u_1(y_1) &= \int_{-\infty}^{\infty} h_{21}(y_1 - \tau)p^{(k)}(\tau)d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} h_{22}(|y_1 - \tau|)q^{(k)}(\tau)d\tau, \\ u_2(y_1) &= \int_{-\infty}^{\infty} h_{11}(|y_1 - \tau|)p^{(k)}(\tau)d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} h_{12}(y_1 - \tau)q^{(k)}(\tau)d\tau, \quad (-\infty < y_1 < \infty, k = \\ & \quad 0, 1, \dots), \\ f_1^{(k-1)}(y_1) &= D_0 \frac{d^2}{d(y_1)^2} \left[ f(y_1) \frac{d^2 u_2^{(k-1)}(y_1)}{d(y_1)^2} \right], \quad (k = 1, 2, \dots), \\ f_2^{(k-1)}(y_1) &= E_0 h \frac{d}{d(y_1)} \left[ f(y_1) \frac{du_1^{(k-1)}(y_1)}{d(y_1)} \right], \quad D_0 = E_0 I. \end{aligned} \quad (23)$$

where  $D_0$  is the zero term of the expansion for the series,  $D(y_1) = IE_1(y_1)$  – bending stiffness of the stringer,  $I$  – parameter of inhomogeneity.

System (21) describes the contact problem for a homogeneous infinite stringer [6,13,15], each subsequent system with (22) differs from the previous external load. The solution of the contact problem for a prestressed strip with a heterogeneous infinite stringer is simplified to the solution of a series of uniform contact problems with different external loads system (21). The zero approximate solution, that is, the solution of system (21) using the Fourier transform, is constructed in [1] and has the form

$$\begin{aligned} p(y_1) &= \frac{\mu}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [\alpha^2 H_{21}^*(\alpha) \tilde{q}_0(\alpha) + H_{22}^*(\alpha) \tilde{p}_0(\alpha)] H^{-1}(\alpha) e^{-i\alpha y_1} d\alpha; \quad (-\infty < y_1 < \infty) \\ q(y_1) &= \frac{\mu}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [H_{11}^*(\alpha) \tilde{q}_0(\alpha) - iH_{12}^*(\alpha) \tilde{p}_0(\alpha)] H^{-1}(\alpha) e^{-i\alpha y_1} d\alpha. \end{aligned} \quad (24)$$

Here, the quantities  $H^{-1}(\alpha)$ ,  $H_{ij}^*(\alpha)$  ( $i, j = 1, 2$ ), are expressed through functions  $H_{ij}(\alpha)$  and  $\tilde{H}_{ij}(\alpha)$  ( $i, j = 1, 2$ ), are determined by the formulas of equal and unequal roots of the equation [1,3,6,13] in the case of the specific structure of elastic potentials. The rest of the approximate solutions of influence of the heterogeneity of the stringer material are constructed in a similar way, where  $\tilde{p}_0(\alpha)$  and  $\tilde{q}_0(\alpha)$  is the Fourier, and  $\mu$  is the Lamé coefficient.

Thus, the  $k$  approximation has the form

$$p^{(k)}(y_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P^{(k)}(s) e^{-isy_1} ds, \quad q^{(k)}(y_1) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Q^{(k)}(s) e^{-isy_1} ds, \quad (k = 1, 2, \dots),$$

where

$$\begin{aligned} P^{(k)}(s) &= Ds^2 \left\{ \bar{f}_1^{(k-1)}(s) [E_0 h s^2 H_{22}(s) + 1] - E_0 h s^3 \bar{f}_2^{(k-1)}(s) H_{12}(s) \right\} / L(s), \\ Q^{(k)}(s) &= -I E_0 h s \left\{ \bar{f}_2^{(k-1)}(s) [D_0 h s^4 H_{11}(s) + 1] + D_0 h s^3 \bar{f}_1^{(k-1)}(s) H_{12}(s) \right\} / L(s), \end{aligned} \quad (25)$$

$$(k = 1, 2, \dots),$$

are Fourier transforms of contact stresses.

In (25):

$$\begin{aligned} L(s) &= [D_0 s^4 H_{11}(s) - 1][E_0 h s^2 H_{22}(s) + 1] + D_0 E_0 s^4 h H_{12}^2(s), \\ \bar{f}_j^{(k-1)}(s) &= F[f_j^{(k-1)}(y_1)], \quad (j = 1, 2), \quad (k = 1, 2, \dots), \end{aligned}$$

where  $F$  is the Fourier transform operator for the specified function (functional).

Applying to (21) and (22) the integral Fourier transform to the contact stress transforms:

$$\begin{aligned} h_{11}(y_1) p^{(0)}(y_1) - I h_{12}(y_1) Q^{(0)}(y_1) &= 0 \\ E_0 h y_1^2 h_{21}(y_1) p^{(0)}(y_1) - [E_0 h y_1^2 h_{22}(y_1) + 2] Q^{(0)}(y_1) &= Q_0(y_1). \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} h_{11}(y_1) p^{(k)}(y_1) - I h_{12}(y_1) Q^{(k)}(y_1) &= 0 \quad (k = 1, 2, \dots) \\ E_0 h y_1^2 h_{21}(y_1) p^{(k)}(y_1) - [E_0 h y_1^2 h_{22}(y_1) + 2] Q^{(k)}(y_1) &= Q_0^{(k-1)}(y_1) \end{aligned} \quad (27)$$

where

$$\begin{aligned} p^{(k)}(y_1) &= F[p^{(k)}(y_1)], \quad Q^{(k)}(y_1) = F[q^{(k)}(y_1)] \quad (k = 0, 1, 2, \dots). \\ Q_0(y_1) &= F[q_0(y_1)], \quad Q_0^{(k-1)}(y_1) = F[q_0^{(k-1)}(y_1)], \end{aligned}$$

and  $I$  is the heterogeneity parameter, and  $h_{ij}(y_1)$  is the influence function, the expressions:

for equal roots  $n_1 = n_2$ :

$$\begin{aligned} h_{11}(y_1) &= \frac{1}{\pi} \int_0^\infty H_{11}(\alpha) \cos \alpha y_1 \, d\alpha, \\ h_{12}(y_1) &= \frac{1}{\pi} \int_0^\infty H_{12}(\alpha) \sin \alpha y_1 \, d\alpha, \end{aligned} \quad (28)$$

for unequal roots  $n_1 \neq n_2$ :

$$\begin{aligned} h_{11}(y_1) &= \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \tilde{H}_{11}(\alpha) \cos \alpha y_1 \, d\alpha, \\ h_{12}(y_1) &= \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \tilde{H}_{12}(\alpha) \cos \alpha y_1 \, d\alpha \end{aligned} \quad (29)$$

Here,  $h_{ij}(\alpha), i, j = 1, 2$  the influence functions, which characterize the movement of the limit points  $y_2 = 0$  of an infinite elastic band with initial stresses from a unit horizontal force, core  $H_{ij}(\alpha)$  and  $\tilde{H}_{ij}(\alpha)$ , respectively, have the form (15), (16).

After finding the transformants of the contact stresses from systems (26), (27) and applying the inverse Fourier transform, the expressions of the zero and  $k$  approximation of the normal and tangential stresses

$$p^{(0)}(y_1) = \frac{\mu}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \frac{H_{12}^*(\alpha)}{H^*(\alpha)} Q_0(\alpha) \operatorname{sign} \alpha e^{-i\alpha y_1} d\alpha; \quad (-\infty < y_1 < \infty) \quad (30)$$

$$q^{(0)}(y_1) = \frac{\mu}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \frac{H_{11}^*(\alpha)}{H^*(\alpha)} Q_0(\alpha) e^{-i\alpha y_1} d\alpha;$$

$$p^{(k)}(y_1) = \frac{\mu}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \frac{H_{12}^*(\alpha)}{H^*(\alpha)} Q_0^{(k-1)}(\alpha) \operatorname{sign} \alpha e^{-i\alpha y_1} d\alpha; \quad (-\infty < y_1 < \infty) \quad (31)$$

$$q^{(k)}(y_1) = \frac{\mu}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \frac{H_{11}^*(\alpha)}{H^*(\alpha)} Q_0^{(k-1)}(\alpha) e^{-i\alpha y_1} d\alpha.$$

Here  $H(\alpha), H_{ij}^*(\alpha) (i, j = 1, 2)$  the quantities are expressed through known functions  $H_{ij}(\alpha)$  and  $\tilde{H}_{ij}(\alpha) (i, j = 1, 2)$ , which are determined by the formulas of equal and unequal roots of the equation [1, 16] for the corresponding structure of elastic potentials.

Expressions of contact stresses (30) describe the solution of the problem for a uniform stringer, which is the zero approximation of the problem for a non-homogeneous stringer. In this way, the approximations specified by formulas (31) create a variant of the solution for a non-homogeneous stringer. At the same time, it is possible to solve contact problems of an elastic body, with an infinite stringer, in which a weak heterogeneity varying according to the law is simulated

$$E_1(y_1) = E[(1 + \delta f(y_1))] \quad (-\infty < y_1 < \infty)$$

where  $f(y_1)$  is known function,  $\delta$  – small parameter.

**System of solving equations.** Having applied to both parts of the system (2.8) the integral Fourier transform by variable and using the convolution theorem, we find the expressions.

The zero approximation for the cases of equal and unequal roots of the characteristic equation will take the form (24), if these formulas are substituted:

- for equal roots ( $n_1 = n_2$ )  $H_{ij}^*(\alpha)$  on  $H_{ij}(\alpha)$ ,
- for unequal roots on ( $n_1 \neq n_2$ )  $H_{ij}^*(\alpha)$  on  $\tilde{H}_{ij}(\alpha)$ ,
- where the kernels  $H_{ij}(\alpha)$  and  $\tilde{H}_{ij}(\alpha)$  have the form (1.11) and (1.12), respectively.

Let's consider numerical examples for incompressible bodies of neo-Hookean material (Treloir potential) (Fig. 2, a, b).

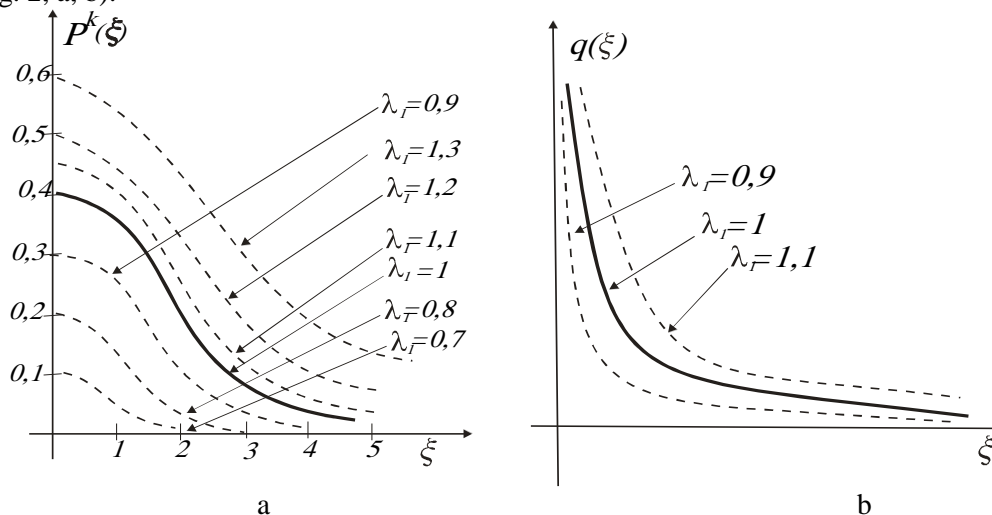


Fig. 2. Numerical examples for incompressible bodies of neohouk material: a – for the dependence of  $p^{(k)}(\xi)$  on  $\xi$ , b – for the dependence of  $q(\xi)$  on  $\xi$

Here  $p(\xi)$ ,  $q(\xi)$  are dimensionless contact normal and tangential stresses in elastic strips with initial stresses. The value  $\lambda_1 = 1$  corresponds to the results obtained in the work [11,16],  $\lambda_1 = 0; 0,8; 0,4$  – corresponds to the initial compression stresses, and  $\xi$  – the initial tensile stresses, is a dimensionless coordinate of the initial stress state in the elastic band with the initial stresses.

The analysis of the graphs shows that in the case of compression ( $\lambda_1 < 1$ ), The presence of initial stresses in the strip leads to a significant reduction in tensile stresses ( $\lambda_1 > 1$ ) - to their increase.

**Conclusions.** In the work using the linearized theory of elasticity, it was possible to obtain a solution of the planar contact problem with the transfer of a concentrated horizontal load from an inhomogeneous infinite elastic stringer to prestressed strips with pinched faces. The calculations were based on the theory of large initial deformations and established several variants of small initial deformations. The solution of the problem is determined for normal and tangential contact stresses thanks to the system of recurrent integro-differential equations. The zero approximate solution of the inhomogeneous problem is built on the integral Fourier transform, which led to the representation of contact stresses by Fourier integrals.

1. The presented general case for equal and unequal roots of the equation of contact problems based on the linearized theory of elasticity makes it possible to formulate a general solution method that determines the solution of similar problems with known linear (without initial stresses) parameters.

2. For the case of equal roots of the defining equation for bodies with elastic potentials of arbitrary shape, the stresses and displacements at the ends of elastic pads have a feature that completely coincides with the feature in similar problems of the classical linear theory of elasticity. With unequal roots for bodies with elastic potentials of arbitrary shape, it is not possible to prove the coincidence of the orders of the specified features.

3. The contact stresses at the contact line with the elastic overlay are significantly dependent on the initial stresses. For highly elastic materials, the initial stresses play a more significant quantitative effect. Qualitative influence has an identical character.

#### References:

1. Діхтярук М.М. Періодична контактна задача для пружної смуги з початковими (залишковими) напруженнями. Доповіді національної академії наук.– 2004. № 3. – С. 46 – 49. 2. Yuan

W.K., Long J.M., Ding Y., Wang G.F. Micro/Nanocontact Between a Rigid Ellipsoid and an Elastic Substrate With Surface Tension // Journal of Applied Mechanics. – 2017. №1. – p. 011012, Paper No: JAM-16-1460. 3. Stashchuk M.G., Nitrebych Z.M., Zhiguts Yu.Yu., Lazar V.F. et al. Methods of calculating singular integrals for engineering problems // The 7th International scientific and practical conference “International scientific innovations in human life” (January 19-21, 2022) Cognum Publishing House, Manchester, United Kingdom. 2022. – P. 164-171. 4. Zhiguts Yu., Lazar V., Pallay D. Features of calculation of stresses caused in metal structures // The VIII International Scientific and Practical Conference «Actual trends in science and practice», February 28 – March 02, Geneva, Switzerland. 2022. – P. 162- 164. 5. Akopyan V.N., Mirzoyan S.A., Mkhitaryan S.M. The Problem of the Contact Between a Broken Stringer and an Elastic Infinite Strip Containing a Vertical Edge Crack // Int. Appl. Mech. – 2015. – 51, N 2. – P. 176 – 186. 6. Babich S., Zhiguts Y., Lazar V. System of recurrent equations for the problem of load transfer from an infinite inhomogeneous stringer to two jointed elastic strips // The 12th International scientific and practical conference “Actual issues of the development of science and ensuring the quality of education” (March 28 – 31, 2023) Florence, Italy. International Science Group. 2023. Pp. 347-353. 7. Babich, S.Y., Yarets'ka, N.O. Contact Problem for an Elastic Ring Punch and a Half-Space with Initial (Residual) Stresses. // International Applied Mechanics. 2021, №6. – p. 297-305. 8. Moses O. P., Adewale A. O., Olusegun O. A. Numerical Analysis of Thermo-Elastic Contact Problem of Disc Brakes for Vehicle on Gradient Surfaces. // World Journal of Engineering and Technology. – 2016. №1. – p. 51 – 58. 9. Babich S.Yu., Zhiguts Yu.Yu., Lazar V.F. Dynamic tensioned twolayer semispace under the influence of moving load // The 9th International scientific and practical conference “Modern science: innovations and prospects” (May 29-31, 2022) SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2022. – P. 201-207. 10. Yaretskaya N.A. The impact of the initial (residual) stresses on the contact interaction of elastic cylindrical punch and an elastic layer // Bulletin of NAS of Ukraine. – 2014. – N 1. – P. 57 – 62. 11. Dikhtyaruk N.N. Load transfer from the infinite stringer to the two jammed along one edge identical stripes with initial (residual) stresses // Scientific journal of the Ternopil national technical university. – 2016. N 3. – P. 51– 61. 12. Babych S., Zhiguts Yu., Lazar V., Dihtyaruk M. Contact problems for preliminary strips reinforced by thin elastic overlays stringers // The 4th International scientific and practical conference “Innovations and prospects of world science” (December 1-3, 2021) Perfect Publishing, Vancouver, Canada. 2021. – P. 220-224. 13. Yaretskaya N.A. Three-Dimensional Contact Problem for an Elastic Layer and a Cylindrical Punch with Prestresses // Int. Appl. Mech. – 2014. N 4. – P. 378 – 388. 14. Rudnitsky V.B., Dikhtyaruk N.N. Interaction Between an Infinite Stringer and Two Identical Prestressed Strips: Contact Problem. // International Applied Mechanics. – 2017. №2. – p 149–155. 15. Babich, S.Y., Dikhtyaruk, N.N., Degtyar, S.V. Contact Problem for Two Identical Strips Reinforced by Periodically Arranged Fasteners with Initial Stresses // International Applied Mechanics. – 2019. №6 – p. 629 – 635. 16. Bosakov S.V. Finite Integral Transform Method in Static Problems for Inhomogeneous Plates // Int. Appl. Mech. – 2014. – 50, N 6. –P. 651– 663.

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

П.О. Коробко<sup>1</sup>, А.В. Кузьмов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України;

<sup>2</sup>Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

## ЕФЕКТИВНІ ПРУЖНІ ВЛАСТИВОСТІ ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ ЗІ СТРУКТУРОЮ ІНВЕРСНОГО ОПАЛУ

Базуючись на теоретичних засадах механіки композитів шляхом скінченно-елементного моделювання було досліджено ефективну пружну поведінку пористого матеріалу з періодичною структурою інверсного опалу. Здійснювалось осереднення питомої пружної енергії на представницькому осередку інверсного опалу за різних схем деформування. За рахунок цього було знайдено ефективні модуль зсуву та об'ємний модуль для різних випадків структури інверсного опалу. Виявилось, що ефективні модулі пружності вкрай чутливі до пористості. Зокрема нанесення додаткового покриття, навіть товщиною меншою від 0.05 діаметру сферичних пор (вихідних частинок полімеру), викликає збільшення ефективного об'ємного модуля пружності в 4 рази, а зсувного аж в 6 разів.

**Ключові слова:** метаматеріали, інверсний опал, представницький осередок, модулі пружності, мікромеханіка.

P. Korobko, A. Kuzmov

## EFFECTIVE ELASTIC PROPERTIES OF POROUS MATERIALS WITH INVERSE OPAL STRUCTURE

Based on the theoretical principles of composite materials mechanics, the effective elastic behavior of a porous material with a periodic inverse opal structure was investigated by finite element modeling. The specific elastic energy was averaged on a representative cell of the inverse opal under different deformation schemes. This allowed us to find the effective shear modulus and bulk modulus for different cases of the inverse opal structure. It turned out that the effective elastic moduli are extremely sensitive to porosity. In particular, the application of an additional coating, even with a thickness less than 0.05 of the diameter of the spherical pores (the original polymer particles), causes an increase in the effective bulk modulus of elasticity by a factor of 4, and the shear modulus by a factor of 6.

**Key words:** metamaterials, inverse opal, representative cell, elastic moduli, micromechanics.

### 1. Introduction.

In recent years, intensive research has been conducted on the phenomena associated with the negative refractive index of electromagnetic waves [1]. The reason for the intensification of these studies was the emergence of a new class of nanostructured composite materials that have an ordered periodic structure and are called metamaterials. The structure of these materials can be changed so that they have a wider range of electromagnetic characteristics, including a negative refractive index. One type of metamaterials is porous materials with an inverse opal structure, and such materials are also being investigated as promising structural materials with high specific strength and stiffness characteristics [2]. Inverse opal structures, characterized by their unique geometry and mechanical properties, have emerged as a focal point in recent research due to their versatile applications. One notable advancement is in the domain of wound management, where inverse opal hydrogel layers incorporated into Chinese herb hydrogel patches have demonstrated significant improvements in mechanical properties. This development is crucial for medical applications, offering a promising pathway for the creation of advanced wound care solutions [3].

The inverse opal structure is made in several stages [4]. The first stage is the self-assembly of polystyrene spheres into an opal structure on a substrate by slowly evaporating the colloidal solution of these spheres. The second stage is sintering of the spheres to form a bond between them. The third stage involves electrodeposition of nickel to fill the remaining space between the spheres. The fourth stage is the etching of polystyrene to obtain the actual inverse opal structure, after which an additional layer of the same or another material can be applied to the formed structure. The periodic cell of the inverse opal is shown in Fig. 1.

Although the structure of the pore space in an inverse opal is quite complex, it can be characterized by only two parameters, such as the isthmus between spherical pores and the thickness of the coating applied to the metal frame, according to the material production technology. In this work, the porosity and thickness of the additionally deposited nickel layer are used as a characteristic of the structure. Nickel [4] is considered as a solid phase material for such a porous composite, both for the main structure and for the additional layer.

The Goal of this work is to find the effective elastic properties of materials with an inverse opal structure by finite element modeling on a unit cell.

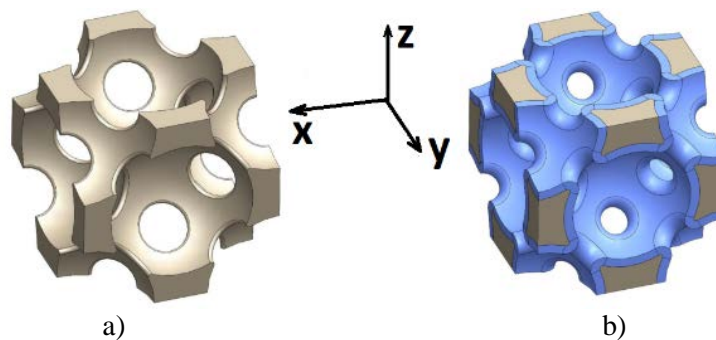


Fig. 1. Periodic cell of inverse opal a) uncoated; b) coated.

**2. Micromechanical averaging procedure on a unit cell.**

Inverse opal is a microheterogeneous material with a regular periodic structure. For composites of this type, approaches to finding effective properties are well developed [5]. For materials with a periodic structure, micromechanical averaging is sufficient to be carried out within a periodic cell, i.e., on a scale of heterogeneity that is smaller than the scale of the averaging length [6]. On the scale of the averaging length, the boundary of the representative cell is distorted close to a linear transformation [7], and in the case of an elementary periodic cell, generally speaking, it is not [8].

However, due to symmetry, in the case when there are no shear components of macroscopic "effective" deformations in the XYZ coordinate system shown in Fig. 1, the cell will retain a rectangular shape during such deformation. Using this, in the following, as a first approximation, we will consider the inverse opal as an isotropic composite. In this case, we assume that the main axes of the macroscopic stress and strain tensors are directed along the XYZ coordinate axes from Fig. 1. Accordingly, to describe the elastic behavior of the inverse opal, it will be sufficient to find only two independent elastic moduli, for example, the shear G and bulk K elastic moduli.

For this purpose, the elementary (representative) volume extracted from the material space is subjected to two loading schemes - hydrostatic compression and pure shear (Fig. 2.2).

To set up a numerical experiment to determine the effective elastic properties of a nanostructured material, it is necessary to use the properties of the solid phase of a porous material. In our study, the solid phase of the base and coating is electrodeposited nickel, the elastic constants of which correspond to the properties of pure nickel (Table 2.1).

Table 2.1

**Solid phase material elastic properties**

Material	Density, $\rho$	Young's Modulus, E	Poisson's ratio, $\nu$
Electrodeposited nickel	8900 $\frac{kg}{m^3}$	171 GPa	0,31

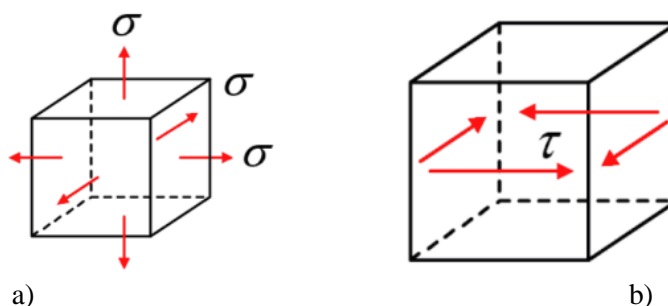


Fig. 2.2. Scheme of elementary volume loading: a) hydrostatic compression scheme; b) shear loading scheme.

As mentioned above, the structure must be subjected to hydrostatic and shear loading. In order to represent this mathematically, we have used the boundary conditions on the unit cell (UC), which are transformed into a strain matrix ( $e_{ij}^0$ ) from which we can calculate the normal strain ( $e^0$ ) and shear strain ( $\gamma^0$ ) using the following formulas:

$$e^0 = e_{11}^0 + e_{22}^0 + e_{33}^0; \tag{2.1}$$

$$\gamma^0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(e_{11} - e_{22})^2 + (e_{22} - e_{33})^2 + (e_{33} - e_{11})^2 + 6(e_{12}^2 + e_{23}^2 + e_{31}^2)} \tag{2.2}$$

Since the boundary of the elementary volume is a parallelepiped, considering the symmetry of the structure, the conditions for micromechanical averaging of a composite with a periodic structure can be represented in the form of displacements of the edges perpendicular to the axes of a rectangular coordinate system (Table 2.2). [5]

Table 2.2

Representative cell boundary conditions

Stress scheme	Boundary conditions	$e_{ij}^0$	$e^0$	$\gamma^0$
Hydrostatic	$\vec{n} = (1,0,0): U_1 = -X$ $\vec{n} = (0,1,0): U_2 = -Y$ $\vec{n} = (0,0,1): U_3 = -Z$	$e_{ij}^0 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$	3	0
Shear	$\vec{n} = (1,0,0): U_1 = X$ $\vec{n} = (0,1,0): U_2 = -Y$	$e_{ij}^0 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \equiv \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}$	0	$\sqrt{2}$

### 3. Description of finite element modeling

The loading process is modeled by the finite element method in the ABAQUS/Standard software environment. The material model is assumed to be isotropic elastic, with the properties shown in Table 2.1. We apply displacements corresponding to the shear and hydrostatic loads to the elementary cell on the corresponding faces in accordance with the parameters given in Table 2.2. We use the automatic division of the solid phase of the structure into a mesh of ten-node quadratic tetrahedral finite elements by the type of volumetric stress. The results of modeling the hydrostatic compression of a structure with a pore diameter of 495 nm and a 33 nm nickel layer are shown in Fig. 2.3.

The target parameter for hydrostatic load modeling is the value of the total internal energy ALLIE accumulated during deformation. Having determined this parameter, we calculate the value of the total elastic specific energy from the following expression:

$$W = \frac{ALLIE}{V_c}, \quad (2.3)$$

where  $V_c$  – the volume of the representative cell.

On the other hand, the total elastic specific energy  $W$  is defined as [6]:

$$W = \frac{K}{2}(e^0)^2 + G(\gamma^0)^2, \quad (2.4)$$

where  $K$  – Bulk modulus, Pa;  $G$  – Shear modulus, Pa.

Taking into account the boundary conditions (Table 2.2), we can calculate the Bulk modulus  $K$  from formula (2.4) using the following formula:

$$K = \frac{2}{9} * W_h \quad (2.5)$$

where  $W_h$  – specific elastic energy accumulated as a result of hydrostatic compression, Pa.

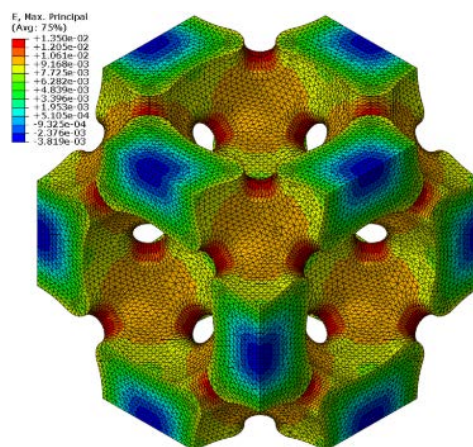


Fig. 2.3. Maximal strain under hydrostatic stress condition

Similarly to hydrostatic compression, we model the shear deformation (Fig. 2.4). The desired parameter in the shear load modeling is the value of the total internal energy ALLIE accumulated during



the deformation process. After determining this parameter, we calculate the value of the total elastic specific energy using formula (2.3).

Given the boundary conditions (Table 2.2), we can calculate the shear modulus G from formula (2.4) using the following formula:

$$G = \frac{1}{2} W_{sh} \tag{2.6}$$

where  $W_{sh}$  – specific elastic energy accumulated as a result of shear strain, Pa.

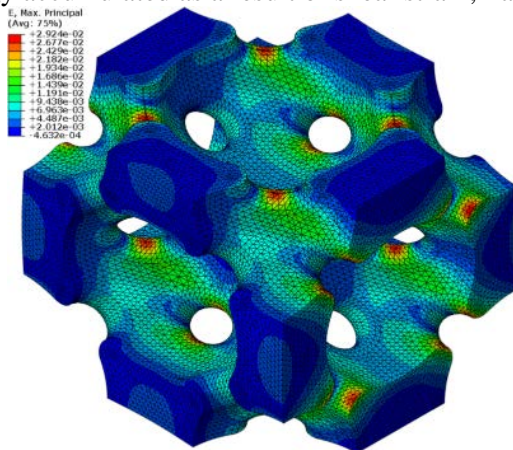


Fig. 2.4 Maximal strain under shear stress condition

The obtained values of the bulk modulus K and the shear modulus G fully describe the isotropic elastic behavior of the inverse opal structure under load. In Hooke's law for an isotropic linear elastic material, there is an unambiguous relationship between the elastic constants of the material, so the following dependencies are valid for determining the effective Young's modulus  $E^{eff}$  and Poisson's ratio  $\nu^{eff}$  [9]:

$$E^{eff} = \frac{9KG}{3K + G}; \tag{2.7}$$

$$\nu^{eff} = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)}. \tag{2.8}$$

Summarizing the values obtained from the finite element modeling with the results of analytical calculations in the form of a table (Table 2.3), while comparing them with the properties of the solid phase material.

Table 2.3

**Numerical calculations results**

Structure	$\Theta$ , %	$W_h$ , [GPa]	$W_{sh}$ , [GPa]	K, [GPa]	G, [GPa]	E, [GPa]	$\nu$
Bulk Ni	0	-	-	-	-	171	0,31
NiIO 260nm	90	8,67	0,588	1,93	0,294	0,84	0,427
NiIO 520nm	84	21,5	2,53	4,77	1,27	3,49	0,378
NiIO 930nm	90	8,01	0,513	1,78	0,257	0,735	0,431
NiIO 470+19nm	65	79,3	14,4	17,6	7,2	19	0,32
NiIO 495+33nm	57	113	22,5	25,1	11,25	29,3	0,305

**Conclusion:** As can be seen from the calculation results, both the bulk and shear moduli of elasticity depend significantly on the structure of the inverse opal. The porosity of 0.9 is almost the limit for inverse opal and corresponds to a structure with thin cross-links. In this case, the stiffness of the inverse opal is about two orders of magnitude less than the stiffness of the solid phase material (i.e. nickel). In this case, the bulk modulus decreases less than the shear modulus. However, a slight decrease in porosity from 0,9 to 0,84 causes an approximately fivefold increase in the shear modulus and Young's modulus. The application of an additional layer causes an even more significant increase in the stiffness of the inverse opal. An additional coating, even with a thickness less than 0,05 of the diameter of the spherical pores (the original polymer particles), causes a 4-fold increase in the effective bulk modulus of elasticity and a 6-fold increase in the shear modulus.

**References**

1. Агранович В. М., Гартштейн Ю. М. Пространственная дисперсия и отрицательное преломление света // УФН. – 2006. – С. 1051–1068.

2. Rosario J. J., Berger J. B., Lilleodden E. T., McMeeking R. M., Schneider G. A. The stiffness and strength of metamaterials based on the inverse opal architecture // *Extreme Mechanics Letters*. – 2016. – Т. 12. – С. 86–96.
3. Cao X., Wang Y., Wu X., Wang J., Ren H., Zhao Y. Multifunctional structural color Chinese herb hydrogel patches for wound management // *Chemical Engineering Journal*. – 2024. – Vol. 485. – P. 149957. – ISSN 1385-8947. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.149957>.
4. Pikul J. H., Özerinç S., Liu B., Zhang R., Braun P. V., Deshpande V. S., King W. P. High strength metallic wood from nanostructured nickel inverse opal materials // *Scientific Reports*. – 2019.
5. Bakhvalov N.S., Panassenko G.P. *Upscaling: Averaging Processes in Periodic Media*. – Kluwer Academic Publishers, 1989.
6. Christensen R. M. *Mechanics of composite materials*. – New York: Wiley-Interscience, 1979. – 348 с.
7. Победря Б. *Механика композиционных материалов*. – Москва: Изд-во Моск. ун-та, 1984.
8. Kuzmov A., Olevsky E., Maximenko A. Multi-scale modelling of viscous sintering // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. – 2008. – 16(3), 035002.
9. Божидарник В. В., Сулим Г. Т. *Елементи теорії пружності*. – Львів: Світ, 1994. – 560 с.

О.О. Налобіна<sup>1</sup>, М.В. Голотюк<sup>1</sup>, А.В. Шимко<sup>1</sup>, О.З. Бундза<sup>1</sup>, В.Л. Мартинюк<sup>2</sup>, В.С. Пуць<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет водного господарства та природокористування

<sup>2</sup>Луцький національний технічний університет

## ДО ПИТАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

*Здатність будь-якої сільськогосподарської машини зберігати свої початкові технічні показники у процесі експлуатації визначається її надійністю. Усі показники, що впливають на надійність, як правило, розраховуються на підставі тих чи інших моделей функціонування. Відомими є різні підходи до моделювання процесів формування показників надійності. У даній роботі проаналізовано чинні моделі надійності технічних систем та запропоновано новий підхід до оцінювання надійності з урахуванням впливу на даний показник комплексу взаємопов'язаних внутрішніх і зовнішніх факторів. Такої системності можна досягти використавши можливості штучного інтелекту.*

*Ключові слова:* надійність, модель, технічна система, сільськогосподарська машина, аналіз.

O. Nalobina, M. Holotiuk, A. Shymko, O. Bundza, V. Martyniuk, V. Puts

## ON THE ISSUE OF MODELING THE RELIABILITY OF AGRICULTURAL MACHINERY

*The ability of any agricultural machine to maintain its original technical performance during operation is determined by its reliability. All indicators that affect reliability are usually calculated on the basis of certain models of functioning. There are various approaches to modeling the processes of forming reliability indicators. This paper analyzes the existing reliability models of technical systems and proposes a new approach to assessing reliability, taking into account the impact of a set of interrelated internal and external factors on this indicator. Such a systematic approach can be achieved using the capabilities of artificial intelligence.*

*Keywords:* reliability, model, technical system, agricultural machine, analysis.

**Постановка проблеми.** Ефективність експлуатації сільськогосподарських машин визначається рівнем їхньої надійності, яка формується ще під час виконання процесу проектування, забезпечується в ході виготовлення, проявляється та підтримується в процесі експлуатації машин.

Відомо, що надійність – це властивість виробу зберігати в часі у встановлених межах значення параметрів, які характеризують здатність виконувати закладені функції за умови роботи на рекомендованих режимах, із проведенням технічного обслуговування, ремонту, зберігання та транспортування.

Низький показник надійності є вирішальним фактором зростання витрат на технічне обслуговування й ремонт машин. Аналіз питання надійності машин є вирішальним для організації управління інженерними активами АПК, який дозволить зрозуміти динаміку їхніх змін, оптимізувати їхню роботу та мінімізувати експлуатаційні витрати. Тому вихідною точкою для вирішення питання надійності є вивчення та дослідження причин виникнення несправностей, видів їхніх проявів і наслідків, можливостей їхньому запобіганню залежно від сукупності випадкових впливів, що діють на об'єкт на всіх етапах його життєвого циклу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання надійності сільськогосподарської техніки висвітлено в роботах В.Д. Войтюка, Д. П. Журавель, М.І. Черновола, В.Ф. Анісімова, Durczak Karol, Wang, Huang та інших вчених [1-6].

Методичні підходи до визначення надійності технічних засобів і, зокрема, сільськогосподарських машин, викладено в роботах А.В. Новицького [7], Wang, Huang [8], О.С. Гринченко [8].

Зокрема у роботі [7] викладено етапи забезпечення надійності технічних засобів для приготування і роздавання кормів на стадії експлуатації та обслуговування. Автором окреслено рекомендації для підвищення надійності. Розкрито сутність організації системи збирання інформації про надійність; забезпечення системи технічного обслуговування і ремонту. Новицький А.В. наголошує на необхідності розроблення науково-обґрунтованих принципів і єдиних підходів для формування напрямків забезпечення надійності.

Wang, Huang [6] зазначає, що використання компонентоцентричного підходу на основі даних про відмови, який застосовують під час оцінювання надійності є недостатньо точним. Автор пропонує більш точний метод, що інтегрує моніторинг продуктивності та аналіз надійності в одну

структуру. При цьому необхідно використовувати результати моніторингу, який проводиться за різних умов, що дає більш точні результати.

Гринченко О.С. [8] провів аналіз чинних методів оцінювання і моделей прогнозування механічної надійності, що утворюють загальну методологію оцінювання та забезпечення надійності. Наголошено на необхідності розробки загальної методології забезпечення механічної надійності сільськогосподарських машин, яка може бути покладена в основу відродження вітчизняного машинобудування. В основу такої методології слід покласти результати випробувань, які дозволяють прогнозувати ресурсні показники механічної надійності. Крім експериментальних методів автор рекомендує використовувати теоретичний аналіз конструкцій і комп'ютеризовані числові методи визначення напружено-деформованого стану об'єктів.

Методи підвищення надійності розглянуто у роботах [9-13]. У роботі [9] авторами проаналізовано чинні методи підвищення надійності систем і агрегатів для сільського господарства. Дані методи поділяються на три групи: конструкційні, технологічні та експлуатаційні. Авторами також запропоновано методологію вирішення проблеми надійності систем і агрегатів мобільної сільськогосподарської і автотранспортної техніки технологіями триботехнічного відновлення.

Авторами [10] виділено чотири «фактори підвищення надійності тракторів і сільськогосподарських машин: 1) удосконалення методів конструювання з використанням комп'ютерних систем, відпрацювання конструкцій різних вузлів і деталей на стадії проектування, перевірка їх надійності до початку виробництва; 2) застосування в конструкціях машин достатньо відпрацьованої високо-надійної елементної бази; 3) застосування нових високоякісних конструкційних матеріалів для виготовлення деталей, вузлів і базових елементів машин; 4) удосконалення технологій виробництва і контроль якості матеріалів, комплектуючих і виготовлення машин на всіх етапах виробництва».

Виконаний аналіз чинних досліджень виявив значний науковий інтерес до питання надійності технічних систем й сільськогосподарських машин, зокрема.

**Постановка завдань.** З урахуванням викладеного, метою даної роботи є аналіз моделей надійності технічних систем і розробка нового підходу до оцінювання надійності сільськогосподарських машин.

**Викладення основного матеріалу.** Надійність визначається як ймовірність того, що система буде виконувати свої функції протягом певного часу за встановлених умов. Як встановлено вище, відома значна кількість робіт, присвячених питанню надійності. Для оцінювання показника надійності використовують різні методологічні підходи: баєсовські мережі, дерево несправностей, дерево відмов, ланцюг Маркова, тощо.

Розглянемо деякі відомі моделі.

Моделі дерева відмов і дерева несправностей, які часто використовуються для оцінювання надійності, потребують значної бази експериментальних даних про відмови та фіксації фактичного часу, витраченого на ремонтні роботи. Отримати такі дані у достатньому об'ємі для складних технічних систем доволі важко. Це також є причиною для багатфакторного аналізу. Даний метод не дозволяє встановити залежності між факторами впливу на надійність, особливо в умовах невизначеності, врахувати вплив терміну експлуатації окремих складових технічної системи на її надійність. Перевагою методу є доступність візуального сприйняття та простота у використанні.

Моделювання надійності технічних систем на основі ланцюгів Маркова. Застосування ланцюгів Маркова дає можливість виконати аналіз надійності складної технічної системи якою є сільськогосподарська техніка. Особливість даного методологічного підходу – це можливість оцінити компоненти системи, які різняться за технічним станом, проявом відмов у часовому просторі.

Метод ґрунтується на використанні випадкових марківських процесів. Моделювання випадкових станів враховує та розглядає фактори, що викликають найбільш небезпечний стан у процесі експлуатації машин. Можливість враховувати зовнішні фактори протягом деякого проміжку часу є безперечною перевагою методу, що дозволяє робити прогнози надійності загального стану машини з урахуванням ймовірнісних критеріїв, які враховують небезпечні ситуації, несприятливі впливи зовнішніх факторів, техногенні причини.

Недолік даного методу обґрунтовано в роботі [14]. Автор відмічає складність побудови моделі на основі ланцюга Маркова, що є причиною помилок. Крім того, побудовану модель надійності, яка враховує багато станів, важко розв'язати із застосуванням комп'ютерних програм.

Баєсовські мережі відносять до ймовірнісно-статистичних методів, які дозволяють приймати обґрунтовані тактичні та стратегічні рішення з забезпечення надійності.

Згідно з [15] процес моделювання та прогнозування на основі баєсовської мережі складається з таких етапів: збір даних; побудова моделей-кандидатів; вибір кращої моделі за статистичними критеріями адекватності; обчислення оцінок прогнозів.

Моделі, які базуються на використанні баєсовської мережі, порівняно з іншими, точно показують структуру формування надійності в контексті ймовірнісних подій та дають можливість формалізувати даний процес [15].

Слід зауважити, що баєсовські мережі використовуються для оцінювання надійності багатокомпонентних систем, які характеризуються різними станами навіть за умови неповного набору статистичних даних.

Серед недоліків даного методу можна вважати те, що доволі важко на основі даних моніторингу подій, отриманих із різних джерел, побудувати модель втрати надійності з врахуванням зовнішніх факторів впливу. Також деякі вчені у якості недоліку методу відзначають суб'єктивне сприйняття спостерігачів таких понять як «граничний» і «дефектний» стани [16].

Аналіз підходів до оцінювання надійності дозволив нам зробити висновок, що в літературі практично відсутні роботи, у яких надійність розглядається системно, тобто з врахуванням впливу на даний показник комплексу взаємопов'язаних внутрішніх і зовнішніх факторів. Такої системності можна досягти використавши можливості штучного інтелекту.

Застосуємо як основу логіко-семантичну модель, що базується на побудові семантичних сіток. Перевагою такої моделі обробки інформації є спрощення інтеграції даних, що дає можливість спростити введення нової інформації з зовнішніх джерел в режимі реального часу.

Використання семантичної сітки дозволить нам отримати гнучку модель надійності будь якої сільськогосподарської машини.

На рисунку зображено принципову схему складання такої моделі. Модель формується з певної кількості блоків, які можуть накладатись один на другий. Блоки з даними за потреби можна додавати або вилучати з бази без втрати роботоздатності моделі надійності. Сукупність блоків створює певну систему знань, яка містить інформацію, потрібну для аналізу надійності конкретної машини.

Практично на етапі I (рисунок) формується формалізована модель у вигляді сіток. Верхівки сіток – це стан окремих структурних елементів; лінії між верхівками розкривають взаємний вплив елементів.

Використання семантичної моделі дозволяє системно оцінити процес за рахунок введення блоків даних, які містять як зовнішні так і внутрішні фактори впливу на показники надійності. Крім того в межах кожного ми можемо відстежити закономірності взаємного впливу факторів (рисунок).

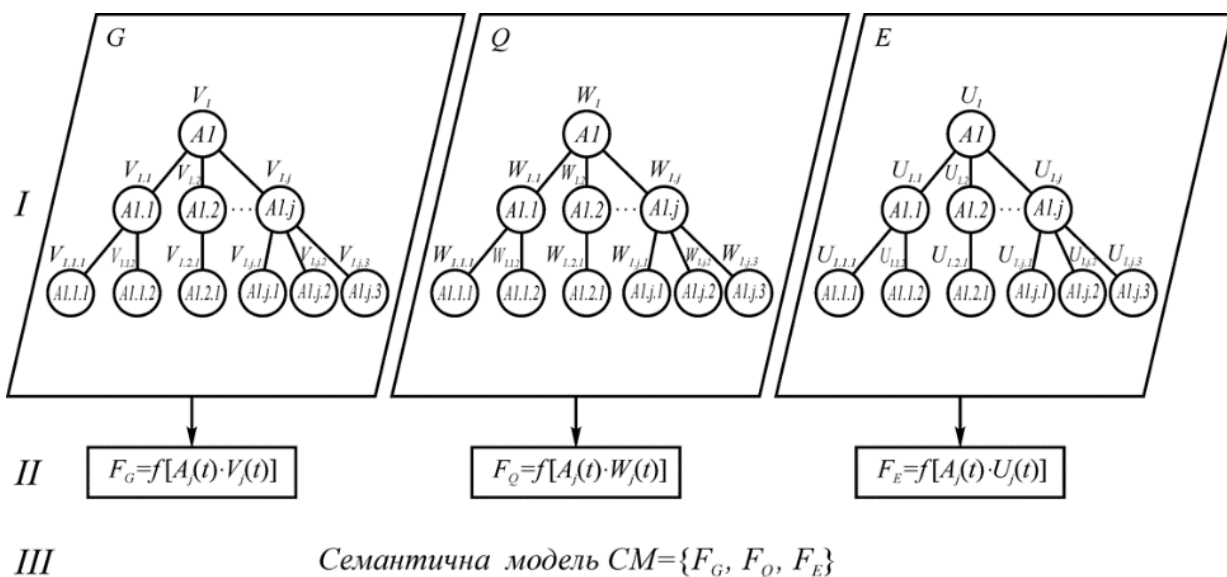


Рисунок. Схематичне представлення семантичної моделі надійності сільськогосподарської машини

Наведена семантична модель формування надійності складається з блоку  $G$  – містить інформацію про відмови деталей через зношування у вигляді сітки, яка містить зв'язки між окремими агрегатами ( $1.1, 1.2, \dots, 1.n$ ), вузлами ( $1.1.1., 1.1.2, 1.3, \dots 1.n.j$ ) та деталями ( $1.n.j.m$ ), що входять до їхнього складу.

Блок  $Q$  – містить інформацію про відмови, причиною яких є втомне руйнування причиною яких є дія циклічних навантажень.

Блок  $E$  – містить інформацію про відмови через порушення монтажу та експлуатації.

Так як сільськогосподарська машина являє собою складну систему, то кожен її окремий елемент може мати декілька станів, які характеризують певний показник надійності системи. Окремі елементи змінюючи свій стан, одночасно впливають на інші елементи, з якими вони пов'язані структурними, кінематичними або силовими зв'язками. Все це приводить до того, що машина набуває нові властивості. Це, в свою чергу, впливає на якість виконання певних функцій й на показники надійності.

З урахуванням цього представимо окремі елементи структури машини як вершини семантичної сітки, а ребра сітки відображають взаємозв'язки між ними (рис.1). Враховуючи зазначене, подані на рисунку елементи, можна описати такою множиною

$$A = \{A_j(t)\}, \text{ де } j = 1 \dots n. \quad (1)$$

Відповідно показники надійності змінюються і у певний момент часу характеризуються відповідним станом ( $V_i$ ). Всі можливі стани машини

$$\begin{cases} V = \{V_i(t)\}, \\ W = \{W_i(t)\}, \text{ де } i = 1 \dots m. \\ U = \{U_i(t)\}, \end{cases} \quad (2)$$

Внаслідок аналізу семантичних ланцюгів, отримаємо функції  $F_G, F_Q, F_E$  (на рівні II), які інтерпретують показники надійності.

Розглянемо можливі варіанти отриманих функцій.

Наприклад, на рівні II отримано функцію:  $F_G = \min(A 1.1) \vee (A 1.2) \Leftrightarrow j < 3$ . Такий результат інтерпретується наступним чином: відмова головного конструктивного елементу  $A 1$  відбудеться за умови відмови одного з найменш надійних елементів ( $A 1.1$ ), ( $A 1.2$ ).

За умови, що  $F_G = \min(A 1.1) \vee (A 1.2) \Leftrightarrow j > 2$  – роботоздатний стан головного конструктивного елементу  $A 1$  буде зберігатись при відмові одного з найменш надійних елементів ( $A 1.1$ ), ( $A 1.2$ ).

Звичайно, може бути багато різних сценаріїв загроз втрати надійності, кожен з яких являє собою набір кроків, які в певній сукупності можуть вплинути на показники надійності.

На підставі отриманих функцій  $F_G, F_Q, F_E$  формується семантична модель надійності машини (СМ) на рівні III. Об'єднання окремих семантичних ланцюгів на рівні III привело до створення інтегрованої мережі, яка містить об'єднання елементів рівня I.

Застосування такої моделі оцінювання надійності дає можливість спростити процес аналізу значного обсягу даних і отримати потрібну інформацію за незначний проміжок часу. Семантичну модель також легко адаптувати до нових джерел даних і мінливих умов експлуатації машини.

**Висновки.** Поширення технологій штучного інтелекту призводить до необхідності створення сучасних інтелектуальних систем нового типу, які здатні обробляти складноструктуровану інформацію. До таких систем можна віднести обробку інформації з використанням семантичних моделей, які базуються на оброблянні великого об'єму інформації з застосуванням графічних сіток.

Використання таких моделей для оцінювання надійності сільськогосподарських машин дозволить:

- автоматично або напівавтоматично реагувати на зміну структури загальної інформації (типу машини);
- досліджувати структуру, функціональні та інші зв'язки не у вигляді чисельних (математичних) абстракцій, а у вигляді логічних зв'язків;
- аналізувати показники надійності системно, тобто з урахуванням впливу комплексу взаємопов'язаних внутрішніх і зовнішніх факторів.

**Список використаних джерел**

1. Войтюк В. Д. Техніко-технологічний розвиток системи сервісу енергонасиченої сільськогосподарської техніки: дис. ... докт. техн. наук : 05.05.11. Мелітополь, 2012. 448 с.
2. Журавель Д. П. Моделювання працездатності машино-тракторного агрегату при експлуатації на біодизелі. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного, 19(3), 2019 р. С.57-67. <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/pratsi/article/view/241>.
3. Надійність сільськогосподарської техніки: Підручник. Друге видання, перероблене і доповнене / М.І. Черновола, В.Ю. Черкун, В.В. Аулін, Є.К. Солових, С.Г. Гранкін, О.В. Гранкіна. За ред. М.І. Черновола. – Кіровоград, 2009. 289 с.
4. Анісімов В.Ф. Аналіз і вибір методів дослідження надійності автотракторних двигунів / В.Ф. Анісімов, В.І. Музичук. Сільське господарство та лісівництво. Зб. наук. пр. ВНАУ. – 2019. № 15. С. 56-63.
5. Durczak Karol. Reliability of agricultural tractors according to Polish farmers. Tehnički vjesnik, 2020, 27.6: 1761-1766.
6. Wang H., Jiang Y. (2013). Performance reliability prediction of complex system based on the condition monitoring information. Mathematical Problems in Engineering, 2013. doi:10.1155/2013/836517.
7. Новицький А.В. Методичні підходи до формування програми забезпечення надійності сільськогосподарської техніки / А.В. Новицький. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. 2022. Col.6(37), Part I. С. 134-143.
8. Гринченко О.С. Концептуальні питання забезпечення механічної надійності сільськогосподарської техніки / О.С. Гринченко. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кіровоград: КНТУ, 2015. Вип. 45, ч. 1. С. 298-302.
9. Трибофізичні основи підвищення надійності мобільної сільськогосподарської та автотранспортної технологіями триботехнічного відновлення: монографія / В.В. Аулін, С.В. Лисенко, О.В. Кузик та ін.; за ред. В. В. Ауліна. Кропивницький. СПД ФО Лисенко В.Ф., 2016. 303 с.
10. Шокарев О. М., Шокарев О. М., Кабанов О. І. Підвищення рівня надійності сільськогосподарської техніки. Матеріали II Міжнародній науково-практичній конференції «Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі». 22-27 листопада 2020 р. С.445-449.
11. Коваль Дмитро Віталійович. Підвищення працездатності ущільнювальних пристроїв підшипникових вузлів сільськогосподарської техніки. кваліфікаційна робота магістра: спец. 133 - Галузеве машинобудування; Харків, 2022. 92 с.
12. Кухтов В., Гринченко О., Твердохліб С. Шляхи підвищення механічної надійності вітчизняної сільськогосподарської техніки. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України, 2013, 17 (1): 79-84.
13. Болтянська Н. І. Забезпечення надійності сільськогосподарської техніки. Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового лісового та транспортного комплексів», 2020, 21: 139-147.
14. Нікулін В.В. Моделювання динаміки експлуатаційних показників пожежної автомобільної техніки на основі імовірісно-статистичних методів. Все буде Україна! 97.
15. Salem A., Muller A., Weber P. (2006). Dynamic Bayesian Networks in system reliability analysis. In 6th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of technical processes (pp. 481-486): IFAC.
16. Yu J., Rashid, M. M. A novel dynamic bayesian network-based networked process monitoring approach for fault detection, propagation identification, and root cause diagnosis. AIChE Journal, 2013, 59(7), 2348-2365. <http://dx.doi.org/10.1002/aic.14013>.

О.У. Стельмах<sup>1</sup>, Р.Є. Костюнік<sup>1</sup>, О.В. Кущев<sup>1</sup>, С.П. Шимчук<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Національний авіаційний університет

<sup>2</sup> Луцький національний технічний університет

## АНАЛІЗ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОЧИЩЕННЯ МІНІАТЮРНИХ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ ДЛЯ ПРЕЦИЗІЙНИХ МЕХАНІЧНИХ ТА АВІАКОСМІЧНИХ СИСТЕМ НА РЕМОНТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

*В роботі приведено аналітичні дослідження методів очищення підшипників кочення від різного роду забруднень. Запропоновано, для покращення ефективності очищення підшипників від складних забруднень різної природи, використовувати метод імпульсного магнітно-турбулентного очищення в миючому середовищі з додатковим використанням ультразвукових систем різної частоти.*

*Ключові слова:* метод імпульсного магнітно-турбулентного очищення, ультразвук, підшипники кочення

O. Stelmakh, R. Kostyunik, O. Kushchev, S. Shymchuk

## ANALYSIS OF WAYS OF IMPROVING THE QUALITY OF CLEANING MINIATURE ROLLER BEARINGS FOR PRECISION MECHANICAL AND AEROSPACE SYSTEMS IN THE REPAIR PRODUCTION

*Analytical studies of methods of cleaning rolling bearings from various types of contamination are presented in the work. It is proposed to use the method of pulsed magnetic-turbulent cleaning in my environment with the additional use of ultrasonic systems of different frequencies to increase the efficiency of cleaning bearings from complex contamination of various nature.*

*Keywords:* method of pulsed magnetic-turbulent cleaning, ultrasound, rolling bearings

**Вступ.** При експлуатації, навіть у високоточних підшипниках, виникають різного роду дефекти. Існує залежність між виникненням значної частини дефектів підшипників кочення, що призводить до їх виходу з ладу, та видом і кількістю забруднень робочих поверхонь [1, 2]. Це прискорює зношування елементів конструкції, збільшує сили тертя, підвищує вібрації та шумові характеристики виробу в цілому. На сьогодні відомо багато різноманітних методів очищення підшипників від забруднень, що ефективні при їх застосуванні на нових підшипниках та не завжди можуть забезпечити необхідну чистоту виробів, після їх експлуатації, через особливість формування деяких забруднень [1 – 4].

**Літературний аналіз використовуваних методів очищення підшипників кочення.** Як показали результати ряду досліджень, проведених колективом авторів науково-дослідної лабораторії Нанотриботехнологій Національного авіаційного університету та іншими дослідниками за піднятою проблематикою [1 – 7], використання джерела імпульсного змінного магнітного поля в пристроях очищення дозволяє ефективно видаляти забруднення металічної природи, а також неметалеві та органічні частинки, які не характеризуються високою щільністю та ступенем адгезії. Для проведення ефективного очищення нових підшипників кочення, що надходять від виробників, цього зазвичай цілком достатньо. Але при діагностуванні та відновленні підшипників кочення, що були в експлуатації, коли забруднення мають дещо складнішу природу (наприклад забруднення мають природу старих полімеризованих мастильних матеріалів, коксованих продуктів змащення та консервації, щільних забруднень утворених органічними матеріалами та металічними включеннями) висвітлений вище метод є ефективним, зазвичай, при комплексному поєднанні з ультразвуком.

**Постановка завдань дослідження.** На основі практичного досвіду та літературного аналізу запропонувати новий ефективний метод очищення підшипників кочення від різного роду забруднень.

**Викладення основного матеріалу статті.** Магнітно-турбулентний метод очищення, що базується на впливі змінного магнітного поля та турбулентного потоку на забруднені поверхні підшипників кочення, виконує своє призначення за рахунок безконтактного обертання об'єкта очищення та ефективного «розрихлення» й видалення забруднень з робочих поверхонь підшипників. Особливо цей метод є актуальним для очищення мініатюрних та прецизійних



шарикопідшипників. Проте, для забезпечення ефективного очищення підшипників, його буває недостатньо.

Щоб забезпечити необхідну якість очищення мікропідшипників кочення для прецизійних механічних систем авіакосмічної й іншої техніки цивільного та військового призначення на ремонтному виробництві, потрібен новий ефективний метод, що буде включати крім імпульсного магнітно-турбулентного методу ще й технологію зменшення щільності наявних забруднень.

Основні недоліки імпульсного магнітно-турбулентного методу очищення можуть бути компенсовані послідовним використанням додаткового способу очищення, що дозволить ефективно «розрихлити» (зменшити щільність) та подолати адгезійну складову ряду найбільш складних та твердих експлуатаційних забруднень.

В якості такого способу можна використовувати ультразвукове очищення, що за результатами лабораторних досліджень показало значну ефективність, що суттєво перевершує за якістю інші існуючі методи [4 – 5]. На сьогоднішній день цей метод знайшов найбільше поширення для очищення підшипників кочення, як при їх виробництві, так і при відновленні в міжексплуатаційний (ремонтний) період. Його принцип дії полягає в створенні в миючій рідині ультразвукових коливань, які призводять до виникнення кавітації на робочих поверхнях, що підлягають очищенню. Обмеження за розмірами деталей, що піддають очищенню в даному випадку не є суттєвим. Виявлені в процесі використання даного способу очищення труднощі – забезпечення ефективного відводу забруднень з зони дії джерела, при комбінуванні з імпульсним магнітно-турбулентним методом, вирішуються організацією гідродинамічної течії за рахунок безконтактного (примусового) обертання вільного кільця шарикопідшипників. Проблемаю вищенаведеного способу є також перекривання (затінення) значної частини робочих поверхонь деталей підшипника від ефектної дії ультразвукових коливань конструктивно. При примусовому безконтактному обертанні елементів підшипника [8], вектору дії ультразвуку є однонаправленим, що призводить до значної анізотропії його поширення в миючому середовищі.

Таким чином, як показав досвід висвітлених досліджень, для ефективного видалення різного роду забруднень з металевих поверхонь складових шарикопідшипників доцільно використовувати комбіновані методи, що базуються на використанні імпульсного магнітно-турбулентного методу доповненого ультразвуковими випромінювачами [9 – 11].

Серед переваг такої комбінації є достатньо невелика ціна обладнання та комплектуючих, його поширеність на ринку та великий вибір випромінювачів ультразвуку, з широким діапазоном технічних характеристик та потужностей. Такий комплекс є відносно простим у реалізації. При цьому, правильний підбір параметрів випромінювача, за рахунок виникнення кавітаційних процесів в миючій рідині, дозволяє без кавітаційного пошкодження елементів конструкції підшипника ефективно порушити адгезію та міцність найбільш складних забруднень [5 – 6].

Метод довів свою ефективність навіть при очищенні органічних утворень (таких як нагар, коксовані мастила та лакові відкладення), що найбільш важко видаляються, оскільки вони утворюються під температурним впливом на паливо-мастильні матеріали. При цьому в багатьох наукових джерелах [7, 12 – 13] вказано, що ефективність цього методу напряму залежить від потужності випромінювача та частоти коливань.

Основними факторами, які впливають на результат та продуктивність очищення є частота випромінювача, його потужність, температура середовища та сумісність миючої рідини з матеріалами об'єкту очищення [7, 13].

Головним елементом пристрою є ультразвуковий генератор з перетворювачем, що формує електричні коливання із частотою ультразвукового діапазону та глибокою (до 90%) амплітудною модуляцією (50 – 100 Гц і більше). Випромінювач перетворює електричні ультразвукові коливання на механічні.

При випромінюванні потужного ультразвуку в рідину, в останній виникають кавітація та акустичні течії, що відіграють велику роль при очищенні. Вони виникають внаслідок поглинання ультразвукової хвилі середовищем. При цьому імпульс коливань окремих частинок в хвилі, що поширюється, переходить в імпульс спрямованого руху струменя потоку як єдиного цілого. При такій ультразвуковій очистці, акустичні течії сприяють виносу частинок забруднення з області, що очищається, інтенсифікують хімічну взаємодію миючого середовища з поверхнею за рахунок

посилення циркуляції в приграничній області. Крім того, вони доставляють активні кавітаційні бульбашки до ділянок поверхні, що очищається.

Сучасні промислові джерела ультразвуку здатні формувати ультразвукову хвилю в миючому середовищі з частотою від 25 кГц. Але на практиці сучасних технологій ультразвукового очищення найчастіше застосовується ультразвук низьких частот – від 16 до 45 кГц.

Визначення оптимальної необхідної частоти є однією з основних задач, що забезпечує ефективність роботи пристрою. Відповідно до літературних джерел [6, 12 – 13]:

- частоти 20-30 кГц сприяють швидкому розчиненню поверхневих забруднень та не викликають пошкодження виробів;
- наднизькі частоти (менше 20 кГц) можуть призводити до руйнування об'єкту очищення;
- для більшості процесів очищення кращою є частота діапазону від 35 до 45 кГц. Частоти в цьому діапазоні найчастіше забезпечують найбільш швидке та ефективне розчинення забруднень, особливо в пазах та порожнинах;
- більш високі частоти значно менш ефективні.

На сьогодні існують наступні типи промислових ультразвукових приладів для очищення:

- одночастотні (генерують ультразвук лише однієї частоти, зазвичай 35-40 кГц);
- багаточастотні;
- з «плаваючою» частотою (з плавною зміною частоти в певному діапазоні).

Перевагами багаточастотних пристроїв та систем очищення є те, що в об'ємі миючого середовища не утворюється «мертві» зони у вузлах інтерференції. Тому багаточастотні системи дозволяють розташовувати об'єкт очищення практично в будь-якій зоні ванни та проводити очищення більш ефективно у складноконтурних моделях. За результатами аналізу літературних джерел встановлено, що частота 35-40 кГц є оптимальною для видалення більшості видів забруднень:

- плівкових забруднень;
- масляних забруднень;
- нагарних забруднень;
- продуктів корозії;
- консервуючих та захисних покриттів;
- сольових забруднень.

Багаточастотні системи очищення найчастіше здатні виробляти дві різні частоти ультразвуку. Наприклад, обладнання фірми Elma Hans Schmidbauer GmbH & Co KG (Німеччина) працює в діапазоні частот – 25/45 кГц для грубого та тонкого очищення відповідно. Також існують варіанти багаточастотних версій 35/130 кГц та 25/45 кГц, де дві пари частот дозволяють виконувати тонке та грубе очищення плюс очищення ультразвуковим потоком без кавітації.

Не менш важливим за робочу частоту є потужність ультразвукового випромінювача. Шляхом порівняльних лабораторних досліджень встановлено, що чим більшим буде об'єм ванни, тим вищою має бути його потужність. Це особливо важливо для забруднень з великою щільністю та міцністю плівок. При недостатній потужності такі забруднення не можуть будуть ефективно видалені з робочих поверхонь елементів конструкції ні під впливом температури, ні під впливом поверхнево активних речовин через недостатній об'єм кавітації.

В результаті аналізу літературних джерел та розрахунків визначено бажане співвідношення потужності – близько 40 Вт на 1 л корисного об'єму ванни.

В деяких випадках є сенс мати можливість регулювати потужність:

- для очищення предметів із різнорідними поверхнями. В цьому випадку зазвичай орієнтуються за найменш міцним компонентом;
- для промивання конструкцій, що містять елементи, виконані з крихких матеріалів: деяких пластиків, тонкого металу, кераміки, гуми;
- для випадків, коли необхідно підбирати потужність відповідно до цілей.

В якості миючого середовища можна використовувати розчинники або спеціалізовані склади поверхнево-активних речовин. В сучасній літературі найчастіше рекомендують використовувати водні суміші та розчини, як максимально безпечні при достатній ефективності.

При цьому категорично забороняється використовувати горючі речовини чи розчини з низькою температурою спалаху через можливість спалаху від енергії, що вивільняється при кавітації і перетворюється на теплову чи кінетичну енергію, генеруючи високотемпературні градієнти в розчині. Також не бажано використовувати кислоти.

Таким чином, для очищення мініатюрних підшипників кочення на відновлювальному виробництві, навіть допустимо термічно навантажених в процесі попередньої роботи підшипників, підвищення ефективності використовуваного імпульсного магнітно-турбулентного методу шляхом доукомплектування його ультразвуковою складовою є дуже перспективним. При цьому, стосовно існуючих ультразвукових методів очищення підшипників, як самостійних методів очищення, варто зауважити, що основним недоліком їх є недостатня ефективність видалення забруднень через складність конструкції підшипників та велику кількість перекритих «затінених» робочих поверхонь, що не сприяють нормальному доступу ультразвукових хвиль. Також, ультразвукові методи очищення не мають високої ефективності при очищенні металевих забруднень на робочих поверхнях підшипників, що утримуються за рахунок магнітної складової [1 – 2]. Проте використання ультразвукових хвиль дозволить подолати адгезію та ефективно зруйнувати навіть найміцніші та найскладніші плівки забруднень, тоді як магнітна складова імпульсного магнітно-турбулентного методу ефективно виведе з підшипника металеві складові забруднень. Примусове обертання з турбулізацією потоків миючої рідини забезпечить максимальний доступ до робочих поверхонь та ефективне видалення з об'єкту очищення забруднень.

#### **Висновки.**

1. Використання лише імпульсного магнітно-турбулентного методу для якісного видалення експлуатаційних забруднень з мініатюрних підшипників кочення для прецизійних механічних систем авіакосмічної та іншої техніки цивільного та військового призначення на ремонтному виробництві недостатньо.

2. Найбільш раціональним шляхом підвищення якості очищення, враховуючи особливості експлуатаційних забруднень, є використання імпульсного магнітно-турбулентного методу та додаткового джерела, що буде генерувати можливість ефективного розрихлення найбільш складних експлуатаційних забруднень.

3. Використання імпульсного магнітно-турбулентного методу, доповненого ультразвуковим випромінювачем з певними характеристиками, дозволить ефективно видаляти найбільш складні експлуатаційні забруднення мініатюрних підшипників кочення. Примусове обертання, під час очищення, буде сприяти ефективному проникненню ультразвуку та запобігати ефекту екранування робочих поверхонь елементами конструкції, що є основною перешкодою ефективного очищення робочих поверхонь шарикопідшипників при статичному способі в ультразвукових ваннах.

#### **Список літературних посилань.**

1. Аксьонов О. Ф., Стельмах О.У., Костюнік Р. Є., Куцев О. В. Електромагнітна складова утворення феромагнітних забруднень // Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник. – К.: НАУ 2006. – Вип.46. – С. 91 – 102.

2. Аксьонов О. Ф., Костюнік Р. Є., Куцев О. В. Підвищення функціональної якості підшипників кочення шляхом електромагнітного очищення // Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник. – К.: НАУ 2008. – Вип.49. – Т. 1. С.9 – 13.

3. Куцев А.В., Шевченко Р.А., Коба В.П., Ковальчук Е.Г. Физика процесса бесконтактной магнитно-турбулентной очистки подшипников качения // Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми хімотології» – Одеса.: 2012. – С.217 – 221.

4. Ультразвуковая мойка, очистка и обеззараживание металлических и пластмассовых деталей. / Тематич. Подборка/. Рига, - 1971. – 26 с.

5. Fuchs F.J. Ultrasonic Cleaning: Fundamental Theory and Application / F.J. Fuchs. — 1995.

6. Weller R.N. Efficacy of ultrasonic cleaning / R.N. Weller, J.M. Brady, W.E. Bernier // Journal of Endodontic. — 2013. — 6(9). — p. 740-743.

7. Mason T.J. Ultrasonic cleaning: an historical perspective / T.J. Mason // Ultrasonics Sonochemistry. — 2016. — 29. — p. 519-523.

- 
8. Павлище В.Т. Підшипники кочення: основні параметри конструкції опор змащування, ущільнення та розрахунку ресурсу. Довідник / В.Т. Павлище. – 2 вид. доп. – Львів, 2001. – 145 с.
  9. Авер'янов В. С., Коробочка О. М. Використання безкамерної фільтрувальної установки для очищення рідин на автотранспортних підприємствах./ Наукові праці. Техногенна безпека Випуск 191. Том 203 Миколаїв 2012 С.17-20
  - 10.Зубенко С.О. Очищення трансформаторної оливи контактним методом із застосуванням кавітації / С. О. Зубенко, Є. В. Полункін // Катализ и нефтехимия. - 2012. - № 21. - С. 170.
  - 11.Авер'янов В.С. Використання безкамерної фільтрувальної установки для очищення рідин на автотранспортних підприємствах / В. С. Авер'янов, О. М. Коробочка // Наукові праці [Чорноморського державного університету імені Петра Могили]. Сер.:Техногенна безпека. - 2012. - Т. 203, Вип. 191. - С. 17-20.
  - 12.Vetrimurugan M.G. Experimental Investigation of Ultrasonic and Megasonic Frequency on Cleaning of Various Disk Drive Components / M.G. Vetrimurugan, S. Terry Lim, J.S. Nagarajan // International Journal of Chemical Engineering and Applications. — 2013. — 4(4). — p. 174-177
  - 13.Verhaagen B. Measuring cavitation and its cleaning effect / B. Verhaagen, D.F. Rivas // Ultrasonics Sonochemistry. — 2016. — 29. — p. 619-628.

**В. В. Сергєєв***Луцький національний технічний університет***МОДЕЛЮВАННЯ ТВЕРДИХ ЧАСТИНОК МЕТОДАМИ HOOMD-BLUE PYTHON ТА МОНТЕ-КАРЛО**

*Методи Монте-Карло виявилися цінними при моделюванні фізичних об'єктів і процесів. Мова програмування Python є основним інструментом, який широко використовується серед наукових дослідників. Метод, використаний у цій статті, задає алгоритмічну основу для моделювання засипки твердих частинок. Використаний варіант метода Монте-Карло (HPMC), представляє частинки як об'єкти різноманітної форми, що не можуть накладатися одна на другу. У системі немає сил притягання або відштовхування. Виключно жорсткі зв'язки призводять до впорядкованих структур. Запропонований фреймворк включає всі етапи моделювання: метамову для опису форми частинок, інтегратор опуклих многогранників, ініціалізацію стану системи, пробні ходи (варіанти проміжних станів), зберігання конфігурації у файлової системі.*

*Ключові слова:* моделювання, частинка, пітон монте-карло, структура, форма, мета, система.

**V. Serhieiev****SIMULATION OF THE HARD PARTICLES WITH HOOMD-BLUE PYTHON AND MONTE CARLO METHODS**

*Monte Carlo methods proved to be valuable in simulating physical objects and processes. The Python programming language is the mainstream tool used widely among scientific researchers. The method used in this article sets an algorithmic basis to the problem of hard particle Monte Carlo (HPMC) simulation. The HPMC represents particles as extended objects which are not allowed to overlap. There are no attractive or repulsive forces in the system. Purely hard interactions induce effective attractions between simulated particles which can lead to ordered structures. The proposed framework includes all steps for the simulation: meta language to describe particle shape, convex polyhedron integrator, system state initialization, trial moves, storing the configuration to the file system.*

*Keywords:* simulation, particle, structure, python monte carlo, framework, shape, meta, system.

**Formulation of the problem.**

Hard particle simulations are arguably one of the most fundamental model systems in soft matter physics, and hence a common topic of simulation studies. The primary obstacle in these simulations is the computational requirements for the system with a waste amount of simulated particles. The complexity calculation for N-body simulations is stated in [1] as follows: Given initial positions and velocities of n particles that have pairwise force interactions, simulate the movement of these particles so as to determine the positions of the particles at a future time.

During recent years various automated frameworks have been developed for designing hardware accelerators on reconfigurable platforms [2]. Applications written using general-purpose programming languages (Python, R, Julia) or specialized computational environments like MATLAB utilizing such algorithms on large-size data sets require high-volume computation platforms [3]. The focus is on N-body interaction problems which have a wide range of applications spanning from astrophysics to molecular dynamics.

Another prospective approach is to utilize the capabilities of the quantum processing units or quantum computers. Quantum computing and quantum Monte Carlo (QMC) are respectively the most powerful quantum and classical computing methods for understanding many-body systems [4, 5]. Unfortunately current state-of-art near term quantum devices (NISQ era) are limited in computing power and error correction protocols; the quantum hardware capable of simulating practical-useful quantities of particles is not yet available for the wide audience.

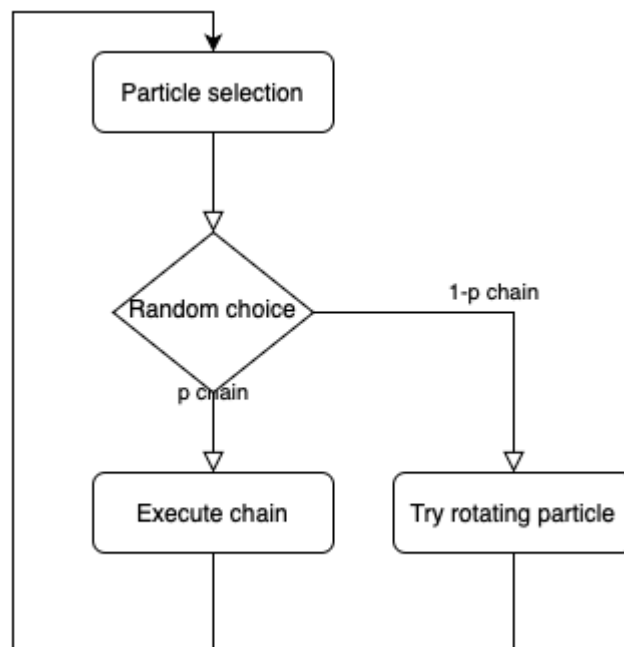
**HPMC and Newtonian event-chain Monte Carlo method.**

This article uses the HOOMD-blue particle simulation engine to set an algorithmic basis and framework to the problem of hard particle Monte Carlo (HPMC) simulation. The HOOMD-blue package [6] is actively developed by the University of Michigan and available open source. HOOMD-blue is a Python package with a high performance C++/CUDA [7] backend that is built from the ground up for GPU [8] acceleration. The Python interface allows users to combine HOOMD-blue with other packages to create simulation and analysis workflows. The framework can execute simulations both on CPUs or GPUs. The library default installation supports NVIDIA GPUs and CPU support is always enabled.

Typical Monte Carlo simulations run more efficiently on GPUs for simulation sizes larger than a few thousand particles (1KB in memory for particle with modern hardware gives a ~100 000 000 soft limit for simulation), although this strongly depends on the details of the simulation:

- The complexity of the definition of particle shape.
- Spherical or cylindrical particles are easier to simulate from the computational cost while complex, unregular and more realistic particles require more computations to perform.
- Simulation step parameters.

HOOMD-blue engine implements Newtonian event-chain Monte Carlo (NEC) simulation method. In NEC a trial move is applied to a sequence and these collective moves form a chain which updates the configuration. Each update chain has a random start particle and is followed by the series of deterministic events. This is different in nature from the classical Monte Carlo method with local update. In classical trial moves a single randomly selected particle is either moved or rotated and new configuration is then accepted with Boltzmann factor. The Boltzmann factor collapses to an overlap check when simulating a system of hard particles. Newtonian event-chain NEC has best performance with a system of anisotropic particles and obeys the balance condition [9].



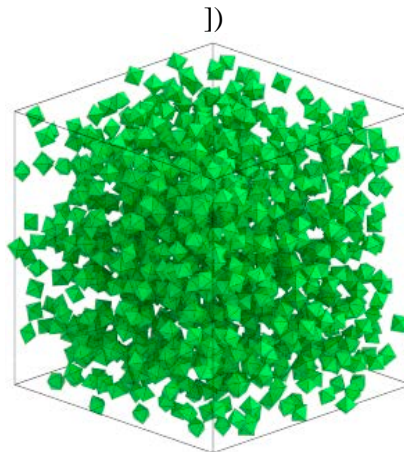
**FIG. 1. Flowchart of Monte Carlo simulation for anisotropic particles. The algorithm combines event chains for translation moves and random trial rotation moves as in local Monte Carlo**

The core object of the engine - is ConvexPolyhedron integrator which implements HPMC simulations:

```
mc = hoomd.hpmc.integrate.ConvexPolyhedron()
```

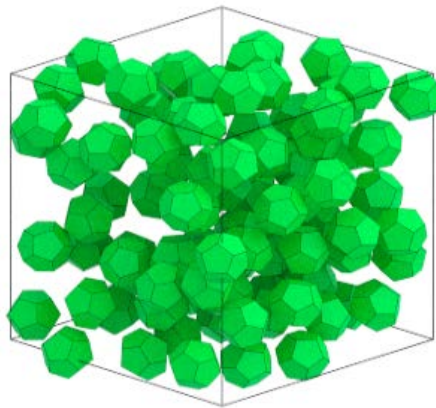
The particle in simulation is described as a set of vertices, normalized in range 0..1. The shape of the particle alone controls how it interacts with other particles. Formally, the potential energy of the system is zero when there are no overlaps and infinite when there are. Purely hard interactions induce effective attractions between particles which can lead to ordered structures. The example below illustrates the definition of Octahedron particle:

```
mc.shape['octahedron'] = dict(
    vertices = [
        (-0.5, 0, 0),
        (0.5, 0, 0),
        (0, -0.5, 0),
        (0, 0.5, 0),
        (0, 0, -0.5),
        (0, 0, 0.5),
    ]
)
```

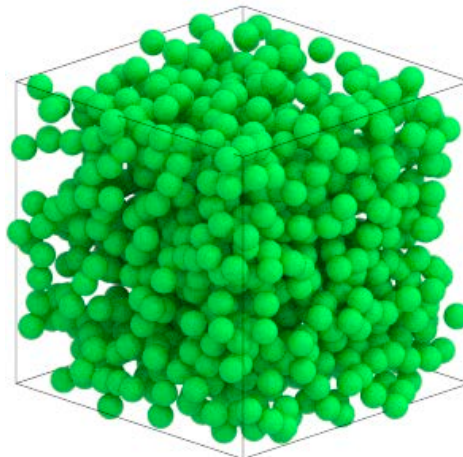


**FIG. 2. The initial random state of the simulation of octahedron particles**

The particle class in the example above, 'octahedron' acts as a descriptor for defined shape. The simulation can have [1..N] particle shapes and sizes. The next example uses the "Dodecahedron" particle shape.



**FIG. 3. The initial random state of the simulation of dodecahedron particles**

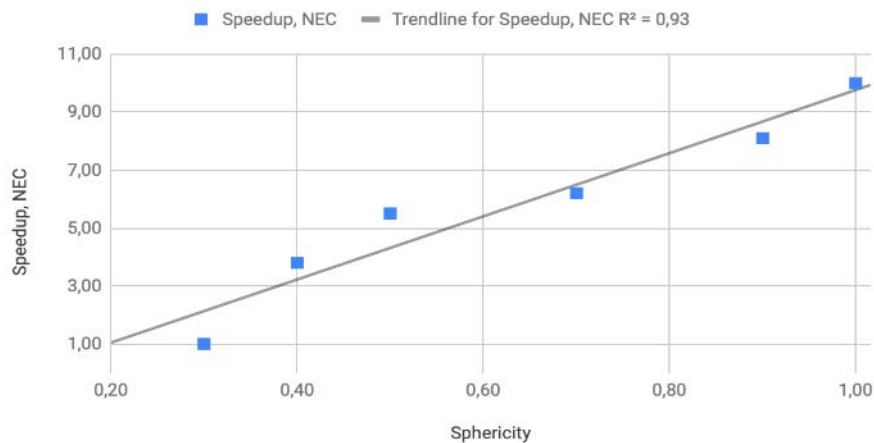


**FIG. 4. The initial random state of the simulation of spherical particles**

This shape structure is the standard array of the points (X, Y, Z) and could reuse existing public datasets for the complex particle shapes (construction materials, powder metallurgy, crystals).

We have analyzed the speed of simulation depending on the sphericity of the particles. The trend is that the higher sphericity results in the higher speed-up. This makes sense because higher sphericity makes translations less critical for equilibrating polyhedra and rotation moves number decreases (since it has no effect on spheres).

Speedup, NEC vs. Sphericity



**FIG. 5. The speedup of the simulation with dependence on the sphericity of the particles**

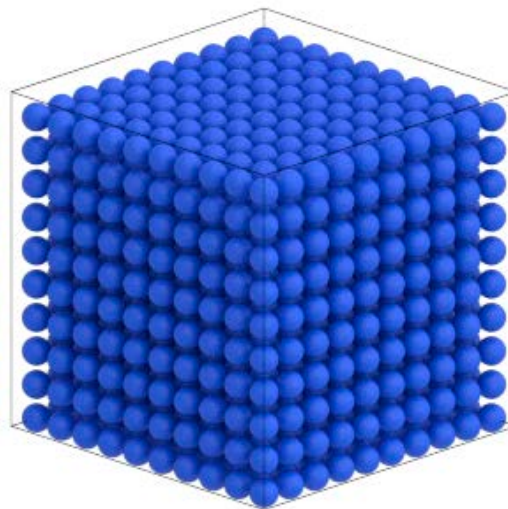
During each time step in Monte Carlo the algorithm attempts to make a number of `nselect` trial moves on each particle in the simulation. The NEC method has two types of moves:

- Translation move - affects the position of the start particle, and then impacts all chains of particles.
- Rotation move - rotate the particle by a random angle about a random axis.

These parameters are properties of the integrator:

```
mc.nselect = 2
mc.d['octahedron'] = 0.15
mc.a['octahedron'] = 0.2
```

For the test simulation with ideal spherical particles the result with 10,000,000 steps gives the expected packing lattice:



**FIG. 6. The convergence test for spherical simulation**

The HOOMD-blue integrator should be set to use either CPU or GPU. It is a type of operation and integrates the simulation state at every time step. Assigning the HPMC integrator is required to the simulation object:

```
cpu = hoomd.device.CPU()
simulation = hoomd.Simulation(device=cpu, seed=1)
simulation.operations.integrator = mc
```

The seed value (passed to the simulation constructor above) selects the sequence of values in the pseudorandom number stream. Given the same initial condition and seed, HPMC simulations will produce exactly the same results. All operations that generate pseudorandom numbers use the seed set in the



simulation. Whenever you add operations that utilize random numbers, you should set the seed to a non-default value.

HOOMD-blue does not adopt any particular real system of units. Instead, HOOMD-blue uses an internally self-consistent system of units and is compatible with many systems of units. For example: if you select the units of meter, Joule, and kilogram for length, energy and mass then the units of force will be Newtons and velocity will be meters/second. A popular system of units for nano-scale systems is nanometers, kilojoules/mol, and atomic mass units.

Run the simulation to randomize the particle positions and orientations. The run method takes the number of steps to run as an argument. 10,000 steps is enough to randomize a low density system:

```
simulation.run(10e3)
```

During each step the algorithm combines event chains for translation moves and random trial rotation moves as in local Monte Carlo. In the example the acceptance ratio (the fraction of attempted moves which are accepted) is very high since this is a low density simulation.

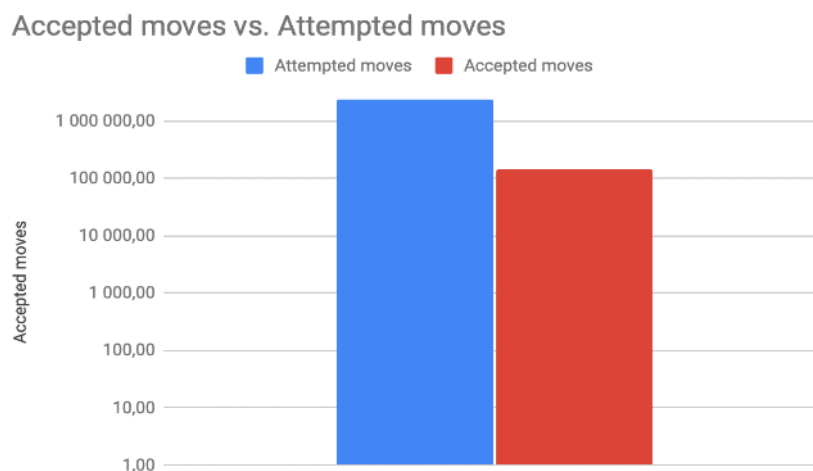


FIG. 7. The accepted moves versus attempted moves ratio

The resulting packed cluster of particles shown on the figure below.



FIG. 8. The converged results visualization for octahedron simulation

### Conclusion.

The simulation algorithm uses the XenoSweep extension of XenoCollide [10] library for detecting collisions among a limitless variety of convex shapes. It is based on the technique “Minkowski Portal Refinement”. The method of simulation of the hard particles using HOOMD-blue is an important improvement both in terms of speed and in terms of simplicity of the algorithm. Such computation efficiency and simplicity in setup simulation is of interest to researchers working on a broad range of problems in computer graphics, robotics, and granular dynamics.

The great feature of the HPMC is that it automatically tunes simulation parameters to improve performance. During the first 1,000 - 20,000 timesteps of the simulation run, runtime will optimize kernel parameters each time it calls a kernel.

Future extensions should advance this method in two directions: improved handling of rotations and generalization to anisotropic particles with extended interaction, i.e. particles that are not purely hard. Next steps in the method improvement should focus on developing collective rotations moves that resemble conceptually the idea of event chains for translations. Such an improved algorithm has the potential to reach a speed-up of up to one order of magnitude across all convex polyhedra.

#### References:

1. Reif, John & Tate, Stephen. (1995). The Complexity of N-Body Simulation. 10.1007/3-540-56939-1\_70.
2. Kim, Jungsub & Deng, Lanping & Mangalagiri, Prasanth & Irick, Kevin & Sobti, Kanwaldeep & Kandemir, Mahmut & Narayanan, Vijaykrishnan & Chakrabarti, Chaitali & Pitsianis, Nikos & Sun, Xiaobai. (2009). An Automated Framework for Accelerating Numerical Algorithms on Reconfigurable Platforms Using Algorithmic/Architectural Optimization. IEEE Trans. Computers. 58. 1654-1667. 10.1109/TC.2009.78.
3. Hamada, T. & Nakasato, Naohito. (2005). PGR: A software package for reconfigurable super-computing. Proc International Conference on Field Programmable Logic and Applications (FPL'05). 2005. 366- 373. 10.1109/FPL.2005.1515749.
4. Zhang, Yukun & Huang, Yifei & Sun, Jinzhao & Lv, Dingshun & Yuan, Xiao. (2022). Quantum Computing Quantum Monte Carlo. 10.48550/arXiv.2206.10431.
5. Mazzola, Guglielmo. (2023). Quantum computing for chemistry and physics applications from a Monte Carlo perspective.
6. Anderson, Joshua & Glaser, Jens & Glotzer, Sharon. (2019). HOOMD-blue: A Python package for high-performance molecular dynamics and hard particle Monte Carlo simulations. Computational Materials Science. 173. 109363. 10.1016/j.commatsci.2019.109363.
7. NVIDIA, Vingelmann, P. & Fitzek, F.H.P., 2020. CUDA, release: 10.2.89, Available at: <https://developer.nvidia.com/cuda-toolkit>.
8. Anderson, Joshua & Keys, Aaron & Nguyen, Trung & Glotzer, Sharon. (2010). HOOMD-blue, general-purpose many-body dynamics on the GPU.
9. M. Klement and M. Engel, "Efficient equilibration of hard spheres with Newtonian event chains," The Journal of Chemical Physics 150, 174108 (2019).
10. G. Snethen, "XenoCollide: Complex Collision Made Simple," in Game Programming Gems 7, edited by S. Jacobs (Charles River Media, 2008) pp. 165–178.

УДК: 621.793.6

DOI 10.36910/775.24153966.2024.77.11

І. В. Кругляк, Д. Б. Серeda, Р. Г. Кривко

Дніпровський державний технічний університет

**ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ГВИНТІВ НАТИСКНОГО ПРИСТРОЮ РОБОЧОЇ КЛІТИ СТАНУ 650**

У даній дослідницькій роботі розглядається використання хромованого покриття із застосуванням процесу саморозповсюдженого високотемпературного синтезу (СВС) на гвинтах натяжного пристрою прокатного стану моделі 650. Основною метою роботи є підвищення зносостійкості та довговічності механізмів прокатного стану для поліпшення його продуктивності. Експериментальні дослідження включають проведення випробувань на машині тертя МТ-5 з метою оцінки мікротвердості та зносостійкості хромованого покриття. Також здійснено термодинамічний аналіз процесу отримання покриття та вивчення складу газової та конденсованої фази в реакторі. Результати роботи можуть бути використані для оптимізації технологічних процесів на прокатних станах, поліпшення якості продукції та зниження витрат на технічне обслуговування обладнання. Дослідження виявило, що леговане титаном і кремнієм хромоване покриття, отримане із застосуванням технології СВС, сприяє формуванню захисного шару, що поліпшує адгезію і стійкість до механічних впливів. Отримані результати підтверджують ефективність застосування технології СВС для підвищення зносостійкості та довговічності гвинтів натяжного пристрою прокатного стану 650, що є актуальним завданням у галузі промислового машинобудування та виробництва жерсті.

*Ключові слова:* прокатний стан, хромування, саморозповсюджувальний високотемпературний синтез, зносостійкість, тертя.

I. Kruhliak, D. Sereda, R. Krivko

**INCREASING THE DURABILITY OF THE SCREWS OF THE PRESSING DEVICE OF THE MILL STAND 650**

*This research work deals with the use of chrome plating using the self-propagating high temperature synthesis (SHS) process on the idler screws of a Model 650 rolling mill. The main objective of the work is to improve the wear resistance and durability of the rolling mill mechanisms to improve its performance. Experimental studies include conducting tests on an MT-5 friction machine to evaluate the microhardness and wear resistance of the chrome plating. Also thermodynamic analysis of the process of obtaining the coating and study of the composition of the gas and condensed phase in the reactor were carried out. The results of the work can be used to optimize technological processes at rolling mills, improve product quality and reduce equipment maintenance costs. The study revealed that titanium and silicon doped chrome coating obtained using SHS technology promotes the formation of a protective layer that improves adhesion and resistance to mechanical effects. The obtained results confirm the efficiency of SHS technology application for increasing wear resistance and durability of screws of tensioning device of rolling mill 650, which is an actual task in the field of industrial machine building and tinplate production.*

*Key words:* rolling mill, chrome plating, self-propagating high-temperature synthesis, wear resistance, friction.

**Problem statement.** Statement of the problem in this study is associated with the need to improve the wear resistance and service life of tensioning devices of rolling mill 650. The main problem is that standard materials do not provide the required level of wear resistance under high loads and intensive friction conditions. This requires the development and use of new technologies to improve mechanical properties and extend the service life of tensioning devices. The main direction to address this problem is to investigate the use of chrome plating produced using the self-propagating high-temperature synthesis (SHS) process and its effect on tensioner performance. However, successful implementation of this approach requires a more detailed analysis of the thermodynamic processes in the SHS reactor, as well as an evaluation of the structural and mechanical properties of the resulting coating to determine the optimal application parameters [1]. Thus, the problem statement includes the need for a comprehensive approach to the study of wear mechanisms and service life of tensioning devices, as well as the search for innovative technological solutions to improve them and increase the efficiency of the rolling process.

**Analysis of recent research.** An analysis of recent research in the field of functional coatings and alloying technologies to improve the durability of mechanical equipment in metallurgical production highlights several key areas and results. In recent years, numerous studies have been conducted to optimize the composition and structure of functional coatings to improve their adhesion, hardness, and wear resistance. One of the most promising approaches is the use of alloy coatings made of chromium, silicon and titanium, as these materials have high hardness and resistance to abrasive and adhesive wear, making them ideal for use in metallurgical production. Much attention is also paid to the study of wear mechanisms and surface interaction in contact, which allows us to more accurately determine the factors that affect the

durability of coatings. The molecular mechanical theory of friction is widely used to explain the processes that occur during friction and to develop effective methods to reduce surface wear.

An important research result is the determination of optimal production parameters, such as temperature, pressure, and speed, which allow for maximum efficiency of coatings and alloyed materials. This helps to optimize application processes and improve the quality of the final product [2-4]. Thus, the analysis of recent studies shows significant progress in the field of functional coatings and alloying technologies to increase the durability of mechanical equipment in metallurgical production, which opens up new prospects for the development of this area and increase the efficiency of production processes. Until now, intensive research has been conducted using self-propagating high-temperature synthesis to apply alloy chrome coatings to important mill parts. The results of these studies have shown the high potential of SHS in forming wear-resistant and durable coatings that significantly improve the performance of equipment. In particular, the thermodynamic features of the processes in the SHS reactor were studied, the chemical and physical properties of the formed compounds were analyzed, and the optimal process parameters were determined to obtain the best results in ensuring the durability and efficiency of the mechanism.

**Setting objectives.** The purpose of this work is to study and analyze the production technology of a 650 tinplate rolling mill using an alloyed chromium coating obtained by self-propagating high-temperature synthesis. The main objective is to evaluate the effectiveness of the alloyed chromium coating on the bolts of the tensioning mechanism of the rolling mill and its effect on the wear resistance and mechanical properties of the bolts. In addition, the work plans to thermodynamic analysis of the gas and condensed phase composition in the SHS process to determine the optimum coating parameters. Tests on the MT-5 friction machine will be used to verify the durability and reliability of this coating under real operating conditions. Based on the results obtained, recommendations will be formulated to optimize the coating process in order to improve the durability and reliability of the tin mill 650.

**Presentation of the main material.** Hardening of machine parts and mechanisms in industrial engineering for metallurgical production is one of the key strategies to ensure the reliability and uptime of rolling mills. To achieve these goals, it is important to strengthen the surface layer of parts, in particular, the screws of the pressure device of the 650 cold rolling mills. The wear resistance of these parts can be significantly improved by applying functional active layers, which can reduce hardening costs and energy consumption.

The use of self-propagating high-temperature synthesis technology to form protective coatings is an effective approach. The SHS technology is based on exothermic reactions occurring in the combustion wave mode, which contributes to the formation of products with high physical and chemical characteristics. This approach differs from traditional powder metallurgy methods, as it allows not only surface hardening but also the formation of active chemical and thermal zones.

Such synthesis of materials differs significantly from standard methods of powder metallurgy based on sintering of chemically inert compounds and has a number of obvious advantages, among which the following can be noted: - formation of active chemical and thermal zones, which allows to intensify transformations of reagents and leads to the formation of desired products; - use of less expensive chemical energy (heat generation during exothermic reactions) instead of electrical energy to achieve high temperatures required for obtaining products; - use of relatively simple equipment (instead of furnaces and other heating devices); - use in the process of rapid layer-by-layer heating of large volumes of reagents instead of slow heating of blacks.

One of the advantages of using SHS technology is the efficient use of energy and reduced costs for strengthening parts. It is also worth noting that this technology makes it possible to produce materials with high technical characteristics that meet modern industrial requirements. From this point of view, the use of SHS technology has great potential in the production of industrial parts and machinery, where reliability, service life and efficiency are important factors.

The 650 cold rolling mill stand consists of two massive closed-type stands, usually cast from 35L steel, a set of rolls, a pressure and balance device, and a leash table. The top and bottom stands are connected to each other by bolts and crossbeams. The support and working rolls with cushions are installed between the beds. Side bars are attached to the outer parts of the bed posts to guide the cushions in the beds and to adjust the rolls in the axial direction[5].

Side strips are attached to the outer parts of the bed posts to guide the cushions in the beds and to adjust the rolls in the axial direction.

The stand stands are fixed to the plates with anchor bolts using special tides. The distance between the cold rolling mill stands is 4.3 to 5 meters. According to A.I. Tselikov, the cross-sectional area of the bed stand is approximately equal to  $(1,0 - 1,2) d^2$ , where  $d$  is the diameter of the neck of the support roll[6].

A pressing device is provided in the upper part of the stand to install the rolls and adjust the gap between them. In modern cold rolling mills, each pressure screw is driven by an electric motor through two globular gearboxes. The drives of the two screws are coupled via an electromagnetic clutch, which allows for joint or separate operation of the screws.

The power supply for each motor of the pressure screws is carried out according to the D-D system. The power and control systems ensure minimal acceleration and deceleration times. The accuracy of stopping the screws is  $\pm 0.01$  mm. Figure 1 shows a diagram of the pressing device[7-8].

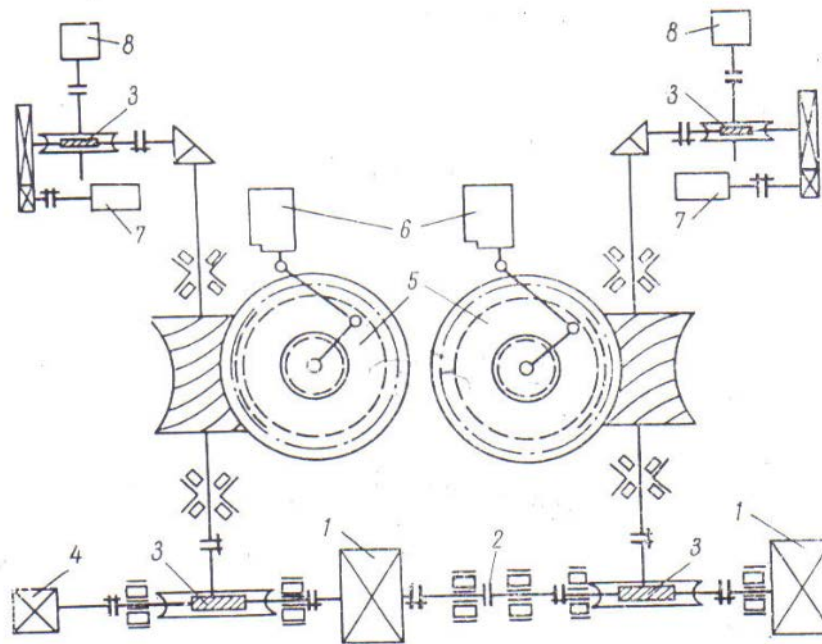


Fig 1. Schematic of the pressing device of the mill stand 650 [5].

**1 - electric motor; 2 - electromagnetic clutch; 3 - worm gearbox; 4 - tachogenerator; 5 - globular gearbox; 6 - rotation angle sensors; 7 - selsin sensor; 8 - command unit.**

The operating speed of the pressure screws is significantly lower than the maximum speed possible. This is done in order to accelerate the movement of the screws during swath handling. The balancing device consists of a single hydraulic cylinder, two crossheads, a lever system and rods. The hydraulic drive system for the pressure device is shown. The torque is transmitted from the stand to the work rolls via a spindle connection. The spindles are supported in the middle section by plain bearings. The plain bearings are mounted on traverses that move vertically along guide rails under the action of coil springs and rest on a spindle chair. The spindle connection allows the torque to be transmitted at a certain angle. The weak link in the spindle device is the bronze bushings, which wear out quickly under heavy loads.

For the thermodynamic analysis of the SHS process of forming alloyed protective coatings, we used the universal program for calculating multicomponent heterogeneous systems TERRA, created on the basis of the ASTRA-4 program for the WINDOWS environment and developed for high-temperature processes. In contrast to the traditional methods of calculating equilibrium parameters in chemical thermodynamics using the Gibbs energy, equilibrium constants, and the Goldberg and Waget law of masses, the universal thermodynamic calculation program TERRA is based on the principle of maximum entropy for isolated thermodynamic systems in equilibrium. It is characterized by the maximum entropy with respect to thermodynamic degrees of freedom, which include the concentrations of system components, temperature, pressure, etc.

To develop specific methods for obtaining protective coatings on structural materials under high-temperature synthesis conditions, it is necessary to clarify the thermodynamic features of the process.

Among the various factors that affect the mechanism of coating formation under SHS conditions are the initial conditions preceding the process of diffusion of elements into the material, which directly or

indirectly depend on the physicochemical factors of saturation (thermodynamic characteristics of phases in the system of interacting elements; thermodynamic characteristics of the saturated medium). Let's consider the most important ones.

The main condition for the spontaneous occurrence of this reaction is the higher thermodynamic strength of aluminum oxides compared to oxides of renewable metals. The strength of oxides of various metals is characterized by the value of the isobaric potential  $\Delta Z^0$  when these metals interact with oxygen. The greater the difference in the isobaric potentials of aluminum oxide formation and the element (metal) being reduced, the more complete and energetic the reduction reactions are.

The heating temperature of the mixture as a result of the SHS reaction depends on the temperature of its preliminary heating, as well as the amount of heat released as a result of the reduction reaction. It should be borne in mind that the final heating temperature depends not only on the amount of heat from the reduction reaction, but also on the temperature range in which the reaction itself takes place.

In most cases, the temperatures that develop during reduction reactions are significantly higher than the melting points of metals and alloys.

In SHS processes, which can take place during reactive mechanical alloying, an important characteristic is the adiabatic interaction temperature  $T_{ad}$ . In the course of a single SHS reaction, the thermodynamic calculation of the adiabatic interaction temperature is based on the following assumption: the reaction proceeds completely (with a conversion rate of 100%) under adiabatic conditions. The heat of reaction at the initial temperature  $T_0$  ( $T_0 > 298$  K) is consumed for heating to  $T_{ad}$  and possible melting of the products. The calculation is reduced to determining the value of  $T_{ad}$  from the nonlinear enthalpy balance equation.

Powdered saturating charges for alitization under SHS conditions contain a chromium component, aluminum, transport activators, and chromium. The equilibrium composition of SHS charges in the mode of thermal self-ignition was calculated for the system:  $XC + Al + Cr + Al_2O_3 + NH_4I + NH_4F$ , for a large range of changes in the output components depending on temperature (Fig. 2, 3).

At temperatures above 700 K, the proportion of the condensed phase practically does not change. This fact suggests that in the temperature range of 700-1500 K, reactions occur with the release of the condensed phase, but without changing the number of moles, which is typical for decomposition reactions, exchange with the material, i.e., in fact, chemical transport of elements occurs. The content of gaseous aluminum compounds in the reactor, the mode of thermal self-ignition of the SHS charge for the system:  $XC + Al + Cr + Al_2O_3 + NH_4I + NH_4F$  in temperature range 400–15000 K:  $AlH$ ,  $AlH_2$ ,  $AlF$ ,  $AlF_2$ ,  $AlF_3$ ,  $AlHF$ ,  $AlH_2F$ ,  $AlI$ ,  $AlI_2$ ,  $AlI_3$ ,  $Al_2I_6$  etc. Content of gaseous chromium compounds:  $Cr$ ,  $Cr_2$ ,  $CrO$ ,  $CrH$ ,  $CrOH$ ,  $CrF$ ,  $CrF_2$ ,  $CrF_3$ ,  $CrI$ ,  $CrI_2$ ,  $CrI_3$  etc., as well as the content of condensed products:  $Al(c)$ ,  $Al_2O_3(c)$ ,  $AlF_3(c)$ ,  $AlI_3(c)$ ,  $AlN(c)$ ,  $Cr(c)$  etc.

Deformation interaction occurs in areas of contact with rough surfaces and causes repeated deformation of the surface layer by irregularities. Mechanical impact can be in the form of elastic or plastic interaction, as well as micro-cutting. Adhesive interaction occurs when micro-welds are formed in the contact zone. Reducing the intensity and even suppressing wear, according to molecular mechanical theory, helps to: prevent the formation of strong adhesive bonds in friction pores; increase the hardness of friction surfaces. Applying a durable coating to rubbing surfaces can, on the one hand, form a barrier that prevents adhesion of the mating surfaces, and, on the other hand, increase the surface hardness. Increasing the hardness of the coated surface, making it difficult to deform and eliminating microcutting, contributes to the elastic interaction of rubbing surfaces, which is most favorable for increasing wear resistance.

Tests on the MT-5 friction machine (friction under shock-dynamic loading) show that the best wear resistance is provided by alloyed coatings alloyed with Si and Ti with a wear value of  $\Delta I = (33 - 55) \cdot 10^{-4}$  g/m<sup>2</sup>. This can be explained by the higher values of the total brittle fracture score of isothermal coatings, where it is 20-25% higher.

**Conclusions.** This work discussed various aspects of the production technology of a 650 tinplate rolling mill, with a particular focus on improving the wear resistance and mechanical properties of the tensioner bolts. The use of alloyed chrome plating using the self-propagating high-temperature synthesis (SHS) process was shown to significantly improve the durability and wear resistance of important parts of the mill. Thermodynamic analysis of gas and condensed phase composition in the SHS process allowed to determine the optimal parameters of the coating process providing high quality and desired chemical properties:  $XC + Al + Cr + Al_2O_3 + NH_4I + NH_4F$  in temperature range 400–15000 K:  $AlH$ ,  $AlH_2$ ,  $AlF$ ,  $AlF_2$ ,  $AlF_3$ ,  $AlHF$ ,  $AlH_2F$ ,  $AlI$ ,  $AlI_2$ ,  $AlI_3$ ,  $Al_2I_6$  etc. Content of gaseous chromium compounds:  $Cr$ ,  $Cr_2$ ,  $CrO$ ,  $CrH$ ,  $CrOH$ ,  $CrF$ ,  $CrF_2$ ,  $CrF_3$ ,  $CrI$ ,  $CrI_2$ ,  $CrI_3$  etc., as well as the content of condensed products:  $Al(c)$ ,  $Al_2O_3(c)$ ,  $AlF_3(c)$ ,  $AlI_3(c)$ ,  $AlN(c)$ ,  $Cr(c)$  i in. i in. The results of tests on the MT-5 friction machine

confirmed the effectiveness of alloyed chrome coating, which is an important step in ensuring the reliability and durability of the rolling mill. The best wear resistance is provided by aluminized coatings alloyed with Si and Ti with a wear rate of  $\Delta I = (33 - 55) \cdot 10^{-4} \text{ g/m}^2$ . This can be explained by the higher values of the total brittle fracture score of isothermal coatings, where it is 20-25% higher. Thus, this research has shown that the use of SHS process for coating the screws of the tensioning mechanism of the rolling mill is a promising and effective method to improve its performance characteristics.

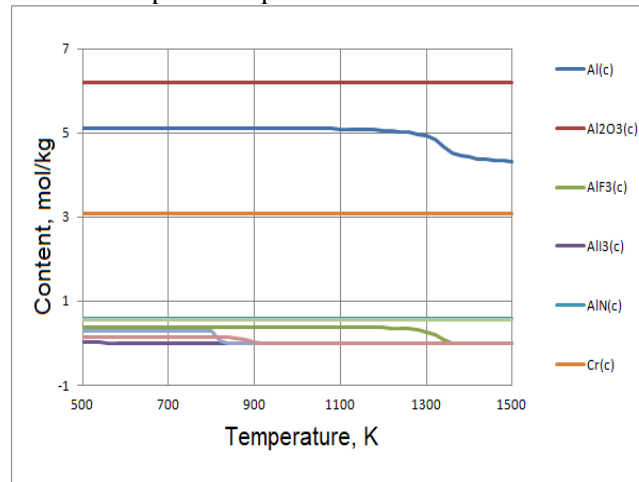


Fig. 2. The content of condensed products in the reactor.

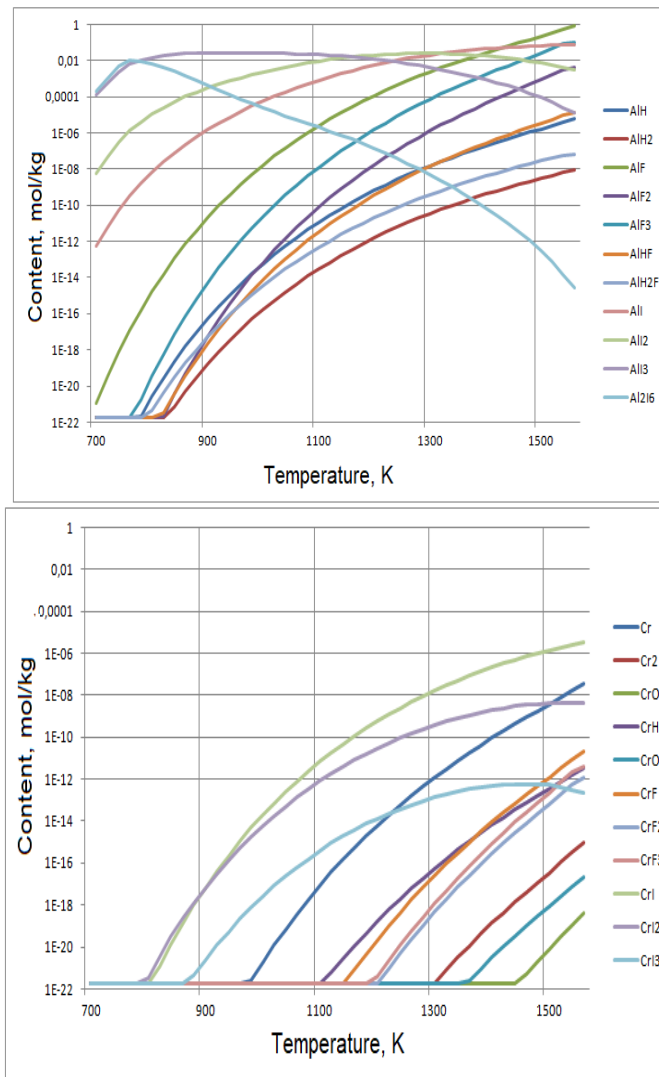


Fig. 3. Content of gaseous aluminum and chromium compounds in the reactor, thermal self-ignition mode of SHS charge

### References

1. Савуляк В.І. Наплавлення високовуглецевих зносостійких покриттів/ Савуляк В. І., Шенфельд В.Й.// Монографія. Вінниця: ВНТУ, - 2016. -124с.
2. Поверхнєве зміцнення матеріалів працюючих в умовах комплексного впливу агресивних речовин: монографія. Б.П. Серєда, Л.П. Банніков, С.В. Нєстерєнко, І.В. Кругляк, О.С. Гайдєнко, Д.Б. Серєда – Кам'янське: Дніпровський державний технічний університет, 2019. – 170с.
3. Sereda V. High-performance chrome coatings to protect against wear and corrosion Steel Properties and Applications in Conjunction with Materials Science and Technology 2021, P. 39–41.
4. Cheiliakh, O. P., Ryabikina, M. A., & Kutsomelia, Y. Y. (2015). Моделювання впливу параметрів дифузійного хромування на експлуатаційні та фізико-механічні властивості сталей для штампового інструменту. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*, (29), 56–64.
5. Обладнання прокатних цехів Навчальний посібник для студентів ЗДІА металургійних спеціальностей денної та заочної форми навчання / Укл.М.Г. Прищип, - Запоріжжя: ЗДІА, 2016. – 116с.
6. Прокатне виробництво [Текст]: навч. посіб. для студ. ВНЗ / Б. П. Серєда; Запорізька держ. інженерна академія. - Запоріжжя: Вид-во Запорізької держ. інж. акад., 2008. - 310 с. - Бібліогр.: с. 310 (12 назв). - ISBN 978-966-7101-96-1
7. Обробка металів тиском [Текст]: навч. посіб. для студ. ВНЗ / Б. П. Серєда; Запорізька держ. інженерна академія. - Запоріжжя: [Видавництво Запорізької держ. інж. акад.], 2009. - 342 с. - Бібліогр.: с. 342. - ISBN 978-966-8462-11-5
8. Обробка металів тиском [Текст]: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. за напрямком "Металургія" / В. М. Данченко. - Д.: Пороги, 2006. - 183 с.: рис. - ISBN 996-525-716-1



Б. П. Серета, А. М. Удод

*Дніпровський державний технічний університет*

## ОТРИМАННЯ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ХРОМОВАНИХ ПОКРИТТІВ НА ДЕТАЛЯХ, ЯКІ ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ В АГРЕСИВНИХ УМОВАХ ЕЛАСТОМЕРНОГО ВИРОБНИЦТВА

*Дана стаття присвячена дослідженню технології отримання багатокомпонентних хромованих покриттів на деталях, які експлуатуються в агресивних умовах еластомерного виробництва. Зокрема, розглядається використання методу саморозповсюджуючого високотемпературного синтезу (SHS), що дозволяє отримувати покриття з високою корозійною стійкістю завдяки утворенню пасивних оксидних плівок на поверхні. Проведено аналіз актуальності проблеми підвищення надійності та довговічності деталей в умовах агресивного впливу, який свідчить про необхідність впровадження ефективних методів захисту машин та установок. Стаття розглядає методику отримання багатокомпонентних хромованих покриттів з використанням технології SHS, а також вплив режиму теплового самовоспалення з розбавленням порошкової суміші на ефективність отримання покриттів і їх корозійну стійкість. Проведено дослідження корозійної стійкості отриманих покриттів в агресивних середовищах, таких як водний розчин соляної кислоти, азотна кислота та сірчана кислота, що мають концентрацію 15%. На основі результатів досліджень зроблено висновок про ефективність застосування багатокомпонентних хромованих покриттів для підвищення корозійної стійкості деталей, які експлуатуються в агресивних умовах еластомерного виробництва. Дана стаття має практичне значення для підвищення довговічності та надійності машин і установок, особливо в умовах еластомерного виробництва, де важлива стійкість деталей до агресивних середовищ та корозії.*

*Ключові слова:* саморозповсюджувальний високотемпературний синтез, корозійна стійкість, хромовані покриття, еластомерні матеріали, кремній, бор, матриця.

B. Sereda, A. Udod

## OBTAINING MULTI-COMPONENT CHROME COATINGS ON PARTS THAT ARE USED IN AGGRESSIVE CONDITIONS OF ELASTOMER PRODUCTION

*This research is devoted to the study of the technology for obtaining multicomponent chrome coatings on parts that operate under aggressive conditions of elastomeric production. In particular, the use of the self-propagating high-temperature synthesis (SHS) method is considered, which allows obtaining coatings with high corrosion resistance due to the formation of passive oxide films on the surface. The urgency of the problem of increasing the reliability and durability of parts under aggressive conditions is analyzed, which indicates the need to introduce effective methods of protecting machines and installations. The article considers the methodology for obtaining multicomponent chrome coatings using SHS technology, as well as the effect of thermal spontaneous combustion with dilution of the powder mixture on the efficiency of coating production and their corrosion resistance. The corrosion resistance of the obtained coatings in aggressive environments, such as an aqueous solution of hydrochloric acid, nitric acid, and sulfuric acid with a concentration of 15%, was studied. Based on the research results, it is concluded that the use of multicomponent chrome coatings is effective for improving the corrosion resistance of parts that operate in aggressive conditions of elastomer production. This article is of practical importance for increasing the durability and reliability of machines and installations, especially in the conditions of elastomer production, where the resistance of parts to aggressive environments and corrosion is important.*

*Key words:* selfpropagating high-temperature synthesis, corrosion resistance, chrome coatings, elastomeric materials, silicon, boron, matrix.

**Formulation of the problem.** Formulation of the problem in the context of the study under discussion includes the following aspects. First of all, with the development of technologies, there is a growing need to improve the reliability and durability of machine parts, devices and installations, especially those operating under vulcanization conditions of elastomer production. The role of surface hardening processes is becoming critical to ensure the longevity of machines and mechanisms due to the growing demands of the industry, including high loads, temperature fluctuations and aggressive environments. The SHS method, based on diffusion chromium plating, is proving to be effective in increasing the durability of various components as it changes the chemical composition, structure and properties of metal surface layers, which increases their resistance to wear, corrosion and other types of degradation. A comparative analysis with other diffusion saturation methods shows the advantages of SHS coatings, as they can have material properties that increase wear or corrosion resistance compared to the substrate, and also have strong adhesive strength to powders. In this regard, it is also important to take into account the microstructure of SHS coatings, which determines their mechanical and chemical properties, and to solve problems related to the control of diffusion processes and coating homogeneity, which is important for practical applications in industrial environments [1, 3].

**Analysis of recent research and publications.** An analysis of recent research and publications in the field of obtaining chromium coatings on parts that operate under aggressive conditions of elastomeric production using the self-propagating high-temperature synthesis method allows us to identify the following key aspects.

Recent studies confirm the high efficiency of the SHS method in forming chrome coatings on metal parts. This method can significantly increase the resistance of parts to aggressive environments and ensure their long-term operation. New research aims to optimize SHS processes to achieve maximum uniformity and quality of chrome coatings. This includes developing new formulations, controlling process parameters, and analyzing the impact of microstructure on coating properties.

Research focuses on the microstructure of SHS chrome coatings and its impact on mechanical, thermal and corrosion properties. It is important to ensure the correct microstructure to form high-quality chrome coatings. Comparative studies with other coating methods allow us to find out the advantages and disadvantages of the SHS method in specific operating conditions and compare its effectiveness [4,5].

Recent studies have focused on the practical applicability of the SHS method in industrial environments. It is important to develop technologies that would be efficient, cost-effective and have a wide range of applications in aggressive elastomer production conditions [2].

**Setting objectives.** Research into the self-propagating high-temperature synthesis method for obtaining chromium coatings on parts used in aggressive elastomeric production conditions has the following goals and objectives. First of all, the main goal is to develop optimal process parameters and formulations for the SHS process to produce high-quality and efficient chrome coatings on metal parts. This includes studying the effect of processing conditions, temperature parameters, powder composition and gasification mode on the quality and properties of coatings. Another important aspect is the study of the microstructure of the resulting coatings and their properties, such as strength, hardness, resistance to abrasive wear, as well as thermal conductivity and electrical conductivity. This makes it possible to assess the effectiveness of the coating in the conditions of its operation and determine the possibility of its use in specific production conditions.

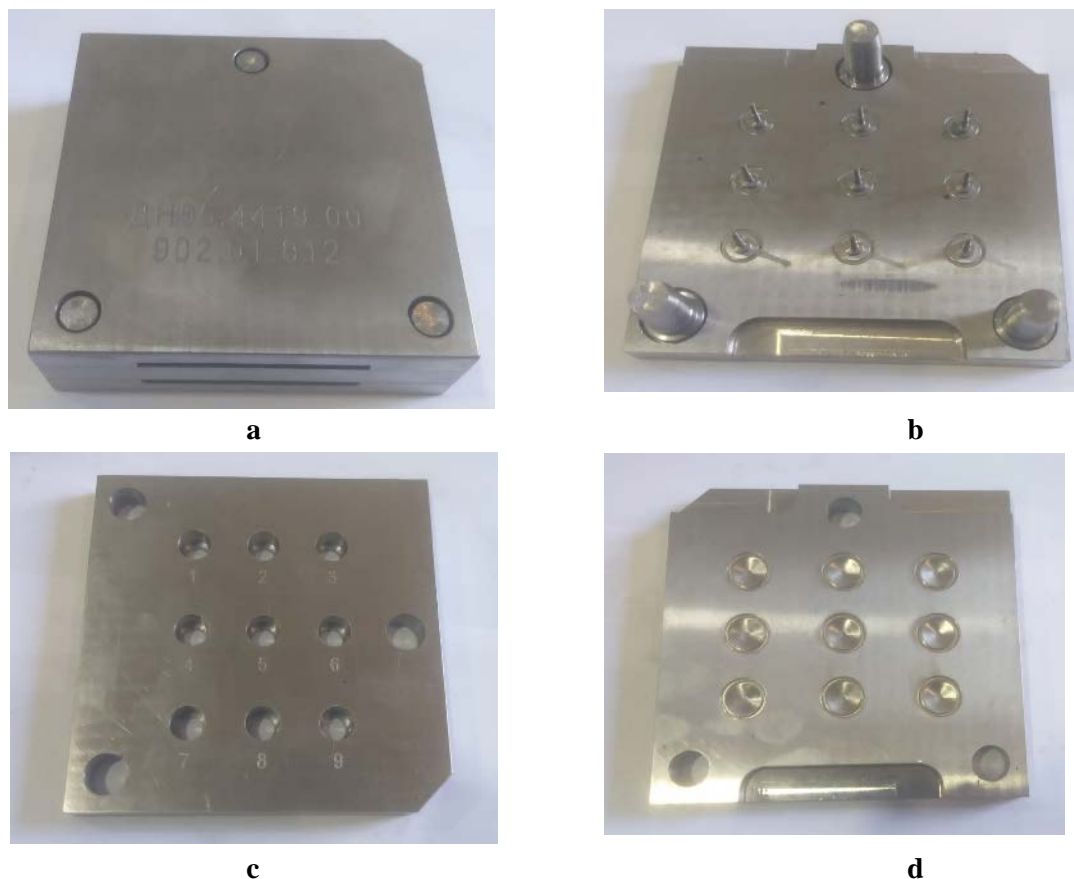
The third task is to optimize the SHS process to meet practical requirements and in accordance with the technological capabilities of the production. This includes implementing the most effective solutions for equipment, operating modes and process control to ensure consistent coating quality at the industrial level. In addition, it is important to conduct a comparative analysis of the effectiveness of the SHS method with other coating technologies to determine its competitiveness and applicability in practical conditions of elastomer production. The overall result of the study provides for specific practical recommendations for the implementation of the obtained results in production, which will improve the quality and efficiency of elastomeric products with chrome coatings in aggressive operating conditions.

**Presenting main material.** Given the rapid development of technology in Ukraine, the issues of increasing the reliability and durability of machine parts, devices and installations operating under conditions of vulcanization of rubber products have become so urgent. The role of surface hardening processes in the durability of machines and mechanisms has become especially important at the present stage, as the development of machine-building industries is associated with an increase in loads, temperatures and aggressiveness of the environments in which critical parts operate. Diffusion chromium plating using the CVS method is an effective method of increasing the durability of various parts, which changes the chemical composition, structure and properties of the metal surface layers.

Modern composite materials, such as rubber and rubber-based natural and synthetic rubber, play an important role in the metallurgical, textile and chemical industries. The use of such materials allows for the creation of products for structural and tribotechnical applications with improved damping properties, high elasticity and corrosion resistance. The use of rubber instead of metal also helps to reduce the weight of structures and machines, shortens the time for manufacturing parts (even of complex configurations) and increases corrosion resistance [6]. The pressing process was carried out using a hydraulic press of the "vulcanization 100-400 2E" type with plates measuring 400x400 mm for new elastomeric materials based on a copolymer of vinyl di-fluoride and hexopropylene, ethylene-propylene rubber.

Rubbers consist of a mixture of substances, the main component of which is natural or synthetic rubber. It is important to note that pure rubber has low mechanical, thermal, chemical and electrical properties. To improve these characteristics, fillers such as clay, carbon black, modified montmorillonite octadecylamine, silica (SiO<sub>2</sub>), aluminosilicate hollow microspheres, carbon black, and others are effectively used [3].

The materials used for press tooling in the production of elastomeric products, such as steel 20, steel 45, U8, 40X, 40X16M, were investigated. Mixtures of powders with dispersity from 60 to 250 microns of the following materials were used as reaction agents. When determining the necessary dispersity of reagents, we were guided by the studies, which showed that the maximum completeness of transformation is achieved when using a reaction mixture with a fraction of 100-120 microns. The press tooling to be processed is shown in Fig. 1.



**Fig. 1. General view of the press tooling: a- appearance of the complete tooling, b- punch, c- press spacer, d- die.**

Coatings obtained in self-propagating high-temperature synthesis processes have unique properties related to the associated gas-transport reactions. These coatings consist of a film of the applied product, similar to gas-phase deposition, as well as a broad transient diffusion (gradient) zone, as in diffusion saturation. Due to these features, gas-phase SHS coatings have better characteristics compared to other methods [7,8]. They can have properties of the applied material, such as being more wear-resistant or corrosion-resistant than the substrate, and have high adhesion strength powders. In such powders, the particles of one substance are coated with a layer of another, which provides a large specific contact surface for the reactants at sufficiently small particle sizes. The micron sizes under such conditions are satisfactory, and the interaction between the reactants occurs in the solid phase in the reaction diffusion regime if the particles do not melt. The low values of mass transfer coefficients in the solid phase can be compensated by a large contact surface. In this case high temperature is an important factor intensifying the process.

Determination of reaction products allows modeling the process of formation of protective layers under SHS conditions. On the basis of calculation of adiabatic temperatures of SHS system combustion it is possible to solve the heat balance equation, which is important for optimization and control of the process of protective coatings application. For the application of protective coatings on samples under SHS conditions the developed pilot plant DDTU12 was used, which includes the main functional systems: reaction equipment, system of control and regulation of technological parameters, as well as the system of gas utilization. This ensured efficient and controlled deposition of coatings with specified characteristics and quality.

The existence of temperature limits to which the combustion front can spread limits the use of combustion in technological processes. This is due to the fact that certain conditions, such as the presence of oxygen and sufficiently high temperatures, are required to sustain combustion. However, the thermal self-ignition mode is not subject to these limitations. By diluting the initial powder mixture with an inert substance to 85-90% by weight, it is possible to reduce the maximum process temperature to the values required by the technology. This approach allows more flexible process control and provides the necessary conditions without the risk of exceeding temperature limits.

Thus, the use of thermal auto-ignition mode with powder mixture dilution with an inert substance is an effective way to optimize processes, especially in areas where precise temperature control and avoidance of possible combustion limitations are important.

The following compounds predominate in the gas phase at temperatures between 400 and 1600 K: SiCl, SiCl<sub>2</sub>, SiCl<sub>3</sub>, SiJ<sub>2</sub>, SiJ<sub>3</sub>, AlCl, AlCl<sub>2</sub>, AlCl<sub>3</sub>, BF<sub>3</sub>, CrF, CrF<sub>2</sub>, CrF<sub>4</sub>, TiCl<sub>2</sub>, TiCl<sub>3</sub>, TiCl<sub>4</sub>, AlI, as well as iodine in atomic and molecular states. With increasing temperature, an increase in the number of products in the gaseous phase as well as the formation of condensed products is observed. However, the fraction of condensed phase decreases in the range of 400-1600 K due to vaporization of the carriers used. At temperatures above 800 K, the decomposition of reaction products occurs, indicating the appearance of decomposition products and a sharp increase in the number of gaseous molecules. The gaseous products interact with the elements of the powder system (Al, Si, B, Ti, Cr), transferring them to the gas phase.

At temperatures above 800 K, the proportion of the condensed phase practically does not change, indicating reactions with the formation of the condensed phase without changing the total number of molecules. This fact indicates the chemical transport of elements in the range of 800-1600 K. To increase corrosion resistance, a coating containing elements that form passive films is required. When tested in a 20% aqueous solution of hydrochloric acid, the best resistance is shown by protective coatings alloyed with chromium and titanium, which have the following weight loss rates: 23.5 and 21.5 g/m<sup>2</sup>. Corrosion test results for 8 days are shown in Table 1.

Table 1

**Corrosion resistance of steel 45 with protective coatings in aqueous acidic environments**

Corrosive environment	Type of coating	Weight loss (10 <sup>-4</sup> g/m <sup>2</sup> )							
		Test time, days							
		1	2	3	4	5	6	7	8
20% HNO <sub>3</sub>	Uncoated	87	152	230	300	363	468	547	631
	Cr-Al-Si	5,8	10,8	18	23	27	31	35	38
	Cr-Al-Ti	6,3	13	19	24	28	33	38	44
	Cr-Al-B	5,6	11	14,7	18	23	28	33,6	37,8
20% HCl	Uncoated	56	90	121	166	218	280	340	401
	Cr-Al-Si	6,7	10,3	11,7	15	18,3	20,9	25,1	28,2
	Cr-Al-Ti	5,9	9,2	11,1	13,3	15,4	16,9	19,2	21,5
	Cr-Al-B	6,4	10,7	12,5	14,1	16,4	19,1	21,1	23,5
20% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Uncoated	59	94	130	160	198	220	252	280
	Cr-Al-Si	3,7	4,7	6,6	8,2	9,2	10,9	12,2	13,4
	Cr-Al-Ti	2,9	3,4	4,5	5,6	7,2	8,1	8,8	9,6
	Cr-Al-B	3,9	5	6,4	7,9	9,7	10,8	12,9	14

When tested in a 20% aqueous solution of sulfuric acid, the best resistance is shown by protective coatings alloyed with silicon and titanium, which have the following weight loss rates: 13.4 and 9.6 g/m<sup>2</sup>. When tested in a 20% aqueous solution of nitric acid, titanium and silicon-alloyed protective coatings show good resistance, with the following indicators: 44 and 38 g/m<sup>2</sup>. A comparative analysis of the corrosion resistance of protective SHS coatings and CTH coatings obtained under isothermal conditions shows that they have a weight loss of 1.9-2.2 times less.

The results obtained can be explained by the formation of alloyed phases on the surface, which leads to surface passivation in aggressive environments. It is also possible to assume the influence of electrochemical inhibition of anodic dissolution of metals at a higher concentration of alloying elements of

alloyed protective coatings compared to coatings obtained under isothermal conditions, which indicates the absence of microcracking.

It is known that mechanical stresses (in this case, compressive residual stresses) affect the corrosion behavior of metals due to the structural material receiving additional energy due to the fact that the level of residual stresses in coatings obtained under conditions of thermal spontaneous combustion of SHS charges is higher. As a result, the probability of microcracking of passive oxide films decreases, which leads to an increase in corrosion resistance. A comparative analysis of the corrosion resistance of protective SHS coatings and CTH coatings obtained under isothermal conditions shows that they have a weight loss of 1.9-2.2 times less.

The conducted research allows us to conclude that one of the main factors affecting the performance of equipment is its corrosion resistance under the aggressive influence of the corrosive environment of elastomeric products production.

**Conclusions.** Several important conclusions were drawn during the study of the self-propagating high-temperature synthesis SHS method for obtaining chromium coatings on parts that operate under aggressive conditions of elastomer production. The SHS method is an effective and promising way to produce high-quality coatings, including chrome, on metal parts. It was found that optimal process parameters, such as processing modes, temperature, and powder composition, significantly affect the quality and properties of the resulting coatings. A detailed analysis of the microstructure allows us to determine the optimal conditions for coating formation. When tested in a 20% aqueous solution of sulfuric acid, the best resistance is shown by protective coatings alloyed with silicon and titanium, which have the following mass loss rates: 13.4 and 9.6 g/m<sup>2</sup>.

When tested in a 20% aqueous nitric acid solution, titanium- and silicon-alloyed protective coatings show good resistance, with values of 42 and 37 g/m<sup>2</sup>. A comparative analysis of the corrosion resistance of protective SHS coatings and CTH coatings obtained under isothermal conditions shows that they have a weight loss of 1.9-2.2 times less. The chromium coatings obtained by the SHS method are highly resistant to abrasive wear, corrosion and mechanical stress, which makes them effective for use in elastomeric production. The high level of stability and efficiency of the SHS process confirms the possibility of implementing this method at elastomeric products manufacturing enterprises to improve the quality and service life of parts. Thus, the study of SHS for obtaining chromium coatings in the context of elastomeric production is a relevant and promising area that will further improve the quality and efficiency of elastomeric production.

#### References

1. Kumar, V., Alam, M.N., Manikkavel, A., Song, M., Lee, D.-J., Park, S.-S. Silicone Rubber Composites Reinforced by Carbon Nanofillers and Their Hybrids for Various Applications: A Review. *Polymers*. 2021. №13(14), 2322.
2. Vasmer, E. Preparation and characterization of composites containing natural rubber, wastes rubber and cellulose nano-crystals. Master's degree in Advanced Materials Science and Engineering. 2022. 94 p.
3. Поверхневе зміцнення матеріалів працюючих в умовах комплексного впливу агресивних речовин: монографія. Б.П. Серєда, Л.П. Банніков, С.В. Нестеренко, І.В. Кругляк, О.С. Гайдаєнко, Д.Б. Серєда – Кам'янське: Дніпровський державний технічний університет, 2019. – 170с.
4. Sereda B., Sereda D. High-performance chrome coatings to protect against wear and corrosion Steel Properties and Applications in Conjunction with Materials Science and Technology 2021, P. 39–41.
5. Konovalenko, A.D., Dragobetsky, V.V. Novyye napravleniya razvitiya SVS–tekhnologiy [New trends in SHS technologies]. *Sistemnyye tekhnologii*. 2003. № 6. P. 68–73.
6. Cheshko, F. Microscopic Study of the Coal Tar Carbonaceous Dispersed Phase. *Chemistry & Chemical Technology*, 2011, 5(3), 355-362.
7. Kiryashkin, A.I., Salamatov, V.G., Maksimov, Y.M., Sosnin, E.A., Tarasenko, V.F., Gabbasov, R.M. Osobennosti spektra opticheskogo izlucheniya v protsessakh goreniya s obrazovaniem kondensirovannykh produktov goreniya [Features of the spectrum of optical radiation in combustion processes with the formation of condensed combustion products]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2010. Vol. 46, №1. P. 132–135.
8. Varma, A., Rogachev, A.S., Mukasyan, A.S., Hwang, S. Combustion synthesis of advanced materials: Principles and applications. In *Advances in Chemical Engineering*. J. Wei (Ed.). New York: Academic Press. 1998. V. 24. P. 79–226.

Г.М. Губаль

Луцький національний технічний університет

## ВДОСКОНАЛЕННЯ СТВОРЕННЯ ТАБЛИЦЬ І ДЕЯКИХ ОБЧИСЛЕНЬ НА МОВІ ПРОГРАМУВАННЯ LATEX ДЛЯ МАТЕМАТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

*У статті розглядається система LaTeX. Виконано автоматизацію створення даних у математичних дослідженнях за допомогою створених нових макросів у системі LaTeX на мові програмування LaTeX. Створено нові макроси, які генерують матриці випадкових чисел, розмірності яких можна ввести на етапі виконання макросів, які обчислюють і друкують суми введеної кількості доданків, піднесених до заданого степеня, які друкують рядки введених таблиць при заданій умові, які обчислюють і друкують суму елементів рядків і стовпців введених таблиць.*

*Ключові слова:* LaTeX, макроси, матриця, лічильник, умова.

Н.М. Hubal

## IMPROVEMENT OF CREATION OF TABLES AND SOME CALCULATIONS IN THE LATEX PROGRAMMING LANGUAGE FOR MATHEMATICAL RESEARCH

*The LaTeX system is considered in this article. The automation of data creation in mathematical research is performed using created new macros in the LaTeX system in the LaTeX programming language. New macros are created that generate matrices of random numbers, the dimensions of which can be entered at the stage of execution of macros that calculate and print the sums of the entered number of terms raised to a given power, that print the rows of the entered tables under a given condition, that calculate and print the sum of the elements of the rows and columns of entered tables.*

*Keywords:* LaTeX, macros, matrix, counter, condition.

**Постановка проблеми.** Система LaTeX широко використовується для написання наукових статей, навчальних посібників, підручників, монографій, що мають складне форматування [1]-[14]. Науковці і дослідники надають перевагу системі LaTeX, оскільки в системі LaTeX можна створювати складні формули, посилання і виноски [15]-[24]. Мова програмування LaTeX дає можливість автоматизувати і спростити роботу із системою за допомогою макросів [13], [14].

Використання макросів дозволяє ефективно керувати елементами, що використовуються багато разів. Макроси покращують читання і оновлення програмного коду та зменшують його дублювання, що підвищує швидкість компіляції і обробки документа LaTeX. Макроси полегшують колективну роботу, оскільки розробники проекту можуть ефективно використовувати та змінювати стандартизовані конструкції.

Створимо нові макроси у системі LaTeX на мові програмування LaTeX, які

– генерують матриці випадкових чисел, розмірності яких можна ввести на етапі виконання макросів;

– обчислюють і друкують суми введеної кількості доданків, піднесених до заданого степеня;

– друкують рядки введених таблиць при заданій умові;

– обчислюють і друкують суму елементів рядків і стовпців введених таблиць.

Ці макроси автоматизують і спрощують створення наукових і навчально-методичних праць, здійснюють обчислення, допомагаючи науковцям у їхніх дослідженнях.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При створенні документа LaTeX програмний код компілюється. При цьому команди транслюються в інші коди, які в свою чергу транслюються в інші коди і т.д. [5], [8], [11], [16]-[18], [21], [22]. У системі LaTeX можна генерувати тестові питання для перевірки знань студентів [22] та розробляти свої типи тестових питань [13]. Мова програмування LaTeX дає можливість створювати макроси [14].

**Виклад основного матеріалу.** Створимо матрицю випадкових чисел, розмірність якої можна ввести на етапі виконання макросів. У LaTeX документі `article` підключимо пакети `amsmath`, `forloop` та `pgf`. Створимо нові макроси:

– `\rnd`, що генерує випадкове ціле число від -30 до 30 за допомогою пакета `pgf`;

– після оголошення лічильників `row` і `col`, створимо `\randmatrix`, що генерує матрицю за допомогою оточення `\pmatrix` з пакета `amsmath` з заданим числом рядків і стовпців, які можна вводити з клавіатури. `\randmatrix` використовує два аргументи – число рядків і стовпців. Вкладені цикли `forloop` використані для створення рядків і стовпців матриці за допомогою команди `\rnd`.

Наведемо програмний код для створення матриці випадкових чисел, розмірність якої можна ввести (рис. 1).

```

\documentclass{article}

\usepackage{amsmath}
\usepackage{forloop}
\usepackage{pgf}

\newcommand{\rnd}{\pgfmathparse{int(random(-30,30))}
\pgfmathresult}%

\newcounter{row}
\newcounter{col}

\newcommand{\randmatrix}[2]{%
\begin{pmatrix}
\forloop{row}{1}{\value{row} < #1}{%
\forloop{col}{1}{\value{col} < #2}{%
\rnd &
}%%
\rnd
\\
}%%
\forloop{col}{1}{\value{col} < #2}{%
\rnd &
}%%
\rnd
\end{pmatrix}
}%

```

Рис. 1. Створення матриці випадкових чисел

У тілі документа виклинемо створену команду `\randmatrix` і введемо число рядків, наприклад, 10 та число стовпців, наприклад, 7 (рис. 2).

```

\begin{document}

Matrix of inputted size with random elements has the
form


$$\randmatrix{10}{7}$$


\end{document}

```

Рис. 2. Звертання до створеної команди у тілі документа

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

Matrix of inputted size with random elements has the form

$$\begin{pmatrix} -14 & -14 & -1 & 21 & -12 & 26 & 20 \\ -7 & 1 & -8 & -23 & 10 & -28 & 3 \\ -10 & -29 & -2 & -20 & -10 & -11 & 14 \\ 27 & 10 & -13 & 10 & 6 & -15 & -6 \\ 0 & -3 & -13 & -6 & -30 & -7 & 23 \\ 24 & -19 & 30 & -25 & 22 & -30 & 12 \\ -3 & 27 & -17 & 23 & -11 & 17 & 30 \\ -13 & -4 & -25 & 11 & -20 & -22 & -9 \\ 9 & -21 & 7 & -17 & -25 & 3 & 20 \\ 10 & -9 & 24 & 23 & -9 & -16 & 28 \end{pmatrix}$$

Рис. 3. Результат, згенерований програмним кодом

У випадках, коли у наукових дослідженнях треба обчислювати досить складні границі при  $n \rightarrow \infty$ , можна їх обчислювати на комп'ютері для великих  $n$ . При цьому чим більше  $n$ , тим довше виконуються такі обчислення, а при  $n \rightarrow \infty$  обчислення границі на комп'ютері немає змісту.

Можна спростити обчислення складних границь послідовностей при  $n \rightarrow \infty$  за допомогою коду на мові програмування LaTeX. Наприклад, знайдемо границю послідовності з загальним членом

$$a_n = 1^a + 2^a + 3^a + \dots + n^a + \left(\frac{1}{u}\right)^{2n}$$

при  $a=3$ ,  $u=120$ ,  $n \rightarrow \infty$ . Для цього запишемо границю

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = 1^a + 2^a + 3^a + \dots + u^a.$$

У цьому випадку можна обчислити границю послідовності за допомогою програмного коду, написаного на мові LaTeX (рис. 4). У LaTeX документі `\article` підключимо пакети `\calc` та `\forloop`. Створимо нові лічильники `\r`, `\t` і `\result`. Присвоїмо значення 0 лічильнику `\result`. Створимо команду `\sumn` для обчислення і друку суми введеної кількості натуральних чисел, піднесених до кубу. Введена кількість натуральних чисел є аргументом цієї команди, і ця кількість повинна бути введена більшою на одиницю.

```
\documentclass{article}
\usepackage{calc}
\usepackage{forloop}

\newcounter{r}
\newcounter{t}
\newcounter{result}

\setcounter{result}{0}

\newcommand{\sumn}[1]{%
\forloop{r}{1}{\value{r} < #1}%
{%
\setcounter{t}{\value{r}*\value{r}*\value{r}*\value{r}}
\setcounter{result}{\value{result}+\value{t}}}
\theresult
}%
```

Рис. 4. Обчислення і друк суми введеної кількості натуральних чисел, піднесених до кубу

У тілі документа LaTeX викличемо команду `\sumn` і введемо кількість натуральних чисел більшу на одиницю (рис. 5). Якщо необхідно обчислити суму 120 натуральних чисел, піднесених до кубу, то введемо число 121 в якості аргумента команди `\sumn`.

```
\begin{document}

The sum of \{(120\}) natural numbers raised to the power of
3 is \sumn{121}.

\end{document}
```

Рис. 5. Звертання до створеної команди у тілі документа

Наведений програмний код на рис. 4 і рис. 5 генерує результат, представлений на рис. 6.

```
The sum of 120 natural numbers raised to the power of 3 is
52707600.
```

Рис. 6. Результат, згенерований програмним кодом

Таким чином, границя заданої послідовності з загальним членом



$$a_n = 1^a + 2^a + 3^a + \dots + u^a + \left(\frac{1}{u}\right)^{2n}$$

при  $a=3$ ,  $u=120$ ,  $n \rightarrow \infty$ , дорівнює 52707600.

Створимо кореляційну таблицю, наприклад, з шести рядків і шести стовпців.

Для цього у LaTeX документі `article` підключимо пакети `pgf` і `bnumexpr`. Створимо нову команду `\ifthenrow`, що містить сім аргументів, які можна ввести. Ця команда друкує рядки таблиці за умови, що введене число (перший аргумент цієї команди) дорівнює одиниці. Якщо введене число (перший аргумент цієї команди) не дорівнює одиниці, то рядки таблиці не друкуються. Решта аргументів команди `\ifthenrow` – це перший, другий, ..., шостий елементи відповідного рядка таблиці (рис. 7).

```
\documentclass{article}
\usepackage{pgf, bnumexpr}

\newcommand{\ifthenrow}[7]{\ifnum \numexpr#1\relax=1
#2&#3&#4&#5&#6&#7\\\fi
}
```

Рис. 7. Друк рядків таблиці за умови, що введене число (перший аргумент цієї команди) дорівнює одиниці

Якщо необхідно створити кореляційну таблицю з іншою кількістю рядків і стовпців, можна змінити число аргументів команди `\ifthenrow` на необхідну кількість.

У тілі документа LaTeX створимо таблицю і викличемо команду `\ifthenrow`, наприклад, у третьому рядку таблиці, ввівши одиницю в якості першого аргумента (рис. 8). У цьому випадку третій рядок таблиці надрукується.

```
\begin{document}

\begin{tabular}{|c|c|c|c|c|c|}

\hline
\(\xi \backslash \eta\) & 16 & 26 & 36 & 46 & 56 \\
\hline
20 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
25 & 6 & 8 & 0 & 0 & 0 \\
\ifthenrow{1}{30}{0}{10}{32}{4}{0}
35 & 0 & 0 & 3 & 12 & 1 \\
40 & 0 & 0 & 9 & 6 & 5 \\
\hline

\end{tabular}

\end{document}
```

Рис. 8. Звертання до створеної команди у тілі документа

Наведений програмний код на рис. 7 і рис. 8 генерує результат, представлений на рис. 9.

$\xi \backslash \eta$	16	26	36	46	56
20	4	0	0	0	0
25	6	8	0	0	0
30	0	10	32	4	0
35	0	0	3	12	1
40	0	0	9	6	5

Рис. 9. Результат, згенерований програмним кодом

Якщо викликати команду `\ifthenrow` у третьому рядку таблиці і ввести, наприклад, нуль в якості першого аргумента (рис. 10), то третій рядок таблиці не надрукується.

```

\begin{document}

\begin{tabular}{|c|c|c|c|c|c|}

\hline
\(\xi \backslash \eta\) & 16 & 26 & 36 & 46 & 56 \\
\hline
20 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
25 & 6 & 8 & 0 & 0 & 0 \\
\ifthenrow{0}{30}{0}{10}{32}{4}{0}
35 & 0 & 0 & 3 & 12 & 1 \\
40 & 0 & 0 & 9 & 6 & 5 \\
\hline

\end{tabular}

\end{document}

```

*Рис. 10. Звертання до створеної команди у тілі документа*

Наведений програмний код на рис. 7 і рис. 10 генерує результат, представлений на рис. 11.

$\xi \backslash \eta$	16	26	36	46	56
20	4	0	0	0	0
25	6	8	0	0	0
35	0	0	3	12	1
40	0	0	9	6	5

*Рис. 11. Результат, згенерований програмним кодом*

Обчислимо і надрукуємо суму елементів рядків і стовпців кореляційної таблиці, представленої на рис. 9.

Для цього у LaTeX документі `\article` підключимо пакети `\pgf` і `\bnumexpr`. Створимо нову команду `\sm`, що містить п'ять аргументів, які можна ввести. Ця команда обчислює і друкує суму введених аргументів. Наведемо програмний код на рис. 12.

```

\documentclass{article}
\usepackage{pgf,bnumexpr}

\newcommand{\sm}[5]{%
\the\numexpr#1+#2+#3+#4+#5\relax
}

```

*Рис. 12. Обчислення і друк суми введених аргументів*

Якщо необхідно створити кореляційну таблицю з іншою кількістю рядків і стовпців, можна змінити число аргументів команди `\sm` на необхідну кількість.

У тілі документа LaTeX створимо таблицю і викличемо команду `\sm`, в якості аргументів якої введемо задані числа – елементи таблиці (рис. 13). Ця команда обчислить суму елементів рядків і стовпців.

Наведений програмний код на рис. 12 і рис. 13 генерує результат, представлений на рис. 14.

```

\begin{document}

\begin{tabular}{|c|c|c|c|c|c|c|}
\hline
\(\xi \backslash \eta\) & 16 & 26 & 36 & 46 & 56 &
sum\\
\hline
20 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sm{4}{0}{0}{0}\\
25 & 6 & 8 & 0 & 0 & 0 & \sm{6}{8}{0}{0}\\
30 & 0 & 10 & 32 & 4 & 0 & \sm{0}{10}{32}{4}\\
35 & 0 & 0 & 3 & 12 & 1 & \sm{0}{0}{3}{12}{1}\\
40 & 0 & 0 & 9 & 6 & 5 & \sm{0}{0}{9}{6}{5}\\
\hline
sum & \sm{4}{6}{0}{0}{0} & \sm{0}{8}{10}{0}{0} & \sm{0}{0}{32}{3}{9} & \sm{0}{0}{4}{12}{6} & \sm{0}{0}{0}{1}{5} &
& \sm{4}{14}{46}{16}{20}\\
\hline
\end{tabular}

\end{document}

```

Рис. 13. Звертання до створеної команди у тілі документа

$\xi \backslash \eta$	16	26	36	46	56	sum
20	4	0	0	0	0	4
25	6	8	0	0	0	14
30	0	10	32	4	0	46
35	0	0	3	12	1	16
40	0	0	9	6	5	20
sum	10	18	44	22	6	100

Рис. 14. Результат, згенерований програмним кодом

**Висновки.** У статті виконано автоматизацію створення даних у математичних дослідженнях за допомогою створених нових макросів у системі LaTeX на мові програмування LaTeX. Створено нові макроси, які

- генерують матриці випадкових чисел, розмірності яких можна ввести на етапі виконання макросів;
- обчислюють і друкують суми введеної кількості доданків, піднесених до заданого степеня;
- друкують рядки введених таблиць при заданій умові;
- обчислюють і друкують суму елементів рядків і стовпців введених таблиць.

#### Список використаних джерел:

1. Gubal', G. N., & Stashenko, M. A. (2005). Improvement of an estimate of the global existence theorem for solutions of the Bogoliubov equations. *Theoretical and mathematical physics*, 145, 1736-1740.
2. Stashenko, M. A., & Gubal', G. N. (2006). Existence theorems for the initial value problem for the Bogolyubov chain of equations in the space of sequences of bounded functions. *Siberian Mathematical Journal*, 47, 152-168.
3. Hubal, H. M. (2012). The generalized kinetic equation for symmetric particle systems. *Mathematica Scandinavica*, 140-160.
4. Gubal', G. N. (2014). On the existence of weak local in time solutions in the form of a cumulant expansion for a chain of Bogolyubov's equations of a one-dimensional symmetric particle system. *Journal of Mathematical Sciences*, 199, 654-666.
5. Gryshchenko, T.V., Deineko, Zh.V. & Nikitenko, O.M. (2019). Using the LaTeX system during the preparation of scientific publications. *IV International Scientific and Technical Conference "Print,*

*Multimedia & Web*”, 96–98.

6. Губаль, Г. М. (2013). LATEX як видавнича система для створення математичних текстів і для програмування. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, (12), 23-26.

7. Губаль, Г. М. (2013). Анімація в математичних текстах на мові LATEX. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, 11, 11-15.

8. Lamport, L. (1994). *LaTeX: a document preparation system*. 2<sup>nd</sup> ed. Boston: Addison-Wesley. (272 p.).

9. Губаль, Г. М. (2013). Стратегії для створення математичної статті у видавничій системі LATEX. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, (13), 10-13.

10. Губаль, Г. М. (2014). Особливості створення інтерактивних математичних тестів у видавничій системі LATEX. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*, (15), 9-13.

11. Lode, C. (2019). *Better books with LaTeX the agile way*. Clements Lode Verlag E.K. (254 p.).

12. Hubal, H.M. (2023) Improvement of references and footnotes in mathematical and other texts by creating macros in the LaTeX programming language. *International Journal on Information Technologies & Security*, (15(3)), 15–22.

13. Hubal, H. (2023). LATEX system in distance learning of the probability theory. *Grail of Science*, (33), 244-248.

14. Hubal, H. (2024). Analysis of Approaches to the Study of Limits of Sequences and Functions and the Use of Information Technologies. *Grail of Science*, (35), 226-231.

15. Hubal, H. (2024). Optimization of the Use of Some Modules in the Moodle System. *Grail of Science*, (38), 226-231.

16. Kottwitz, S. (2021). *LaTeX beginner's guide*. Packt Publishing, USA, (354 p.).

17. Kottwitz, S. (2023). *LaTeX graphics with TikZ*. Packt Publishing, USA, (304 p.).

18. Romansky, R. (2023). Empirical evaluation of the transfer of information resources in active learning. *International Journal on Information Technologies & Security*, 15(1), 39–48.

19. Hubal, H.M. (2019) Mathematical description of the non-equilibrium state of symmetric particle systems. *International Journal of Applied Mathematics*, (32(5)), 767–774.

20. Hubal, H.M. (2021) Mathematical modeling of biochemical processes rates in biological systems. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*, (42), 43–49.

21. Van Dongen, M.R.C. (2012). *LaTeX and friends*. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K. (300 p.).

22. Verdaguer-Codina, J. (2022). Linux, LaTeX, and Python in secondary and baccalaureate. *Proceedings of IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, Tunisia, 763–768.

23. Hubal, H. (2021). Mathematical modeling of biochemical processes rates in biological systems. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*, (42), 43-49.

24. Губаль, Г. М. (2022). Математичне дослідження стійкості особливих точок систем диференціальних рівнянь, які описують швидкості біохімічних процесів. *Наукові нотатки*, (73), 29-39.

**Рецензент:** Федосов С.А., доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики та вищої математики Луцького національного технічного університету.

**О.Б. Турчин**

аспірант, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
ORCID: 0009-0001-5989-1712

## АНАЛІЗ ШТАНГОВОЇ НАСОСНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ПРИ ВИДОБУТКУ НАФТИ ЗА ЗМІННИХ УМОВ НА ОСНОВІ ДИНАМОМЕТРИЧНИХ ДАНИХ І НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Системи глибоководної насосної штанги для морського видобутку нафти повинні працювати належним чином. Важливо розуміти режими роботи цих систем, щоб вони добре функціонували. Це досягається за допомогою глибоководної насосної штангової установки, яка називається штанговим насосом (SRP). Однак глибоководні умови постійно змінюються, знижуючи ефективність традиційних систем SRP. Робота може погіршитися, а умови навколишнього середовища можуть сильно відрізнятись. Мета дослідження: у цьому документі пояснюється, чому важливо адаптувати системи SRP до змін у суворих глибоководних регіонах. У ньому також розглядаються проблеми, що виникають у зв'язку з цим, поточні методології або навіть ймовірні майбутні підходи. Крім того, оптимізація ефективності, безпеки та стійкості морських нафтових операцій передбачає аналіз SRP. Інші виклики включають багатопроменеві перешкоди, які спричиняють погіршення сигналу та збурення іоносфери, що призводить до злиття даних і ускладненнь машинного навчання. Крім того, існують додаткові проблеми, спричинені динамічними середовищами та обчислювальними складнощами під час злиття даних, а також на етапах машинного навчання. Глибоководний моніторинг і контроль вимагає адаптації SRP. Методологія: Методика оглядової статті передбачає широкий огляд літератури з метою виявлення досліджень, що стосуються теми застосування стрижнів ПВН для видобутку нафти. Статті критично проаналізовано та дистильовано для отримання основних результатів дослідження з використанням збору динамометричних даних та алгоритмів НМ. Наукова новизна: Точна ідентифікація робочих режимів має вирішальне значення для глибоководних штангових систем, які використовуються в морському видобутку нафти. Однак середовище, що постійно змінюється в глибоких водах, ускладнює ефективну роботу типових систем SRP. Робота може бути погіршена, а умови навколишнього середовища можуть значно відрізнятись. Ця стаття має на меті дослідити, чому адаптація систем SRP до мінливих глибоководних умов є важливою. У ньому також розглядаються виклики, які постали перед нами, поточні підходи та перспективи, які застосовуються. Висновок: Аналіз SRP необхідний для досягнення ефективності, безпеки та стійкості морських нафтових операцій. Проблеми включають деградацію сигналу на основі багатопроменевої інтерференції та іоносферні збурення змінних. Існують додаткові складності через динамічне середовище, а також проблеми з обчисленням у процесах злиття даних і машинного навчання. Тим не менш, ефективний глибоководний моніторинг і контроль вимагають адаптації SRP.

Ключові слова: ГНШУ, глибоководні райони, нафтова насосна штангова установка, адаптація, нейронна мережа.

**O. Turchyn**

## ANALYSIS OF THE SUCKER-ROD PUMP SYSTEM FOR IDENTIFYING OPERATING MODES IN OIL PRODUCTION UNDER VARIABLE CONDITIONS BASED ON DYNAMOMETRIC DATA AND NEURAL NETWORKS

Deep-sea pumping rod systems for offshore oil production must operate properly. It is crucial to understand the modes of operation of these systems for them to function well. The use of a deep water pumping rod installation called a sucker-rod pump (SRP) achieves this. However, deep-water conditions continually change, reducing traditional SRP systems' effectiveness. Operations may deteriorate, and environmental conditions vary greatly. Purpose of study: This paper highlights why it is important to adapt SRP systems to changes in harsh deepwater regions. It also considers issues arising from this, present methodologies, or even likely future approaches. Also, optimizing efficiency, safety, and sustainability in offshore oil operations involves analyzing SRP. Other challenges include multi-path interferences that cause signal deterioration and ionospheric disturbances that result in data fusion and machine learning complexities. Also, there are additional problems occasioned by dynamic environments and computational complexities during data fusion as well as machine-learning phases. Deep-water monitoring and control requires SRP adaptation. Methodology: The method of the review article involves a wide-ranging literature review, to identify research that relates to the subject of SRP rod application for oil production. The articles are critically analyzed and distilled to obtain the main results of the study using dynamometric data collection and NN algorithms. Scientific novelty: Accurate identification of operational modes is crucial for deep-water rod systems used in offshore oil production. However, the constantly changing environments in deep waters make it difficult for typical SRP systems to perform well. The operation can be degraded, and environmental conditions may vary much. This paper aims to examine why adapting SRP systems to changing deep-water conditions is important. It also examines the challenges faced, current approaches used, and prospects that are being analyzed. Conclusion: Analysis of SRP is necessary for achieving efficiency, safety, and sustainability in offshore oil operations. Challenges comprise multipath interference-based signal degradation and ionospheric disturbances of variables. There are additional complexities due to dynamic environments as well as computational issues in data fusion and machine learning processes. Nonetheless, effective deep-water monitoring and control require SRP adaptation.

Keywords: SRP, Deep-water, oil pumping rod installment, Adaption, Neural Network.

**Introduction.** The accurate pumping and monitoring in the design of the devices is the only way that deep-sea oil production the well pumping rod installations will be able to function efficiently. Hence, the need to develop some control mechanisms could overcome the volatile and changing natures of deep waters, which is the great hindrance for the regulated running mode of power generation. The evaluation of the adaptive nature of the Sucker rod pump (SRP) system, which has the capability of deciding the states of operations that are dynamic and involve the diverse conditions get authenticated by using the theory of dynamo-metrics data analysis, a machine learning paradigm. This can be recognized to be an effective approach (Al-Rbeawi, 2023).

Using SRP technology in the installation of the downhole pumping rods is not only revolutionizing the accuracy and precision of the oil production techniques but it has as well created a new level of rationale in the oil extraction processes. SRP might be used together with systems operators so that they can monitor the location and move of equipment on the spot. Thus, they can improve operations and ensure equipment safety. Strangely, the SRP-based conventional systems though are sensitive to the changing elements of seabed shapes, waves and currents in the deep water area, there exist the examples where the systems have overcome the obstacles (Yang, Chen, Wu, & Li, 2022).

In this reason, we propose a novel approach that uses the dynamometry data and takes benefits of neural networks to improve the adaptability of the SRP based system. The dynamometry analyzes the forces and moments acting on the area of the rod pump which turns into the mechanics of operation processing. The sensory adaptation is happening and it will visualize the correct picture of future similar events with unusual events ahead.

Not only the neural network stands out as the prime tool for the deep learning providing the complicated pattern recognition function and the ability to generate models of the patterns but also because of that, the system can find and apply the past patterns to forecast the outcomes (Panettiere, Bossier, & Khenchaf, 2023).

Implementation of SAP integrated Smart Pump system with fully developed technology will be groundbreaking in the oil production industry. Such straightforward process ensures the impetuous oil recovery and supports climbing in field oil production too. The utilization of SRP technology by us will not only enable us to reach the right levels of reliability and efficiency but also it will enable us to extract oil from the deep-water level. By applying this technology, the SRP system's accuracy is enhanced, and real-time monitoring is introduced for all possible system modes of operation, consequently exposing the systems to the best performance under every situation. Because of the arrival of such CBM technology, we are going to witness an incomparable oil output from the fields, and this will be done with the implementation of strict standards of safety in the deep-sea oil extraction environment and compatible the advanced operational competence (Ranawat, Kankar, & Miglani, 2020).

**Problem statement.** Efficient operation of rod lift installations for extraction of deep water oil depends majorly on the accurate identification of operational modes using SRP. On the other hand, the fast and unstable characteristics of deep-water environment make the traditional SRP-based technology very bad with high level of inaccuracy and thus possible safety hazards. At the moment, existing systems are not able to adapt to the varying water conditions such as currents, wave patterns, and sea bottom topography that amend equipment performance. It will be needed to create a stronger and more adaptable system which will have capacity to determine different operational modes considering up-to-date data inputs. Combating this challenge necessitates the use of cutting-edge techniques that integrate dynamometric data analysis and neural networks so as to improve the performance and effectiveness of SRP-based systems in deep-water environmental conditions. Through the solution of this problem, the chances can be transformed to elevate the efficacy, safety and sustainability of deep-water oil extraction schemes.

**Purpose of the study.** The aim of this research work is to design a general converter that would be able to be applied to any transient mode of pumping oil from oceanic wells depending on the environmental conditions. The study seeks to achieve this objective by integrating dynamic data modeling and neural network algorithms that improve the flexibility and dependability of this system. This study aims at developing the innovations in the current SRP-based systems by providing a more dependable and changed based approach toward know the nature of the operation modes of changing situations. The research, in the long run, aims multi-faceted contribution to convenience deep-water oil extraction practices by increasing productivity, safety, and sustainability. Via inference from mass observations and deductions from the model thesis, the study will offer current guidelines and approaches to the integration of adaptive SRP systems into practical scenarios thus boosting the innovation and modernization of the offshore oil production.

**Recent research and publications.** The use of SRP systems based technology for moving equipment to depth in deep-water pumping rod installations during oil production has been adapted to utilize developmental innovations in research, publications, and technology. A study held in Journal of oil Science and Engineering suggested that the mix of machine learning algorithms with SRP data for the sake of forecasting operational modes in deep water and with high precision is a productive idea (Al-Rbeawi, 2023; Ranawat, Kankar, & Miglani, 2020). The research paper Chen, Li, & Li (2022) established the validity of the neural networks for dynamometric data analysis combined with SRP installation allowing for real-time response to variable conditions.

Additionally, emerging technological trends have been concerned with strengthening the credibility and accuracy of SRP-aided systems in depth-sea operations (Al Toubi, Harrison, & CV, 2023; Krishnakumari, Sivasankar, & Radhakrishnan, 2020).

Institution and research technology institutions together with industry leaders have collaborated and developed advanced sensors and data fusion techniques that boost resilience of SRP operations to the interference and multipath effects in maritime environment. Deep-water rod-pump installations for deep well development where such oil production is made possible by the employment of SRP have become the major research subject for scientists. This is done to increase the responsiveness of system and also efficiency. Study can define the best possible way of using real-time monitoring and pumping operations control in the deep-water and provide the basis for further development. As a part of research work the elasticity of the piling, the robustness of the capsules employed in the SRP and the durability of the offshore conditions is going to be taken covered in detail. In addition, the mud logging, sensor technology, and data analytics are perfected, and sucker rod pumps become more efficient, thus improving the safety of the overall oil production operation, especially deep water extraction development (Behari et al., 2020; Ganat, 2019).

Additionally, recent studies have underlined the significance of taking on board environmental factors like ocean currents, tides and underwater terrain during the design and implementation of decisive SRP platforms (Vandrangi, Lemma, Mujtaba, & Ofei, 2022; Freitas, Barbosa, & Aguirre, 2021).

Probabilistic modeling is one of the methods which has been used in studies to cover uncertainties with dynamic environmental circumstances encompassing improve decision making and planning of operations.

The last publications Chen, Li, & Li (2022), Tomczak, Stępień, Abramowski, & Bejger (2022) the research that is being made about the water depth topic and the innovations which are very related to SRP technology are a main proof that SRP technology is improving deep-water oil production. A growing number of these inventions will be implemented by the companies, and they will focus on the improvement of operational efficiency, risk management, and making the industry more sustainable. The experience from the past has great deal in taking decisions for betterment of the oil and gas industry.

**Main research analysis.** Deep water oil extraction experiences the peculiar turbulent character of the offshore environment; it possesses some specific problems. In this case, convergence of the high precision SRP-based technology which is responsible for the detection of operational modes of pumping rod installations is very important for ensuring productivity, security and sustainability (Behari et al., 2020). The following analysis presents the crucial elements of this which consist of changing the way SRP systems are working, the problems of changing them, methods that have already been applied and prospects.

**Significance of Adapting SRP Systems.** Deepwater No longer humans solely perform the extraction workface and supervise the execution of their blueprints in deep water. Indeed, the SRP stands out, and this is basically by giving all the information that can be used to figure out the whereabouts of the vehicles in the real time context. Besides, navigating systems, which are mostly based on pumping, may not easily adapt to motion changes neither depth, current, sea wave and bottom features. It is impossible for the operational activities of SRP if they cannot adapt to these changes. This is guaranteed to reduce danger levels and also ensures the safety of the personnel on-board and their assets (Tomczak, Stępień, Abramowski, & Bejger, 2022).

Not to say more, theory of establishment of SRP must be considered while placing the pumping rod in deep-water well of oil extraction processes. It is vital that the SRPs are modified in the deep-water regions where obstacles are added to the dynamic conditions, therefore the maintenance of a healthy SRP depends on several factors of the technology (Wang et al., 2021).

The proper placement of the pumping rod installations is also an important factor that needs to be considered for installing the facilities. This is if the highest productivity goals in the oil extraction process are to be met. SRP has the functionality of providing the operators with regular pumping data that assists

them in tracking the placing and/or advancing of their equipment. This task is meant to enhance or adjust performances or to maximize production efficiency (Gao et al., 2022). However, the exact determining problem with SRP systems is approached as an effect of pumping operation attenuation, multipath, and ionospheric interference which are mostly the cases in deep waters. Changes in SRP systems to be made in order to carry these difficulties are tailor-made for retaining the operational precision, so it confirms accurate pumping information.

Additionally, the safety levels of human content and equipment are heavily dependent upon precision pumping oil production process. SRP-based systems with the attempt of getting current data with the precision, result in avoiding hazard in pumping rod installations, hence, are being the basis of a safe operation. Developing an SRP that is adaptable to changing conditions would improve the safety aspect of the equipment by permitting the relevant authorities to act in advance towards crisis prevention as well as preparation for potential emergencies (Al Toubi, Harrison, & CV, 2023)

This becomes the next factor that effectively greening the operations of deep ocean oil drilling with SRP capability. Using systems like SRP for such services like system optimization and for environmental safety can contribute to the conservation of resources and to the decrease of carbon footprint and finally have a positive impact on the ecological status (Osagie et al., 2019).

In fact, SRP systems use for deep-water pumping rods installation will be beneficial in many ways through enhancing the productivity, guaranteeing high-security standards and a sustainable means of oil exploitation for the offshore activities. The operations of deep-water sited is resolved through the use of innumerable technologies and modified SRP serves as the steppingstone into the expansive and dependable offshore oil production.

**Challenges Involved.** Impacts of corrosion and erosion of the product occurrence which are caused by the rough offshore environment. In addition, a faulty piece of equipment when working at seabed under high pressure and extreme current may lead to major complications. Moreover, creating an uninterruptible energy source and communication systems at deep offshore locations is a key effort. During deep-water diving in complex surroundings with reduced sight and obstacles along the way, precise pumping and navigation in dynamic environment is the most challenging task. Overcoming these challenges calls for a smart engineering approach as well as solid revenues syategies that will delivery both high performance and efficiency of SRP while sustaining safety and environment as well (Krishnakumari et al., 2019).

In particular, the maintenance of deep-sea pumping rod stations is linked to difficulties caused by the availability of and access to such structural components as sensors and electric motor. Performance of regular checkups, repairs and replacements in offshore is facilitated through use of specific equipment and well-trained personnel, but of course, it requires a high level of logistic complexity and money. To maintain corrosion- and biofouling-free surface of equipment in aggressive marine environments always raises this issue, thus the requirement for new materials and coatings is incessant in order to increase equipment service life. Not only that but environmental risks, for example, oil spills or habitat disturbance, which results in stricter regulations and set of environmental control protocols. On the other hand, the deep sea is an extreme and remote environment, which increases safety risks for personnel. Emergency response plans and personnel training are therefore vital to assure effective safety its essential. It is complex to say simple that the solutions should be interdisciplinary cooperation, technological development, and creating the system for deep-water pumping rod installations to work efficiently and sustainably, still using SRP. Being in deep water brings big hurdles that call for quick fixes. likewise, joining dynamometric data and neural networks exacerbates computational complications like data operation, model training, and algorithm optimization. important swings, surge signal, and uneven aquatic home pose redundant difficulties, making it delicate to calibrate SRP systems. Conquering such difficulties calls for fresh ideas concerning sensor technology used in this field, data processing algorithms as well as self-sufficiency in decision making thus refining adaptability and reliability of SRP based systems when operating circumstances change (Panetier, Bossier, & Khenchaf, 2023).

Data integration techniques based on machine learning algorithms are the main available means for joining SRP technology into water pumping rod installation. By merging data, it is aimed at improving the precision and reliability of the pumping system. Therefore, big datasets that look unintelligible to human observer become analyzed by such artificial neural nets as machine-learning algorithms for their decision-making process to be translated into real-world operations. Merger of these two things (data fusion and machine learning methods) has proved to be a very effective way of enhancing SRP performance in various surroundings and environmental conditions (Al-Rbeawi, 2023).



**Current Approaches.** There are majorly two groups' approaches concerning SRP technology with respect to deep-water pumping rod installations. The existing technologies used currently involve combining measurements from several sensors, intelligent control systems, data loggers, computers, and software applications. The first group views it as a problem of joining or integrating various components of SRP with other parts that perform some functionalities like inertial operation system; while second group looks at it through an interface approach between SRP and environmental conditions (Chen, Li, & Li, 2022; Freitas, Barbosa, & Aguirre, 2021).

There are two major groups or sorts of trends in SRP technology for water pumping rods located at the bottom. The current technologies generally use combinations of measurements made by several sensors, smart instrument control methods and data logging units, computers and software tools/programs that are used today. While one class looks at it as a way of bringing together various factors from SRP which include other supporting means such as environmental conditions; another class considers this to be a boundary between SRP and environmental conditions. For identifying operational modes, machine learning algorithms particularly neural networks have been employed in the analysis of complex datasets to extract significant insights. Hybrid approaches that involve combining data fusion and machine learning techniques have shown promising results in enhancing adaptability of SRP systems under different operating conditions. This facilitates the system's ability to learn from previous occurrences and make real-time adjustments with optimum performance and safety in offshore circumstances. But it still doesn't sit right. All these new calculations, in addition to a lot of computer power and complex algorithms, remain the price we pay to use SRP systems in deep-water oil drilling – and efforts to improve and refine those current methods continue.

**Potential for Future.** The future for applying SRP systems in deep-water pump application will depend upon development in sensor tech, data processing technology, and decision-making capability. The development of new sensor technology that can use different frequency and different systems to offer pumping solution underwater such as SRP receivers with flexibilities for receiving data will transform it to a more usable tool for both greater accuracies in challenging settings and conditions. There is also an avenue towards better pumping solution by improving data processing technology. Different algorithms for signal processing such as using probabilistic method and processing of data on the spot can produce more precise pumping than traditional computing. Additionally, there is an opportunity to make SRP-based system smarter and better in decision making by linking artificial intelligence and self-governing systems.

**Conclusion.** The adaptation of SRP-based systems has been evolutionary in offshore oil producing industries, as the systems have successfully adapted to rough sea conditions. Still, the extreme dynamic nature of the operating conditions and the effect of pumping degradation by the propagation in harsh offshore environments pose many challenges. Recent developments in research on data fusion techniques and machine learning algorithms, such as neural networks, have shown the potential to improve the adaptability and reliability of the systems for real-time adaptation to variable operating conditions, thus increasing the efficiency, safety and sustainability of offshore oil-gas industries.

These indispensable efforts should continue to address such residual problems as data-fusion complexities, optimization of algorithms to reduce computation requirements, and the challenge to deliver required computational resource. Research may have to concentrate on advancing sensor technology, refinement in data-processing algorithms and self-decision autonomy capabilities aimed at improving SRP performance. The role of collaboration between academia and industry and the need for intervention from government agencies have an essential role to play if these advanced technologies are to be driven forward and then applied to offshore oil extraction operations in the real world.

SRP systems are increasingly being optimized to fit deep-sea oil extraction. Their impact can be immense, boosting production, and protecting nature and people offshore. The offshore world may not be the same anymore.

#### REFERENCES:

1. Al-Rbeawi, S. (2023). A review of modern approaches of digitalization in oil and gas industry. *Upstream Oil and Gas Technology*, 11, 100098.
2. Yang, P., Chen, J., Wu, L., & Li, S. (2022). Fault identification of electric submersible pumps based on unsupervised and multi-source transfer learning integration. *Sustainability*, 14, 9870.
3. Panetier, A., Bossier, P., & Khenchaf, A. (2023). Sensitivity of Shipborne SRP Estimates to Processing Modeling Based on Simulated Dataset. *Sensors*, 23, 6605.

4. Ranawat, N. S., Kankar, P. K., & Miglani, A. (2020). Fault diagnosis in centrifugal pump using support vector machine and artificial neural network. *Journal of Engineering Research EMSME Special Issue*, 99, 111.
5. Chen, Y., Li, M., & Li, Y. (2022). Identification of Wellbore Flow Abnormal Working Conditions Based on Deep Learning. In *2022 IEEE 22nd International Conference on Communication Technology (ICCT)* (pp. 1927-1931).
6. Al Toubi, S., Harrison, D., & CV, S. (2023). Evaluating and predicting overall equipment effectiveness for deep water disposal pump using ANNGA analysis approach. *Journal of Mechanical Engineering (JMEchE)*, 20, 199-225.
7. Krishnakumari, K., Sivasankar, E., & Radhakrishnan, S. (2020). Hyperparameter tuning in convolutional neural networks for domain adaptation in sentiment classification (HTCNN-DASC). *Soft Computing*, 24, 3511-3527.
8. Behari, N., Sheriff, M. Z., Rahman, M. A., Nounou, M., Hassan, I., & Nounou, H. (2020). Chronic leak detection for single and multiphase flow: A critical review on onshore and offshore subsea and arctic conditions. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 81, 103460.
9. Ganat, T. (2019). Pumping system of heavy oil production. In *Processing of Heavy Crude Oils - Challenges and Opportunities*. IntechOpen. DOI:10.5772/intechopen.87077
10. Vandrangi, S. K., Lemma, T. A., Mujtaba, S. M., & Ofei, T. N. (2022). Developments of leak detection, diagnostics, and prediction algorithms in multiphase flows. *Chemical Engineering Science*, 248, 117205.
11. Freitas, L., Barbosa, B. H., & Aguirre, L. A. (2021). Including steady-state information in nonlinear models: An application to the development of soft-sensors. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 102, 104253.
12. Tomczak, A., Stępień, G., Abramowski, T., & Bejger, A. (2022). Subsea wellhead spud-in marking and as-built position estimation method based on ultra-short baseline acoustic positioning. *Measurement*, 195, 111155.
13. Wang, X., He, Y., Li, F., Wang, Z., Dou, X., Xu, H., & Fu, L. (2021). A working condition diagnosis model of sucker rod pumping wells based on deep learning. *SPE Production & Operations*, 36(02), 317-326.
14. Gao, Z.-t., Feng, X.-y., Zhang, Z.-t., Liu, Z.-l., Gao, X.-x., Zhang, L.-j., Li, S., & Li, Y. (2022). A brief discussion on offshore wind turbine hydrodynamics problem. *Journal of Hydrodynamics*, 34(1), 15–30. <https://doi.org/10.1007/s42241-022-0002-y>
15. Osagie, S. O., Ibaba, I. S., & Watts, M. J. (2009). Reflections on the Nigerian State, Oil Industry and the Niger Delta. *Journal of African Development*, 11(2), 9–26. <https://doi.org/10.5325/jafrideve.11.2.0009>

О.О. Молнар<sup>1</sup>, В.В. Герасимов<sup>2</sup>, Ю.Ю. Жигуц<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ДВНЗ «Ужгородський національний університет»

<sup>2</sup>Мукачівський державний університет

## КОМП'ЮТЕРНО-ОРІЄНТОВАНІ ДОДАТКИ У ВИВЧЕННІ АСТРОНОМІЇ НА ПЛАТФОРМИ WINDOWS

*В статті здійснено огляд комп'ютерних програм придатних для вивчення астрономії при підготовці студентів в університетах, учнів у школі, в гуртках. Акцент зроблено на безкоштовних додатках на базі платформи Windows. Зазначено, що дослідженні програми характеризуються набором функціоналу різного спрямування орієнтованого як для початківців, для учнів старших класів, так і для студентів. Більшість застосунків мають постійне оновлення, що сприяє розширенню інформаційної бази щодо об'єктів вивчення, а також покращення інтерактивних складових при роботі з даною платформою.*

*Ключові слова:* комп'ютерно-орієнтовані додатки, платформи Windows, інформаційна база, інтерактивні складові.

O.O. Molnar, V.V. Gerasimov, Yu.Yu. Zhiguts

## COMPUTER-ORIENTED APPLICATIONS IN THE STUDY OF ASTRONOMY ON THE WIDOWS PLATFORM

*The article reviews computer programs suitable for studying astronomy while training students at universities, schools, and clubs. Emphasis is placed on free applications based on the Windows platform. It is noted that the research programs are characterized by a set of functionality of various directions, oriented both for beginners, for high school students, and for students. Most applications are constantly updated, which contributes to the expansion of the information base on the objects of study, as well as the improvement of interactive components when working with this platform.*

*Keywords:* computer-oriented applications, Windows platforms, information base, interactive components.

**Вступ.** Пізнання космосу стає все більш актуальним у наші дні, причому не лише з наукової, а і з практичної точки зору. Ілон Маск збирається покорити Марс, NASA повертається на Луну, космічні апарати вивчають склад астероїдів з метою видобутку корисних копалин тощо. Тому вивчення астрономії в університетській програмі, школі є дуже актуальною, так як сьогоднішні учні через 10-15 років можуть абсолютно реально зіткнутись з можливістю космічних подорожей або роботою у космосі. Вивчення законів всесвіту, пізнання об'єктів сонячної системи відбувається в заняттях «Я познаю світ», а потім на заняттях з «Астрономії». Також важливим є те, що майбутні вчителі астрономії повинні оволодівати компетентностями в області комп'ютерно орієнтованих технологій, які використовуються при вивченні астрономії та методології її викладання.

Застосування сучасних технологій в процесі підготовки майбутніх фахівців в сфері вивчення астрономії суттєво підвищують рівень зацікавленості предметом у фокусі демонстрації досягнень в області дослідження космосу в комбінації з класичним навчальним матеріалом представленими у вигляді підручників, довідників з астрономії [1,2]. Певні аспекти такого інформаційного підходу були продемонстровані авторами в роботах [3,4]. Не висвітленим залишився матеріал пов'язаний з додатками придатними для роботи на комп'ютерах класу PC в середовищі Windows (або альтернативних операційних системах). На відмінну від портативних пристроїв, настільний комп'ютер має перевагу у більшому екрані, ширшому колі мультимедійних застосувань та зручнішому керуванні, що певним чином сприяє ефективнішому засвоєнню матеріалу, що відповідає можливостям які надає персональний комп'ютер (ПК). В цій роботі буде здійснено огляд безкоштовних версії програм для ПК, використання яких не вимагає окремого ліцензування в закладах освіти.

**Безкоштовні програми з Астрономії.** Мульти-платформна (Windows, MacOS, Linux) програма *KStars* (остання версія 3.6.9 випущена 1 квітня 2024) допоможе вивчати зоряне небо, здійснюючі рух у лінійці часу назад та вперед, змінювати положення точки спостереження за зоряним небом та багато-багато іншого. Нижче наведено перелік можливостей програми, який весь час поповнюється внаслідок оновлення версій:

- дозволяє змінювати точку спостереження за географічними координатами, щоб побачити, який має вигляд небо у залежності від широти;
- побачити та зрозуміти різницю між зоряними і сонячними днями, змінюючи швидкість симуляції;
- прикріпивши треки до планет і встановивши високу швидкість моделювання, можна побачити їх траєкторії, а саме коли вони здійснюють опозитний рух в системі;

- дослідити різні системи координат, здійснюючи перехід від екваторіальних та горизонтальних координат, та застосовувати перетворення координат в астрокалькуляторі *KStars*;
- отримувати інформацію про різні тематичні новини з астрономії та астрофізики за допомогою проекту *AstroInfo* (частина Довідника *KStars*, доступного через меню Довідка);
- використати ефекти зміщення часу на декілька тисяч років вперед, щоб спостерігати за впливом явища прецесії;
- спостерігати за експериментом Еддінгтона активуючи ефекти гравітаційного лінзування в колі Сонця;
- існує можливість переходу до екваторіальних координат, встановити швидкість моделювання на 1 рік, відмітити зірку (двічі «клацнути» по її зображенні), щоб утримати її у фокусі, і збільшивши масштаб, спостерігати за ефектом аберації світла;
- при переключенні на екваторіальні координати, можемо встановити швидкість моделювання на 1 рік, та двічі «клацнувши» на порожній області, побачити ефекти прецесії та нутації;
- змінюючи час на далекий майбутній, існує можливість спостереження за тим, як змінюються сузір'я через переміщення зірок у космічному просторі (наприклад, помітні у сузір'ї Близнюки);
- використання правої кнопки миші на будь-якому об'єкті, ініціює відкриття вікна Деталі, для отримання інформації у вигляді інтернет-ресурсів, зображень і професійних оглядів;
- отримати детальну картину об'єкту космосу при огляді неба внаслідок застосування контекстного меню при натисненні правої кнопки миші;
- можливість керування персональною обсерваторією в контексті широкої підтримки *KStars* для астрономічного обладнання;
- *KStars* представляє та деталізує точне зображення неба з планетами, супутниками планет-гігантів, сотнями мільйонів зірок, тисячі об'єктів далекого неба включаючи астероїди та комети;
- проєкт *AstroInfo* містить корисні інформаційні посилання на зовнішні сторінки (рис. 1);
- пропонує зосередитись користувачеві на цікавих астрономічних об'єктах, які можна спостерігати з існуючого обладнання та в умовах візуального спостереження за небом у будь-який період ночі.

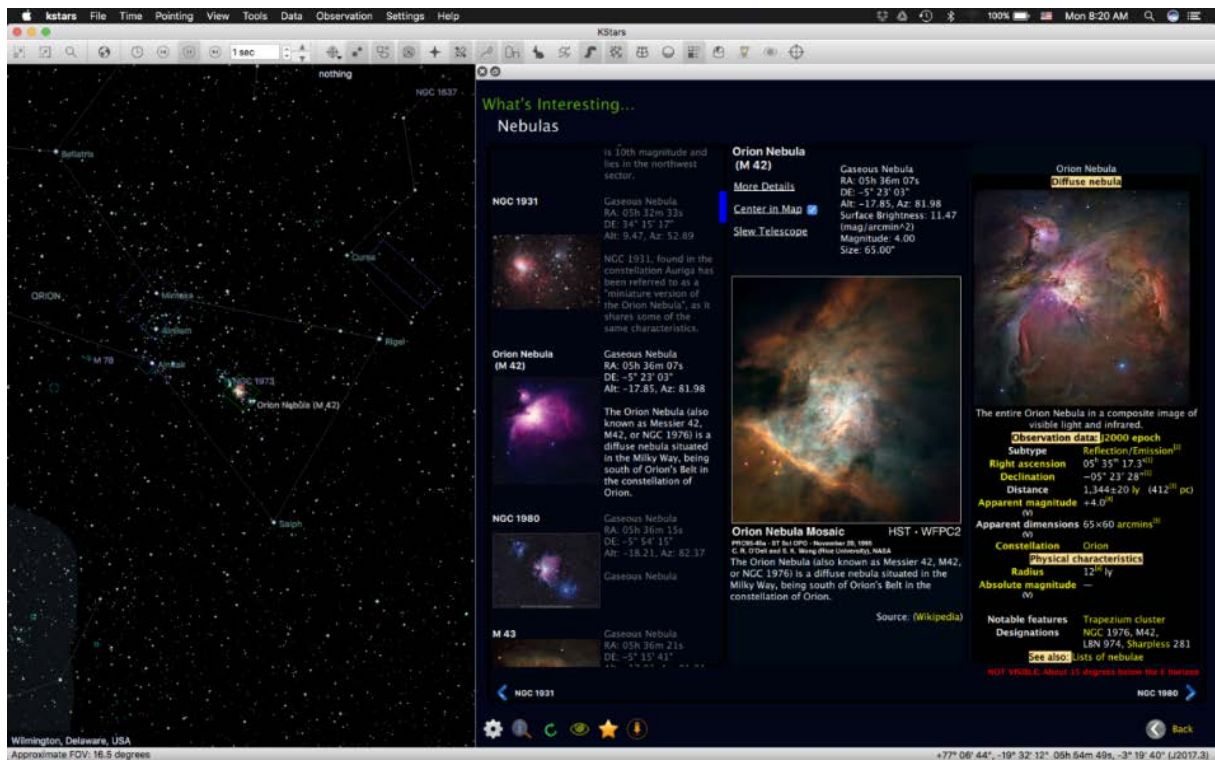


Рис. 1. Інструмент «Цікаві об'єкти» програми *KStars*. Дає змогу організувати доступ до декількох інтернет-ресурсів для отримання відомостей, зображень і даних

Програма *KStars* містить певні можливості, які відсутні в інших безкоштовних аналогічних програмах:

- представляє зображення неба за допомогою оцифрованих оглядів неба та з інтернету у цілому;
- містить можливість доступу до інформаційних ресурсів через небесні об'єкти з *KStars*;
- формує високоякісні зоряні мапи з можливостями легкого їх налаштування та декількома представленнями з різними рівнями масштабування для обраного або обраних об'єктів;

- надає можливість обробки зображень при використанні вбудованого астрофотографічного пакету *Ekos*;
- дає змогу здійснювати прогнозування та реалізовувати опції спостереження і зберігання *DSS*-зображення в автономному режимі з використанням функції Планувальника спостережень та операції "Виконати";
- моделює позицію супутників Юпітера на майбутній та минулий час та будує їх так, як це представлено у професійних астрономічних розрахункових таблицях;
- має можливість імпортувати каталоги з *KStars* до інших додатків;
- за допомогою Астро-Калькулятора надає доступ до деяких внутрішніх розрахунків *KStars*;
- під час запуску програми *KStars* вона може автоматично сповіщати про нові наднові;
- надає можливість відобразити небесну сферу на плоскому екрані використовуючи любий метод проекції карти зоряного неба.

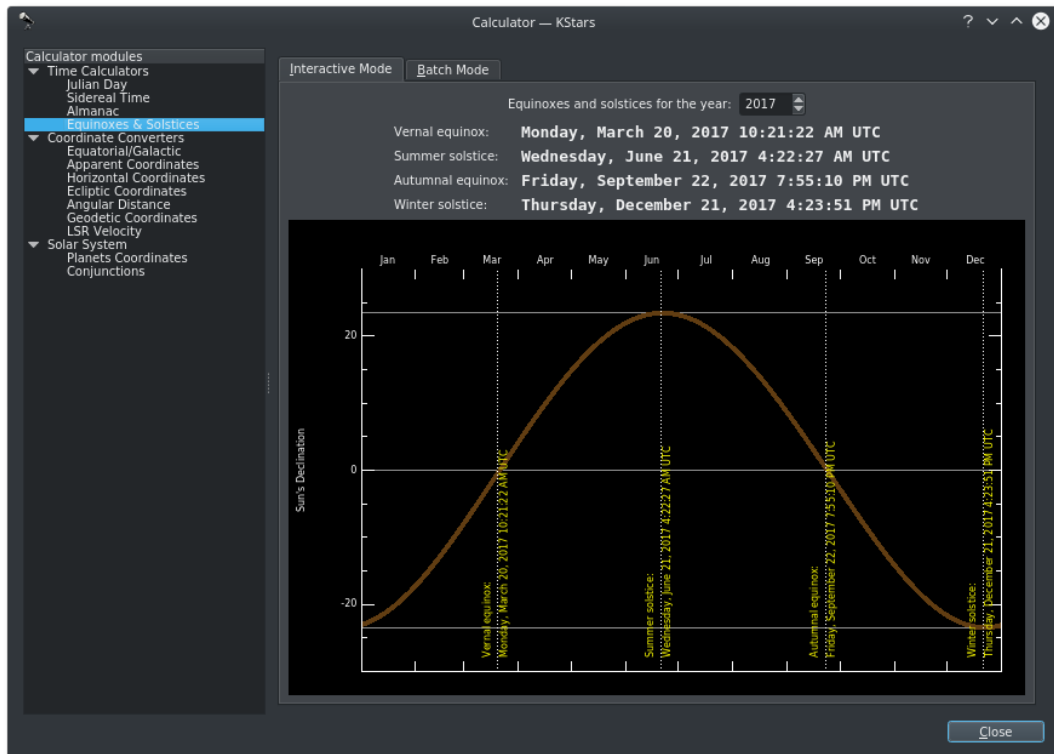


Рис. 2. Астрокалькулятор *KStars* – широкий набір інструментів для прогнозування зміни позицій планет з часом, виконання обчислень, тощо

*KStars* підтримує значну кількість астрономічних засобів спостереження космосу, використанням бібліотеки *INDI*. Це здійснюється такими засобами – телескопами, ПЗЗ, фокусаторами, фільтрами, куполами, спектрометрами та допоміжними пристроями. Використання власної підтримки *INDI* у *KStars* означає, що користувач має повний контроль над існуючими інструментами також і на платформі *Linux*. На додаток до підтримки астрономічних пристроїв, *KStars* містить додаток *Ekos* – повний інструмент для астрофотографії. При його використанні існує можливість вирівнювання і позиціонування телескопу, фокусування ПЗЗ і отримання знімків за допомогою простого інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу. Інструмент *KStars FITS Viewer* – простий переглядач *FITS*-зображень, здатний виявляти зорі та застосовувати різні фільтри, для допомоги у астрофотографічних розв'язках. Функціональні додатки *KStars/INDI* можуть бути корисними як для аматорів, так і для професійних астрономів.

Наступним відомим продуктом у вивчені астрономії є *Stellarium* [6]. *Stellarium* – вільний планетарій для комп'ютера з відкритим вихідним кодом, придатним для роботи і на мобільних платформах. Він відображає реалістичне небо в 3D таким, яким людина бачить його неозброєним оком, у бінокль або телескоп. Програма повністю локалізована українською. Додаток обчислює положення Сонця і Місяця, планет і зірок, а також малює, як виглядатиме небо для спостерігача у залежності від його місцезнаходження та часу. *Stellarium* може демонструвати сузір'я і моделювати астрономічні явища, такі як метеоритні дощі, комети, сонячні або місячні затемнення.

Фактично, *Stellarium* можна використовувати як освітній інструмент при вивченні нічного неба (навіть і умовно «денного»), як допоміжний засіб для астрономів-аматорів, які бажають здійснювати спостереження або навіть вивезти перемістити свої телескопи для зручнішого спостереження об'єктів. Завдяки високій якості графіки, яку створює *Stellarium*, її використовують у деяких справжніх проекторах для планетаріїв та музейних проекторах з функцією доповненої реальності. Групи аматорів-астрономів використовують його для створення небесних карт для опису регіонів неба у статтях для інформаційних бюлетенів і журналів. Головні можливості програми: стандартний каталог містить понад 600000 зірок, додаткові каталоги з більш ніж 177 мільйонами зірок, стандартний каталог містить понад 80000 об'єктів глибокого космосу, додатковий каталог із більш ніж мільйоном об'єктів глибокого космосу, зоряні скупчення та зображення сузір'їв, сузір'я понад 40 різних культур, календарі понад 35 різних культур, зображення туманностей (повний каталог *Messier*), реалістичний Чумацький Шлях (рис. 3), дуже реалістична атмосфера, заходи сонця і світанки, планети та їхні супутники. Функціонал програми: потужне збільшення, контроль часових проміжків, формування проекції по типу "риб'яче око" для проектування зображень на купол планетарію, сферична дзеркальна проекція для певних видів куполів (низько бюджетних), управління телескопом, відображення кількох координатних сіток, прецесійні кола, мерехтіння зірок, метеори, хвости комет, симуляція затемнень, симуляція наднових і нових, місця розташування екзопланет, 3D пейзажі та ін.

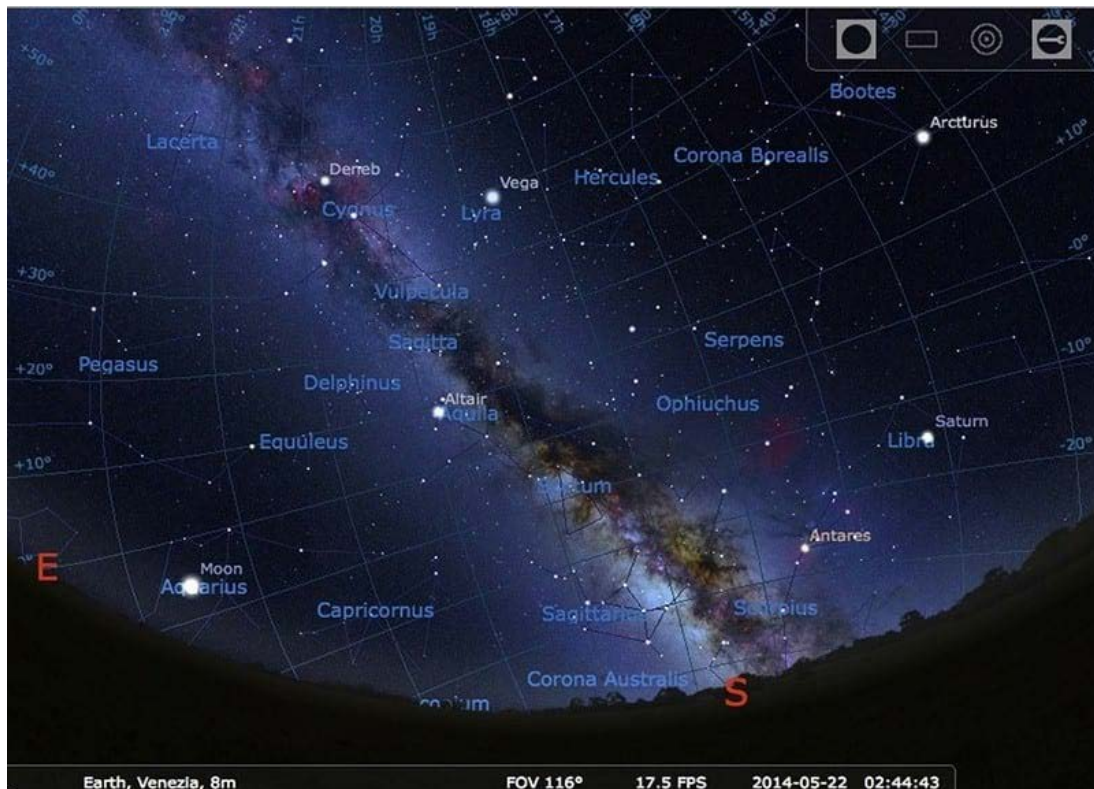


Рис. 3. *Stellarium*. Вид зоряного неба з чумацьким шляхом та зірками

*Celestia* – тривимірна астрономічна програма з вільним доступом для платформ *Microsoft Windows*, *Linux* і *Mac OS X*. Програма, ґрунтуючись на каталозі *HIPPARCOS*, дає змогу користувачеві розглядати об'єкти розмірами від штучних супутників до повних галактик у трьох вимірах, використовуючи технологію *OpenGL*. Користувач може вільно «подорожувати» Всесвітом, на відміну від більшості інших віртуальних планетаріїв.

НАСА і ЄКА використовують *Celestia* в освітніх програмах, а також як інтерфейс для програм аналізу траєкторій. *Celestia* відображає близько 120 000 зірок, орієнтуючись за каталогом *HIPPARCOS*. Вона використовує точну систему розрахунку траєкторій *VSOP87*, завдяки чому можна легко побачити певні сонячні та місячні затемнення, відобразити орбіти планет та їхніх великих супутників. За допомогою звичайних Кеплерових елементів орбіти відображаються карликові планети, малі супутники планет, астероїди, комети, екзопланети та космічні апарати.

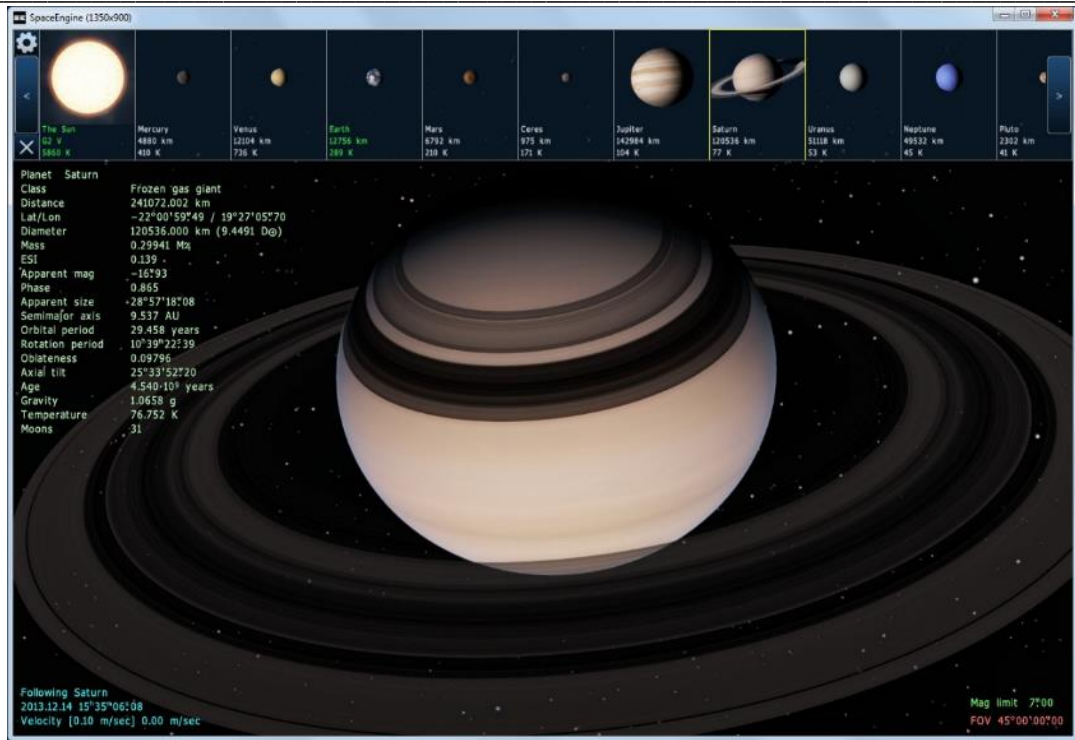


Рис 4. Планети сонячної системи в програмі Celestia

*Celestia* дає змогу здійснювати умовні польоти віртуальним Всесвітом за допомогою простих елементів управління, і застосовуючи набір гарячих клавіш. Рухатись можливо у широкому діапазоні швидкостей: від 0,001 м/с до кількох мільйонів світлових років за секунду. Користувачі можуть розглянути будь-який об'єкт під будь-яким кутом. Можна просто спостерігати за їх рухом, стежити або синхронно з ними обертається.

У *Celestia* моделюється будь-який час у минулому, сьогодні та майбутньому, аж до двох мільярдів років у різні боки від Різдва Христового, проте точність орбіт зберігається у проміжку від кількох тисяч років до наших днів (рис. 5). Час також можна змінити на зворотній або зовсім зупинити.

При фокусуванні на об'єкті відображається його основна інформація про розміри, відстань від центрального об'єкта системи (якщо є такі), температура поверхні, а також існуюча відстань від користувача до нього. На планетах і супутниках можуть також відображатись назви важливих об'єктів поверхні. При цьому виконується візуалізація атмосфери планет та їх супутників, можна спостерігати за динамікою руху хмар, бачити тіні при затемненнях, спостерігати за заходами сонця та світанками, масштабні структури поверхонь об'єктів, планетарні кільця. У програмі реалізовано спостереження за нічним світлом міст на Землі, лінії сузір'їв та їх межі.

Для того, щоб учнів зацікавити астрономією (або в рамках астрономічних гуртків або через *STEM* заняття), дуже корисними є ресурси, які в ігровій формі дають можливість ознайомитись з планетами, сузір'ями та іншими дивовижними об'єктами зоряного неба. Однією з подібних програм є *Orbiter* [6].

*Orbiter* – безкоштовний реалістичний фізичний симулятор для Windows, що дає змогу в ігровій формі досліджувати об'єкти Сонячної системи на основі десятків моделей реальних носіїв, кораблів і станцій: Восток/Восход, *Mercury*, Союз, *Gemini*, *Saturn/Apollo*, *Skylab*, Спейс Шаттл, Енергія/Буран, Мир, Салют, МКС із залученням безлічі віртуальних кораблів і сценаріїв. Програма використовує закони класичної механіки для моделювання руху космічних апаратів та інших об'єктів, які входять до складу Сонячної системи. Симулятор дає змогу відтворити та спостерігати за історичними космічними польотами, та надає змогу досягти тих ділянок Сонячної системи, які не були навіть досліджені на сьогоднішній час.

Користувач може здійснювати перельоти між планетами та орбітальними станціями в Сонячній системі. *Orbiter* вирізняється ретельно опрацьованою реалістичною фізикою руху об'єктів і розширеними можливостями налаштування та написання різних додатків (модифікацій). Програма застосовує різні види фізичних моделі для представлення руху планет, динаміки переміщення кораблів та явищ в атмосфері.

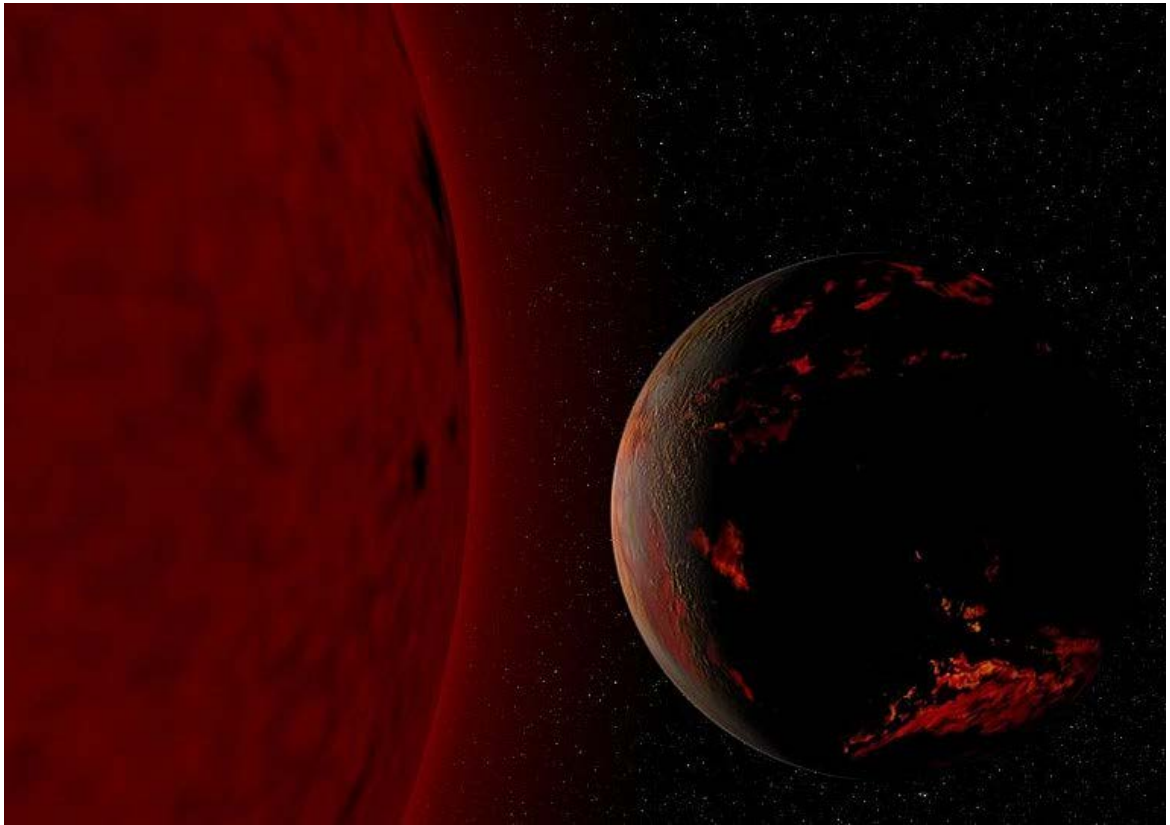


Рис. 5. Модель Землі і Сонця, що стало червоним гігантом через 5-7 мільярдів років.  
Середовище *Celestia*

Спостерігач може відчувати себе майбутнім астронавтом здійснюючі віртуальні перельоти за допомогою цієї програми, та в ігровій формі досліджувати планети нашої Сонячної системи (рис. 6).

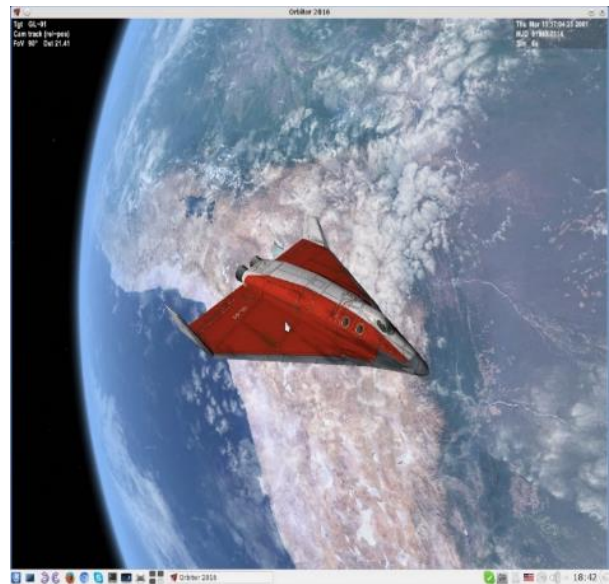
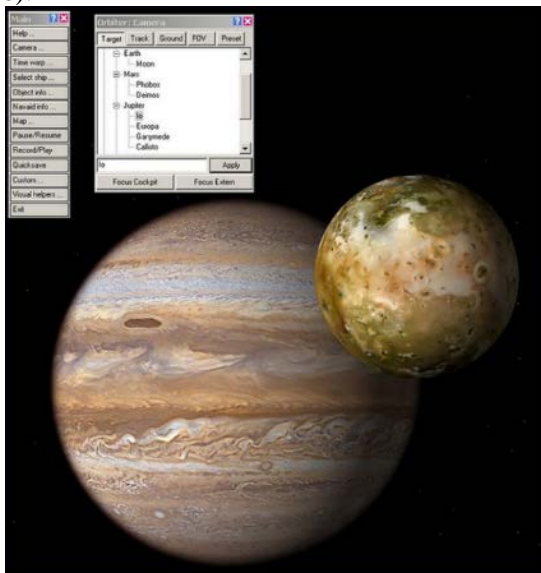


Рис. 6. Приклади інтерфейсу *Orbiter*

**Висновки.** Аналіз існуючих програмних засобів на платформі *Windows* в області вивчення Астрономії дає широкий вибір продуктів для застосування в навчальному процесі, причому значна кількість на безкоштовній основі. Існує доволі широкий вибір програм різного рівня використання, як для аматорів, так і для тих хто знайомий з основами існування космічних об'єктів, причому деякі програми мають аналогічні версії для мобільної основи (*Stellarium*), що є корисним для певного класу користувачів. Очевидно, що використання таких ресурсів в рамках астрономічних гуртків або через *STEM* занять сприятимуть популяризації вивчення курсу «Астрономії».

© О.О. Молнар, В.В. Герасимов, Ю.Ю. Жигуц



**Список літератури:**

1. Застосування сучасних інтерактивних систем та додатків у вивченні астрономії в школі / Герасимов В.В., Молнар О.О., Рейс Т.Т. // Міжнародний науковий журнал «Освіта і наука». Випуск 2(35), 2023, С. 20-34.
2. Kresyak M., Molnar A., Gerasimov V. Augmented reality in astronomy learning / Miroslava Kresyak, Aexander Molnar, Vitaly Gerasimov // Monografia: Przetwarzanie, transmisja i bezpieczenstwo informacji, I Wydawnictwo naukowe Uniwersytetu Bielsko-Bialskiego, 2023, Pp.183-188. SBN 978-83-67652-12-4.
3. Астрономія: підручник для загальноосвітніх навч. закл.: рівень стандарту, академічний рівень / М. П. Пришляк; ред. Яцків Я. С. - Харків: Ранок, 2011. - 160 с.
4. Загальна астрономія : навч. посіб. / О. О. Панько, О. Г. Сергієнко; Одеський національний університет імені І. І. Мечникова. - Одеса : ОНУ, 2020. - 126 с.
5. Інформаційний ресурс <https://kstars.kde.org/uk/>.
6. Інформаційний ресурс <https://stellarium.org>.
7. Інформаційний ресурс <https://celestiaproject.space/>.
8. Інформаційний ресурс <http://orbit.medphys.ucl.ac.uk/download.html>.

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

**Р. М. Пастернак**

*Луцький національний технічний університет*

## КОСМОЛОГІЧНІ В'ЯЗИ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ КОРПУСКУЛЯРНОЇ ТА ХВИЛЬОВОЇ МЕХАНІК

*Запропоновано модель релятивістської корпускулярної механіки у 4-вимірному евклідовому просторі, де абсолютна величина швидкості усіх частинок однакова та незмінна, а час співставний із метричною мірою довжин ділянок 4-траєкторій частинок. Оптимізовано набір космологічних в'язей та використано відмінне від класичного означення інерційної системи. У релятивістській хвильовій механіці сталу Планка пов'язано зі швидкістю розширення Всесвіту.*

*Ключові слова:* космологічні в'язі, інерційна космічна система, неспостережувані частинки.

**R. Pasternak**

## COSMOLOGICAL CONNECTIONS OF RELATIVISTIC PARTICLE AND WAVE MECHANICS

*The model of relativistic corpuscular mechanics is proposed in 4-dimensional Euclidean space, where the absolute value of the speed of all particles is the same and unchanged, and time is comparable to the metric measure of the lengths of plots of 4-trajectories of particles. A set of cosmological knitters is optimized and different from the classic definition of the inertial system. In a relativist wave mechanics, a steel bar is associated with the speed of expansion of the universe.*

*Key words:* cosmological bonds, inertial cosmic frame of reference, unobservable particles.

**Постановка завдання.** Використовуючи метод абдукції оптимізувати кількість в'язей (принципів) релятивістської [1] та хвильової механік [2] в евклідовому 4-просторі центральносиметричного Всесвіту, в рамках апарату механіки ввести трактування ходу часу [3], пов'язати сталу Планка [4] із величиною швидкості розширення Всесвіту [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Побудовані на сумісному виконанні законів збереження енергії та імпульсу частинок апарати релятивістської корпускулярної механіки у просторі-часі [1] чи хвильової у просторі кватерніонів [2] використовують 4-простори. В основу апарату ньютоніоподібної релятивістської корпускулярної механіки незмінної маси покладено класичне диференціальне означення енергії  $E$  частинки відповідно до формули Ж. Понселе  $dE = (\vec{f}, \vec{v})dt$ , де  $\vec{f}$  – 3-вектор сили,  $\vec{v}$  – 3-вектор швидкості частинки, а  $dt$  – приріст координатного часу (четвертого виміру) і запропонований А. Айнштайном та А. Пуанкаре релятивістський 3-імпульс  $\vec{p} = m_0\gamma\vec{v}$ , де  $\gamma = (1 - (v/c)^2)^{-1/2}$  – Лоренц-фактор,  $m_0$  – маса спокою частинки, а  $c$  – швидкість поширення світла у вакуумі [1]. З метою симуляції метрики 4-вимірного простору в (3+1)-вимірному просторі-часі Г. Мінковський запропонував фізично необґрунтоване приєднання Лоренц-фактора  $\gamma$  у формулі для релятивістського імпульсу  $\vec{p} = m_0\gamma\vec{v}$  до швидкості частинки  $\vec{p} = m_0(\gamma\vec{v})$ , замість  $\vec{p} = (m_0\gamma)\vec{v}$  [1], чим порушив принцип А. Айнштейна  $E = c^2m$  еквівалентності її маси  $m$  та енергії  $E$ . (Інтерпретація наступних перетворень фізичних змінних суттєво вплинула на область застосування цього апарату [6].) Натомість апарат релятивістської хвильової механіки П. Дірака [2] використовує інтегральне означення енергії відповідно до 4-вимірного гамільтоніану частинки

$$E = cP = c(m_0^2c^2 + p^2)^{1/2},$$

де  $P$  – величина 4-імпульсу  $\vec{P}$  частинки в 4-просторі кватерніонів. Реальність фізичного існування четвертого виміру підтвердили астрономічні спостереження, що виявили темну холодну матерію та темну енергію [7], які неспостережувані (темні) у супутній з розширенням Всесвіту системі відліку (ССВ).

Висновки, зроблені на основі прецизійних вимірювань анізотропії космічного мікрохвильового фону [8] поглибили розуміння та вимагали змін класичного поняття інерційна система. У даній роботі запропоновано апарат механіки змінної маси в евклідовому 4-просторі [3] для моделювання поведінки всіх частинок (включно з темними) у Всесвіті.

Метою роботи є адаптація апаратної та інтерпретаційної складових релятивістських корпускулярної й хвильової механік до використання 4-вимірного евклідового простору з урахуванням неспостережуваних (темних) у ССВ частинок.

### 1. Космологічні в'язі корпускулярної механіки

1.1. *Перша космологічна в'язь.* Відповідно до принципів П. Дірака  $E = cP$  пропорційності енергії частинки величині її 4-імпульсу [2], А. Айнштейна еквівалентності маси частинки її енергії  $E = c^2 m$  [1] та розширеного на 4-простір принципу Л. Ейлера  $\vec{P} = m\vec{V}$  [3] можна побудувати модель, де величина 4-швидкостей усіх частинок у Всесвіті незмінна:

$$V = const = c. \quad (1)$$

У моделі [3] фундаментальна стала  $c$  відповідає величині швидкості розширення фронту 4-вимірного центральносиметричного Всесвіту, а частинки геометрично є нескінченними векторними кривими. Логічно допустити, що четвертий вимір Всесвіту заповнюють неспостережувані частинки [5], наприклад, нерухомого в інерційній ССВ ефіру Г.А. Лоренца [1], чи холодної темної матерії в  $\Lambda$ CDM-моделі Всесвіту [5]. Як наслідок (1), отримуємо, що:

- скаляри маси, енергії та величина 4-імпульсу лінійно пов'язані  $E = cP = c^2 m$  для усіх частинок;

- на відміну від координатного часу  $t$  ССВ [1] у Всесвіті його зміни співставні з приростами  $dR$  довжини 4-траєкторії частинки евклідового 4-простору [3] (перша космологічна в'язь)

$$dR = c dt, \quad (2)$$

де  $dt$  – зміна її параметру  $t$  (часу) [3]. При побудові апарату релятивістської корпускулярної механіки достатньо обмежитись лише умовою (1), принципами П. Дірака  $E = cP$ , Л. Ейлера  $\vec{P} = m\vec{V}$  і однією змінною – вектором  $\vec{P}$  4-імпульсу частинки.

1.2. *Системи координат у Всесвіті.* Для опису поведінки частинок, відповідно до симетрії великомасштабної структури центральносиметричного Всесвіту [5], зручно послуговуватися системою полярних координат, початок якої знаходиться в центрі симетрії Всесвіту, а напрями полярних осей кожної з координатних систем  $S$  збігаються з напрямками радіальних променів, що виходить з його центру симетрії. Останні будемо характеризувати одиничними напрямними 4-векторами  $\vec{\zeta}_s$ , тобто власними напрямками конкретних систем координат у Всесвіті (СКВ). Останні враховують умову (1) незмінності величини швидкості розширення фронту Всесвіту, а область дії СКВ обмежується космічними комірками [5].

Враховуючи умову (1), спостережувану  $\vec{v}$  та неспостережувану в ССВ  $\vec{v}_0$  складові векторів 4-швидкості  $\vec{V}$  у СКВ  $S$  зручно записувати з використанням полярного кута  $\alpha$  частинки, де  $\cos \alpha = (\vec{\zeta}_s, \vec{\xi})$  [3]:

$$\vec{v} = c \sin \alpha \vec{\tau}, \quad \vec{v}_0 = c \cos \alpha \vec{\zeta}_s. \quad (3)$$

Отже, величина неспостережуваної складової швидкості частинки пов'язана з величиною її спостережуваної складової:

$$v_0 = c \cos \alpha = c \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} = c \sqrt{1 - v^2 c^{-2}} = c \gamma^{-1}. \quad (4)$$

Відповідно до принципу суперпозиції, 4-імпульс  $\vec{P} = m\vec{V}$  довільної частинки буде векторною сумою спостережуваної в ССВ складової  $\vec{P}_\tau = p\vec{\tau} = m\nu\vec{\tau}$ , де  $p$  – величина релятивістського 3-імпульсу частинки [1],  $\nu$  – величина спостережуваної складової 4-швидкості  $\vec{V}$ , а  $\vec{\tau}$  – одиничний 4-вектор, що ортогональний до власного вектора  $\vec{\zeta}_s$  СКВ  $S$  [3]

$$(\vec{\zeta}_s, \vec{\tau}) = 0, \quad (5)$$

та власного імпульсу  $\vec{P}_s = p_0 \vec{\zeta}_s = m\nu_0 \vec{\zeta}_s$  частинки в СКВ  $S$ , де  $p_0$  – величина власного імпульсу:

$$P_\xi = \vec{P}_s + \vec{P}_\tau = m\nu_0 \vec{\zeta}_s + m\nu \vec{\tau}. \quad (6)$$

Тут  $\vec{\xi}$  – одиничний 4-вектор напрями поширення частинки в СКВ.

1.3. *Друга космологічна в'язь.* В основу класичного означення інерційної системи покладено відсутність пришвидшення тіла відліку [1]. Оскільки в апараті 4-вимірної механіки тілом відліку виступає нерухомий у СКВ Всесвіт, як ціле, означення інерційної системи необхідно доозначити.

Відповідно до підходу Г.А. Лоренца існування неспостережуваного в ССВ нерухомого ефіру [1], умова інерційності кожної з СКВ вимагає незмінності вектора власного імпульсу частинок [3], що належать даній СКВ:

$$\vec{P}_s = p_0 \vec{\zeta}_s = \text{const} \quad \forall t \quad (7)$$

(друга космологічна в'язь). Аналогічне означення інерційної системи використовував П. Дірак [2].) Прецизійні вимірювання анізотропії космічного мікрохвильового фону [8] підтвердили валідність умови (7). Якщо класичне означення інерційної системи допускає перетворення Г.А. Лоренца для усіх частинок [1] (крім темних), то в СКВ, де власний напрям фіксований радіальними променями Всесвіту, перетворення Г.А. Лоренца для частинок з  $p_0 \neq 0$  незастосовні: переходити від однієї СКВ до іншої можуть лише частинки з  $p_0 = 0$  (фотони).

1.4. *Власна маса.* Поширимо рівняння руху Р. Декарта [1] на евклідов 4-простір  $d\vec{P} = \vec{F}dt$ , увівши поняття 4-сили  $\vec{F}$ . Відповідно до (7) складова 4-сили вздовж власного напрямку інерційної системи дорівнює нулю, тому  $\vec{F} = (0, \vec{f})$ , а робота сили на переміщенні  $dE = (\vec{F}, d\vec{R}) = (\vec{f}, \vec{v})dt$  збігається з класичною формулою Ж. Понселе [1] (у [3] показано, що формула Ж. Понселе є наслідком рівняння руху в механіці змінної маси).

З умови (7) другої космологічної в'язі випливає зв'язок

$$p_0 = m v_0 = m_0 c = \text{const}, \quad (8)$$

де  $m_0$  – власна (мінімальна) маса частинки (у динамічному Всесвіті поняття маси спокою відсутнє). Враховуючи (8), деталізуємо принцип Дірака

$$E = cP = c^2 m = \sqrt{(m v_0)^2 + (m \vec{v})^2} = c \sqrt{(m_0 c)^2 + (m \vec{v})^2}, \quad (9)$$

що збігається зі старанно перевіреним виразом для гамільтоніану частинки [7], тобто сумісний з означенням (7) інерційної системи (та вступає в протиріччя з її класичним означенням).

Підстановкою (4) у (8) отримуємо явну залежність власної маси частинки  $m_0$  від її маси  $m$ :

$$m_0 = m \gamma^{-1}. \quad (10)$$

(Поняття власної маси має виключне значення при розгляді властивостей частинок у гравітаційному полі [6].) Незважаючи на відсутність у фотона власної маси, відповідно до гамільтоніану та принципу П. Дірака, фотон має енергію  $E = cp$  та масу  $m = c^{-1}p$ .

## 2. Космологічні в'язі хвильової механіки

2.1. *Принцип М. Планка.* На відміну від векторних кривих корпускулярної, у хвильовій механіці [4] частинки описують хвильовими пакетами. В її основу покладено розширений на 4-простір принцип М. Планка пропорційності енергії частинки величині її циклічної частоти  $\Omega$  [2]:

$$E = \hbar \Omega. \quad (11)$$

Тут  $\hbar = \text{const}$  – стала П. Дірака [2]. Помноживши зв'язок (11) на одиничний 4-вектор  $\vec{\zeta}$  напрямку поширення частинки в СКВ  $\mathcal{S}$  та враховуючи принцип П. Дірака  $E = cP$  [2], отримуємо формулу для зв'язку вектора 4-імпульсу частинки з 4-вектором її циклічної частоти [4]:

$$\vec{P} = \hbar c^{-1} \vec{\Omega}. \quad (12)$$

Аналогічно до розкладу вектора 4-імпульсу  $\vec{P}$  на власну  $\vec{P}_0$  та спостережувану  $\vec{p}$  складові в інерційній СКВ  $\mathcal{S}$  корпускулярної механіки, введемо поняття 4-векторів  $\vec{\Omega}_0$  неспостережуваної та  $\vec{\omega}$  спостережуваної складових 4-вектора  $\vec{\Omega} = \Omega \vec{\zeta} = \Omega_0 \vec{\zeta}_s + \omega \vec{\tau}$ , причому  $\Omega^2 = \Omega_0^2 + \omega^2$ . Для порівняння з корпускулярною механікою, власний імпульс буде  $\vec{P}_0 = m_0 c \vec{\zeta}_s = \hbar c^{-1} \vec{\Omega}_0$ , а спостережуваний  $\vec{p} = m \vec{v} = (\hbar/c) \vec{\omega}$ . Оскільки маса  $m$  частинки залежить від швидкості  $v$ , однозначний зв'язок між масою  $m$  та частотою  $\Omega$  можна отримати лише для власного імпульсу частинки (де відсутнє поняття величини спостережуваної складової швидкості  $v$ ). Наприклад, для електрона частота  $\Omega_0 = 7,76 \cdot 10^{20}$  рад/с, якій відповідає довжина неспостережуваної (комптонівської) довжини хвилі  $\Lambda_0 = 3,86 \cdot 10^{-13}$  м (класичний радіус електрона  $4,458 \cdot 10^{-16}$  м, а експериментально знайдений радіус протона –  $8,418 \cdot 10^{-16}$  м [7]).

2.2. *Канонічно-спряжені величини та одиниці їхнього вимірювання.* Зважаючи, що в інерційній системі власний імпульс частинок незмінний, при розгляді задач динаміки у хвильовій механіці обмежуються використанням лише спостережуваного підпростору та спостережуваної складової  $\omega$  частоти  $\Omega$ , а в ССВ замість єдиного зв'язку (12) використовують окремі формулювання для часової та просторової змінних

$$ET_v = h; \quad p\lambda = h, \quad (13)$$

де  $h = 2\pi\hbar = \text{const}$  – стала Планка,  $T_v = 2\pi/\omega$  – спостережуваний період коливань, а  $\lambda = cT_v$  – довжина хвилі у спостережуваному підпросторі. Якщо вибрати одиниці вимірювання змінних так, щоб  $c = h = 1$  (безрозмірні одиниці), зв'язки (13) отримають вигляд  $ET_v = 1$  та  $p\lambda = 1$ , де одиниця вимірювання енергії обернена до одиниці вимірювання часу, а одиниця вимірювання імпульсу обернена до одиниці вимірювання довжини [2]. Такі змінні та їхні одиниці вимірювання у хвильовій механіці називають канонічно-спряженими [4].

Отже, усі одиниці вимірювання хвильової механіки можна звести до двох груп канонічно-спряжених, де одиниці вимірювання енергетичних характеристик (енергії, імпульсу) обернені до одиниць вимірювання просторових (довжини, часу). (Використання канонічно-спряжених величин зумовило перехід апарату релятивістської хвильової механіки від 4-вимірному евклідовому до гіперкомплексного 4-простору кватерніонів В. Гамільтона [2], де визначено поняття оберненого кватерніона.)

Незважаючи на принципову відсутність у хвильовій механіці поняття маси, у SI величину сталої Планка означають за допомогою трьох одиниць вимірювання: довжини, часу та маси [9]. Зважаючи на канонічну спряженість пар одиниць вимірювання, у хвильовій механіці можна виключити надлишкове поняття маси. Тоді в системі SI [9] отримаємо зв'язок між  $c$  та  $\hbar$ :

$$\hbar = c^{-4}. \quad (14)$$

2.3. *Принцип невизначеності В. Гайзенберга.* На відміну від корпускулярної механіки, де частинки є нескінченними векторними кривими, у хвильовій механіці цуги хвиль мають скінченну довжину, внаслідок чого їхні хвильові функції неможливо описати однією частотою  $\omega$ , а доводиться використовувати смугу частот  $\langle \omega \rangle \pm \Delta\omega$ . Для порівняння хвильових властивостей частинок з корпускулярними, В. Гайзенберг запропонував використовувати середні значення частоти  $\langle \omega \rangle$  та середні значення енергії  $\langle E \rangle$  хвильового пакету частинки, обов'язково супроводжуючи їх середньоквадратичними відхиленнями  $\Delta\omega$  і  $\Delta E$  [4]. Отримане методами хвильової механіки співвідношення невизначеностей стверджує [4], що добуток невизначеностей енергії  $\Delta E$  частинки на невизначеність тривалості  $\Delta\tau$  цугу хвиль задовольняє співвідношення:

$$\Delta E \Delta\tau \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (15)$$

Зважаючи на принцип Дірака, запишемо аналогічне співвідношення для невизначеності  $\Delta p$  величини імпульсу  $p$  та невизначеності  $\Delta q$  координати  $q$  частинки у 3-просторі ССВ:

$$\Delta q \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (16)$$

Наприклад, при випромінюванні світла в оптичному діапазоні (з енергією  $\langle E \rangle \approx 2,5 \text{ eV} = 4 \cdot 10^{-19}$  Дж) природна довжина  $\tau$  цугу хвиль за нормальних умов (невизначеність координати) складає біля 3 м, а невизначеність часу випромінювання  $\Delta t = \tau \approx 10^{-8}$  с [10]. Відповідно до (15), відносна природна невизначеність енергії фотона складає  $\Delta E/E \approx 10^{-7}$ . Шляхом компресії [10] цугу хвиль вдається отримати піко-, фемпто- та навіть аттосекундні імпульси (тривалістю біля  $10^{-17}$  с), для яких, відповідно до (15),  $\Delta E/E > 1$ .

З іншого боку, створюючи спеціальні умови для усунення впливів фононної взаємодії та енергії віддачі (явище Р.Л. Мессбауера резонансного поглинання ядерних  $\gamma$ -квантів [1]), відносну невизначеність енергії частинки можна зменшити до  $\Delta E/E \approx 10^{-17}$  [1].

Засобами хвильової механіки показано, що знак рівності в (15) та (16) задовольняється лише для конкретного розподілу власної функції частинки (гаусової функції похибок [4]). Оскільки у хвильовій механіці визначальними є не окремо енергія та тривалість процесу, (чи імпульс та

хвильовий вектор), а їхній добуток, розклад у збіжний ряд однієї зі спряжених величин (просторової) призводить до появи розбіжного ряду для спряженої величини (енергетичної). Хоча неможливо побудувати хвильову функцію так, щоб вона одночасно визначала обидві канонічно-спряжені величини, в експериментах з потоками частинок їх можна достатньо точно визначати незалежно.

Тобто назване вище обмеження можна обійти процедурою перенормування [11] – підстановкою експериментально знайденого значення спряженої величини.

2.4. Віртуальні еталони одиниць вимірювання в системі SI. Відповідно до рекомендацій Міжнародного комітету мір і ваг [9] для юстування приладів вимірювання часу замість матеріальних еталонів довжини та маси використовують їхні віртуальні цифрові, де є лише одна основна одиниця – секунда, якій відповідає частота 9192631770 Гц (точно) надтонкого розщеплення основного стану атому цезію-133 [9], а решта похідні. Так, одиницю вимірювання довжини пов'язують з одиницею вимірювання часу відповідно до умови (1), де  $c = 299792458$  м/с (точно), а одиницю вимірювання маси – відповідно до сталої Планка [9]. Комітет з даних для науки і техніки рекомендував використовувати значення сталої Планка  $h = 6.62606957 \pm 4.4 \cdot 10^{-34}$  Дж·с [9], що отримане усередненням вимірів відповідно до декількох методик: ватових терезів, розсіяння рентгенівських променів, сталої Дірака, магнітного резонансу та сталої Фарадея.

2.5. Причини розбіжностей між  $\hbar$  та  $\hbar^*$ . Підставивши табличне значення  $c$  у (14), отримаємо  $\hbar^* = 1,23799 \cdot 10^{-34}$  Дж·с, що на 17% більше від табличного значення  $\hbar = 1,054571817 \cdot 10^{-34}$  Дж·с [9]. Причинами розбіжностей між експериментально помірним значенням  $\hbar$  та отриманим  $\hbar^*$  за формулою (14) можуть бути впливи енергії віддачі при випромінювання фотонів, неточності вимірювання фундаментальної сталої  $c$ , вплив форми хвильового пакету, тощо, розгляд окремих з яких подано нижче.

2.5.1. Особливості взаємодії частинок. Нехай взаємодіють дві частинки з 4-імпульсами  $\vec{P}_1$  та  $\vec{P}_2$ , результатом якої могла б бути частинка з 4-імпульсом  $\vec{P}_3$ . Використовуючи закони збереження імпульсу та енергії (зважаючи на принцип Декарта  $E = cP$  та умову інерційності СКВ), запишемо:

$$\vec{P}_1 + \vec{P}_2 = \vec{P}_3; \quad P_1 + P_2 = P_3 \quad P_{01} + P_{02} = P_{03}. \quad (17)$$

Із (16) випливає, що спільне використання законів збереження імпульсу та енергії в евклідовому просторі для тривітного вузла взаємодії реалізувати неможливо. Загальна теорія відносності [5] для узгодження законів збереження в тривітковому вузлі взаємодії використовує криволінійний простір. Натомість в апараті релятивістської механіки змінної маси [3] запропоновано використовувати непланарні вузли взаємодії частинок в евклідовому 4-просторі, що містять не менше чотирьох віток (додаткова вітка – акцептор енергії). Так, процес випромінювання фотона можна представити схемою: збуджена частинка  $\rightarrow$  не збуджена частинка + фотон + фонон (енергію фону, тобто кінетичну енергію віддачі, не завжди враховують [1]).

Аналогічно, при поглинанні фотона його енергія йде не тільки на збудження атому, але й на надання йому додаткової кінетичної енергії [1]. Наприклад, для ефекту Дірака, з наведених вище числових значень для  $\hbar$  та  $\hbar^*$ , енергія фотона складе лише частину різниці енергій куперівської пари до та після випромінювання:

$$\hbar\omega = z(E_1 - E_2) = czp, \quad \text{де } z < 1. \quad (18)$$

Відповідно до (17), стала Дірака буде на коефіцієнт  $1/2$  більшою, ніж порохована без врахування енергії віддачі. Порівнюючи числові значення  $\hbar$  та  $\hbar^*$ , коефіцієнт  $z$  складе  $z = 0,852$ . У процесі випромінювання фотона може відбутись розпад куперівської пари, а енергія її зв'язку вплине на енергію випроміненого фотона. Не виключений також вплив невизначеностей В. Гайзенберга на результат вимірювання енергії фотона.

2.5.2. Вплив похибки вимірювання фундаментальної сталої  $c$ . У результаті прецизійних вимірювань анізотропії космічного мікрохвильового фону було виявлено пекулярну швидкість Сонячної системи, що становить  $v_p = (368 \pm 2)$  км/с [8], якій відповідає полярний кут  $1,22 \cdot 10^{-3}$  рад.

Отже, система відліку, пов'язана з Сонячною системою, не відповідає умові (7) інерційності. Відповідно до (3), фундаментальна стала  $c$  повинна бути більшою від помірної на Землі швидкості поширення світла у вакуумі, тобто  $2,997926839 \cdot 10^8$  м/с (відносна похибка складає  $\varepsilon = 7,5 \cdot 10^{-5}$ ). У

результаті вплив похибки вимірювання величини релятивістської космологічної в'язі (1) на значення  $\hbar$  не перевищує  $10^{-5}$ .

**Висновки.** З наведеного в першому розділі розгляду зв'язків між змінними механіки зроблено висновок, що апарат релятивістської механіки змінної маси можна будувати лише на основі першої космологічної в'язі в евклідовому 4-просторі інерційної космічної системи відліку та принципах П. Дірака і Л. Ейлера (постулати А. Айнштейна про світло відносяться лише до супутньої системи відліку з іншим означенням інерційної системи відліку).

У другому розділі показано, що основа апарату хвильової механіки відрізняється від основи апарату корпускулярної лише принципом М. Планка (замість Л. Ейлера). Звернено увагу, що рекомендована Міжнародним комітетом мір і ваг вимірність сталої Планка містить відсутнє у хвильовій механіці поняття маси. Для усунення неузгодженостей встановлено зв'язок сталої Планка з фундаментальною сталою  $c$ .

#### Література

- 1 Joos, G. Theoretical Physics, Dover Publications, New York, 1987, 885 p.
2. Dirac, P.A.M. Principles of Quantum Mechanics (4th ed.). Oxford science publications. 2008, 314 p.
3. Pasternak, R. Means of the restrictions elimination of the space-time apparatus in relativistic mechanics. Вісник ТНТУ, № 1 (89), 2018, с. 64-71.
4. Wit, B., Smith, J. Field theory in particle physics. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1986, 487 p.
5. Weinberg, S. Cosmology. Oxford University Press, New York, 2008, p.593.
6. Пастернак, Р. М. Релятивістські рівняння руху в потенціальному силовому полі. Комп'ютерно-інтегровані технології. №50, 2023, с. 90-94. DOI: <https://doi.org/0000-0001-9668-9161>.
7. Derdzinski, A. Geometry of the Standard Model of Elementary Particles. Springer-Verlag, Berlin, 1992, 197 p.
8. Smoot, G. F. UFN. 177, 12 (2007). <https://doi.org/10.3367/UFNr.0177.200712d.1294>.
9. The International System of Units (SI). <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.330-2019.pdf>
10. Steiner, R. L., Williams, E. R.; Liu, R., Newell, D. B. Uncertainty Improvements of the NIST Electronic Kilogram. IEEE Trans. Instrum. Meas. 56 (2), 2007, p. 592–596. <https://doi:10.1109/TIM.2007.890590>.
11. Demtröder, W. Laser spectroscopy. Springer-Verlag, Berlin,, 2003,963 p.
9. The International System of Units (SI). <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.330-2019.pdf>
10. Steiner, R. L., Williams, E. R.; Liu, R., Newell, D. B. Uncertainty Improvements of the NIST Electronic Kilogram. IEEE Trans. Instrum. Meas. 56 (2), 2007, p. 592–596. <https://doi:10.1109/TIM.2007.890590>.
11. Demtröder, W. Laser spectroscopy. Springer-Verlag, Berlin,, 2003,963 p.

**М. М. Фрідлянд**

*архітектор, ФОП, м. Запоріжжя, Україна*

### **ЗЕЛЕНІ ТЕХНОЛОГІЇ У СУЧАСНОМУ БУДІВНИЦТВІ: АНАЛІЗ ВІДНОВЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ СИСТЕМ**

*Зелені технології у будівництві набувають все більшого значення у сучасному світі, спонукаючи до переосмислення підходів до створення споруд. Це дослідження зосереджено на вивченні різноманітних аспектів використання зелених технологій, зокрема – їхнього впливу на енергоефективність та екологічну стійкість будівельних об'єктів. Вивчено використання екологічно чистих матеріалів у будівництві, розробку альтернативних джерел енергії, впровадження ефективних методів утилізації відходів та створення оптимальних систем опалення та охолодження. Розглянуто широкий спектр аспектів використання зелених технологій у будівництві й висвітлено ефективність та можливості використання екологічно чистих матеріалів (біорозкладних композитів, відновлюваних дерев'яних матеріалів та інших натуральних ресурсів). Зосереджено увагу на розвитку альтернативних джерел енергії (сонячна та вітрова енергія, геотермальні системи та інші інноваційні технології), які дозволяють забезпечувати будівлі чистою та ефективною енергією.*

*Розглянуто різноманітні методи утилізації відходів у будівництві, зокрема – переробку сміття, використання вторинних матеріалів та розробку систем водоочищення та вентиляції. Важливим аспектом є також аналіз оптимальних систем опалення та охолодження, включаючи використання випромінювальних поверхонь, теплових насосів та енергоефективних конструкцій. Висновки дослідження можуть слугувати основою для подальшого розвитку сталого будівництва та сприяти створенню енергоефективних та екологічно стійких споруд, що відповідають сучасним вимогам до житла та інфраструктури. Ця стаття може бути корисною різним зацікавленим сторонам: так, будівельні компанії та розробники зможуть залучити більше клієнтів і зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, використовуючи зелені технології; архітектори та дизайнери зможуть створювати більш стійкі та ефективні будівлі, відповідні сучасним екологічним стандартам; громадські організації та екологічні активісти можуть використовувати цю інформацію для просування сталого будівництва.*

*Ключові слова:* зелене будівництво, енергоефективність споруд, будівельні матеріали, оптимізація, енергозбереження, утилізація відходів, стале будівництво.

**M. Fridlyand**

### **GREEN TECHNOLOGIES IN MODERN CONSTRUCTION: ANALYSIS OF RENEWABLE MATERIALS, AND EFFICIENCY OF ENERGY-EFFICIENT SYSTEMS**

*Green technologies in construction are becoming increasingly important in the modern world, prompting a rethinking of approaches to the creation of buildings. This research focuses on the study of various aspects of the use of green technologies, in particular, their impact on energy efficiency and environmental sustainability of construction projects. The use of environmentally friendly materials in construction, the development of alternative energy sources, the introduction of effective waste management methods, and the creation of optimal heating and cooling systems are studied. A wide range of aspects of the use of green technologies in construction is considered, and the efficiency and possibilities of using environmentally friendly materials (biodegradable composites, renewable wood materials, and other natural resources) are highlighted. Attention is focused on the development of alternative energy sources (solar and wind energy, geothermal systems and other innovative technologies) that allow providing buildings with clean and efficient energy.*

*Various methods of waste management in construction are considered, including waste recycling, the use of secondary materials, and the development of water treatment and ventilation systems. An important aspect is also the analysis of optimal heating and cooling systems, including the use of radiant surfaces, heat pumps, and energy-efficient structures. The conclusions of the study can serve as a basis for further development of sustainable construction and contribute to the creation of energy-efficient and environmentally sustainable buildings that meet modern requirements for housing and infrastructure. This article can be useful for various stakeholders: construction companies and developers will be able to attract more customers and reduce their negative impact on the environment by using green technologies; architects and designers will be able to create more sustainable and efficient buildings that meet modern environmental standards; NGOs and environmental activists can use this information to promote sustainable construction.*

*Keywords:* green construction, energy efficiency of buildings, building materials, optimization, energy saving, waste management, sustainable construction.

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Сталий розвиток є стрижневою інтегрованою проблемою нашого часу, що детерміноване його актуальністю. Так, половина населення світу живе у мегаполісах (зокрема, таких, що швидко розвиваються), які, своєю чергою, споживають дві третини створюваної енергії й вироблять 70% викидів парникових відходів у світі. Відповідно, будівельна галузь набуває особливої значущості, стаючи одним з найбільших



забруднювачів навколишнього середовища з одночасним споживання величезної кількості ресурсів [11].

На сьогодні, турбота про екологію – це необхідність, яку усвідомлюють на найвищому рівні державної політики в більшості країн світу. Тому на одному рівні з «вимушеними» інноваціями в будівельній сфері, пов'язаними з різними обмеженнями (до прикладу, епідеміологічними), дедалі більшої популярності набуває «зелене» будівництво. «Зелене» будівництво (sustainable building) або стійка архітектура (sustainable architecture) – технологія зведення та експлуатації будівель з мінімальним впливом на навколишнє середовище завдяки ефективному і продуманому використанню матеріалів, енергії, простору та екосистеми загалом [14].

Зелена архітектура – метод мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище. За своєю природою, це інтегроване явище, у яке входить, з-поміж іншого, особлива філософія, що корелює з циркулярною економікою. Вищезазначена філософія розглядає природне середовище як джерело натхнення для створення екологічно безпечних просторів. «Зелені» будинки та споруди відрізняються одне від одного в різних регіонах і країнах, оскільки в процесі їх проєктування, побудови тощо актуалізовані кліматичні, культурні, економічні тощо особливості регіону.

При цьому зрозуміло, що основними науковими та практичними завданнями в сфері зеленого будівництва є розробка та впровадження технологій, які дозволять зменшити відходи та споживання ресурсів, підвищити енергоефективність будівель, а також мінімізувати їх вплив на природне середовище. Доцільно здійснювати постійний моніторинг і вдосконалення процесів будівництва та експлуатації будівель з метою мінімізації викидів та покращення екологічних характеристик об'єктів.

Відтак, ознаками, за якими будь-який будинок або споруда (житловий будинок, офіс, школа, склад тощо) може бути позиціоноване як «зелене» є: а) зведення до мінімуму енергоспоживання на всіх етапах життєвого циклу будинку, ефективне використання водних та інших ресурсів; б) інтеграція відновлюваних і низьковуглецевих технологій; в) зведення до мінімуму відходів – використання меншої кількості міцніших матеріалів, виробництва меншої кількості відходів і максимізація повторного використання – врахування стадії закінчення терміну служби споруди шляхом проєктування варіантів утилізації, переробки й повторного використання відходів після зносу (згадаймо вищезазначену циркулярну економіку); г) створення комфортного повсякденного середовища за рахунок забезпечення в приміщенні високої якості повітря, необхідної температури, правильної акустики і належної звукоізоляції, природного освітлення; г) зниження навантаження особистого транспорту на навколишнє середовище за рахунок транспортної інфраструктури; г) збереження ландшафту, забезпечення захисту й покращення природного різноманіття; д) проєктування гнучких й динамічних просторів, яке дозволяє передбачити зміни у їх використанні з плином часу, забезпечення стійкості до таких подій, землетрусів, пожеж тощо; е) використання інформаційно-комунікаційних технологій [12; 13].

Актуальність вивчення зелених технологій у сучасному будівництві (зокрема, аналізу відновлюваних матеріалів та ефективності енергоефективних систем) продукована низкою їх переваг, які актуалізовані одразу у трьох площинах: екологічній, економічній та соціальній. Так, «зелені» будівлі, які отримали сертифікат Green Star в Австралії, продукують на 62% менше викидів парникових газів, ніж інші австралійські споруди; приміщення, сертифіковані IGBC, дозволяють економити на 40–50% енергії та 20–30% води (порівняно зі звичайними будівлями в Індії); будинки з вищезазначеним сертифікатом Green Star у Південній Африці щорічно економлять в середньому 30–40% енергії та 20–30% води; натомість, сертифіковані LEED в Сполучених Штатах Америки (далі – США) та інших країнах, споживають на 25% менше енергії й на 11% менше води, ніж «узвичаєні» [14]. Окрім того, «зелене» будівництво продукує формування й розширення ринків екологічно чистих продуктів та послуг, скорочення експлуатаційних витрат, покращення стану екосистем, підвищення комфорту та здоров'я людей, поліпшення загальної якості життя [10].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема зелених технологій у сучасному будівництві має складну природу: вона інтегрована, міжпредметна тощо, що, своєю чергою, продукує потребу у аналізі історіографії щодо питань енергозабезпечення та сталого розвитку економіки. Так, репрезентативним вважаємо працю З. Атаманчук, Ю. Неголюк [1], у якій виокремлено стрижневі пріоритети розвитку «зеленої» економіки, досліджено самотність інвестиційного забезпечення цього сектора, а також подано світові надбання інтеграції зелених технологій. Автори обґрунтовують інвестиційну динаміку сектора, а також локалізують основні пріоритети його розвитку на засадах сталого виробництва (ресурсо- та енергоефективного,

екологічного тощо). Дослідники висвітлюють пропонувану ними модель переходу нашої держави до «зеленої» економіки, доводячи її життєздатність у сучасних реаліях.

Специфіка проблематики «зеленого» будівництва (розкриття його стрижневих принципів, напрямів актуалізації тощо) представлена у праці Л. Богінської [2]. У аналізованому дослідженні подано перспективи впровадження інноваційного будівництва в нашій країні з кореляцією останнього з прагненням до екологізму умов проживання молодих українців. Окреслено інноваційні архітектурні рішення у цьому напрямі, які порівняно з технологією типового будівництва, екстрапольовано на підходи забезпечення екологічної стійкості. Вчена виявляє релевантні характеристики «зеленого» будівництва, які, на її думку, є перспективними й втілюваними у нашій країні, а також подає можливі системи «зеленої сертифікації».

Питанню сучасного стану та головних детермінантів процесу інтегрування зелених технологій у діяльність підприємств будівельної галузі присвячено працю В. Бредіхін, В. Вербицька [3]. У ній автори аналізують стандарти будівництва країн БРІК й досліджують міжнародний досвід екологічного менеджменту у вищезазначеній галузі. Вчені подають параметризацію будівельних екотехнологій, специфіку їх стандартування тощо, які корелюють з енергоефективністю. Натомість кореляцію будівничого сектора з екосистемою планети відстежено у праці Г. Мазур, О. Дьяченко, Л. Дьяченко [7], у якій автори досліджують параметризацію впливу на навколишнє середовище щодо виробництва, переробки будівельних матеріалів, експлуатації будівель тощо.

Головні перспективи актуалізації водневих технологій з урахуванням їх енергетичного потенціалу подано у праці Ю. Ташев та ін. [4], де представлено стрижневі технології виробництва водню й окреслено параметризацію цього процесу. Зокрема, вченими здійснено аналіз вартості вищезазначеного виробництва при різних варіантах його отримання й проведено порівняння розподіленого і узагальненого виробничих шляхів, висвітлено принципи роботи лужного, PEM і SOE електролізу.

Локалізовано стрижневі характеристики «зеленого» будівництва у праці М. Данилюк, М. Дмитришин [5], у якій автори розкривають особливості такого будівництва у порівнянні зі звичайним (традиційним). Вчені виокремлюють місце «зеленого» будівництва в економічній полісистемі (зокрема, циркулярній економіці), зосереджуються на його перспективах, системах «зеленої сертифікації» (LEED, BREEAM). Своєю чергою, у межах вищезазначених стандартів дослідниками описано параметризацію: місце для забудови, ефективність споживання природних ресурсів (води, енергії), якість середовища, інновативність тощо.

Натомість економічні наслідки кореляції з соціокультурними трансформаціями Польщі в контексті актуальної ситуації в Україні розглянуто у праці К. Чіхоцькі та ін. [8]. Типологію «зелених конструкцій», аналіз історії їх розвитку та найближчої генези щодо властивостей стічних вод в контексті екологічної безпеки міст репрезентовано у праці Т. Ткаченко, О. Ткаченко [9]. У аналізованому дослідженні автори розглядають параметризацію світових стандартів таких конструкцій в контексті інтегрування останніх в український ринок та перспективних напрямів розвитку й низки викликів на нашому підґрунті.

Отже, аналіз історіографії з досліджуваної проблематики статті засвідчив самотність використання зелених технологій щодо сучасного будівництва в контексті циркулярної економіки. Водночас низка питань лишається невирішеною (докладніше вони розглянуті нижче), що продуковано інноваційністю, нестандартним підходом та підвищеним ступенем актуалізації творчого складника у процесі роботи. Вищезазначене, природно, є визначальним щодо спрямованості цієї статті в контексті узагальнення підходів до аналізованої проблематики в контексті вибудовування її аналізу й методології.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Таким чином, вищезазначені постановка аналізованої проблематики у загальному вигляді та аналіз останніх досліджень і публікацій засвідчили такі невирішені аспекти щодо аналізу відновлювальних матеріалів та ефективності енергоефективних систем щодо:

а) *стандартизації та сертифікації відновлювальних матеріалів*: мовиться про те, що багато вищезазначених матеріалів не мають чіткої параметризації (стандартування, сертифікування тощо), наслідком чого стає потенційна можливість плутанини у виборі та актуалізації останніх у будівництві;

б) *життєвого циклу та впливу на довкілля*: констатуємо наявність лакун у дослідженнях життєвого циклу відновлюваних матеріалів (зокрема, їх енергетичної ефективності, інтенсифікації

викидів під час виробництва, транспортування та використання, а також актуалізації у межах концепції циркулярної економіки);

в) *технології для зменшення енерго- та споживання природних ресурсів*: незважаючи на наявність низки різних енергоефективних систем для будівель, відзначимо потребу у розвитку нових технологій, які були б продуктивними щодо вищезазначеної параметризації та підвищення стійкості до зовнішніх впливів;

г) *економічної вигоди*: досі це питання є суперечливим, оскільки сучасні економічні дослідження (в тому числі, в межах згаданої циркулярної економіки) мають неоднозначні результати, саме тому нагальною є розробка нових бізнес-моделей, які, своєю чергою, зроблять цей вид технологій привабливішим для інвесторів та забудовників;

г) *адаптування до різних кліматичних умов*: детерміноване потребою у трансформаційних змінах щодо певних кліматичних умов, оскільки ефективність функціонування зелених технологій корелює з регіональними особливостями;

д) *системної інтеграції зелених технологій*: йдеться про нагальність паралелізму генези відновлювальних матеріалів та енергоефективних систем, оптимальна актуалізація яких вимагає інтеграції й синергії між ними;

е) *масштабування ефективності*: мовиться про те, що ті чи ті технології можуть бути продуктивними локально або загалом (на рівні конкретної будівлі, району, берега (до прикладу, правий чи лівий), міста тощо);

є) *ефективності управління природними ресурсами (енергією та водою)*: так, розвиток технологій для моніторингу, управління останніми у будівлях корелює з їх енергоефективністю та зниженням витрат.

Отже, вищезазначені не вирішені аспекти аналізованої проблематики репрезентативні щодо розширення розуміння та вдосконалення заходів актуалізації зелених технологій у сучасне будівництво, а також самобутності використання відновлювальних матеріалів та ефективності енергоефективних систем у їх межах.

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** *Метою* статті є розгляд самобутності використання зелених технологій у сучасному будівництві. *Предметом* – специфіка вищезазначеної роботи щодо аналізу відновлювальних матеріалів та ефективності енергоефективних систем (зокрема, аналізу сучасного стану енергозабезпечення економіки країни та визначення шляхів його покращення з урахуванням принципів сталого розвитку). Своєю чергою, вищезазначені мета і предмет дослідження дозволили сформулювати його *завдання*:

1. Висвітлити теоретичні здобутки використання зелених технологій у сучасному будівництві й екстраполювати їх специфіку на роботу з відновлювальними матеріалами та динаміку актуалізації енергоефективних систем у їх межах.

2. Проаналізувати історіографію аналізованої проблематики щодо використання таких систем в контексті сталого розвитку та перспектив функціонування в енергетичному комплексі.

3. Представити генезу світового досвіду щодо впровадження енергоефективних заходів та розвитку відновлювальних джерел енергії.

**Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** *Енергозбереження* – стрижневий принцип «зеленого» будівництва, оскільки його наріжним каменем є розробка технологій, що дають змогу максимально знизити втрати енергії в процесі використання будівель, основними методами останнього є: а) *забезпечення ефективної теплоізоляції*: використання сучасних технологічних рішень, ізоляційних матеріалів, які краще утримують тепло всередині будівлі; б) *зниження втрат тепла у вентиляційній системі* шляхом встановлення рекуператорів (приладів, які забезпечують теплообмін між вхідними та вихідними потоками повітря, використовуються для підтримання в приміщенні теплового та чистого повітря); в) *забезпечення герметичності дверних і віконних прорізів*: екобудинки повинні мати якісні склопакети та двері, які забезпечують захист від втрат тепла; г) *скорочення витрат електроенергії завдяки використанню новітніх економних приладів*: сучасна побутова техніка виробляється на основі енергозберігаючих технологій (до прикладу, скорочення споживання електроенергії в екобудинку може бути досягнуто завдяки використанню енергозберігаючих ламп, які споживають приблизно в 5 разів менше енергії, ніж звичайна лампа розжарювання), за рахунок використання яких сучасний будинок економить майже чверть споживаної електрики [15].

Прикметно, що зелені технології в будівництві стають не лише модою, а й необхідністю в епоху, коли енергоефективність та сталий розвиток набувають пріоритетності. Вони спрямовані на мінімізацію негативного впливу будівництва на навколишнє середовище та забезпечення

оптимального використання ресурсів. Одним з ключових складників таких технологій є актуалізація відновлюваних матеріалів (дерева, скла, металів тощо), що зменшує споживання природних ресурсів та викиди CO<sub>2</sub>. Саме тому природно, що енергоефективність набуває все більшої значущості у актуалізації зелених технологій у будівництві.

Зокрема, використання ізольованих конструкцій, енергоефективних вікон і дверей, систем опалювання й кондиціонування знижує споживання енергії та загальні витрати. Окрім того, такі технології сприяють створенню комфортного середовища для життя і роботи, одночасно заощаджуючи енергію та ресурси [13]. Своєю чергою, зелені технології включають також використання відновлюваних джерел енергії (сонячних панелей, вітряків та геотермальних систем). Вищезазначене зменшує залежність від традиційних джерел енергії (вугілля та нафти) і, відповідно, мінімізує викиди шкідливих речовин в атмосферу (див. Табл. 1).

Табл. 1.

## Використання зелених технологій в будівництві

Зелена технологія	Опис	Переваги	Недоліки
<i>Енергоефективні матеріали та конструкції</i>	Використання матеріалів з низькою теплопровідністю, вікон з високим коефіцієнтом енергоефективності та продуманих конструкцій для мінімізації втрат тепла.	Зменшення споживання енергії на опалення та кондиціонування, економія коштів, зниження викидів парникових газів.	Можливе збільшення початкових витрат на будівництво.
<i>Відновлювані джерела енергії</i>	Використання сонячних панелей, вітрових турбін, геотермальних систем та інших джерел чистої енергії для живлення будівлі.	Зменшення залежності від ископного палива, економія коштів, зниження викидів парникових газів.	Можливе збільшення початкових витрат на будівництво, залежність від погодних умов.
<i>Системи збирання та використання дощової води</i>	Збір дощової води для використання в системах поливу, туалетах та інших цілях.	Зменшення споживання прісної води, економія коштів.	Можливе збільшення початкових витрат на будівництво, необхідність додаткового простору для зберігання води.
<i>Зелені дахи</i>	Покриття дахів ґрунтом, рослинами та іншими зеленими елементами для утеплення, поглинання води та покращення якості повітря.	Зменшення теплового навантаження на будівлю, поглинання дощової води, покращення якості повітря.	Можливе збільшення початкових витрат на будівництво, необхідність додаткового обслуговування.
<i>Енергоефективні системи освітлення та електроприладів</i>	Використання світлодіодних ламп, енергоефективних приладів та систем управління для зменшення споживання енергії.	Зменшення споживання енергії, економія коштів.	Можливе збільшення початкових витрат на придбання енергоефективних приладів.
<i>Смарт-системи управління будівлею</i>	Використання датчиків, контролерів та програмного забезпечення для	Зменшення споживання енергії, економія коштів,	Можливе збільшення початкових витрат на будівництво, складність

	автоматичного управління освітленням, опаленням, кондиціонуванням та іншими системами будівлі.	покращення комфорту.	налаштування та обслуговування.
<i>Використання перероблених та екологічно чистих матеріалів</i>	Застосування будівельних матеріалів, виготовлених з перероблених відходів або з екологічно чистих джерел.	Зменшення використання природних ресурсів, зниження забруднення навколишнього середовища.	Можливе збільшення початкових витрат на будівництво, обмежений вибір матеріалів.
<i>Створення сприятливого мікроклімату</i>	Забезпечення природної вентиляції, використання вітрозахисних та сонцезахисних конструкцій, озеленення прилеглої території.	Покращення якості повітря, створення комфортного мікроклімату, економія енергії.	Можливе збільшення початкових витрат на будівництво, залежність від природних факторів.

*Source: Створено автором дослідження*

На сьогодні, низка екологічних проблем міст набуває глобальних масштабів, потребуючи негайного врегулювання. Натомість більшість зусиль у боротьбі з цим явищем обмежуються позитивним озелененням територій, поліпшенням вентиляційних систем та невеликими заходами щодо зменшення промислового впливу на навколишнє середовище. Прикметно, що саме поняття «міське середовище» набуло особливого значення в сучасному світі і визначає глибоку сутність міста як місця, де концентрується велика кількість людей, та як функціонального утворення, що відіграє ключову роль у розвитку суспільства.

Однак, стан міського середовища став предметом серйозного хвилювання через загострення екологічних проблем наприкінці минулого століття [1]. Вирішенням вищезазначених проблем може стати реалізація ідеї екологічної архітектури, яка набуває популярності в масовій свідомості, проте має доволі глибоке коріння. Так, саме підґрунтя цієї концепції знаходимо на початку минулого століття, однак в той час теорії щодо заміни традиційних джерел енергії альтернативними не отримали належної уваги та не принесли відчутних результатів.

Проте, зелені технології, які мають за мету забезпечення сталого розвитку довкілля, стали широко використовуватися в будівництві з середини ХХ століття. Вони спрямовані на мінімізацію негативного впливу будівель на навколишнє середовище, покращення якості повітря, оптимізацію освітлення та вологості, що дозволяє зменшити споживання енергоресурсів та води під час експлуатації. Вищезазначено, що застосування зелених технологій охоплює переробку будівельних матеріалів, очищення води та повітря, використання альтернативних джерел енергії та енергоефективні технології [9].

Таким чином, зелені технології в будівництві є не лише модою, а й необхідністю в контексті сучасних екологічних викликів: це пов'язано з їх стрижневою роллю щодо забезпечення сталого розвитку міського середовища та покращення якості життя мешканців. Своєю чергою, використання останніх у будівництві має безліч переваг, серед яких особливо важливе енергозбереження. Проблеми, пов'язані зі скороченням енергоспоживання у будівництві, вже давно вирішуються у всьому світі, і з успіхом. Так, діє система, що заохочує використання зелених технологій у будівництві шляхом надання пільг під час кредитування та оподаткування. Це продукує зацікавленість будівельників в отриманні відповідних сертифікатів, своєю чергою, архітектори постійно вдосконалюють «зелені» рішення [6].

Так, на світовому ринку обіг грошей від продажу екологічно чистих будівельних матеріалів становить близько 20 мільярдів доларів щорічно, і прогнозують, що ця сума зростатиме не менше ніж на 10%. Це свідчить про те, що сфера «зеленого» будівництва набирає обертів, що є дуже обнадійливим показником для подальшого розвитку цього напрямку. Екологічна будівля – це

результат проектування, яке базується на трьох основних аспектах: а) підвищенні ефективності використання обмежених ресурсів (води, тепла, електрики, землі), б) зниженні негативного впливу на здоров'я людей, які живуть і працюють у цих будівлях, та в) мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище [4].

На сьогодні, екологічні принципи реалізовані у архітектурному проектуванні, зокрема:

1. *Використання екологічно чистих будівельних матеріалів*, які мінімізують негативний вплив на навколишнє середовище. Під чистими будівельними матеріалами розуміються ті, які виготовляються з використанням екологічно безпечних сировини та процесів, не містять шкідливих хімічних сполук або токсичних речовин, і можуть бути перероблені, або використані після використання з мінімальним впливом на навколишнє середовище. Такий підхід до вибору будівельних матеріалів сприяє збереженню навколишнього середовища і сприяє створенню більш здорового та екологічно безпечного середовища для мешканців та користувачів будівлі. Безпосередньо втілюється у актуалізації альтернативних джерел енергії: теплових насосів, сонячних колекторів та енергоефективних котлів, що дозволяють зменшити споживання традиційних енергоресурсів [5].

2. *Раціональна утилізація відходів*, що сприяє зменшенню негативного впливу на довкілля. Утилізація відходів полягає в їх переробці чи використанні з метою зменшення кількості, яка потрапляє на сміттєзвалища або викидається у природу. Зазначимо, що вищезазначене допомагає знизити негативний вплив сміттєзвалищ на навколишнє середовище, оскільки вони можуть виділяти шкідливі речовини у ґрунт і воду, а також продукувати викид газів, що сприяють парниковому ефекту. Шляхи зменшення відходів включають в себе переробку та вторинне використання матеріалів, підвищення ефективності актуалізації ресурсів та усунення непотрібних упаковок [7].

3. *Забезпечення комфортної та здорової для людини системи опалення і охолодження*, яка вибудовується з використанням випромінювальних поверхонь для передачі тепла. Випромінювальні системи опалення та охолодження відрізняються від традиційних конвекційних систем, які нагрівають або охолоджують повітря, передаючи тепло через конвекційні потоки. Замість цього випромінювальні системи використовують поверхні, які випромінюють тепло безпосередньо на об'єкти та людей, а не на повітря [5].

4. *Застосування «теплих» стін*, які добре утеплені, для забезпечення енергоефективності. Утеплені стіни допомагають зберігати тепло в приміщенні в холодну пору та захищають від перегріву – в теплу, що сприяє зниженню витрат на опалення та кондиціонування. По-перше, утеплення стін дозволяє підтримувати стійку температуру в приміщенні, що зменшує потребу в опаленні в холодні місяці. Це досягається шляхом запобігання втрати тепла через стіни та створення бар'єру, який утримує тепло всередині будівлі. По-друге, утеплені стіни допомагають зменшити перегрів приміщення влітку, оскільки вони мінімізують проникнення тепла зовнішнього середовища в середину будівлі. Своєю чергою, вищезазначене дозволяє знизити використання кондиціонерів та енергії для охолодження, що продукує її економію та зниження викидів парникових газів [6].

5. *Внутрішнє оздоблення будівель натуральними матеріалами* (глиною, деревом та натуральним лінолеумом), яке продукує здорове середовище з вологістю навколишнього повітря близько 50%. Актуалізація натуральних матеріалів для внутрішнього оздоблення дозволяє уникнути контакту зі шкідливими хімічними речовинами, які можуть міститися у синтетичних матеріалах, зменшуючи ризик алергій і інших захворювань, пов'язаних з ними у мешканців. Натуральні матеріали (глина, дерево тощо), мають здатність регулювати вологість в приміщенні, забезпечуючи комфортні умови для проживання, що особливо важливо для здоров'я дихальних шляхів та загального комфорту мешканців. Своєю чергою, натуральний лінолеум також відомий своєю екологічною безпекою та високою зносостійкістю, що робить його привабливим вибором для підлогового покриття. Він виробляється з натуральних компонентів (льон, деревина та кам'яне вугілля), і не містить шкідливих хімічних речовин, які наявні у синтетичних відповідниках.

6. *Створення системи припливно-витяжної вентиляції* для постійного подання чистого повітря без створення ефекту протягу. Впровадження такої системи вентиляції дозволяє забезпечити постійне оновлення повітря в приміщенні, що є важливим для збереження здоров'я мешканців і підтримання комфортного мікроклімату. Припливно-витяжна вентиляція витягує використане повітря з приміщення та одночасно подає свіже – ззовні, уникнувши таким чином

утворення відчуття протягу. Це дозволяє підтримувати оптимальні умови для дихання та забезпечує комфортне перебування людей в будівлі [2].

7. *Раціональне планування і компактність форм*, що сприяють оптимальному використанню світла та тепла. Раціональне планування включає в себе обґрунтований розрахунок розташування приміщень і внутрішніх просторів з урахуванням потреб користувачів та функційних вимог будівлі. Вищезазначене дозволяє максимально ефективно використовувати простір і забезпечити зручність та функційність приміщень. Окрім того, раціональне планування сприяє оптимальному розподілу світла та тепла усередині будівлі, забезпечуючи комфортні умови для проживання чи роботи [15].

Компактність форм також важлива, оскільки вона дозволяє максимально використовувати доступний простір землі та ресурси для будівництва. Так, компактні будівлі мають меншу поверхню, через що зменшується втрата тепла і енергії, а також знижується вплив на довкілля. Будівництво екологічно чистих будівель, що базується на цих принципах, може коштувати на 7–10% більше, ніж традиційне. Проте окупність останнього настає в середньому за 7–10 років, оскільки споживання енергії в таких будівлях на 90% менше, ніж у будівлях традиційного типу.

**Висновки.** Отже, застосування зелених технологій у сучасному будівництві продуктивне щодо зменшення негативного впливу на навколишнє середовище та покращення енергоефективності будівель. Своєю чергою, актуалізація таких технологій детермінована значним потенціалом в контексті мінімізації викидів шкідливих речовин, створенні комфортного й здорового середовища для проживання та роботи, а також збереження природних ресурсів. Окрім того, представлене дослідження дозволило висвітлити різноманітні аспекти «зеленого» будівництва: від використання екологічно чистих матеріалів до раціонального утилізації відходів.

Особливу увагу приділено інноваційним підходам у використанні альтернативних джерел енергії: тепловим насосам, сонячним колекторам, а також впровадженню систем опалення та охолодження на основі випромінювальних поверхонь. Окрім того, засвідчено переваги використання «тепліх» стін та внутрішнього оздоблення будівель натуральними матеріалами для створення комфортного та здорового середовища для мешканців. Вищезазначене засвідчило кореляцію «зеленого» будівництва із забезпеченням сталого розвитку суспільства та збереженням природного середовища для майбутніх поколінь.

### Література:

1. Атаманчук З. А., Неголюк Ю. В. Інвестиційне забезпечення «зеленої» економіки як пріоритетний напрям розвитку держави на засадах сталого розвитку. *Економіка і організація управління*. 2021. № 1 (41). С. 6–14. <https://doi.org/10.31558/2307-2318.2021.1.1> *Донецький національний університет імені Василя Стуса* : вебсайт. URL: <https://goo.su/tw3Hz> (дата звернення: 07.05.24).
2. Богінська Л. О. Зелене будівництво як складова сталого розвитку будівельного комплексу. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського*. Серія: Технічні науки. 2023. Т. 34 (73), № 2. С. 242–247. *Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського*. Серія: Технічні науки : вебсайт. URL: <https://goo.su/zRAWJ> (дата звернення: 07.05.24).
3. Бредіхін В. М., Вербицька В. І. Напрямки розвитку «зелених» інновацій та технологій в будівництві. *Комунальне господарство міст*. 2019. Вип. 153. С. 69–74. *Цифровий репозитарій ХНУМГ ім. О. М. Бекетова* : вебсайт. URL: <https://goo.su/ktCqiW> (дата звернення: 07.05.24).
4. Глобальні тенденції розвитку водневих технологій у промисловості / Ю. В. Ташеев та ін. *Бізнес Інформ*. 2020. № 8. С. 103–114. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2020-8-103-114> *Бізнес Інформ* : вебсайт. URL: <https://goo.su/63grkf> (дата звернення: 07.05.24).
5. Данилюк М. М., Дмитришин М. В. Зелене будівництво у досягненні сталого регіонального розвитку. *Актуальні проблеми розвитку економіки регіону*. 2020. Т. 1, Вип. 16. С. 153–162. *Репозитарій Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника* : вебсайт. URL: <https://goo.su/qs0d> (дата звернення: 07.05.24).
6. Дудюк Д. Л., Мазепа С. С., Гнатишин Я. М. Нетрадиційна енергетика : основи теорії та задачі : навч. посіб. Львів : Магнолія, 2022. 188 с.
7. Мазур Г. Є., Дьяченко О. С., Дьяченко Л. Ю. Принципи та напрями зеленого будівництва та стійкого розвитку міст. Матеріали науково-практичної конференції «Просування енергоефективності та підготовка фахівців для відбудови України», 13 березня 2024 р., м. Дніпро :

зб. тез. Дніпро : Енерго-інноваційний хаб ПДАБА, 2024. С. 96–99. *Dspace Repository* : вебсайт. URL: <https://goo.su/Rp1o3y> (дата звернення: 07.05.24).

8. Нові можливості в енергетичному секторі Польщі та їх вплив на Україну / К. Чіхоцкі та ін. *Asters* : вебсайт. 2021. URL: <https://goo.su/DyIn> (дата звернення: 07.05.24).

9. Ткаченко Т. М., Ткаченко О. А. Сучасний стан використання «зелених конструкцій» в урбоценозах. Збірник наукових праць Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2019. № 1. С. 3–30. *Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського* : вебсайт. URL: <https://goo.su/tUxiE> (дата звернення: 07.05.24).

10. Green Building Tools for Tribes. *EPA* : website. URL: <https://goo.su/W8zZ2S> (date of application: 07.05.24).

11. Schraml M. Wie grüne Architektur den Planeten rettet. *FormFaktor* : webseite. URL: <https://goo.su/o4wo3l> (abgerufen am 24.05.07).

12. What is green building and why does it matter? *IGBC* : website. URL: <https://goo.su/mS4b> (date of application: 07.05.24).

13. Wood S. What is green architecture? *Brightly* : website. URL: <https://goo.su/tYYYYU> (date of application: 07.05.24).

14. World green building council. *World green building council* : website. URL: <https://goo.su/Ldn0> (date of application: 07.05.24).

15. Zhiqiang J. Z. *Energy Efficient Buildings : Fundamentals of Building Science and Thermal Systems*. USA : John Wiley & Sons, 2022. 384 p.



**М. Р. Олійник, Ю. І. Озимок**

*Національний лісотехнічний університет України*

## **ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД СПОСОБІВ ФРИКЦІЙНОГО ОБРОБЛЕННЯ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ РУБАЛЬНИХ МАШИН**

*Стаття презентує класифікацію обладнання для подрібнення деревини, зокрема рубальні машини, описуючи їхні особливості разом з перевагами та недоліками. Поставлено проблему та визначено мету майбутнього дослідження, яке стосується тривкості різальних інструментів у рубальних машинах.*

*Розглянуто методи фрикційної обробки, які ґрунтуються на терті поверхонь, і виокремлено способи поверхневого зміцнення металів, визначаючи найбільш оптимальний серед них. У кінцевому аналізі представлено висновки проведеного дослідження.*

*Ключові слова: рубальна машина, тривкість, механічне зношування, фрикційна обробка, ніж, контрніж, поверхневе зміцнення, конструкційна сталь, мікроструктура сталі.*

**М. Oliynyk, Yu. Ozymok**

## **GENERAL OVERVIEW OF FRICTIONAL PROCESSING METHODS FOR CUTTING TOOLS OF CHOPPING MACHINES**

*The article presents a classification of equipment for wood shredding, particularly chopping machines, describing their features along with advantages and disadvantages. The problem is identified and the aim of future research related to the durability of cutting tools in chopping machines is determined.*

*Methods of friction processing based on surface rubbing are considered, and ways of surface strengthening of metals are distinguished, determining the most optimal among them. The conclusions of the conducted research are presented in the final analysis.*

*Keywords: chopping machine, durability, mechanical wear, friction processing, blade, counterblade, surface strengthening, structural steel, steel microstructure.*

**Problem statement.** In the modern world, where humanity constantly seeks new ways to optimize and facilitate work, the utilization of various resources becomes a key task. One of the most accessible and widely used resources is wood. By focusing on improving the energy characteristics of wood, significant benefits can be obtained, especially if energy is extracted from it after certain processing. To ensure a more efficient use of wood, its small particles can be compacted into briquettes, which is a fairly economical method. It is important to note that shredded wood, known as wood chips, is also used in the production of various wood-based materials, such as particleboard, fiberboard, and others.

The main problem addressed in the study was to increase the durability of cutting blades and counter blades of chopping machines to prevent their mechanical wear.

**Task formulation.** The aim is to identify an effective method for enhancing the durability of tools to prevent mechanical wear of their materials.

**Presentation of the main material.** Chopping machines are used for the shredding of wood into technological or energy chips as needed. Currently, there are three main types of such machines: disc, drum, and screw [1]. Table 1 presents some technical characteristics of each of them.

Analyzing Table 1, we can determine the structural features and advantages of each of the presented types of chopping machines. Disk-type machines are characterized by the lowest motor power, up to a maximum of 105 kW, have the fewest number of blades (from 1 to 4 pieces), and relatively low productivity (from 2 to 60 m<sup>3</sup>/h). Screw-type machines, due to the characteristics of the working element - the screw, ensure the wood cutting process without impacts, which contributes to the increased service life of parts [2], however, their productivity is significantly lower (from 5 to 40 m<sup>3</sup>/h). Drum-type machines have a simple design and use blades of a simple shape, which facilitates their preparation for work. The use of high-power motors in drum-type machines is compensated by their high productivity compared to other types. A detailed classification of drum-type harvesting machines is presented in Figure 1.

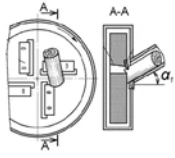
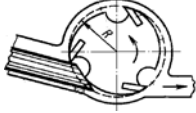
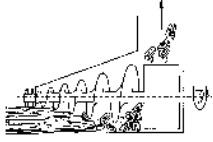
Considering the provided classification, it is evident that the range of drum-type harvesting machines is very diverse. In our case, we have chosen a stationary chopping machines with a cylindrical drum for conducting research. In this machine, the blades are located inside the drum, and the feed of the raw material is carried out by a feeding mechanism.

One of the major problems of chopping machines of all types today is the insufficient durability of the tools [3]. The preparation of the blades and counterblades of chopping machines for operation involves taking into account large dynamic loads [2] acting on the tools, as well as possible foreign inclusions

directly in the wood. Therefore, low tool durability of carbon steel, even after hardening, is a significant issue. Hence, we decided to analyze known methods of steel strengthening today and compare some of them to determine the most effective. Considering previous research [15] on the strengthening of structural steels, the simplest and most accessible method is friction processing.

Table 1.

Comparison of characteristics of disc, drum, and screw chopping machines

Indicators	Machine Type		
	Disk	Drum	Augers
			
Cutting Tool, pcs.	1...4	3...20	Spiral knife
Feed Type	Gravity, Mechanical	Gravity, Mechanical	Mechanical (self-feeding)
Maximum Log Diameter, mm	100...300	80...450	160...270
Thickness of the Cut Layer, mm	4...80 Adjustable	5...80 Adjustable	20...80 Dependent on the screw pitch
Power, kW	8...105	45...325	30...130
Productivity, m <sup>3</sup> /h	2...60	5...100	5...40

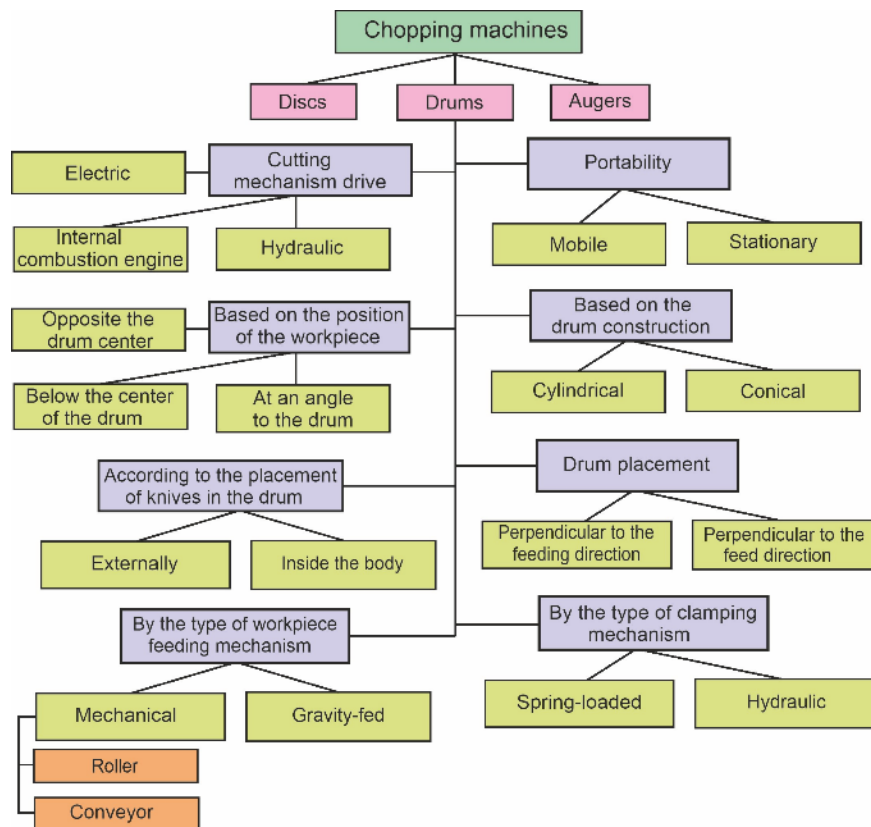


Fig.1. Classification of chopping machines

For better understanding, let's briefly discuss all methods related to frictional friction. According to source [4], there are four main methods based on friction (Fig. 2).

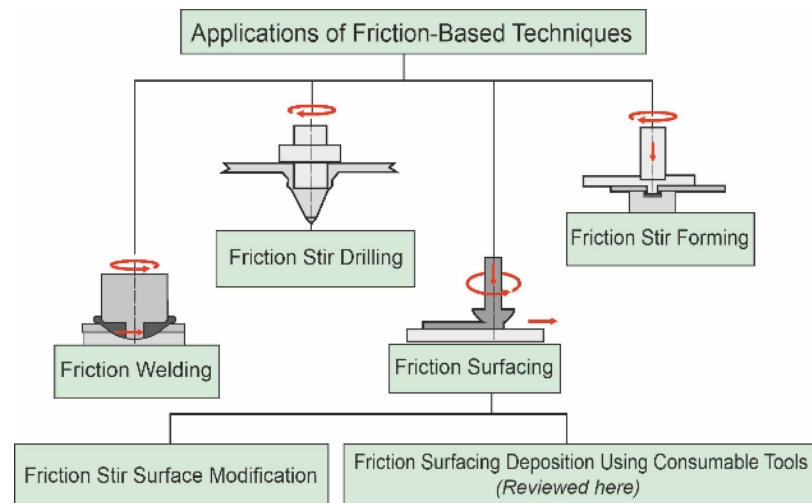


Fig. 2. Methods of strengthening based on friction

Friction welding is often used for joining parts made of different metals or with metals of different chemical structures. For example, this method is applied in the production of spiral drills or end mills, where the working part is made of high-speed steel and the shank is made of structural steel. Friction drilling is a suitable method for many products, especially those made of thin-sheet metal. During this process, the metal is not cut into chips but heated and deformed into a shell shape. This shell, often in the form of a hollow cylinder, can be used as a base for threading. There is also a method of friction stirring, similar to friction welding, where different metals are used. In the article "Rapid surface hardening and enhanced tribological performance of 4140 steel by friction stir processing," the author [5] indicates that friction stirring is a kind of offshoot of friction welding, which can also be used to join metals in the solid state. This process occurs due to significant plastic deformation with subsequent physical mixing of metals. It is important to note that this method does not involve the non-detachable connection of two materials but changes the microstructure of their surface layer. Moreover, this method is widely used to improve plasticity, increase material fatigue resistance, or correct defects in its microstructure.

After conducting classical heat treatment, studies have been carried out on the latest, fourth method - friction surfacing. Nowadays, a large volume of work is dedicated to the analysis, optimization, and implementation of friction surfacing methods with various tools on various materials. It is essential to understand that the analyzed friction surfacing method is divided into two separate sub-methods (see Figure 2): modified surfaces formed by friction mixing (frictional strengthening) and surfaces frictionally surfaced using consumable materials. Let's consider these two methods separately in more detail.

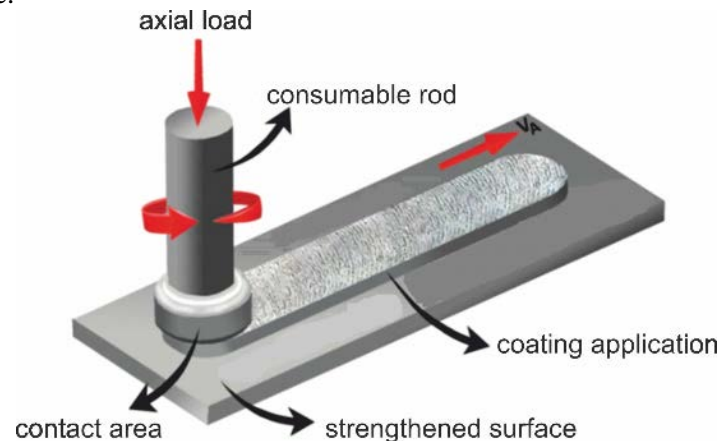
Describing the friction surfacing method using consumable materials, it is important to mention patent "GB572789A" [9] as the primary source. In this patent, the method is presented as an alternative to welding: "In joining steel or hard alloys, iron, aluminum, brass, or other metals, the heat necessary is produced by friction ..." [9, p. 1]. Recently [10], this method has been developed as a practical industrial process. It has been applied to obtain various types of coatings distinguished by wear resistance and resistance to aggressive environments.

Friction surfacing (see Fig. 3) is the process of applying metal from one surface to another by friction, with both metals being in a solid state. During such processing, a thick layer of fine-grained structure can be created in the coating. During this procedure, significant thermal energy is generated due to frictional contact and shear of the rod material inside its structure.

There are successful examples of research on applying metal coatings to a substrate of steel and aluminum, as well as applying high-speed steels to a substrate of ordinary carbon steel.

During the application of tool steel to a substrate of soft steel, the formation of a strong, uniform, and efficient coating was observed, which differs from the process of applying aluminum. The latter process occurred only under significant contact pressure between the surfaces. Regarding the application of coatings on an aluminum substrate, aluminum melting under the influence of heat generated by friction was noticed. This surfacing occurred at a spindle rotation speed of 3000 rpm and a constant pressure on the substrate

surface of 21.8 MPa. This led to the formation of brittle intermetallic compounds at the interface of the coatings with the substrate.

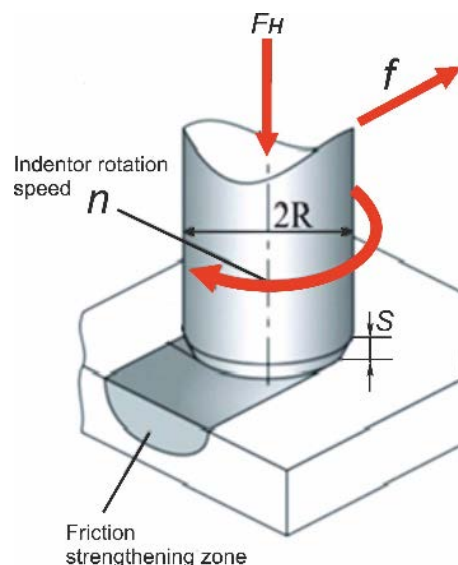


**Fig. 3. Scheme of Frictional Strengthening with Consumable Tools**

Further research [10], conducted using X-ray microscopy, confirmed the presence of discrete layers in the coating structure, which inclined towards the substrate phase at a certain angle. Moreover, the formation of cracks between these layers was observed, especially near the outer edge of the coating. The authors [10] note that to obtain a higher quality surface, it is necessary to remove the upper layers of the coating through mechanical processing. The aforementioned studies were conducted on a milling machine with a vertical spindle. Before the experiment, the substrate was cleaned, degreased, and placed in a closed box made of organic glass, with an opening for feeding the consumable rod [10].

Friction strengthening, also known as "high-speed strengthening," has gained popularity in Eastern Europe for increasing the surface strength of rollers [13].

The process of friction strengthening is relatively simple (see Fig. 4). It is carried out on a milling machine with a vertically arranged spindle. A workpiece is placed on the table and fixed with clamps or clamps on the working surface of the table. An indenter, which is a metal rod with a hardness of 62-63 HRC, is fixed on the spindle through a collet. Strengthening occurs at an indenter rotation speed of  $V_c = 50-80$  m/s, with a constant pressure on the workpiece of  $F_n = 40-60$  kg, while the table of the machine performs the feed movement.



**Fig. 4. Schematic diagram of friction strengthening**

Yes, cementation and classical heat treatment processes are key for enhancing the tribological properties of steels with different carbon contents. For steels with low carbon content, cementation, where steel is artificially enriched with carbon, is often used. In the case of high carbon content, classical heat treatment is applied to increase strength. This process involves heating the steel with open flame and rapidly

quenching it in a specific medium, resulting in a finer structure and increased strength. Following this, a normalization process is conducted, which includes reheating the material to relieve stress and eliminate brittleness. This technological process is quite complex and requires significant energy resources due to its multi-step approach.

Comparing classical thermal treatment of steel with frictional strengthening, it can be noted that frictional strengthening usually takes place over a shorter period and involves fewer technological operations. Classical thermal treatment requires a sequence of operations such as heating, cooling, normalization, and others, which can be time-consuming and energy-intensive. In contrast, frictional strengthening occurs by processing the material surface using friction from the tool, resulting in strengthening without significant heating and cooling. Therefore, frictional strengthening can be a faster and more efficient option for certain applications.

In their study, the authors [5] conducted an analysis of strengthening medium carbon steel AISI 4140 (Ukrainian equivalent - steel 40XΦA) using frictional surface strengthening. They investigated the impact of this process on the characteristics of mechanical wear during reciprocating sliding under dry and liquid friction conditions. According to the results obtained, frictional strengthening provided a similar level of hardness compared to classical thermal treatment, but a decrease in contact interaction of bodies, friction processes, and wear was observed. It was noted that to carry out this process, the energy required for processing was reduced by only 10%, without the need for subsequent steel normalization.

The study used flat test samples of AISI 4140 steel with a thickness of 6.5 mm, which were pre-annealed before testing. Other test samples with the same parameters and material were hardened using the traditional method followed by water quenching. The surface hardness of the material strengthened by frictional processing was 7.8 GPa (62 HRC), whereas during classical thermal treatment (with water quenching), the ultimate strength was 7.5 GPa (61 HRC).

Further microstructural analysis conducted by the authors [5] confirmed that both in classical thermal treatment and frictional strengthening, a martensitic structure is formed. Despite the fact that the signs of wear for surfaces processed by both frictional and conventional methods were approximately the same, the wear of the surfaces processed by the frictional method decreased by almost half. These improved tribological properties can be explained by the finer grain in the metal structure combined with the formation of martensite. Thus, an intermediate conclusion can be drawn that frictional strengthening of medium carbon steel is an effective, energy-saving, and environmentally friendly alternative to traditional hardening methods.

The studies conducted by the authors [14] aimed to apply frictional strengthening to high carbon steel AISI 1080 (Ukrainian equivalents - steel 75, steel 80, steel 85) to improve its surface properties. In this research, a tool made of a refractory tungsten alloy was used, with a rotation frequency of  $n = 1000$  rpm, compression force  $F = 5$  kN, and feed rate  $v = 15$  mm/s. Additionally, to prevent oxidation of the processed layer, an argon shield was applied.

Similarly to the previous example of medium carbon steel strengthening, during frictional strengthening of high carbon steel, transformation of the initial pearlite microstructure into martensite was observed, resulting in increased surface hardness. This increase in hardness affected the friction and wear efficiency of the material, evaluated through dry and liquid sliding. The tests were conducted on a commercial pin-on-disc tribometer using a "ball-flat" contact configuration. The objects of the study were flat samples of AISI 1080 steel with dimensions (L×W×H) - 25×25×10 mm, previously untreated [14].

During dry sliding friction, observations [14] showed that the friction coefficient decreased by approximately 25%, and the wear rate compared to the analogous material hardened by conventional means decreased by an order of magnitude. Regarding liquid friction (lubricated sliding), frictional strengthening had a minor effect on friction, but the wear rate decreased by a factor of 4. The improvement in characteristics during the contact interaction of materials is explained by the lower plasticity of the material during sliding contact.

For our future research object, which is the cutting pair, the frictional strengthening method appears to be the most suitable. This method demonstrates high effectiveness in increasing the metal's resistance to wear, which is a critical aspect for the efficient operation of the cutting pair in a chopping machine.

**Conclusions:**

1. Literature analysis regarding the classification of chopping machines, the toughness of their cutting tools, and various frictional processing methods is crucial for understanding the fundamental principles and potential applications of these methods. Identifying frictional processing methods used for surface strengthening indicates the need to search for optimal methods to enhance the properties of cutting tools.
2. An important distinction between frictional strengthening and friction surfacing has been identified - the absence of material adhesion of the tool to the substrate in frictional strengthening. This may be considered a drawback, as adhesion can result in better bonding and more uniform deposition of material onto the substrate in friction surfacing. Based on this, we can conclude the advantages and disadvantages of each of these processes and determine which suits our specific situation better.
3. The possibility of using friction surfacing to improve wear resistance has been established. This means that utilizing friction surfacing can increase the material's resistance to wear, which is a crucial factor for many applications where materials undergo mechanical or thermal wear.
4. Frictional strengthening involves instantaneous heating of the workpiece metal through friction, as well as similarly instantaneous cooling due to heat dissipation. This process allows for strengthening the material by rapid heating and cooling, promoting the formation of stronger structures within the material and improving its mechanical properties.
5. The choice of frictional strengthening method for strengthening the working surfaces of blades can be justified by its ability to increase the strength, hardness, and wear resistance of the material. This method allows for locally heating the blade surface through friction and rapidly cooling it, resulting in the formation of a martensitic structure, which ensures enhanced strength. Additionally, frictional strengthening can reduce abrasive wear and increase the blade's service life, making it an effective and durable tool for cutting applications.

**References:**

1. Dr. Hans Hartman. Handbook of Bioenergy Small Plants. - Public Relations Department, 2013. – 195 p.
2. Pylypchuk M. I., Burdiak M. R. Equipment for the Production of Flake Boards: Textbook. / M. I. Pylypchuk, M. R. Burdiak – Lviv: Design Studio "Papuga" LLC, 2016. – 244 p.
3. Syuney V. S. Timber Harvesting Machines for Bioenergy: Designs, Calculation: Textbook. - Joensuu: Finnish Forest Research Institute: "METLA", 2011. – 143 p.
4. Ebrahim Seidi, Scott F. Miller, Blair E. Carlson. Friction Surfacing Deposition by Consumable Tools // Journal of Manufacturing Science and Engineering. - Department of Mechanical Engineering, University of Hawaii at Manoa, Honolulu, HI 96822, et al. – 2021. – P. 26.
5. Cinta Lorenzo-Martin, Oyelayo O. Ajayi. Rapid surface hardening and enhanced tribological performance of 4140 steel by friction stir processing // Science Direct. - Energy Systems Division, Argonne National Laboratory, 9700 S. Cass Avenue, Argonne, IL 60439, United States – 2015. – P. 962 - 970.
6. P.S. De, R.S. Mishra, C.B. Smith. Effect of microstructure on fatigue life and fracture morphology in an aluminum alloy // Science Direct. - Friction Processing Center, Department of Materials Science and Engineering, University of Missouri-Rolla, 218 McNutt Hall, 1400 N. Bishop, Rolla, MO 65409, USA, et al. – 2008. – P. 500-503.
7. Y.S. Sato, H. Yamanoi, H. Kokawa, T. Furuhashi. Microstructural evolution of ultrahigh carbon steel during friction stir welding // Science Direct. - Department of Materials Processing, Graduate School of Engineering, Tohoku University, 6-6-02 Aramaki-aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-8579, Japan, et al. – 2007. – P. 557 - 560.
8. M. Ghosh a b, K. Kumar b, R.S. Mishra. Analysis of microstructural evolution during friction stir welding of ultrahigh-strength steel // Science Direct. - Materials Science and Technology Division, National Metallurgical Laboratory (CSIR), Jamshedpur 831007, India, et al. – 2010. – P. 851-854.
9. Google Patents website - <https://patents.google.com>
10. Margam Chandrasekaran, Andrew William Batchelor, Sukumar Jana. Friction surfacing of metal coatings on steel and aluminum substrate // Science Direct. - School of Mechanical and Production Engineering, Nanyang Technological University, 2263 Nanyang Avenue, Singapore – 1998. – P. 446 – 452.

11. Seidi, E., and Miller, S. F., 2019, “Friction Surfacing Using Consumable Tools: A Review,” Proceedings of the ASME 2019 14th International Manufacturing Science and Engineering Conference. Volume 2: Processes; Materials, Erie, PA, June 10–14, p. V002T03A048.
12. G.M. Bedford a, V.I. Vitanov b, I.I. Voutchkov. On the thermo-mechanical events during friction surfacing of high speed steels // Science Direct. - Faculty of Mechanical and Production Engineering, University of Portsmouth, Anglesea Road, Anglesea Building, Portsmouth PO1-3DJ, UK, et al. – 2001. – P. 34 – 39.
13. The Welding Institute (TWI) website - <https://www.twi-global.com/>
14. S.H. Aldajah a, O.O. Ajayi b, G.R. Fenske b, S. David. Effect of friction stir processing on the tribological performance of high carbon steel // Science Direct. - United Arab Emirates University, PO Box 17555, Al-Ain, United Arab Emirates, et al. – 2008. – P. 350 – 355.
15. Kyryk M. D. Technological Foundations for Increasing the Wear Resistance of Woodcutting Tools Made of High Carbon and Low-Alloy Tool Steels: Dr. Eng. Sci. Thesis: 05.05.07 / Kyryk Mykola Dmytrovych. – Lviv, 1996. – 291 p.

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

О.П. Герасимчук, О.Л. Ткачук, В.С. Пуць, А.І. Охремов

Луцький національний технічний університет

## ОТРИМАННЯ ТЕКСТИЛЬНОГО ВОЛОКНА З ХВОЇ ЗА ДОПОМОГОЮ МАШИНИ ДЛЯ М'ЯТТЯ З ГІДРАВЛІЧНИМ ПРИТИСКАННЯМ

*Доведено доцільність застосування операції м'яття для інтенсифікації отримання текстильного волокна з хвої сосни звичайної та розроблено принципову схему машини для м'яття з гідравлічним притискуванням.*

*Ключові слова:* текстильне волокно, хвоя, м'яття, гідравлічне притискування.

O. Herasymchuk, O. Tkachuk, V. Puts, A. Okhremov

## OBTAINING TEXTILE FIBER FROM PINE NEEDLES USING CRUSHING MACHINE WITH HYDRAULIC PRESSURE

*The feasibility of using the crushing operation to intensify the process of obtaining textile fiber from ordinary pine needles has been proven, and a principal scheme of a crushing machine with hydraulic pressure has been developed.*

*Keywords:* textile fiber, needles, crushing, hydraulic pressure.

**Постановка проблеми.** У сучасному світі, де сталий розвиток та екологічна відповідальність стають все більш важливими, інноваційні підходи до виробництва матеріалів з природних ресурсів набувають особливого значення. Текстильні волокна, що отримані з хвої, представляють собою альтернативу традиційним натуральним текстильним волокнам. Сировина для виробництва таких волокон є побічним продуктом, що отримується під час проведення рубок різних видів, та, на сьогодні, часто утилізується шляхом спалювання або залишається на місцях рубок, захарашуючи лісові ділянки та підвищуючи пожежну небезпеку.

Натуральні текстильні волокна з хвої мають значний екологічний та економічний потенціал. Концепція їх виробництва «Forest Wool/Pine needle fiber» отримала міжнародну нагороду Green Product Award, якою з 2013 року відзначаються далекоглядні концепції, відсутні на ринку продуктів та послуг [1].

Проте, на сьогодні відсутні економічно та екологічно ефективні технології отримання натурального текстильного волокна з хвої, які можуть застосовуватися в промислових масштабах, а тому розробка таких технологій та обладнання для їх реалізації є перспективною задачею.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Хвоя на сьогодні широко використовується в різних галузях: медицині, косметології [2, 3], для отримання біопалива [4, 5, 6], целюлози та наноцелюлози [7, 8] тощо. Виробництво натуральних текстильних волокон («лісової вовни») з хвої відомо досить давно [8, 9]. У США запатентована технологія виробництва хвойного волокна, яка не отримала промислового застосування [9].

Для відділення хвої від гілок крони застосовуються різні способи, що ґрунтуються на механічному, пневмомеханічному, електрогідравлічному, високочастотному, криогенному принципі дії [10]. Запропонований також пневмотермічний спосіб отримання хвої, що передбачає використання мобільної установки для її відділення, яка містить сушильну камеру, систему пневмотранспортування, збірник хвої [10, 11].

Для отримання натурального текстильного волокна з хвої можна застосовувати біологічні, механічні, хімічні способи та їх поєднання [12-16]. Біологічні способи включають використання ферментів для розкладання лігніну та інших речовин [8]. Механічні способи включають використання процесів м'яття або плющення [12]. Хімічні способи включають обробку розчинами кислот або лугів, дозволяють розщепити компоненти, що утримують волокна [13]. Запропонована технологія виділення текстильного волокна з хвої шляхом її термічної обробки за температури 100°C тривалістю 40 хв. в розчині натрію гідроксиду (NaOH) з концентрацією 70 г/л [13].

Пошук перспективних напрямків інтенсифікації отримання натурального текстильного волокна з хвої триває і є актуальною задачею.

**Постановка завдань.** На основі аналізу наявних технологій отримання хвойного волокна обґрунтувати доцільність застосування операції м'яття та розробити принципову схему машини для м'яття з гідравлічним притискуванням для забезпечення сталого зусилля притискування при м'ятті.



**Викладення основного матеріалу.** Хвоя сосни містить три шари: епідерміс, мезофіл та пучки провідних тканин. Епідерміс захищає листок від зовнішніх впливів. Він містить зовні кутикулу, яка вкрита воском. Проникнення активних розчинів через шар епідермісу під час обробки хвої для отримання волокна є проблематичним і потребує попереднього його руйнування. В епідермісі є стоми (продихи), через які здійснюється газообмін із зовнішнім середовищем. Саме через стоми на перших етапах хімічної обробки хвої відбувається проникнення активних розчинів. Руйнування епідермісу механічним шляхом може значно пришвидшити виділення волокна з хвої, так як збільшиться поверхня контакту активного розчину з речовинами, що скріплюють волокна в хвої, а отже пришвидшиться їх видалення.



Руйнування шару епідермісу механічним шляхом можна реалізувати за допомогою м'яття або плющення [12]. Плющення хвої реалізується шляхом її пропускання між гладкими валами під великим тиском. Внаслідок плющення збільшується площа хвої в площині її подачі і зменшуються її розміри в перпендикулярній площині. Шар епідермісу також стає тоншим та тріскає паралельно до напрямку подачі хвої, а отже покращується доступ активного розчину за наступної хімічної обробки.



М'яття реалізується шляхом пропускання хвої між рифленими валами. При цьому відбувається не лише плющення хвої, але й її згинання. Шар епідермісу тріскає як паралельно до напрямку подачі хвої, так і у площині, що проходить через осі валів. Так як під час м'яття механічний вплив на шар епідермісу і його руйнування відбувається більш активно, то наступні дослідження проводилися нами з використанням процесів м'яття.

Для оцінки перспективних способів отримання текстильного волокна з хвої, застосовували способи механічного, хімічного впливу та їх поєднання. Хімічний спосіб реалізовували за технологію [13]. Оцінку результатів впливу та отриманого волокна здійснювали органолептично. Для оцінки мікроструктури хвої та волокна застосовували цифровий мікроскоп Levenhuk (DXT 90), що дає максимальне збільшення 300 крат. Обробку отриманих фотографій мікроструктури хвої та волокна реалізовували у програмі MicroCapture Plus. Результати дослідження наведені в табл. 1.

Табл. 1.

**Оцінка хвої та волокна, що оброблене м'яттям, хімічним способом та їх поєднанням**

Спосіб	Зображення хвої та волокна в мікроскоп	Органолептична оцінка
М'яття		Шар епідермісу зруйнований. Спостерігаються світлі довгі пучки провідних тканин, з яких можна отримати волокно. Простір між волокнами заповнений речовиною, що має різні відтінки зеленого кольору.
Хімічна обробка		Спостерігаються довгі пучки комплексних волокон, які скріплені між собою залишками смол та інших речовин. Колір волокна темний, що може вказувати на ресорбцію цих речовин у волокно під час обробки.

М'яття після хімічної обробки		Спостерігаються довгі пучки комплексних волокон. Поверхня волокон нерівномірна, на ній наявні виступи, утворені залишками смол та інших речовин. Колір волокна темний.
Хімічна обробка після м'яття		Спостерігаються довгі пучки комплексних волокон. Поверхня волокон нерівномірна, деякі ділянки гладкі, на інших наявні виступи елементарних волокон. Колір волокна варіюється від світлого до темного, що може вказувати на різний вміст у ньому домішок.

На основі аналізу табл. 1 можна зробити висновок, що застосування м'яття перед хімічною обробкою є ефективним способом підвищення якості отриманого волокна.

Важливою вимогою до операції м'яття хвої є забезпечення сталого зусилля, яке, з однієї сторони, повинне бути достатнім для руйнування шару епідермісу, з іншої – не пошкоджувати та не руйнувати волокна.

Для забезпечення сталого зусилля притискання між рифленими валами пристрою для м'яття доцільно застосовувати гідравлічні системи, які в даному випадку мають ряд важливих переваг у порівнянні з механічними:

1. Гідравлічні системи можуть підтримувати постійне зусилля притискання незалежно від зовнішніх умов (товщини хвої). Вони менш схильні до змін у зусиллі через вібрації або температурні коливання, що забезпечує більш стабільну роботу.

2. Гідравлічні системи можуть створювати значно більші зусилля порівняно з механічними пристроями за менших габаритів. Це робить їх ефективними для великих навантажень та обсягів роботи.

3. Зусилля притискання в гідравлічних системах можна легко і точно регулювати за допомогою гідравлічних пристроїв.

4. Гідравлічні системи легко інтегруються з автоматизованими системами управління, що дозволяє керувати ними дистанційно та підвищує загальну ефективність виробничих процесів.

Принципова схема машини для м'яття хвої з гідравлічним притисканням наведена на рис. 1. Шар хвої подається між рифленими валами 1 та 2 в зону м'яття. Вал 1 обертається від двигуна Д2 через пасову передачу. За потреби знизити швидкість обертання можливе застосування додаткового редуктора. Вал 2 встановлений в вальницях платформи, що притискається гідроциліндрами односторонньої дії Ц1 та Ц2. Саме за рахунок цих гідроциліндрів створюється постійне зусилля притискання в зоні м'яття хвої.

Напір у системі гідроприводу створюється насосною станцією, основними складовими частинами якої є двигун  $Д1$ , насос  $Н$ , запобіжний клапан  $КП$ , манометр  $М$ , гідравлічний бак  $Б$ , що виконані в єдиному корпусі. Рідина від насоса подається по напірній лінії, яка розгалужується на дві гілки до кожного гідроциліндра.

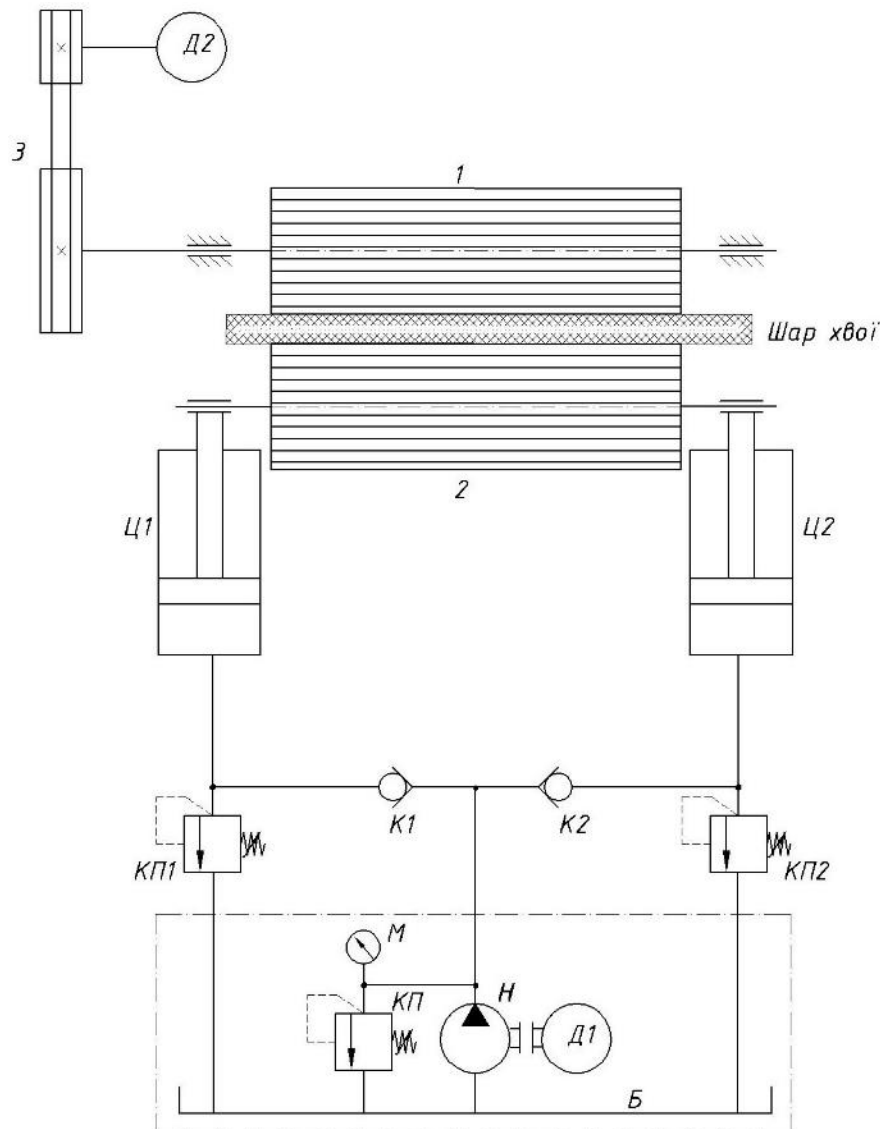


Рис. 1. Принципова схема машини для м'яття хвої з гідравлічним притискуванням

На кожному розгалуженні встановлений зворотній клапан  $K1$  та  $K2$  відповідно, що пропускають рідину лише від насоса до гідроциліндра і не пропускають в зворотному напрямку. Для підтримки необхідного тиску в порожнинах гідроциліндрів  $Ц1$  та  $Ц2$ , що забезпечують потрібне зусилля м'яття, використовуються регульовані клапани тиску  $КП1$  та  $КП2$ . При перевищенні встановленого значення тиску в порожнинах гідроциліндрів  $Ц1$  або  $Ц2$  відповідний напірний клапан  $КП1$  або  $КП2$  відкривається і надлишкова рідина зливається в гідравлічний бак  $Б$ .

Машина для м'яття хвої може мати різне конструктивне виконання. Відрізнитися також може спосіб підтримання сталого тиску в системі гідроприводу, а отже і набір гідравлічних апаратів.

**Висновки.** В статті виконано аналіз наявних технологій отримання текстильного волокна з хвої сосни звичайної з огляду на якість отриманого волокна. За результатами виконаного аналізу із застосуванням мікроструктурних досліджень хвої та волокна доведено доцільність застосування операції м'яття для інтенсифікації отримання текстильного волокна з хвої сосни звичайної. Для реалізації операції м'яття розроблено принципову схему машини для м'яття з гідравлічним притискуванням, що забезпечує стале зусилля притискування між рифленими валами. Обґрунтування параметрів машини для м'яття та режимів її роботи потребує подальших теоретичних та експериментальних досліджень.

**Список використаних джерел:**

1. Forest Wool/Pine needle fiber. <https://www.gp-award.com/en/produkte/Forest-Wool>.
2. Dziejński M., Kobus-Cisowska J., Stachowiak B. (2021). Pinus Species as Prospective Reserves of Bioactive Compounds with Potential Use in Functional Food—Current State of Knowledge. 10(7). <https://doi.org/10.3390/plants10071306>.
3. Волинське ОУЛІМГ. Екстракт хвойний натуральний: виробництво унікального продукту стимулює до більш раціонального використання деревини. <https://lisvolyn.gov.ua/?p=48314>.
4. Bisht A.S., Singh S. & Kumar S.R., (2014). Pine needles a source of energy for himalayan region. International Journal of Scientific & Technology Research, 3(12), 161-164. <https://www.ijstr.org/final-print/dec2014/Pine-Needles-A-Source-Of-Energy-For-Himalayan-Region.pdf>.
5. Mandal S, Bhattacharya TK, Verma AK, Haydary J (2018) Optimization of process parameters for bio-oil synthesis from pine needles (Pinus roxburghii) using response surface methodology. Chem Pap 72(3). <https://doi.org/10.1007/s11696-017-0306-5>.
6. Chaturvedi, S., Singh, S.V., Dhyani, V.C. et al. (2021). Characterization, bioenergy value, and thermal stability of biochars derived from diverse agriculture and forestry lignocellulosic wastes. Biomass Conv. Bioref. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-01239-2>.
7. Ashvinder Rana, Sanjay Guleria, Vijai Kumar Gupta, Vijay Kumar Thakur. (2022). Cellulosic Pine Needles-Based Biorefinery for a Circular Bioeconomy. Bioresource Technology 367:128255. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128255>.
8. Ткачук О., Герасимчук О. (2021). Стан та перспективи застосування деревної целюлози для виробництва хімічних волокон. IX Ukrainian-Polish Scientific Dialogues: Conference Proceedings. International Scientific Conference, 20-23 October 2021, Khmelnytskyi, Ukraine, (pp. 204-205).
9. John B. N. Berry. Process of making p n e - need le fber. Specification forming part of Letters Patent No. 437,555, dated September 30, 1890. Application filed March 21, 1889, Serial No, 304,177. <https://patents.google.com/patent/US437555A/en>.
10. Ткачук, О. Л., Герасимчук, О. П., Резнікова, В. В. (2022). Пневмотермічний спосіб отримання хвої для виготовлення текстильних волокон. Сільськогосподарські машини, 48, 67-73. <https://doi.org/10.36910/acm.vi48.842>.
11. Герасимчук, О.П., Ткачук, О.Л. (2023). Обґрунтування режиму роботи пневмотермічної мобільної установки для відокремлення хвої сосни звичайної. Сільськогосподарські машини, 49, 75-80. / URL: <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1025>.
12. Герасимчук О. П., Ткачук О. Л., Пуць В. С., Охремов А. І. Отримання текстильних волокон з хвої сосни звичайної за допомогою процесів м'яття. Матеріали та технології в інженерії (МТІ-2024): інженерія, матеріали, технології, транспорт: збірник наукових доповідей міжнародної конференції, Луцьк, Україна, 14-16 травня 2024 р. Луцьк : Вежа-Друк, 2024. Ст. 86-88.
13. Herasymchuk Oleksandr, Tkachuk Oksana. Regarding the question of obtaining natural textile fibers from pine needles «Creativitate. Tehnologie. Marketing», simpozion internațional (5;2023; Chișinău). Creativitate. Tehnologie. Marketing. СТМ 2023 : Al Vlea Simpozion International, 31 martie. Chișinău/ Comitetul științific: Viorel Bostan (președinte) [et al.]. Chișinău: Tehnica-UTM, 2023. Pp 203-209. URL: <https://fd.utm.md/wp-content/uploads/sites/37/2023/11/Simpozion-CTM-2023.pdf>.
14. Герасимчук О.П., Ткачук О.Л. Аналіз способів виділення натуральних текстильних волокон з хвої. Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції «Синергія освіти, науки, виробництва в умовах глобальних викликів сьогодення», 29 березня 2023, Луцьк. – Луцький національний технічний університет, 2023. С 19-21. / URL: <https://drive.google.com/file/d/1gGkiePbgUvzfEo5jYa0BemeTBKYxkA4a/view>.
15. Tkachuk O.L., Gerasymchuk O.P. Perspective technologies of obtaining natural textile fibers from pine needles. Якість та безпечність товарів: [матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції, Луцьк (28 квітня 2023 року) / за наук. ред. д.т.н., проф. В. В. Ткачук. – Луцьк: Вежа-Друк, 2023. С. 183-185. / URL: [https://drive.google.com/file/d/1rADR7tuZmsrwRRmnqYIV\\_ynN9AXXu6kr/view](https://drive.google.com/file/d/1rADR7tuZmsrwRRmnqYIV_ynN9AXXu6kr/view).
16. Герасимчук О.П., Ткачук О.Л. До питання використання хвої для отримання натуральних текстильних волокон. Лісівництво, деревообробка та озеленення: стан, досягнення і перспективи. (ДБТУ, 24-25 жовтня 2023 р.). Харків, 2023. С. 35-37. URL: [https://drive.google.com/file/d/1oze6nm7zCqp\\_pLqRvFeK6K7V2HSxNx5n/view?usp=share](https://drive.google.com/file/d/1oze6nm7zCqp_pLqRvFeK6K7V2HSxNx5n/view?usp=share)

**Рецензент:** Мартинюк Віктор Леонідович, доцент кафедри галузевого машинобудування, к.т.н., доцент.

О.Б. Климовець, В.П. Кашицький

Луцький національний технічний університет

## МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БІОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ЕПОКСИПОЛІМЕРНОЇ МАТРИЦІ

*Визначено межу міцності при стисненні епоксикомпозитних матеріалів, які наповнені порошком деревного борошна або крохмалем. Визначено ефективність застосування порошку деревного борошна для формування епоксикомпозитів, що забезпечує вищі значення межі міцності при стисненні порівняно з міцністю при стисненні епоксикомпозитів з вмістом крохмалю. У випадку використання крохмалю відбувається підвищення адгезійної міцності епоксикомпозитів порівняно з ненаповненими епоксиполімерами. Підвищення адгезійної міцності компонентів епоксикомпозитного матеріалу відбувається за оптимального вмісту крохмалю в епоксиполімерній матриці та визначається адгезійним характером руйнування клейового з'єднання епоксикомпозитного матеріалу з поверхнею субстрату.*

*Ключові слова:* органічний наповнювач; адгезія; міцність; твердість; напруження; пористість; покриття; структура.

O. Klymovets, V. Kashytskyi

## MECHANICAL PROPERTIES OF BIOCOMPOSITE MATERIALS BASED ON EPOXYPOLYMER MATRIX

*The compressive strength limit of epoxy composite materials filled with wood flour powder or starch was determined. The effectiveness of the use of wood flour powder for the formation of epoxy composites was determined. The addition of wood flour powder provides higher compressive strength values of epoxy composites compared to the compressive strength of epoxy composites containing starch. In the case of using starch, the adhesive strength of epoxy composites increases compared to unfilled epoxy polymers. An increase in the adhesive strength of the components of the epoxy composite material occurs with the optimal content of starch in the epoxy polymer matrix. The optimal content of the filler is determined by the adhesive nature of the destruction of the adhesive connection of the epoxy composite material with the surface of the substrate.*

*Key words:* organic filler; adhesion; strength; hardness; tension; porosity; coating; structure.

**Formulation of the problem.** Classic polymer composite materials consist of a synthetic polymer matrix and also contain dispersed, fibrous or sheet fillers. Fillers are divided according to their chemical composition into mineral, metal, polymer. In some cases, fillers are of natural origin (linen, cotton, paper). The optimal combination of mechanical properties of the polymer matrix and fillers made it possible to obtain a wide range of polymer composite materials that are widely used in various industries. The production of polymer composite products involves the use of technologies that have a harmful effect on the environment. Polymer composite products require disposal at the final stage of operation. Disposal consists in the processing of materials using recycling technologies or safe destruction with the formation of environmentally safe components. In the case of falling into landfills, polymer composite materials can be stored for a long time without destruction or can be destroyed with the release of harmful substances. Therefore, the use of polymer composite materials based on components of synthetic origin should be limited considering their dangerous impact on the environment, which requires a detailed analysis. This contributes to the development of new and promising directions for the creation of materials with the partial use of synthetic materials. At the same time, it is enough to replace fibrous synthetic fillers with natural components, which are able to provide satisfactory mechanical characteristics of the biocomposite product. This requires conducting theoretical and experimental studies to determine the nature of the interaction of components, which ensures a controlled process of forming the structure of biocomposite materials. As a result, biocomposite products with a complex of controlled mechanical and operational properties are obtained. Therefore, biocomposite materials and products based on them have the prospect of replacing classic polymer composite materials containing synthetic components with components of natural origin at the expense of.

**Analysis of recent research and publications.** Classic polymer composite materials have a synthetic polymer matrix and usually contain fibers of synthetic origin (carbon fibers, glass fibers, aramid fibers). Such materials have many advantages compared to unfilled polymers, which include higher mechanical characteristics and specific performance properties that each component does not have separately. The basis of polymer composite materials is a polymer matrix, which connects the particles or fibers of the filler and perceives and transmits the external load. As matrices, classic polymers based on thermoplastics (polyolefins, polyurethanes, polyesters, polyetheramides, polyvinyl alcohol) [1] and thermosets (epoxy, polyester, phenol-formaldehyde resins) are used. Thermosets have a highly cross-linked structure of polymers, which is formed under the influence of heat, pressure or light irradiation. Therefore,

this structure provides the thermosetting polymer with high mechanical characteristics (flexibility, strength and elasticity) [2, 3].

Due to the use of synthetic components, polymer composite materials have high weather resistance, resistance to chemicals and microorganisms. On the one hand, this increases the resource of their operation, but there are problems with their disposal after partial or complete destruction of polymer composite products. The main problem is the accumulation of such materials in the event that plastic products end up in a landfill. This leads over time to an increase in the area of such landfills, since polymer composite materials are stable and can remain in a landfill for hundreds or thousands of years [4]. At the same time, their slow destruction leads to the formation of toxic substances that are quite harmful to the environment, as well as human health.

This problem can be solved by replacing the synthetic filler with natural dispersed particles or fibers. The authors [5] use carbamide-formaldehyde resin to manufacture helmets based on bamboo fibers. The resistance of the biocomposite product to the influence of atmospheric factors, the strength in conditions of high or low temperature and the resistance to the influence of water of this biocomposite material increases as a result of the penetration of urea formaldehyde resin into the pores of bamboo fibers and the formation of chemical bonds between the resin and the filler. In addition, the crystallinity of the modified bamboo decreases from 36.72% to 34.09%, which improves the impact resistance of the biocomposite helmet.

The authors of [6, 7] developed polymer composite materials based on an epoxy matrix using fillers of natural origin (starch, discrete fibers of flax and technical hemp). It was established that the optimal starch content for massive epoxy composite products is 70 wt. parts. This provides an increase in the limit of compressive strength and impact toughness, which is associated with a compact arrangement of filler particles in the epoxy polymer binder and the formation of additional chemical bonds between functional groups of macromolecules of epoxy resin and active groups on the surface of the particles. Introduction to the composition of discrete flax fibers in the amount of 30 wt. of parts provides an increase in compressive strength by 18% compared to the content of 20 wt. parts. This is due to the formation of a homogeneous structure due to the ability of the fibers to be evenly distributed in the epoxy polymer matrix compared to the fibers of technical hemp, which are more rigid and form agglomerates with an oriented arrangement of fibers.

However, the main drawback of such polymer composites is the lack of complete biodegradability [8]. A simple solution to this problem is to replace classic synthetic polymers with biodegradable ones [9]. The prospect of higher economic attractiveness in the future of completely biological composites has appeared as a result of improving the properties of biologically based polymers. At the same time, the active use of biological polymers based on raw materials from renewable sources is not always advisable, especially in the short term. If biopolymer analogues are more expensive or their properties are worse, then it is better to use a resin made from a mixture of synthetic and biochemical substances. For example, the impact strength of petroleum-based epoxy resins can be significantly improved by mixing with epoxidized vegetable oils [10].

The use of natural fillers as reinforcing elements is limited due to their tendency to absorb water. This is due to the high content of cellulose, which has hydrophilic properties by nature. A decrease in mechanical characteristics and a change in the size of biocomposites occurs as a result of intensive water absorption. This leads to the appearance of microcracks in the biopolymer matrix and at the fiber-polymer interface [11-13].

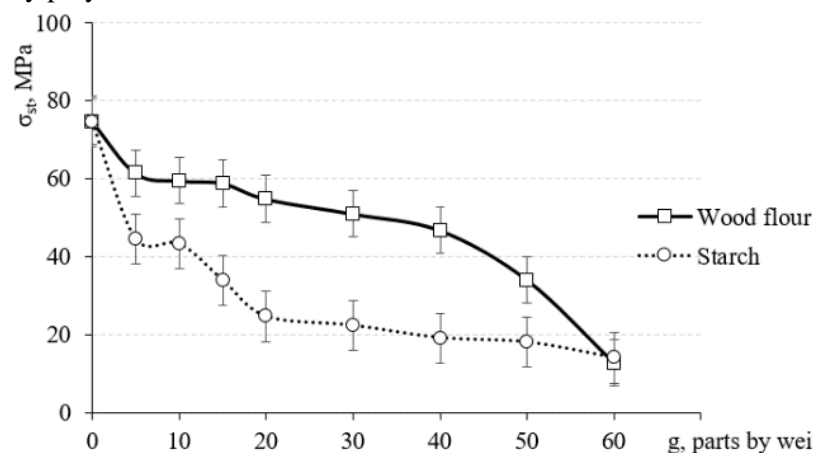
The high hydrophilicity of natural fibers determines their tendency to absorb moisture from the environment. This can be a problem for many types of thermosetting resin systems because moisture acts as an inhibitor to the hardener in the structuring process of the thermosetting polymers. Residual moisture in the natural fiber can lead to the destruction of chemical bonds at the fiber-matrix interface, which leads to the formation of a composite structure with lower mechanical characteristics. This requires the operation of drying natural fillers [14] in the technological process of forming biocomposite products based on thermoset polymer matrices of synthetic origin [15].

**Setting tasks.** Determination of the compressive strength limit and adhesive strength of epoxy resin materials filled with finely dispersed powder of wood flour or starch.

**Presentation of the main material.** Epoxy composite samples were formed by pouring the composition into molds of a certain size. Dosing of components was carried out by the weight method according to the calculated content of the filler per 100 mass parts of the epoxy polymer binder. Mixing of the components of the composition was carried out using a mechanical method with a low speed of rotation of the blades in order to avoid heating the mixture. The compressive strength was determined according to

the ASTM D695 method "Compression testing of rigid plastics" on samples with a height of 15 mm and a diameter of 10 mm. The adhesive strength was determined by breaking the adhesive joint in the end part of cylindrical rods with a conical projection for self-centering. Heat treatment was carried out in a stepwise manner in order to reduce residual stresses in the epoxy composite material: 1 hour at a temperature of 70°C, 1 hour at a temperature of 100°C and 4 hours at a temperature of 140°C.

The compressive strength of epoxy polymer materials without filler is 74.7 MPa (Fig. 1). The compressive strength is reduced by 40-42% when 5-15 parts by weight of starch are added compared to unfilled epoxy polymer. This is due to the use of a filler that has a lower hardness compared to the hardness of the epoxy polymer. Starch particles are deformed under the influence of compression load, which leads to deformation and destruction of the epoxy polymer matrix. This is due to the growth of the specific load on the epoxy polymer matrix in the zone of interphase interaction of the components. In case of introduction of 20-60 parts by weight of filler, the strength limit of epoxy composites gradually decreases from 24.6 MPa to 14 MPa, which is 67-81% less compared to unfilled epoxy composites. The decrease in this characteristic is explained by the increase in the starch content, which, with the same binder content, causes a decrease in the wall thickness of the epoxy polymer matrix. This causes an increase in the specific load on the areas of the epoxy polymer matrix, which leads to their destruction.

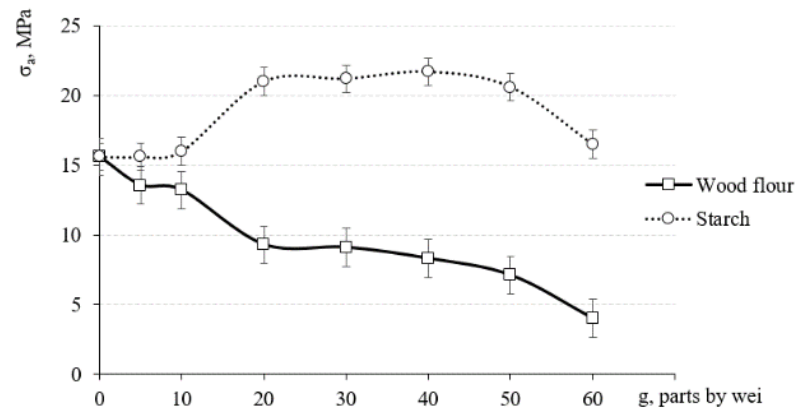


**Fig. 1. The dependence of the compressive strength limit of biocomposites on the content of wood flour and starch in the epoxy polymer matrix**

Epoxy composite materials containing particles of wood flour similarly resist compressive loading compared to epoxy composites filled with starch. The strength limit of epoxy composites decreases uniformly in the range from 61.4 MPa to 54.8 MPa in the case of the introduction of 5-20 parts by weight of wood flour particles compared to unfilled epoxy polymer. Such a decrease in characteristics by 18-26% is due to the use of a filler whose hardness and compressive strength are lower compared to the mechanical characteristics of epoxy polymers. The introduction of a filler in the amount of 30-60 parts by weight leads to a further decrease by 31-81% of the compressive strength of epoxy composites compared to epoxy polymer. A sharp decrease in this characteristic of epoxy composites containing wood flour particles is due to the formation of a heterogeneous structure compared to epoxy composites filled with starch. The sizes of starch particles are smaller, and their surface energy is lower compared to wood flour particles. Therefore, starch particles are compactly located and evenly distributed in the epoxy polymer matrix.

Strength compressed limit by 27-30% in the filling range of 5-15 parts by weight and by 47-56% in the filling range of 20-50 parts by weight epoxy composite materials filled with wood flour is higher. Higher compressive strength values of epoxy composites containing wood flour particles are due to the larger size of wood flour particles compared to starch particles. This provides a higher resistance of wood flour particles to the action of static load, which determines the higher strength of the walls of the epoxy polymer matrix. The difference in compressive strength decreases with increasing filler content, as the starch content in the epoxy polymer parts by weight matrix increases. Such epoxy composites with a high content of starch are not able to resist the compressive load, because the thin wall of the epoxy polymer matrix is rapidly destroyed. The strength limit of epoxy composites filled with wood flour and starch is the same and is 14.3 MPa at a higher filler content (60 parts by weight). This is due to the excess content of the filler, which is poorly wetted by the epoxy polymer binder. As a result, the amount of physical and chemical bonds formed is insufficient, which leads to a decrease in the ability of epoxy composites to resist static loads.

The adhesive strength of epoxy polymers without fillers is 24.3 MPa. A decrease in adhesive strength by 12-14% occurs when 5-10 parts by weight of wood flour particles are added compared to unfilled epoxy polymer (Fig. 2). This is due to the use of filler, which acts as a stress concentrator due to the irregular shape of the particles. This leads to the appearance of cracks and their instantaneous propagation in the zone of interphase interaction of the components. The adhesive strength of epoxy composites is sharply reduced by 40-54% in the case of the introduction of wood flour particles in the amount of 20-50 parts by weight compared to epoxy polymer. A further decrease in adhesive strength is associated with an increase in the filler content in the epoxy polymer matrix. An increase in the concentration of filler particles leads to an increase in the number of stress concentrators and an increase in the probability of crack initiation. The adhesive strength decreases to the lowest value (4 MPa) at the critical content of the filler (60 parts by weight), which indicates the impracticality of further research at a higher content of the filler.



**Fig. 2. The dependence of the adhesive strength of biocomposites on the content of wood flour and starch in the epoxy polymer matrix**

The introduction of starch in the amount of 5-15 parts by weight allows to increase the adhesive strength of epoxy composites compared to epoxy polymer. The introduction of filler in the amount of 20-50 parts by weight leads to a 28-30% increase in the adhesive strength of epoxy composites compared to epoxy polymer, which is due to the compact arrangement of starch particles in the polymer matrix. Starch particles have the correct rounded shape, which ensures the formation of a homogeneous structure. An additional increase in the adhesive strength of the epoxy composite material occurs due to the formation of physical and chemical bonds between the active groups of the components. The adhesive strength of epoxy composites decreases by 24% with an increase in the starch content up to 60 parts by weight compared to the maximum values of adhesive strength of epoxy composites with an optimal filler content in the range of 20-50 parts by weight. A further increase in the starch content leads to the formation of a defective structure, since the wetting of the particles is complicated due to an insufficient amount of epoxy polymer binder.

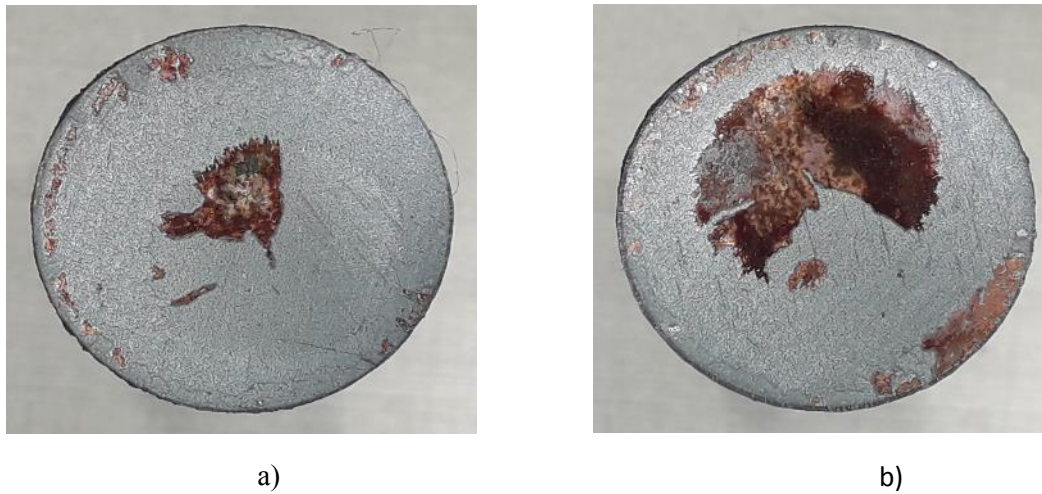
The destruction of the adhesive seam, which is the investigated epoxy composite material, occurs as a result of stretching under the influence of normal stresses. The end surface of the steel rod is completely covered (Fig. 3, a) with an epoxy composite material containing starch particles in the amount of 30 parts by weight.

The part of the epoxy composite coating (silver color) was found on the end surface (Fig. 3, b) of the metal rod (brown color). The appearance of a brown color on the surface of the metal rod is due to the presence of a copper coating, which was applied as a result of the electrolytic deposition of copper ions in order to create contrast. The presence of an epoxy composite coating on one part of the metal rod and its absence on the other surface indicates the destruction of the adhesive seam at the interface "epoxy composite coating-metal surface of the rod". This indicates that the adhesion strength between the epoxy composite coating and the metal surface of the rod is lower than the adhesion strength between the starch particles and the epoxy polymer matrix. This is an additional fact that there is an increase in the adhesive strength of epoxy composites with a starch content of 30 parts by weight.

After the destruction of an epoxy composite adhesive joint (silver color) with a starch content of 60 parts by weight under the influence of normal stresses, the presence of an epoxy composite coating on two metal surfaces of the rods was revealed (Fig. 4).

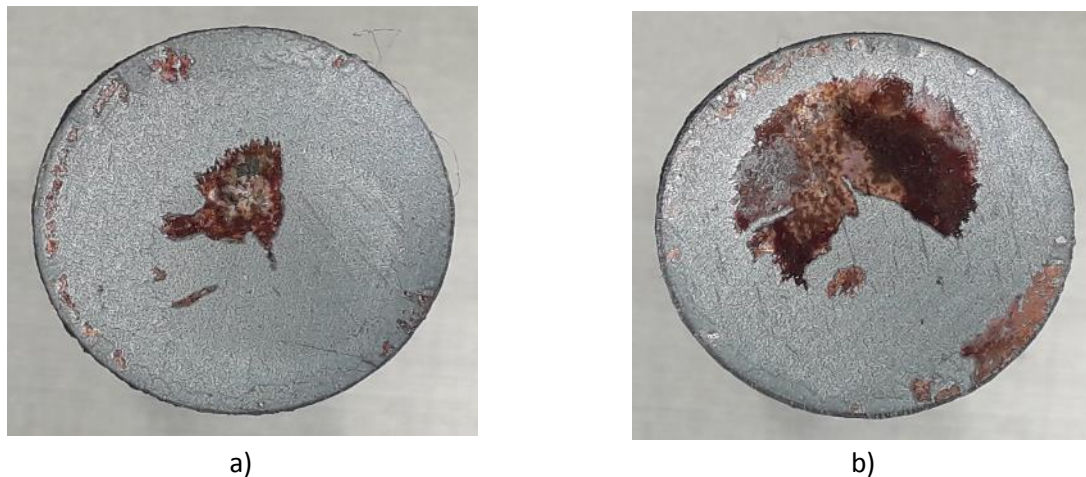


As a result of visual analysis, it can be argued that the epoxy composite coating (silver color) occupies a larger surface area compared to the surface area of the metal rod (brown color). This indicates the cohesive nature of the failure of the epoxy composite material, since the adhesion between the metal surface of the rod and the epoxy composite material is higher than the adhesive strength between the starch particles and the epoxy polymer matrix.



**Fig. 3. The appearance of the surfaces of the adhesive joint after the destruction of the layer of epoxy composite material with a content of 30 parts by weight of starch**

Therefore, the increased content of starch in the epoxy composite leads to a decrease in the adhesive strength of the material due to a decrease in the number of physical and chemical bonds between the components in the epoxy composite system and an increase in porosity.



**Fig. 4. The appearance of the surfaces of the adhesive joint after the destruction of the layer of epoxy composite material with a content of 60 parts by weight of starch**

**Conclusions and prospects for further research.** The compressive strength of epoxy composite materials filled with wood flour particles is higher by 27-56% compared to epoxy composite materials filled with starch. This is due to the higher cohesive strength of wood flour particles compared to starch particles. In addition, wood flour particles have larger sizes, which determines their higher resistance to deformation under the influence of static load. At the same time, the higher strength of wood flour particles increases the resistance of the epoxy polymer matrix to deformation and destruction.

The introduction of starch powder in the optimal amount (20-50 parts by weight) into the composition of the epoxy composite material provides a 28-30% increase in adhesive strength compared to unfilled epoxy polymer. This is due to the formation of a homogeneous structure of the epoxy composite material, in which the filler particles are able to be placed evenly due to the correct shape and low coefficient of friction. Higher strength is provided by the formation of physical and chemical bonds between

the active groups of the components of the epoxy composite material, which is determined by the nature of the destruction of the adhesive joint. The destruction occurs at the interface between the metal surface of the substrate and the epoxy composite material at the optimal starch content, which indicates a higher adhesive strength between the starch particles and the epoxy polymer matrix.

In the future, it is planned to determine the mechanical characteristics and nature of structuring of epoxy composite materials containing particles of different chemical and granulometric composition.

### References

1. Mantia F., Tzankova Dintcheva N., Morreale M., Vaca-Garcia C. (2004). Green composites of organic materials and recycled post-consumer polyethylene. *Polymer International*, 53, 1888-1891.
2. Faruk O., Bledzki A., Fink H., Sain M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552-1596.
3. Savchuk P., Kashytskyi V., Liushuk O., Matrunchyk D., Udovytska Yu. (2018). Optimization of poly-filled system based on epoxycomposites. *Scientific Bulletin Kherson State Maritime Academy*, 1(18), 137-145.
4. Chin-San W. (2003). Physical properties and biodegradability of maleated-polycaprolactone/starch composite. *Polymer Degradation and Stability*, 80, 127-134.
5. Chen L., Yu Z., Fei B., Lin C., Fang C., Liu H., Ma X., Zhang X., Sun F. (2022). Study on Performance and Structural Design of Bamboo Helmet. *Forests*, 13(7), 1091.
6. Savchuk P., Sadova O., Kashytskyi V., Kalba Ye., Klymovets O. (2020). Research of properties of biocomposites filled with discrete natural fibers. *Naukovi notatki*, 69, 75-81.
7. Sadova O., Kashytskyi V., Melnychuk M., Smoljankin O., Myskovets S. (2020). Investigation of the properties of biocomposites filled with the highly dispersed starch powder. *Naukovi notatki*, 70, 35-42.
8. La Mantia F., Scaffaro R., Morreale M., Lo Re G. (2008). Effect of the processing on the properties of biopolymer based composites filled with wood flour. *International Journal of Material Forming*. 1. 759-762.
9. Seung-Hwan L., Wang Siqun W. (2006). Biodegradable polymers/bamboo fiber biocomposite with bio-based coupling agent. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37, 80-91.
10. Mohanty A.K., Misra M., Drzal L.T. (2005). Natural Fibres, Biopolymers, and Biocomposites. *CRC Press*, 894.
11. Dhakal H.N., Zhang Z.Y., Richardson M.O.W. (2007). Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. *Composites Science and Technology*, 67(7-8), 1674-1683.
12. Alamri H., Low I.M. (2012). Mechanical properties and water absorption behaviour of recycled cellulose fibre reinforced epoxy composites, *Polymer Testing*, 31(5), 620-628.
13. Osman E., Vakhguelt A., Sbarski I., Mutasher S. (2011). Water absorption behavior and its effect on the mechanical properties of kenaf natural fiber unsaturated polyester composites. *Proceedings of the 18th International Conference on Composites Materials (ICCM '11)*.
14. Savchuk P., Kashytskyi V., Sadova O., Matrunchyk D., Bagila V. (2019). Features of formation of porosity structure of epoxy organic plastics. *Naukovi notatki*, 66, 287-292.
15. Chard J.M., Creech G., Jesson D.A., Smith P.A. (2013). Green composites: sustainability and mechanical performance. *Plastics Rubber and Composites*, 42(10), 421-426.

О. П. Ясній, М. П. Голубовський

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

## МОДЕЛЮВАННЯ ВТОМНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ СТАЛІ QSTE340TM ЗА СТАЛОАМПЛІТУДНОГО НАВАНТАЖЕННЯ МЕТОДАМИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

У статті змодельовано втомну довговічність сталі QSTE340TM за сталоамплітудного навантаження методами машинного навчання з учителем. Моделювання здійснено методом випадкових лісів, дерев прийняття рішень та методом опорних векторів. Отримано залежності прогнозованих та реальних довжин тріщини для чотирьох коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження  $R=0,1; 0,3; 0,5; 0,7$ . Отримано залежності прогнозованих та експериментальних довжин тріщини  $a$  від кількості циклів навантаження  $N$ . Виявлено, що найкращі результати показали метод випадкових лісів та дерева прийняття рішень.

**Ключові слова:** машинне навчання, втомна довговічність, випадкові ліси, дерева прийняття рішень, метод опорних векторів.

O. P. Yasniy, M. P. Holubovskiy

## MODELLING OF QSTE340TM STEEL LIFETIME UNDER CONSTANT AMPLITUDE LOADING BY EMPLOYING MACHINE LEARNING METHODS

In the article, there was modelled the fatigue life of QSTE340TM steel under constant-amplitude loading using supervised methods of machine learning. Modeling was carried out by the method of random forests, decision trees and the method of support vectors. Dependencies of predicted and actual crack length were obtained for four stress ratio  $R=0.1; 0.3; 0.5; 0.7$ . There were built the dependences of the predicted and experimental crack length  $a$  on the number of load cycles  $N$ . It was found that the best results were shown by random forests method and decision trees.

**Keywords:** machine learning, fatigue lifetime, random forest, decision trees, support vector machines.

**Постановка проблеми.** Методи штучного інтелекту широко застосовують у багатьох галузях науки і техніки, а також у повсякденному житті. Підмножиною множини методів штучного інтелекту є методи машинного навчання. Дані методи застосовують у галузі механіки руйнування, де на їх основі будують високоточні прогностичні моделі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Задачі механіки руйнування можна успішно розв'язувати вищезгаданими методами. Зокрема, ними моделюють стрибкоподібну повзучість алюмінієвих сплавів [1], їхні діаграми деформування [2] та втомного руйнування [3]. Для розв'язування цих задач користуються методами машинного навчання з учителем.

**Постановка завдання.** Мета даної роботи - змодельовати втомну довговічність сталі QSTE340TM за сталоамплітудного навантаження з різними коефіцієнтами асиметрії циклу навантаження методами машинного навчання з учителем, скориставшись відкритим публічно доступним набором експериментальних даних.

**Викладення основного матеріалу.**

Зразки виготовлено з пластини автомобільної сталі QSTE340TM товщиною 2,5 мм. Механічні властивості отримано шляхом випробувань на розтяг. Модуль пружності  $E = 194$  ГПа, межа текучості  $\sigma_y = 365$  МПа, межа міцності  $\sigma_b = 482$  МПа [4]. Компактний зразок на розтяг (СТ) виготовлено відповідно до стандарту ASTM E647 [5]. Хімічний склад сталі QSTE340TM наведено у таблиці 1.

Табл. 1.

Хімічний склад сталі QSTE340TM

C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	Ti
0,12%	0,50%	1,3%	0,03%	0,03%	0,015%	0,09%	0,22%

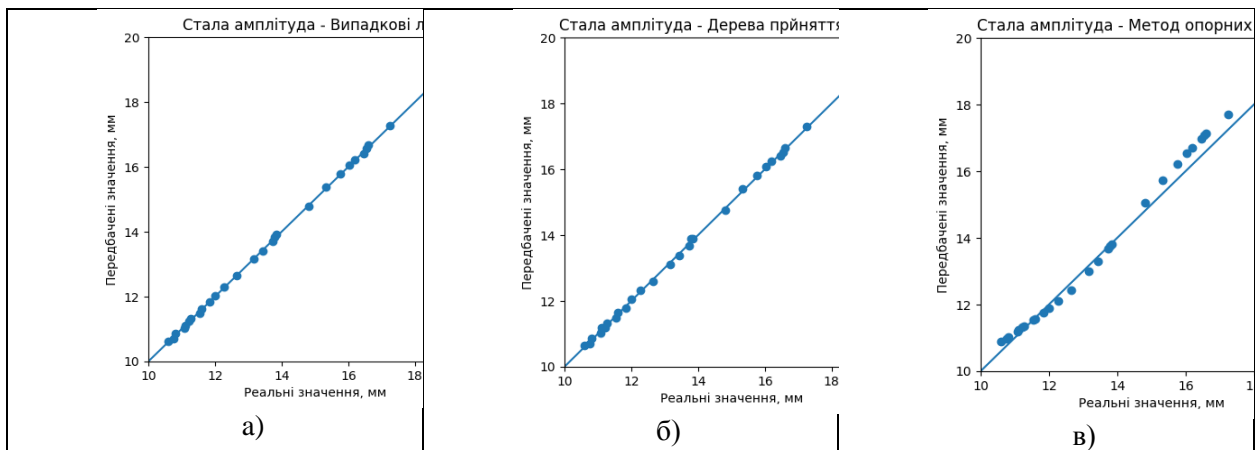
Набір даних [6] містить залежності довжини тріщини  $a$  від кількості циклів навантаження  $N$  для чотирьох асиметрій циклу навантаження, а саме,  $R = 0,1; 0,3; 0,5$  і  $0,7$  за сталої амплітуди (СА).

Вибірki для кожної асиметрії циклу навантаження розділили на дві нерівні частини - навчальну та тестову. Тестові вибірki містила 20% експериментальних даних для певної асиметрії. Навчальні вибірki натомість складалася з решти 80% даних, отриманих за навантаження сталої амплітуди. Моделі тренували на навчальній вибірці, тоді як тестових вибірок вони не бачили. На

вхід кожної моделі подавали дві змінні - кількість циклів навантаження  $N$  та коефіцієнт асиметрії циклу навантаження  $R$ . На виході отримували довжину тріщини  $a$ . Моделювання здійснювали трьома методами машинного навчання з учителем - випадковими лісами [7], деревами прийняття рішень [8] та методом опорних векторів [9]. Кожен із наведених вище методів дозволяє ефективно розв'язувати сформульовану задачу регресії.

У результаті дослідження отримано залежності прогнозованих та реальних значень для довжини тріщини  $a$  за сталоамплітудного навантаження для усіх чотирьох досліджуваних коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження.

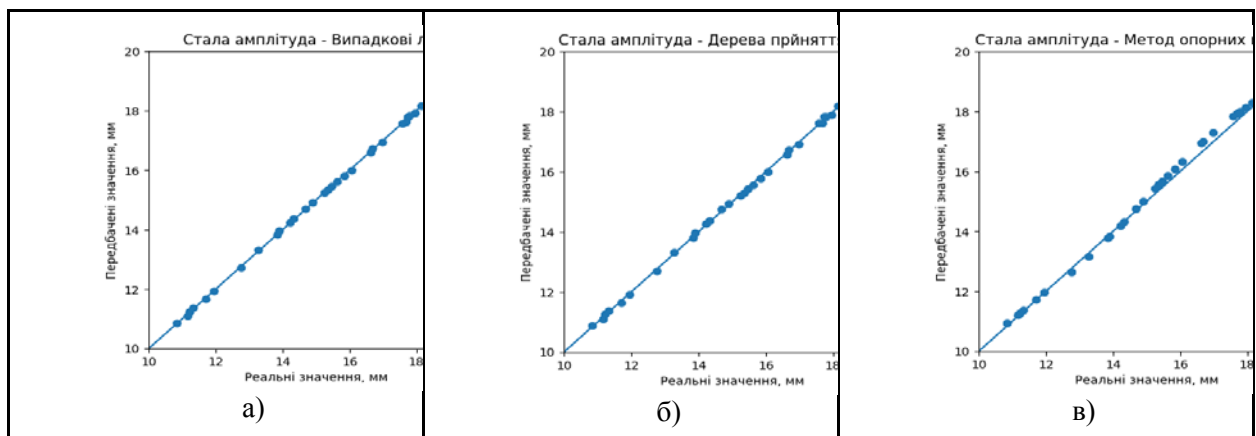
На рисунку 1 подано залежності реальних та прогнозованих довжини тріщини  $a$  за сталоамплітудного навантаження та коефіцієнта асиметрії циклу навантаження  $R = 0,1$ , отримані методом випадкових лісів (а), деревами прийняття рішень (б), та методом опорних векторів (в).



**Рис. 1. Залежності реальних та прогнозованих довжин тріщини  $a$  за сталоамплітудного навантаження та коефіцієнта асиметрії циклу навантаження  $R = 0,1$ , отримані методом випадкових лісів (а), деревами прийняття рішень (б), та методом опорних векторів (в)**

Як видно з рисунку 1, прогнозовані значення, отримані випадковими лісами та деревами прийняття рішень досить близькі до реальних експериментальних даних. Трохи гірше себе показав у цьому випадку метод опорних векторів, що помітно з рис. 1 в.

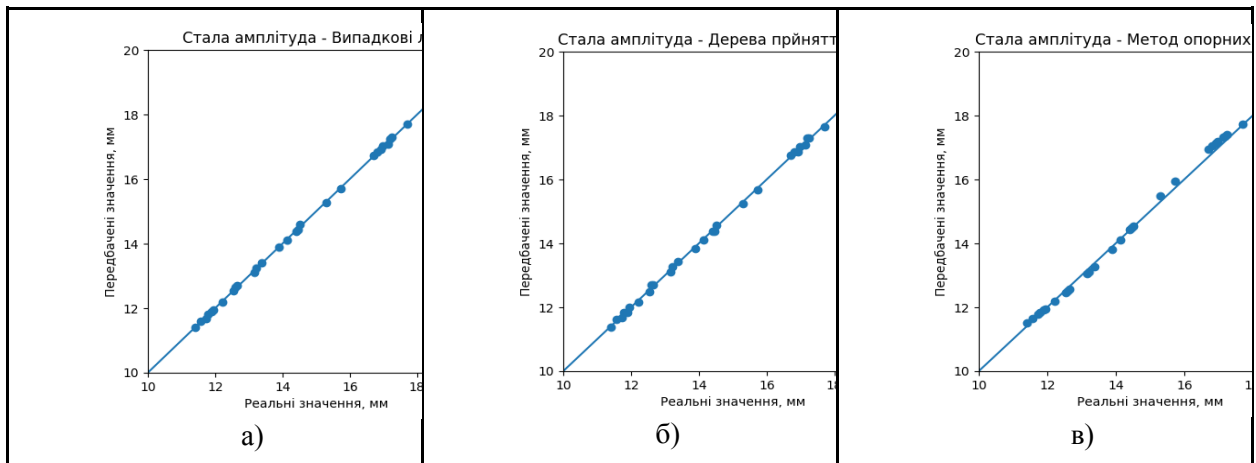
На рисунку 2 наведено залежності реальних та прогнозованих довжин тріщини  $a$  за сталоамплітудного навантаження та коефіцієнта асиметрії циклу навантаження  $R = 0,3$ , одержані методом випадкових лісів (а), деревами прийняття рішень (б), та методом опорних векторів (в).



**Рис. 2. Залежності реальних та прогнозованих довжин тріщини  $a$  за сталоамплітудного навантаження та коефіцієнта асиметрії циклу навантаження  $R = 0,3$ , отримані методом випадкових лісів (а), деревами прийняття рішень (б), та методом опорних векторів (в)**

Як і у попередньому випадку, помітно, що найкращі результати отримано методом випадкових лісів та деревами прийняття рішень, тоді як метод опорних векторів показав дещо гірші результати.

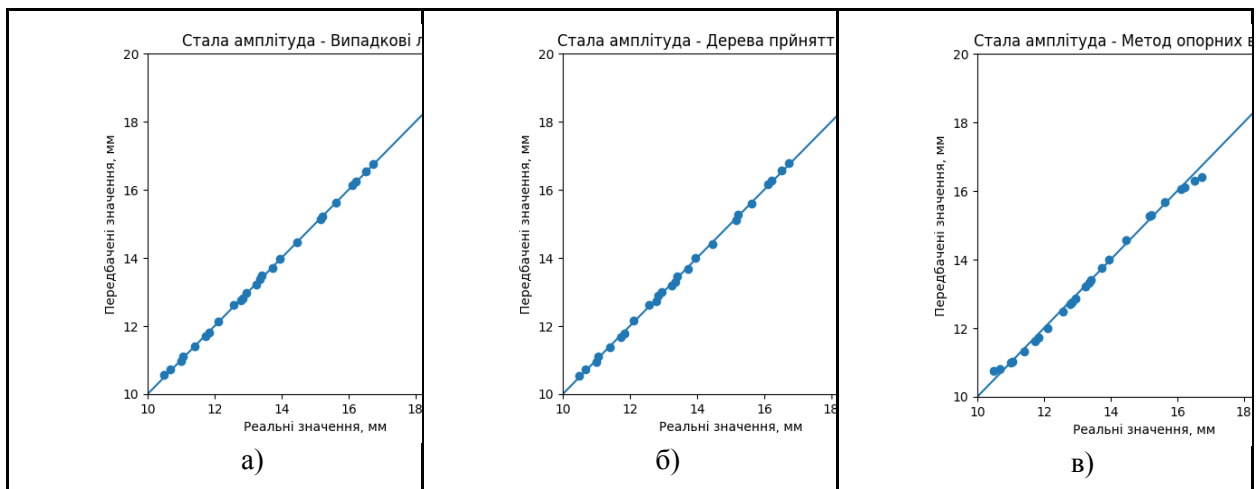
На рисунку 3 наведено залежності реальних та прогнозованих довжин тріщини  $a$  за сталоамплітудного навантаження та коефіцієнта асиметрії циклу навантаження  $R = 0,5$ , одержані методом випадкових лісів (а), деревами прийняття рішень (б), та методом опорних векторів (в).



**Рис. 3. Залежності реальних та прогнозованих довжин тріщини  $a$  за сталоамплітудного навантаження та коефіцієнта асиметрії циклу навантаження  $R = 0,5$ , отримані методом випадкових лісів (а), деревами прийняття рішень (б), та методом опорних векторів (в)**

У цьому випадку найкращі результати показав метод випадкових лісів, менш точні - дерева прийняття рішень, а на третьому місці опинився метод опорних векторів.

На рисунку 4 наведено залежності реальних та прогнозованих довжин тріщини  $a$  за сталоамплітудного навантаження та коефіцієнта асиметрії циклу навантаження  $R = 0,7$ , отримані методом випадкових лісів (а), деревами прийняття рішень (б), та методом опорних векторів (в)



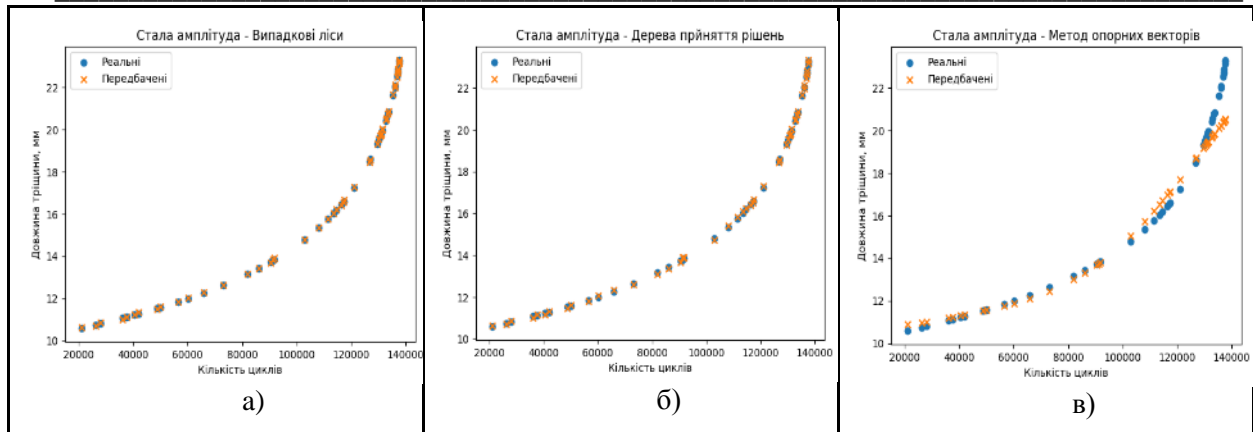
**Рис. 4. Залежності реальних та прогнозованих довжин тріщини  $a$  за сталоамплітудного навантаження та коефіцієнта асиметрії циклу навантаження  $R = 0,7$ , отримані методом випадкових лісів (а), деревами прийняття рішень (б), та методом опорних векторів (в)**

Як і у попередніх випадках, найгірший результат показав метод опорних векторів, тоді як перше і друге місця розділили випадкові ліси та дерева прийняття рішень.

Також отримано залежності довжини тріщини  $a$  від кількості циклів навантаження  $N$  для кожного з чотирьох досліджених коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження.

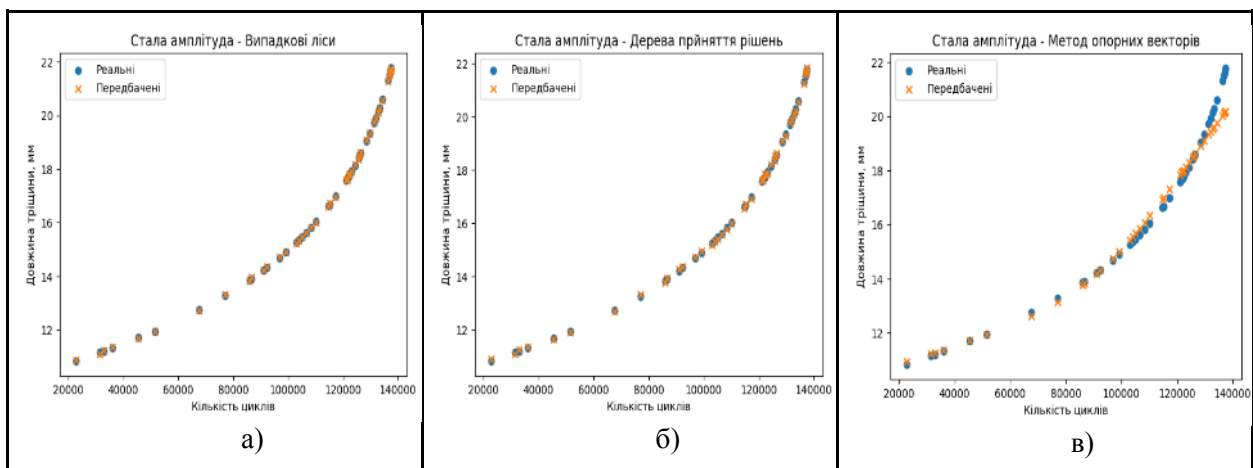
На рис. 5. наведено реальні та розрахункові залежності довжини тріщини  $a$  від кількості циклів навантаження  $N$  для коефіцієнта асиметрії циклу навантаження  $R = 0,1$ , отримані методом випадкових лісів (а), деревами прийняття рішень (б) та методом опорних векторів (в).

Як видно з рис. 5, метод випадкових лісів та дерева прийняття рішень досить добре описують залежності довжини тріщини від кількості циклів навантаження. Менш точні результати досягнуто методом опорних векторів.



**Рис. 5. Залежності реальної та прогнозованої довжини тріщини  $a$  від кількості циклів навантаження  $N$  для коефіцієнта асиметрії циклу навантаження  $R = 0,1$ , отримані методом випадкових лісів (а), деревами прийняття рішень (б) та методом опорних векторів (в)**

На рис. 6. наведено експериментальні та прогнозовані залежності довжини тріщини  $a$  від кількості циклів навантаження  $N$  для коефіцієнта асиметрії циклу навантаження  $R = 0,3$ , одержані методом випадкових лісів (а), деревами прийняття рішень (б) та методом опорних векторів (в).



**Рис. 6. Залежності реальної та прогнозованої довжини тріщини  $a$  від кількості циклів навантаження  $N$  для коефіцієнта асиметрії циклу навантаження  $R = 0,3$ , отримані методом випадкових лісів (а), деревами прийняття рішень (б) та методом опорних векторів (в)**

Як і в попередньому випадку, метод випадкових лісів та дерева прийняття рішень досить точно описують залежності довжини тріщини від кількості циклів навантаження. Трохи гірші результати показав метод опорних векторів.

На рис. 7. зображено експериментальні та прогнозовані залежності довжини тріщини  $a$  від кількості циклів навантаження  $N$  для коефіцієнта асиметрії циклу навантаження  $R = 0,5$ , отримані методом випадкових лісів (а), деревами прийняття рішень (б) та методом опорних векторів (в).

Для коефіцієнта асиметрії циклу навантаження  $R = 0,5$  метод випадкових лісів та дерева прийняття рішень досить точно описують залежності довжини тріщини  $a$  від кількості циклів навантаження  $N$ . Трохи гірші результати досягнуто методом опорних векторів.

На рис. 8 подано залежності реальні та передбачені довжини тріщини  $a$  від кількості циклів навантаження  $N$  для коефіцієнта асиметрії циклу навантаження  $R = 0,7$ , обчислені методом випадкових лісів (а), деревами прийняття рішень (б) та методом опорних векторів (в).

Як у всіх попередніх випадках, метод випадкових лісів та дерева прийняття рішень досить точно описують залежності довжини тріщини  $a$  від кількості циклів навантаження  $N$ . Трохи гірші результати показав методом опорних векторів.

У таблиці 2 подано отримані середньоквадратичну та середню абсолютну похибки, а також середнє абсолютне відхилення та точність, розраховані різними методами машинного навчання для усіх чотирьох досліджуваних коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження.

Табл. 2.

Значення похибок моделювання

Метрика	Метод випадкових лісів				Дерева прийняття рішень				Метод опорних векторів			
	R=0.1	R=0.3	R=0.5	R=0.7	R=0.1	R=0.3	R=0.5	R=0.7	R=0.1	R=0.3	R=0.5	R=0.7
Середньо-квадратична похибка	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.003	0.003	0.003	1.176	0.313	0.142	0.014
Середня абсолютна похибка	0.030	0.030	0.030	0.03	0.050	0.050	0.060	0.059	0.700	0.350	0.230	0.090
Середнє абсолютне відхилення, %	0.208	0.177	0.204	0.215	0.348	0.340	0.382	0.340	3.493	1.830	1.291	0.702
Точність, %	99.792	99.823	99.796	99.785	99.652	99.660	99.617	99.600	96.507	98.170	98.709	99.298

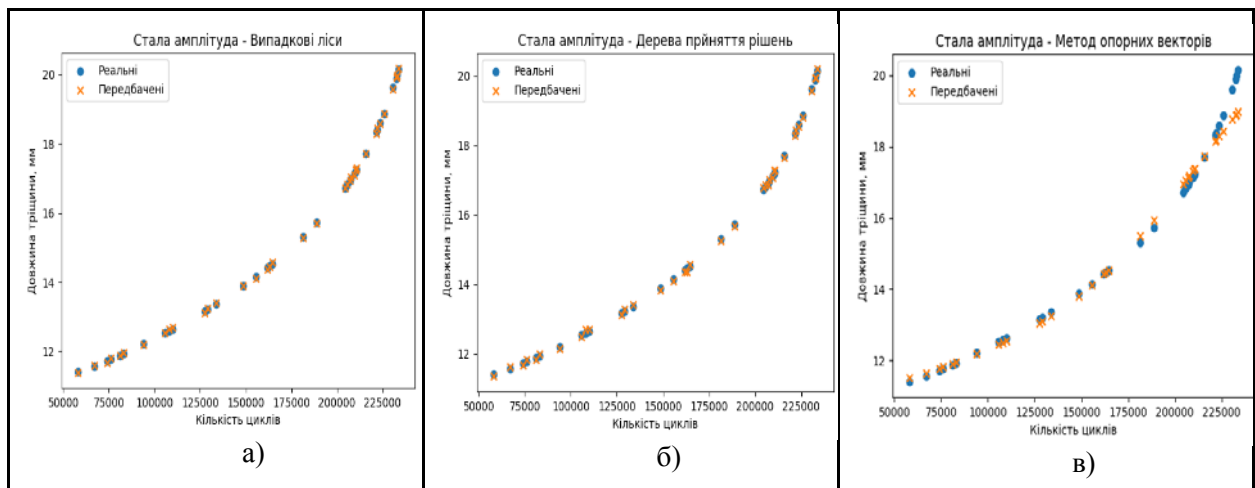
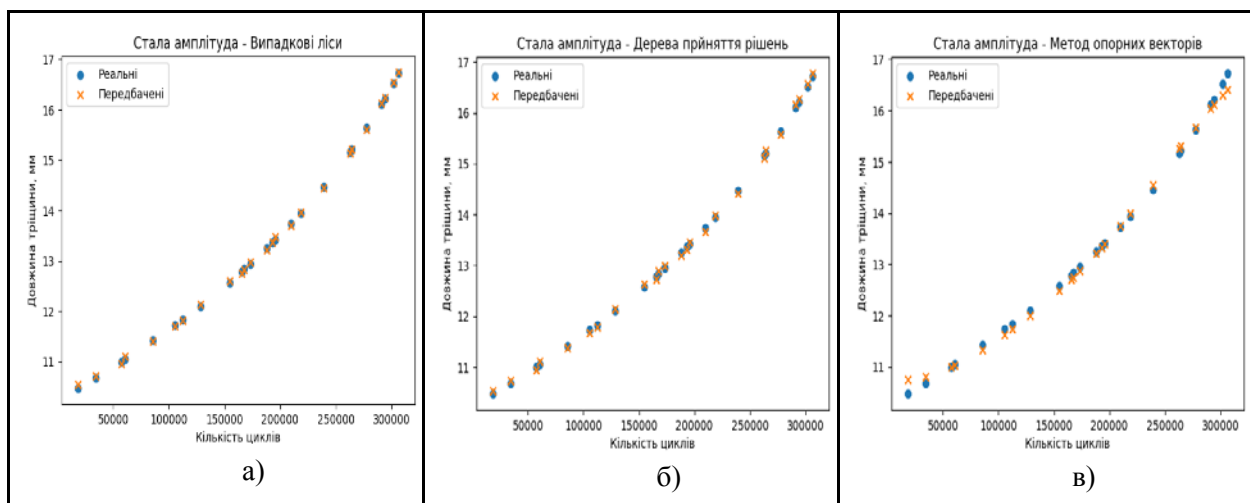


Рис. 7. Залежності реальної та прогнозованої довжини тріщини  $a$  від кількості циклів навантаження  $N$  для коефіцієнта асиметрії циклу навантаження  $R = 0,5$ , отримані методом випадкових лісів (а), деревами прийняття рішень (б) та методом опорних векторів (в)

Як видно з таблиці 2, найвищу точність для усіх коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження, котра становить вище 99,65 %, досягнуто методом випадкових лісів, на другому місці виявилися дерева прийняття рішень з точністю не меншою 99,5%, дещо гірші результати показав метод опорних векторів.

**Висновок.** Методами машинного навчання змодельовано втомну довговічність сталі STE340TM за сталоамплітудного навантаження методами машинного навчання з учителем. Моделювання здійснено методом випадкових лісів, дерев прийняття рішень та методом опорних векторів. Отримано залежності прогнозованих та реальних довжин тріщини для чотирьох коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження  $R=0,1;0,3;0,5;0,7$ .



**Рис. 8. Залежності реальної та прогнозованої довжини тріщини  $a$  від кількості циклів навантаження  $N$  для коефіцієнта асиметрії циклу навантаження  $R = 0,7$ , отримані методом випадкових лісів (а), деревами прийняття рішень (б) та методом опорних векторів (в)**

Отримано залежності прогнозованих та експериментальних довжин тріщини від кількості циклів навантаження. Виявлено, що найкращі результати показали випадкові ліси та дерева прийняття рішень, дещо гірше проявив себе метод опорних векторів. Зокрема, точність методу випадкових лісів складає вище 99,6% для усіх коефіцієнтів асиметрії циклу навантаження. Загалом, методи машинного навчання служать потужним та багатообіцяючим методом розв'язування задач механіки.

#### Список використаних джерел:

- [1] O. Yasniy, I. Pasternak, I. Didych, S. Fedak, and D. Tymoshchuk, "Methods of jump-like creep modeling of AMg6 aluminum alloy," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 48, pp. 149–154, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.prostr.2023.07.141.
- [2] O. Yasniy, O. Pastukh, I. Didych, V. Yatsyshyn, and I. Chykhira, "Application of machine learning for modeling of 6061-T651 aluminum alloy stress–strain diagram," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 48, pp. 183–189, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.prostr.2023.07.146.
- [3] O. P. Yasniy, O. A. Pastukh, Yu. I. Pyndus, N. S. Lutsyk, and I. S. Didych, "Prediction of the Diagrams of Fatigue Fracture of D16T Aluminum Alloy by the Methods of Machine Learning," *Mater. Sci.*, vol. 54, no. 3, pp. 333–338, Nov. 2018, doi: 10.1007/s11003-018-0189-9.
- [4] Y. Lu, F. Yang, and T. Chen, "Effect of single overload on fatigue crack growth in QSTE340TM steel and retardation model modification," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 212, pp. 81–94, May 2019, doi: 10.1016/j.engfracmech.2019.03.029.
- [5] "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates." Accessed: Jun. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.astm.org/e0647-23b.html>
- [6] F. Yang, T. Chen, and Y. Lu, "Data for: Effect of single overload on fatigue crack growth in QSTE340TM steel and retardation model modification," vol. 1, Mar. 2019, doi: 10.17632/8pcx2mgfd4.1.
- [7] L. Breiman, "Random Forests," *Mach. Learn.*, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, Oct. 2001, doi: 10.1023/A:1010933404324.
- [8] J. N. Morgan and J. A. Sonquist, "Problems in the Analysis of Survey Data, and a Proposal," *J. Am. Stat. Assoc.*, vol. 58, no. 302, pp. 415–434, Jun. 1963, doi: 10.1080/01621459.1963.10500855.
- [9] C. Cortes and V. Vapnik, "Support-vector networks," *Mach. Learn.*, vol. 20, no. 3, pp. 273–297, Sep. 1995, doi: 10.1007/BF00994018.



**В.С. Мазурок, В.П. Кашицький***Луцький національний технічний університет***ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ БІОКОМПЗИТНОГО МАТЕРІАЛУ З ВМІСТОМ НАПОВНЮВАЧІВ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ**

*Визначено межу міцності біокомпозитних матеріалів, які наповнені частинками деревного борошна та подрібненими стеблами зернових культур в комплексному співвідношенні. Встановлено оптимальний склад наповнювачів природного походження, що дозволило отримати біокомпозитні матеріали з високою міцністю при стисненні. Визначено ефективність проведення попередньої термічної обробки композиції, що забезпечує видалення вологи в оптимальній кількості. Формування біокомпозитного матеріалу з високою щільністю досягається в результаті компактного розташування компонентів в біополімерній матриці. Досліджено вплив додаткової термічної обробки на міцність при стисненні, що визначає жорсткість глютинової матриці та еластичність подрібнених стебел зернових культур.*

*Ключові слова:* біополімерні композити; деревне борошно; подрібнені стебла; термічна обробка; пресування; міцність; пористість; хімічні зв'язки; адгезія; структура.

**V. Mazurok, V. Kashytskyi****OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION AND FORMING TECHNOLOGY OF BIOCOMPOSITE MATERIAL WITH A CONTENT OF FILLERS OF PLANT ORIGIN**

*The compressive strength limit of biocomposite materials filled with wood flour particles and chopped stalks of grain crops in a complex ratio was determined. The optimal composition of fillers of natural origin has been established. This made it possible to obtain biocomposite materials with high compressive strength. The effectiveness of the preliminary heat treatment of the composition, which ensures the removal of moisture in the optimal amount, has been determined. The formation of a biocomposite material with high density is achieved as a result of the compact arrangement of components in the biopolymer matrix. The influence of additional heat treatment on compressive strength, which determines the stiffness of the glutinous matrix and the elasticity of the chopped stalks of cereal crops, was investigated.*

*Key words:* biopolymer composites; wood flour; chopped stalks; heat treatment; pressing; strength; porosity, chemical bonds; adhesion; structure.

**Formulation of the problem.** The widespread use of a new class of polymer composite materials containing natural components is due to the high environmental friendliness of such materials and the developed raw material base. In the case of using natural binders and fillers, the harmful impact on the ecosystem is reduced sharply compared to synthetic components of polymer composite materials. This is due to the biocompatibility of the components, which do not impair environmental safety and do not pollute the environment during the manufacturing process of the products. In addition, under the influence of atmospheric factors, harmful substances are not formed during the destruction of biocomposite products. The raw material base for obtaining finely dispersed powders or fibers for the production of biocomposite products is replenished with a large amount of organic waste, which is generated as a result of the production of products in the textile, food, furniture and agricultural industries. Natural materials differ little in chemical composition, structure, and properties, so they do not require the development of a separate technological process for the preparation of fillers for mixing with the polymer matrix. This makes the process of waste processing easier and ensures the unification of the technological processes of preparing components for the formation of biocomposite products. However, it is necessary to take into account the morphological composition and physical and mechanical properties of natural fillers, which affects the technology and development of the technological process of forming biocomposite products. The structure of biocomposite materials is formed depending on the nature of the filler and the presence of active groups on its surface, as well as the ability to interact with the polymer matrix. This determines the physical and mechanical and operational properties of biocomposite products, the scope of which expands depending on the functional purpose.

The most common fillers are finely dispersed fillers, which are obtained as a result of processing all possible types of raw materials of plant origin. This makes it possible to make the technological process of forming products easier, but it is difficult to ensure an increase in the resistance of biocomposites to the influence of dynamic loads. This is achieved by using fibrous fillers, but at the same time, the technological process of product formation is complicated. Solving the problem is possible in the case of using fillers in the form of short fibers, which allows to simplify the technological process and obtain high values of mechanical characteristics. The relevance of the work is determined by the need to determine the optimal ratio between the content of fine particles and discrete fibers, which requires research into the processes of structuring and interphase interaction of components of natural origin.

**Analysis of recent research and publications.** In the forming process of biocomposite materials, a scheme of combining components is used [1, 2]. The components are polymer synthetic matrix and fillers of plant origin. This approach is beneficial for modern society to reduce dependence on synthetic materials [3]. Biocomposite materials differ from polymer composite materials by the type of filler, which is mainly plant fibers [4, 5]. Developments in the direction of creating biocomposite materials are primarily determined by environmental needs. A feature of biocomposite materials is the presence of components of natural origin. Under the influence of microorganisms and atmospheric factors, they disintegrate into separate components, which are completely safe [6]. The use of eco-safe components reduces harmful effects during the production of biocomposite products, which increases safety and occupational hygiene [7]. In this case, enterprises do not need to install complex and expensive ventilation systems and treatment facilities. In most cases, the use of natural fibers provides higher environmental friendliness compared to synthetic fibers (glass fiber, aramid fiber, carbon fiber) due to the reduction of carbon dioxide emissions and the consumption of less energy during production [8].

In addition, there are requirements for the economical use of materials based on non-renewable sources of raw materials due to limited oil and mineral substances. Their number in the earth's crust is constantly decreasing, as renewal takes place over thousands of years. Therefore, their use is not commensurate with the duration of recovery. Components of biocomposite materials can be obtained from food, wood processing, and agricultural waste [9]. On the one hand, waste materials are disposed of, and on the other hand, these industries are the main suppliers of renewable raw materials. This approach ensures the long-term existence of the raw material base, which is capable of recovery thanks to the cultivation of agricultural crops or energy plants.

The main advantages of biocomposites include availability and functional properties (eco-friendliness, high thermal insulation properties, good formability, low cost and the ability to restore the raw material base) [10]. In many cases, biocomposite-based materials provide weight reduction, increased stability of working parts of processing equipment, additional functional properties (damping and absorption of dynamic loads), as well as the ability to recycle [11]. In addition to the significant advantages of biocomposite products, there are a number of disadvantages that must be taken into account in order to obtain a quality product. First, the mechanical and operational properties of biocomposite materials are worse [12, 13] compared to polymer composite materials consisting of components of synthetic origin. However, with the use of modifying substances and chemical treatments, the properties of biocomposite materials can be significantly improved.

The intensive development of new polymers on a biological basis is associated with the high biodegradability of the matrix, which contains organic macromolecules. These biopolymers can be recycled in the process of technological transformations or synthesized using raw materials of biological resources [14]. A large group of biopolymers is represented by polysaccharides (cellulose, chitosan, starch, alginate, and pectin), consisting of tens or thousands of monosaccharides connected by glycosidic bonds. The group of synthesized thermoplastics includes biopolymers such as polylactic acid (PLA), polyhydroxyalkanoate (PHA), polyhydroxybutyrate (PHB), polybutylene adipate terephthalate (PBAT), polybutylene succinate (PBS), polycaprolactone (PCL) and thermosetting polymers obtained from vegetable oils and carbohydrates [15]. In some cases, mixtures containing both bio-derived and synthetic components are used. This ensures an optimal balance between productivity and positive environmental impact. Among the wide range of biopolymers, the most practical application is polylactic acid (PLA), which is obtained from corn starch and polyfurfuryl alcohol resin. Currently, there are many more types of biopolymers under development, including starch and vegetable oils. The work [16] determined the optimal pressing pressure of the composition (12 MPa), consisting of starch binder and wood flour particles. The use of a technological compression operation ensures the formation of a biocomposite material that has a high structure density due to the interaction of components with the formation of physical and chemical bonds.

**Setting tasks.** The purpose of the work is to determine the compressive strength limit of biocomposite materials based on gluten with a complex content of fillers (shredded cereal stalks and wood flour powder).

**Presentation of the main material.** The composition for the formation of biocomposite samples is a mixture of a glutinous binder and fillers of vegetable origin (chopped grains of cereal crops and wood flour) in a total amount of 100% (Table 1). The prepared composition was placed in a mold and compressed using a hydraulic press with a specific load of 120 MPa. Further, the mold with the composition was heated for 90 minutes at a temperature of 140°C. If necessary, additional heat treatment was performed. Additional heat treatment consisted in heating the biocomposite samples to a temperature of 50°C for 8 hours. The

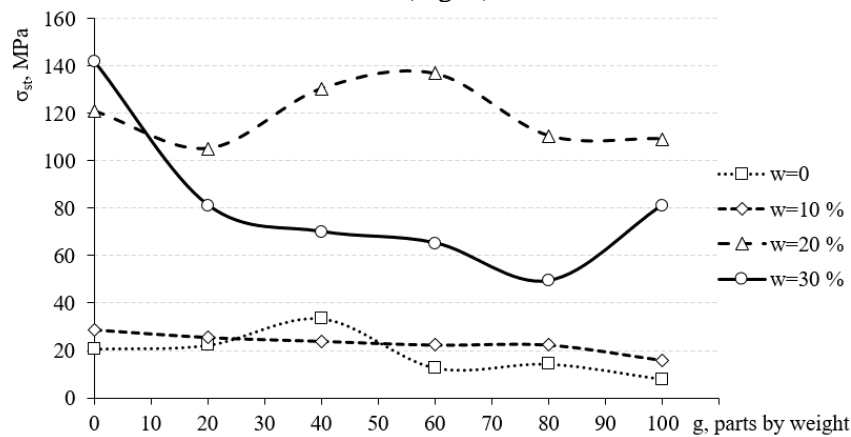
compressive strength limit was determined according to the ASTM D695 "Compression Testing of Rigid Plastics" method on cylindrical samples with a height of 30 mm and a diameter of 30 mm.

Table 1.

**The ratio of filler content of multi-filled biocomposite material**

№ sample	The content of chopped grains of cereal crops, %	Wood flour content, %
1	0	100
2	20	80
3	40	60
4	60	40
5	80	20
6	100	0

The limit of compressive strength of biocomposite materials containing wood flour (100%), the composition of which contains moisture, is 20.7 MPa (Fig. 1).



**Fig. 1. The influence of the content of chopped stalks of cereal crops on the compressive strength of biocomposite materials depending on the degree of moisture loss in the composition without additional heat treatment of the biocomposite**

With an increase in the content of chopped stalks of cereal crops, the content of wood flour decreases and, accordingly, is the difference between the maximum content of the filler in the mixture (100%) and the content of chopped stalks of cereal crops. The compressive strength increases by 38% in the case of using a mixture (40% chopped cereal stalks and 60% wood flour) compared to biocomposites without chopped stalks, because a biocomposite material with an optimal ratio of components is formed. The compressive strength limit decreases by 57-76% in the case of a further increase in the content of chopped stalks to 100% compared to the optimal content and reaches a minimum value of 8 MPa. This is due to the excessive content of chopped stalks in the biocomposite material, which form a heterogeneous structure due to the chaotic arrangement of particles in the biopolymer matrix.

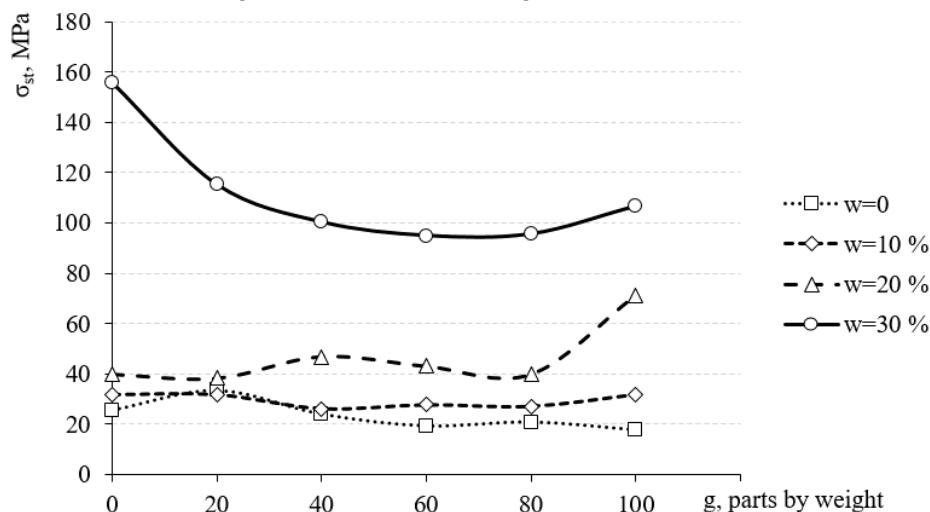
The compressive strength of biocomposite materials increases by 27% in the case of preliminary heat treatment, which consists in removing moisture in the amount of 10% from the composition, compared to biocomposites without preliminary treatment of the composition. Such materials contain 100% wood flour and do not contain chopped cereal stalks. The increase in compressive strength is due to the formation of a biocomposite material that contains less moisture. This ensures the structuring of the biocomposite material with less porosity, as intensive moisture release occurs during heating of the composition in the mold. Accordingly, the formed cavities act as structural defects, which reduce strength under compression. A uniform decrease of 12-45% in compressive strength occurs with an increase in the content of chopped stalks, which is associated with an increase in the degree of chaos in the arrangement of chopped stalks.

Biocomposite materials, the compositions of which lost 20% of moisture as a result of preliminary heat treatment, have a significant increase in compressive strength by 82% compared to biocomposites without preliminary heat treatment of the composition. This increase is due to the removal of moisture from the composition, which contains 100% wood flour. It is much easier to remove moisture from the powder filler compared to the particles of the stalks of grain crops, which ensures the formation of a homogeneous structure. An increase in the strength limit under compression to the maximum values of 130.6 MPa and 136.9 MPa occurs in the case of the introduction of chopped stalks into the composition of biocomposites

in the amount of 40-60%. This is explained by the presence of an optimal amount of moisture in the composition, which ensures the elasticity of the stalk particles without destruction during pressing of the composition. As a result, a dense structure is formed with a compact arrangement of wood flour particles and chopped stalks in the biopolymer matrix.

A sharp increase in the strength limit of biocomposite materials to 141.7 MPa occurs as a result of preliminary heat treatment of the composition, which ensures the removal of moisture in the amount of 30%. This provides an increase in compressive strength by 85% compared to biocomposite materials whose compositions contain the maximum amount of moisture (without additional heat treatment). An increase in the content of chopped stalks in the range of 20-60% in the biocomposite material leads to a 43-53% decrease in their compressive strength. Removing moisture from the composition complicates the process of compaction of the biocomposite material, as the stiffness of the stalks increases. Such stalks lose elasticity, which leads to their destruction during pressing of the composition. The lowest value (49.6 MPa) of the compressive strength limit of the biocomposite material is obtained with a content of chopped stalks of 80%. The formation of a composition consisting of 100% chopped stalks leads to an increase in the strength limit to 81.2 MPa. This is due to the formation of the structure of the biocomposite material, in which the strength is increased due to the mechanical interlocking of the stem particles.

The next stage of research concerns the determination of the compressive strength of biocomposite materials, which, after the main heat treatment of the composition in the mold, were additionally heated (additional heat treatment) in order to remove residual moisture. The compressive strength limit of such biocomposite materials, the compositions of which were not heated to remove moisture during preliminary heat treatment, is in the range of 17.5-25.5 MPa (Fig. 2).



**Fig. 2. The influence of the content of chopped stalks of cereal crops on the compressive strength of biocomposite materials depending on the degree of moisture loss in the composition and additional heat treatment (50° C for 8 hours) of the biocomposite**

The obtained compressive strength values are higher by 52-56% compared to the strength of biocomposites that were not subjected to additional heat treatment. This is due to the removal of excess moisture from the composition. Excess moisture reduces the stiffness of the glutinous matrix and fillers of natural origin, which leads to a decrease in the resistance of the biocomposite material to the impact of static load.

Removal of 20% of moisture from the composition provides an increase of 31-45% in the compressive strength limit in the case of filling the system with chopped stalks in the amount of 60-100% compared to biocomposites from which the moisture was not removed. The increase in compressive strength is due to the higher content of chopped stalks, which are able to form a structure resistant to static loads.

Removing moisture from the composition in the amount of 20% allows to increase (by 32-43%) the compressive strength of biocomposites with a content of 40-80 parts by weight of filler compared to biocomposites in which 10% of moisture has been removed from the composition. The compressive strength limit increases significantly to 71 MPa for biocomposites with a content of 100% chopped stalks, which is due to the formation of physicochemical bonds between the stem particles and the biopolymer

matrix. Removal of 20% of moisture from the composition ensures high stiffness of the glutinous matrix and strength of the stem particles.

The highest compressive strength (156 MPa) was obtained for biocomposites containing 100% wood flour (0% chopped stalks) with 30% moisture removal. The removal of moisture ensures the formation of a stable dense structure of the biocomposite material due to the lack of pressure of water molecules on the formation of physical and chemical bonds between the components of the biocomposite material. The limit of compressive strength of biocomposites containing a higher quantity of chopped stalks (60-80%) is reduced to 95 MPa. This is due to the sensitivity of cereal stalks to moisture loss, which leads to loss of elasticity and destruction under the influence of static load. Additional processing provides relaxation of residual stresses in the biocomposite material. This leads to an increase in compressive strength compared to biocomposites of a similar composition, for which no additional heat treatment was performed.

**Conclusions and prospects for further research.** Additional heat treatment provides relaxation of residual stresses, since the formation of biocomposite materials takes place in a compressed state at a temperature of 140° C. Biocomposite materials whose compositions have been heat treated to remove moisture in the maximum permissible amount of 30% have high compressive strength values. Removing moisture from the composition provides the highest compressive strength values of biocomposites compared to biocomposite materials whose compositions have an increased moisture content. The presence of additional moisture in the biocomposite material reduces the compressive strength limit, as the glutinous matrix dissolves and the bonds between the system components are destroyed.

Fillers can increase the compressive strength of biocomposites. For example, the compressive strength of biocomposites containing chopped stalks of grain crops in the optimal range of 40-60% is 130-136 MPa. This is achieved as a result of the formation of a dense structure of biocomposite material with a compact arrangement of filler particles in the glutinous matrix. The presence of a small amount of moisture contributes to the approach of macromolecules of the biopolymer matrix to the surface of the filler, which ensures the formation of additional physical and chemical bonds between active groups on the surface of the filler of natural origin and the glutinous binder.

In the future, it is planned to investigate the impact toughness of biocomposite materials in order to determine the effect of heat treatment on resistance to dynamic loads.

## References

1. Contact-Rodrigo L., Ribes-Greus A., Imrie C.T. (2002). Thermal analysis of high-density polyethylene and low-density polyethylene with enhanced biodegradability. *Journal of Applied Polymer Science*, 86, 764-72.
2. Haque M., Alvarez V., Paci M., Mariano Pracella M. (2011). Processing, compatibilization and properties of ternary composites of Mater-Bi with polyolefins and hemp fibres. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42(12), 2060-2069.
3. Syamsir A., Mubin S.M., Nor N.M., Anggraini V., Nagappan S., Sofan A.M., Muda Z.C. (2020). Effect of combined drink cans and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. *Journal of mechanical engineering and sciences*, 14, 6734-6742.
4. Pinho S.T., Iannucci L., Robinson P. (2006). Physically-based failure models and criteria for laminated fiber-reinforced composites with emphasis on fiber kinking. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37, 63-73.
5. Kashytskyi V.P., Sadova O.L., Vyshynskyi M.I., Myskovets S.V. (2023). Formation of glutinous biocomposite materials filled with chopped stalks of cereal crops. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 1 (166), 65-71.
6. Mohanty A.K., Misra M., Drzal L.T. (2002). Sustainable bio-composites from renewable resources: opportunities and challenges in the green materials word. *Journal of Polymers and the Environment*, 10(1/2), 19-26.
7. Joshi S.V., Drzal L.T., Mohanty A.K., Arora S. (2004). Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35, 371-376.
8. Rafiee K., Schmitt H., Pleissner D., Kaur G., Brar S.K. (2021). Biodegradable green composites: it's never too late to mend. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 30, 100482.
9. Scaffaro R., Maio A., Gulino E.F., Pitarresi G. (2020). Lignocellulosic fillers and graphene nanoplatelets as hybrid reinforcement for polylactic acid: effect on mechanical properties and degradability. *Composites Science and Technology*, 190, 108008.

10. Nurazzi N.M., Asyraf M.R.M., Rayung M., Norrahim M.N.F., Shazleen S.S., Rani M.S.A., Shafi A.R., Aisyah H.A., Radzi M.H.M., Sabaruddin F.A. (2021). Thermogravimetric analysis properties of cellulosic natural fiber polymer composites: A review on influence of chemical treatments. *Polymers*, 13(16), 2710.
11. Kashytskyi V., Savchuk P., Sadova O., Mazurok V., Kostyrytsya O. (2022). Formation of new biocomposites based on secondary raw materials obtained by recycling biocomposite products. *Naukovi notatki*, 74, 115-121.
12. Safri S., Sultan M., Jawaid M., Jayakrishna K. (2018). Impact behaviour of hybrid composites for structural applications: A review. *Composites Part B: Engineering*, 133, 112-121.
13. Kashytskyi V., Malets V., Sadova O., Shehynskyi V. (2022). Performance characteristics of gluten biocomposites filled with wood flour. *Naukovi notatki*, 73, 216-222.
14. Siracusa V., Blanco I. (2020) Bio-polyethylene (Bio-PE), bio-polypropylene (Bio-PP) and bio-poly(ethylene terephthalate) (Bio-PET): recent developments in bio-based polymers analogous to petroleum-derived ones for packaging and engineering applications. *Polymers*, 12(8), 1641.
15. Morreale M., Scaffaro R., Maio A., Mantia F.P. (2008). Effect of adding wood flour to the physical properties of a biodegradable polymer. *Composites: Part A*, 39, 503-513.
16. Kashytskyi V., Sadova O., Savchuk P., Malets V., Mazurok V., Myskovets S. (2021). Optimization of the composition and formation technology of biocomposites on the basis of starch binder. *Naukovi notatki*, 71, 353-359.

С.Ф. Юхимчук, С.М. Юхимчук, Л.М. Дацюк, Т.Л. Дацюк

Луцький національний технічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПОПЕРЕЧНОГО ТРАНСПОРТЕРА ДИСКОВО-ПАСОВОГО ЛЬОНОБРАЛЬНОГО АПАРАТА

*У статті дано опис нової конструкції дисково-пасового льонобрального апарата, яка дозволить підвищити довговічності бральних пасів та зменшення матеріаломісткості льонозбиральної машини. Пропонується використати стрічковий поперечний транспортер для зниження шуму при роботі і зменшення травмування стебел льону. Проведений силовий розрахунок процесу транспортування стебел льону стрічковим поперечним транспортером дисково-пасового льонобрального апарата та досліджено вплив кінематичного режиму роботи брального апарата і характеристик стеблостою льону на навантаження робочої вітки поперечного транспортера.*

*Ключові слова:* стебла льону, дисково-пасовий бральний апарат, поперечний транспортер, брання, транспортування.

S.F. Yukhymchuk, S.M. Yuhymchuk, L.M. Datsyuk, T.L. Datsyuk

## STUDY OF THE OPERATION OF THE TRANSVERSE TRANSPORTER CONVEYOR OF A DISC-BELT FLAX-PULLING APPARATUS

*The article describes a new design of a disk-belt flax puller, which will increase the durability of the tack belts and reduce the material consumption of the flax harvester. It is proposed to use a belt transverse conveyor to reduce the noise during operation and reduce the injury of flax stalks. The force calculation of the process of transporting flax stalks by a belt transverse conveyor of a flax-pulling was carried out, and the effect of the kinematic mode of the pulling apparatus and the characteristics of the flax stalk on the load of the working branch of the transverse conveyor was investigated.*

*Key words:* flax stalks, disc-belt flax-pulling apparatus, transverse conveyor, pulling, transportation.

**Постановка проблеми.** Нами запатентований [1, 2] дисково-пасовий льонобральний апарат, схематично показаний на рис. 1, який містить: збірну раму (на рисунку не показана); подільники 1, бральний вузол, який включає бральні диски 2, бральні паси 3, ролики 4, підпружинені кріплення 5, напрямні прутки 6, поперечний транспортер 7.

Дисково-пасовий льонобральний апарат працює наступним чином.

Привод бральних дисків, які обертаються в однаковому напрямку, здійснюється з картера рами. З одного боку кожен бральний диск 2, охоплюється бральним пасом 3, який надітий на ролики 4. За рахунок підпружиненого кріплення 5 верхнього ролика 4 забезпечується постійний натяг брального паса 3, а значить і тиск в бральному рівчаку.

При русі машини по поверхні поля подільники 1 розділяють стебла льону на окремі смужки і направляють їх в гирла бральних рівчаків. Далше стебла льону затискаються між контактуючими поверхнями бральних дисків 2 і бральних пасів 3, витягуються з ґрунту і переміщуються до виходу з бральних рівчаків, де захоплюються пальцями поперечного транспортера 7 і ковзаючи по поверхні напрямних прутків 6 пререміщуються до виходу з дисково-пасового льонобрального апарата. В подальшому в залежності від типу льонозбиральної машини стеблева стрічка або розстеляється на льонище, або подається на наступні робочі органи льонозбиральної машини для обчисування насінневих коробочок.

Запропонований дисково-пасового брального апарат має переваги над існуючими пасовими і пасово-дисковими льонобральними апаратами. Так бральний вузол містить менше деталей, тому льонобральний апарат менш матеріаломісткий в порівнянні з аналогами. За рахунок того, що бральні паси не передають тягових зусиль, а виконують тільки затискання і утримування стебел льону, а також підпружинення верхніх роликів 4, забезпечується підвищення довговічності бральних пасів.

Для транспортування стебел льону від бральних секцій використовується поперечний транспортер.

Аналогічні поперечні транспортери використовуються у причіпних льонобралках та льонозбиральних комбайнах [3].

Поперечний транспортер, який встановлений на льонокомбайні ЛК-4А, має три ряди металевих пальців, закріплених на втулково-роликівих ланцюгах. Це доволі металомістка конструкція, яка при роботі видає підвищений шум. Також можливе травмування стебел при дії на них металевих пальців [3].

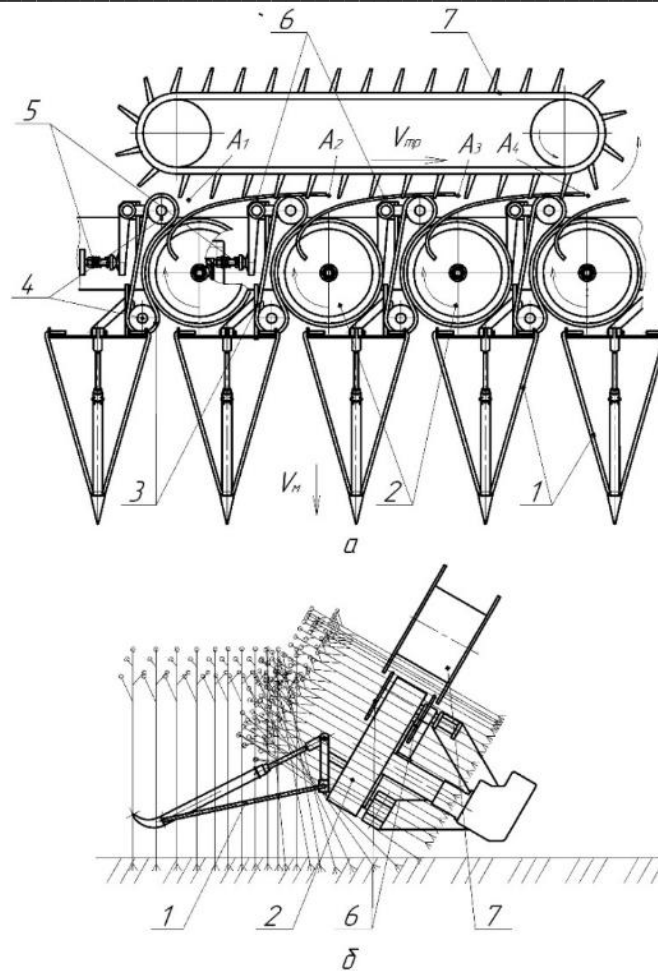


Рис. 1. Дисково-пасовий льнобральний апарат: 1 - подільники, 2 - бральні диски, 3 - бральні паси, 4 - ролики, 5 - підпружинені кріплення, 6 - напрямні прутки, 7 - поперечний транспортер; а – вид зверху, б – вид збоку

Тому в запропонованому бральному апараті встановлюємо стрічковий поперечний транспортер. Стрічка являє собою прогумоване полотно по краях якого закріплені гумові пальці. В результаті чого маємо дві вітки пальців, які захоплюють стебла льону, що виходять з брального рівчаку бральної секції одночасно з двох сторін по відношенню до брального диска і брального паса.

Це знизить металомісткість льнозбиральної машини, зменшить шум при роботі і стебла льону будуть менше травмуватися пальцями транспортера.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Дослідженнями поперечних транспортерів льнозбиральних машин займався проф. Г.А. Хайліс [4] та його учні проф. О.О. Налобіна [5] і доц. І.П. Головачук [6]. Ними обгрунтовані конструктивні, кінематичні та енергетичні параметри поперечних транспортерів. Ґрунтовно досліджені процеси захвата рухомими пальцями стебел льону, які поступають в процесі вільного падіння з секцій брального апарату, транспортування стебел в каналі і в наступні робочі органи та знімання стебел із пальців. Дані цих досліджень були використані при проектуванні стрічкового поперечного транспортера.

**Постановка завдань.** Провести силовий розрахунок процесу транспортування стебел льону стрічковим поперечним транспортером дисково-пасового льнобрального апарату та дослідити вплив кінематичного режиму роботи брального апарату і характеристик стеблостою льону на навантаження робочої вітки поперечного транспортера.

#### **Викладення основного матеріалу.**

Схема поперечного транспортера показана на рис. 1. Транспортер наближено до бральних дисків 1 і бральних пасів 2. Містить транспортер нескінченну стрічку, яка охоплює ведучий і ведений шків. Стрічка являє собою прогумоване полотно по краях якого закріплені гумові пальці, нахилені



під певним кутом. В результаті чого маємо дві вітки пальців, які захоплюють стебла льону, що виходять з брального рівчаку бральної секції одночасно з двох сторін по відношенню до брального диска і брального паса. Також з двох сторін бральних дисків і бральних пасів встановлені нерухомі напрямні прутки. Між нижньою віткою стрічкового поперечного транспортера і напрямними прутками бральних секцій утворюється канал транспортера. На схемі показані також напрямки руху ведучого шківа і стрічки з пальцями.

При роботі машини стебла, що поступають з бральних рівчаків у канал транспортера, підхоплюються пальцями транспортера та переміщуються вздовж каналу; при цьому формується стеблова стрічка, яка далі виводиться із каналу на наступний робочий орган. Найбільше навантаження діє на пальці в зоні останньої (внутрішньої) бральної секції, а найменше – в зоні першої (польової) секції. На схемі (рис. 1) перша (польова) секція знаходиться в зоні біля точки  $A_1$ , наступна секція (друга) знаходиться правіше точки  $A_2$ , в зоні біля точки  $A_3$  знаходиться третя секція, в зоні біля точки  $A_4$  знаходиться остання четверта секція. На схемі від точки  $A_1$  до наступного рівчака ланцюг транспортує стебла вибрані першою секцією (польовою). На виході із другого рівчака до цих стебел під'єднуються стебла з другої секції, при цьому утворюється двохсекційна стрічка; при наближенні пальців до третього рівчака додаються ще стебла й утворюється трьохсекційна стрічка; при наближенні пальців до останнього четвертого рівчака (зона біля точки  $A_4$ ) утворюється чотирьохсекційна стрічка, яка виводиться із каналу та передається на наступний робочий орган. Починаючи з точки  $A_4$  стеблова стрічка рухається до виходу із транспортера.

Кожну секунду кожний бральний рівчак виводить у канал транспортера число  $i_p$  стебел:

$$i_p = B i_c v_m, \quad (1)$$

де  $B$  – ширина захвату бральної секції;

$i_c$  – густина стеблостою (число стебел на  $1\text{ м}^2$  поля);

$v_m$  – швидкість руху машини.

Найменша кількість стебел попадає в канал транспортера в зоні першого брального рівчака. На  $1$  м довжини каналу транспортера в зоні першого рівчака укладається число  $i_{k1}$  стебел, що дорівнює:

$$i_{k1} = \frac{i_p}{v_{mp}} = B i_c \frac{v_m}{v_{mp}}, \quad (2)$$

де  $v_{mp}$  – швидкість стрічки поперечного транспортера.

Така кількість стебел буде на ділянці каналу від першого (польового) до другого рівчака. На ділянці від другого до третього рівчака число стебел на  $1$  м довжини буде у  $2$  рази більше.

На ділянці від  $i$ -того рівчака до  $i+1$  рівчака число стебел на  $1$  м довжини каналу буде :

$$i_{ki} = i B i_c \frac{v_m}{v_{mp}}. \quad (3)$$

У запропонованому апараті число бральних рівчаків рівне чотирьом, тому на ділянці каналу від останнього внутрішнього рівчака до виходу стебел із каналу на наступний робочий орган число стебел на  $1$  м довжини каналу  $i_{k4}$  дорівнює :

$$i_{k4} = 4 B i_c \frac{v_m}{v_{mp}}. \quad (4)$$

На напрямну каналу транспортера передається не вся сила ваги  $G$  стебла, а лише її складова  $G_1$ , яка дорівнює  $G \sin \alpha_\sigma$ , де  $\alpha_\sigma$  – кут нахилу брального апарата до горизонту. Тоді сила, яка передається з боку стеблової стрічки на  $1$  м довжини напрямних транспортера, дорівнює  $G i_{ki} \sin \alpha_\sigma$ . Наведений вираз являє собою інтенсивність розподілу тиску стеблин на напрямні по їхній довжині (погонний тиск) вздовж каналу. Якщо його позначити  $q_{mi}$ , де  $i$  – номер брального рівчака, та врахувавши, що  $G = mg$ , де  $m$  – маса стебла, а  $g$  – прискорення вільного падіння, знаходимо:

$$q_{mi} = i B i_c m g \frac{v_m}{v_{mp}} \sin \alpha_\sigma. \quad (5)$$

Значення  $i$  у рівності (5) дорівнює  $1$  на ділянці каналу між першим і другим рівчакими;  $i$  дорівнює  $2$  на ділянці між другим і третім рівчакими,  $3$  на ділянці між третім і четвертим.

Якщо  $q_{mi}$  помножити на коефіцієнт тертя  $f$  стебел по напрямним, то отримаємо інтенсивність  $q_{mi}$  розподілу сил тертя стеблин по напрямним:

$$q_{mi} = fq_{ni} = ifB_i c mg \frac{v_m}{v_{mp}} \sin \alpha_\sigma. \quad (6)$$

Розрахунок навантаження на пальці, які просувають стеблини вздовж каналу, проводиться по схемі на рис. 2, на якій зображений вплив пальців на стебла. Стрічка 1 з пальцями 2 переміщає стебла 3, що розташовуються в просторі між двома рядами пальців, вправо. Стебла 3, які приймаються за систему матеріальних точок, яка деформується, тиснуть на напрямні 4 каналу з силою  $\sum G_i$ , що дорівнює сумі складових  $G_i$  сил ваги стебла:  $\sum G_i = q_{ni} b_n$ , тут  $b_n$  – відстань між пальцями на стрічці. Напрямна відповідає силі реакції  $N_k$ , яка дорівнює  $\sum G_i$ . Пальці рухають стебло вправо, при цьому з боку напрямних на стебло діють сили тертя, сума яких позначена  $\sum F$  ( $\sum F = q_{mi} b_n = fq_{ni} b_n$ ). Пальці долають ці сили тертя, рухаючись разом із стеблами. Так як сили  $\sum F$  діють вздовж напрямних каналу, то пальці при рівномірному русі повинні діяти на стебло із силою, яка дорівнює  $\sum F$  і протилежно їй направлена. Цією силою  $P$ , яка може бути розкладена на дві складові  $N$  та  $T$ . Сила  $N$  діє перпендикулярно лінії пальця, а  $T$  діє вздовж лінії пальця, - це сила тертя, яка в залежності від кута відхилення пальця може досягнути максимуму або ні.

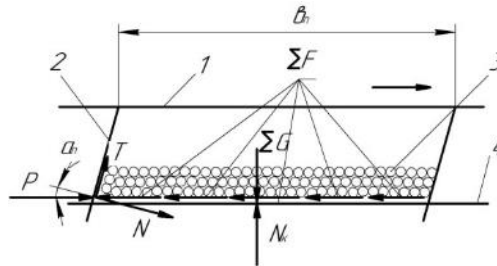


Рис. 2. Сили, що діють при транспортуванні стебел в каналі транспортера:  
1 – стрічка; 2 – палець; 3 – стебла; 4 - напрямна

З викладеного вище випливає, що  $\sum G_i = iBb_n i_c mg \frac{v_m}{v_{mp}} \sin \alpha_\sigma = N_k$ , а сила  $P$ , яка дорівнює  $\sum F = fN_k$ , буде:

$$P = ifBb_n i_c mg \frac{v_m}{v_{mp}} \sin \alpha_\sigma. \quad (7)$$

Так як кут між силами  $P$  і  $N$  рівний куту  $\alpha_n$  відхилення пальця від перпендикуляра до лінії каналу, то  $N = P \cos \alpha_n$  а  $T = P \sin \alpha_n$ . Остаточоно отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} N &= ifBb_n i_c mg \frac{v_m}{v_{mp}} \sin \alpha_\sigma \cos \alpha_n; \\ T &= ifBb_n i_c mg \frac{v_m}{v_{mp}} \sin \alpha_\sigma \sin \alpha_n. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Сили  $P$ ,  $N$  і  $T$  по формулам (7) і (8) характеризують навантаження на один ряд пальців стрічки транспортера при відстані між пальцями  $b_n$  (рис. 2) для випадку, коли стрічка складається з незчеплених стебел, що є частковим випадком. У більшості випадків стебла зчеплені, внаслідок чого ряд пальців 2 (рис. 2) буде переміщувати не лише стебла, що знаходяться на відстані  $b_n$ , але й стебла які розташовані лівіше (позаду) пальців 2 (на схемі вони не показані). Таким чином, пальці транспортера на зчеплених стеблах працюють одночасно, допомагаючи один одному.

Зміна сил тертя при переході стебел із зони одного брального рівчака у зону наступного брального рівчака визначається введенням поняття суми сил тертя, що припадають на відстань між рівчаками. Цю силу позначають  $P_{mi}$ , де  $i$  вказує номер рівчака з якого стебла виходять на транспортер і рухаються до наступного рівчака. При  $i=1$  сила  $P_{m1}$  являє собою суму сил тертя, які діють на ділянці від першого (польового) рівчака до другого; при  $i=2$  сила  $P_{12}$  являє собою суму сил

тертя від другого рівчака до третього; при  $i=3$  сила  $P_{T3}$  являє собою суму сил тертя від третього рівчака до четвертого. Таким чином,  $P_{mi}$  являє собою суму сил тертя, яка припадає на  $i$ -у міжрівчакову відстань.  $P_{mi}$  дорівнює:

$$P_{mi} = q_{mi} B = ifB^2 i_c mg \frac{v_M}{v_{mp}} \sin \alpha_\delta. \quad (9)$$

Формулу (9) можна використати для визначення закономірності зміни сумарного зусилля  $P_{сумі}$ , необхідного для переміщення стебел по каналу транспортера в різних зонах, починаючи із зони від першого рівчака до другого, потім від другого до третього, далі від третього до четвертого. У зоні від першого рівчака до другого  $P_{сум1}$  дорівнює  $P_{mi}$  згідно (9) при  $i=1$ . У зоні від другого рівчака до третього  $P_{сум2}$  дорівнює:

$$P_{сум2} = \sum_{i=1}^2 P_{mi} = fBi_c mg \frac{v_M}{v_{mp}} (B + 2B) \sin \alpha_\delta = 3fB^2 i_c mg \frac{v_M}{v_{mp}} \sin \alpha_\delta. \quad (10)$$

У зоні від третього рівчака до четвертого  $P_{сум3}$  дорівнює:

$$P_{сум3} = \sum_{i=1}^3 P_{mi} = fBi_c mg \frac{v_M}{v_{mp}} (B + 2B + 3B) \sin \alpha_\delta = 6fB^2 i_c mg \frac{v_M}{v_{mp}} \sin \alpha_\delta. \quad (11)$$

Знаючи  $P_{сум3}$  і швидкість транспортування стебел  $v_{mp}$ , знаходимо потужність  $N_{mp}$ , яка необхідна для транспортування стебел:

$$N_{mp} = P_{сум3} v_{mp} = 6fB^2 i_c mg v_M \sin \alpha_\delta. \quad (12)$$

За сумарним зусиллям  $P_{сумі}$  для переміщення стебел в різних зонах і шляхах руху пальців визнається роботу, яка витрачається на подолання сил тертя при переміщенні стебел по каналу транспортера. Ця робота  $A_{mi}$  дорівнює  $P_{сумі} s$ , де  $s$  – шлях переміщення. Якщо шлях  $s$  рахувати від першого брального рівчака, то для чотирьохсекційного брального апарату робота на подолання сил тертя в зоні від першого рівчака до другого буде:

$$A_{m1} = P_{сум1} s. \quad (13)$$

У зоні від другого до третього рівчака:

$$A_{m2} = P_{сум2} (s - B). \quad (14)$$

У зоні від третього рівчака до четвертого рівчака тобто до місця виходу стеблової стрічки з транспортера:

$$A_{m3} = P_{сум3} (s - 2B). \quad (15)$$

В якості пояснення до формул (13) – (15) необхідно вказати, що в залежності (13)  $s$  змінюється від 0 до  $B$ , у виразі (14)  $s$  змінюється від  $B$  до  $2B$ , у залежності (15)  $s$  змінюється від  $2B$  до  $3B$ .

З врахуванням приведених даних можна скласти рівності для визначення загальної роботи, що затрачається  $A_{заг}$  на різних ділянках транспортування стебел і  $A_{заг}$  на весь шлях їх транспортування. Загальна робота, що затрачається на транспортування стебел  $A_{заг}$  знаходиться як сума робіт  $A_{m1}$ ,  $A_{m2}$ ,  $A_{m3}$ , що визначаються за формулами типу (13), (14) і (15):

$$A_{заг} = A_{m1} + A_{m2} + A_{m3}. \quad (16)$$

З викладеного випливає, що формули (13) – (16) дозволяють визначити роботу, що затрачається на транспортування стебел на початковому етапі роботи машини, коли відбувається заповнення транспортера стеблами. В момент, коли стебла почали виходити із транспортера загальна робота  $A_{заг}$  досягає найбільшої величини, після чого вона вже не міняється, якщо параметри стеблової стрічки не міняються. В даному випадку для визначення цієї найбільшої роботи по приведеним формулам в останніх секціях шлях  $s$  приймає значення  $3B$ .

Слід відмітити, що наведені вище залежності (13) – (16) вірні при умові, що рухомі стеблини спираються лише на нижні напрямні каналу. Це можливо, якщо стеблова стрічка в каналі не ущільнена (пухка). Якщо ж у канал кожену секунду поступає багато стеблин, то через наявність ущільнення (стиск) стебел і під дією сил пружності стеблова стрічка буде розпирати канал, у зв'язку з чим під час руху стеблин тертя буде мати місце не лише по нижнім напрямним каналу, а й по полотні стрічкового транспортера, яке є верхньою напрямною для стебел. У цьому випадку через високу щільність стеблової маси сила  $P$  (рис. 2) різко зростає і можливе забивання транспортера.

За наведеними формулами проведені розрахунки для конкретних випадків з метою визначення величин  $q_{ni}$ ,  $q_{mi}$ ,  $P_{mi}$ ,  $P_{сумі}$ ,  $A_{mi}$  на різних ділянках каналу транспортера при наступних вихідних даних:  $B=0,38$  м;  $f=0,5$ ;  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $i_c=1000$  і  $2000$  шт./м<sup>2</sup>;  $v_m=1$  і  $2$  м/с;  $v_{mp}=1,8$  м/с;  $\alpha_0=60^\circ$ ;  $m=0,001$  кг. Розрахунки проведені за комп'ютерною програмою Maple.

За результатами розрахунків побудовані графічні залежності:  $q_{ni}=f(S)$ ;  $q_{mi}=f(s)$ ;  $P_{mi}=f(s)$ ;  $P_{сумі}=f(s)$ ;  $A_{mi}=f(s)$ , які представлені на рисунках 3, 4, 5, 6 і 7.

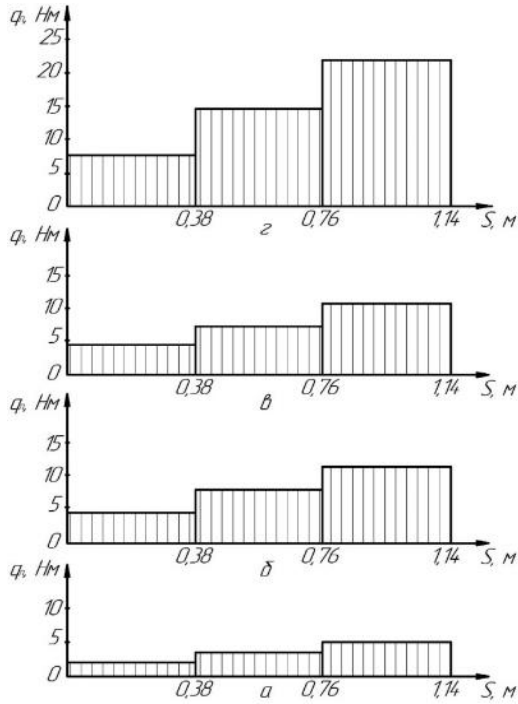


Рис. 3. Діаграма інтенсивності розподілу тиску стебел на напрямні:  
**а** –  $i_c=1000$  шт./м<sup>2</sup>;  $v_m=1$  м/с;  
**б** –  $i_c=1000$  шт./м<sup>2</sup>;  $v_m=2$  м/с;  
**в** –  $i_c=2000$  шт./м<sup>2</sup>;  $v_m=1$  м/с;  
**г** –  $i_c=2000$  шт./м<sup>2</sup>;  $v_m=2$  м/с

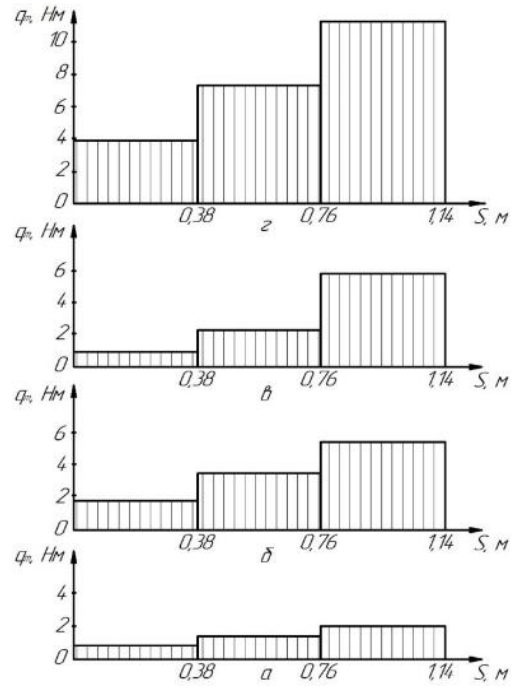


Рис. 4. Діаграма інтенсивності розподілу сил тертя стебел по напрямним:  
**а** –  $i_c=1000$  шт./м<sup>2</sup>;  $v_m=1$  м/с;  
**б** –  $i_c=1000$  шт./м<sup>2</sup>;  $v_m=2$  м/с;  
**в** –  $i_c=2000$  шт./м<sup>2</sup>;  $v_m=1$  м/с;  
**г** –  $i_c=2000$  шт./м<sup>2</sup>;  $v_m=2$  м/с

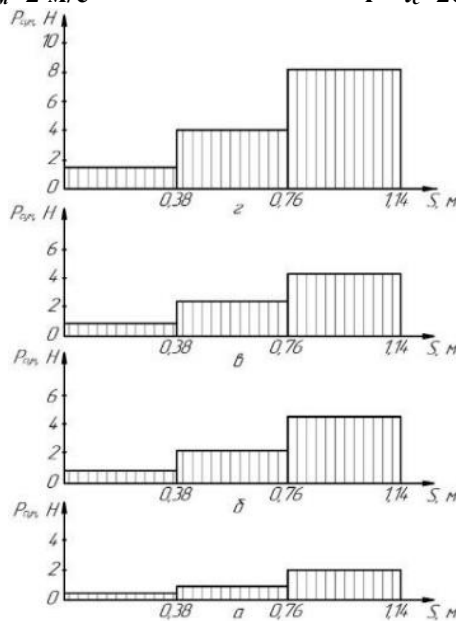


Рис. 6. Діаграма сумарних сил тертя: **а** –  $i_c=1000$  шт./м<sup>2</sup>;  $v_m=1$  м/с; **б** –  $i_c=1000$  шт./м<sup>2</sup>;  $v_m=2$  м/с; **в** –  $i_c=2000$  шт./м<sup>2</sup>;  $v_m=1$  м/с; **г** –  $i_c=2000$  шт./м<sup>2</sup>;  $v_m=2$  м/с

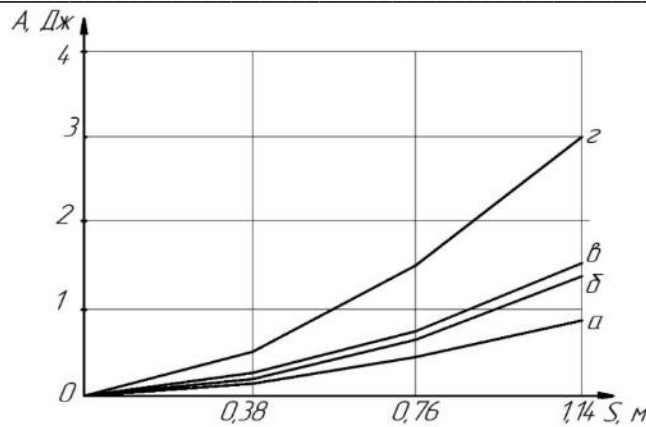


Рис. 7. Діаграми робіт, які витрачаються на переміщення стебел: а –  $i_c=1000$  шт./м<sup>2</sup>;  $v_m=1$  м/с; б –  $i_c=1000$  шт./м<sup>2</sup>;  $v_m=2$  м/с; в –  $i_c=2000$  шт./м<sup>2</sup>;  $v_m=1$  м/с; г –  $i_c=2000$  шт./м<sup>2</sup>;  $v_m=2$  м/с

Аналіз графіків показує, що інтенсивність розподілу тиску стебел на напрямні, інтенсивність розподілу сил тертя стебел по напрямним, сили тертя і робота зростають зі збільшенням швидкості машини і густоти стеблостою, тобто з ростом числа стебел, які поступають у транспортер. Із графіків слідує також, що тиск стебел на напрямні, сили тертя та робота, що витрачається на переміщення стебел в поперечному транспортері, мають найменші значення у зоні польової бральної секції і зростають у напрямку виходу із транспортера.

**Висновки.** Під час надходження та руху в каналі транспортера стебла взаємодіють з його пальцями й напрямними. Проведеними розрахунками встановлено, що тиск стебел на напрямні, сила тертя та робота, що витрачається на їх переміщення, мають найменші значення в зоні польової бральної секції та зростають у напрямі їх виходу з транспортера. Інтенсивність розподілу тиску стебел на напрямні, інтенсивність розподілу сил тертя стеблин по напрямних, сили тертя й робота зростають із збільшенням швидкості машини та зі збільшенням густоти стеблостою, тобто з ростом числа стебел, які надходять у транспортер. За умови збільшення швидкості машини та густоти стеблостою робота, що витрачається на переміщення стебел по всьому каналу поперечного транспортера, зростає та становить 0,85 Дж при  $v_m=1,0$  м/с,  $i_c=1000$  шт./м<sup>2</sup> і 3,04 Дж при  $v_m=2,0$  м/с,  $i_c=2000$  шт./м<sup>2</sup>.

#### Список використаних джерел

1. Патент на корисну модель № 153632 А01D 45/06 (2006.01) Дисково-пасовий льонобральний апарат. Юхимчук С.М., Толстушко М.М., Юхимчук С.Ф. Опубл. 02.08.2023 р. Бюл. № 31.
2. Юхимчук С.М. Розрахунок бральної секції дисково-пасового льонобрального апарата / С.М. Юхимчук, С.Ф. Юхимчук, М.М. Толстушко, Л.М. Дацюк // Ж-л: Сільськогосподарські машини. – Вип. 49. – Луцьк – 2023. С. 81-89 <https://doi.org/10.36910/acm.vi49.1023>
3. Дударев І.М. Теоретичні основи модернізації машин для виробництва льону: монографія / І.М. Дударев. – Луцьк: Ред.-вид. відділ Луцького НТУ, 2015. – 268 с.
4. Хайлис Г.А. Льноуборочные машины / [Г.А. Хайлис, Н.Н. Быков, В.Н. Бухарин и др.] – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
5. Налобіна О.О. Механіко-технологічні основи процесів взаємодії робочих органів льонозбирального комбайна з рослинним матеріалом: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11 / Налобіна Олена Олександрівна; Національний аграрний ун-т. – Київ, 2008. – 476 с.
6. Головачук І.П. Робочий процес та параметри поперечних транспортерів льонокомбайнів: дис... канд. техн. наук: 05.05.11 / Головачук Ігор Павлович; Львів. держ. аграр. ун-т. — Львів, 2003.

**Рецензент:** Ягелюк Світлана Володимирівна, професор кафедри товарознавства та експертизи в митній справі Луцького національного технічного університету, доктор технічних наук, доцент.

В.О. Шегинський

Луцький національний технічний університет

**МОДИФІКАЦІЯ ГЛЮТИНОВИХ БІОКОМПЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ  
ГІДРОФОБНИМИ ДОБАВКАМИ**

*Проведено дослідження впливу гідрофобних добавок на межу міцності при стисненні біокомпозитних матеріалів, які мають глютинову матрицю та наповнені частинками деревного борошна. Введення гідрофобних добавок (оліфа Оксол, соняшникова олія) обумовлено високою гідрофільністю наповнювачів рослинного походження. В результаті введення оліфи Оксол в оптимальній кількості зафіксовано підвищення міцності при стисненні на 12-15 % порівняно з немодифікованими біокомпозитними матеріалами. Визначено характер руйнування модифікованих оліфою Оксол біокомпозитних матеріалів під впливом стискаючого навантаження. Проведено порівняльну оцінку міцності біокомпозитних матеріалів з різним вмістом гідрофобних добавок.*

*Ключові слова:* біополімерні композити; наповнювач; пресування; міцність; напруження; хімічні зв'язки; адгезія; структура; пористість; механічні характеристики.

V. Shehynskiy

**MODIFICATION OF GLUTIN BASED BIOCOMPOSITE MATERIALS WITH  
HYDROPHOBIC ADDITIVES**

*The influence of hydrophobic additives on the compressive strength of biocomposite materials based on a glutinous matrix and are filled with wood flour particles, was studied. The use of hydrophobic additives (drying oil Oksol, sunflower oil) is due to the high hydrophilicity of fillers of plant origin. As a result of the use of drying oil Oksol in the optimal amount, an increase in compressive strength by 12-15% was recorded compared to unmodified biocomposite materials. The nature of destruction of biocomposite materials modified with drying oil Oksol under the influence of compressive load was determined. A comparative assessment of the strength of biocomposite materials with different contents of hydrophobic additives was carried out.*

*Key words:* biopolymer composites; filler; pressing; strength; tension; chemical bonds; adhesion; structure; porosity; mechanical characteristics.

**Formulation of the problem.** Biocomposite materials have many advantages compared to polymer composite materials containing synthetic components. This concerns environmental friendliness, reproducibility of raw materials, low density and low manufacturing cost. Taking into account the advantages of biocomposite materials, it is possible to note the high degree of efficiency and perspective of using such materials in various branches of industry for the manufacture of furniture elements, sports equipment, interior parts of vehicle interiors, household products, containers and device housings. Biocomposite materials are safe at different stages of the production process and are not harmful to the environment after destruction of the product. A high ability to recover raw materials ensures production stability and economic development. Components for the formation of biocomposites can be materials obtained by processing waste from the woodworking, agricultural, and food industries. Components of natural origin provide high mechanical characteristics of biocomposite materials, but due to their high hydrophilicity, they are able to intensively absorb moisture. The decrease in mechanical characteristics occurs due to the destruction of the physical and chemical bonds between the structural elements of the components of the biocomposite material. Otherwise, favorable conditions are created for the development of microorganisms (bacteria, fungi), which lead to biodegradation with the formation of new substances. There is a problem of providing effective hydrophobic protection or increasing moisture resistance of biocomposite materials that contain vegetable fillers. In this case, biocomposite materials require the use of modifying additives, which are characterized by high hydrophobicity. At the same time, it is necessary to determine the ability of fillers to provide high adhesive strength to the polymer matrix and to form biocomposite products with high mechanical characteristics after the introduction of modifying substances.

**Analysis of recent research and publications.** Composite materials, which are obtained from natural sources, have attracted considerable interest in recent years due to the desire to increase the environmental friendliness of production. This situation is beneficial for global communities to reduce dependence on synthetic materials [1]. It is possible to use a wide range of materials of natural origin as fillers of biocomposites. Fillers can significantly improve the mechanical characteristics of biocomposite materials [2, 3].

The high rate of degradation of natural components ensures intensive destruction of biocomposite products after the end of their operation. Such products are in landfills or are under the influence of atmospheric factors in the natural environment. However, this process is not permissible if the biocomposite

product is being operated, stored or transported. Determining the ability of a material to biodegrade is considered taking into account many factors (chemical composition of the material, humidity, temperature change), which requires the presence of special recommendations that determine the influence of such parameters. In the process of developing biocomposite materials using natural fibers, moisture absorption is a critically important factor that can significantly affect the mechanical properties of the biocomposite. The importance of the factor increases if the matrix is a bio-based polymer, as these materials absorb more moisture than their synthetic-based counterparts. It has been proven that biocomposites are not suitable for use in water, so this point must be taken into account during the operation of the products [4].

The absorption of moisture in biocomposites is caused by the natural hydrophilicity of plant fibers [5]. Moisture absorption in biocomposites is due to the natural hydrophilicity of plant fibers. The volume and content of fibers and the ambient temperature significantly affect water absorption. At the same time, there is an increase in the effect in biocomposites with a higher fiber content and environmental temperature [6].

The use of hydrophobic additives makes it possible to increase the water resistance of biocomposite products, but in most cases, there is a decrease in mechanical characteristics. A modifying additive (paraffin) improves manufacturability during compression of the composition, which contains finely dispersed particles of wood flour. As a result of the use of paraffin, the density of the biocomposite material increases, which improves the material's resistance to static loads [7].

In the case of introducing citric acid and glutaraldehyde into the polyvinyl alcohol, which contains banana pseudostem fibers, water resistance is increased due to the presence of hydroxyl groups. Biocomposite material with pseudostem fibers treated with alkali, banana has a maximum tensile strength of 34.2 MPa and water absorption of only 60% [8].

Chemical treatment changes not only the surface layer of the fibers, which affects the nature of the interaction between the fiber and the matrix, but also changes the structure and density of elementary fibers [9]. The addition of *Posidonia oceanica* leaves (POL) improved the mechanical properties of PLA-based polymer matrices and accelerated their decomposition [10]. The paper [11] investigated the properties of Sugar Palm Fiber (SPF), which are used for the development of fishing boats. These fibers have sufficient resistance to water permeability and high mechanical strength. Although lignocellulosic fibers (SPF) have advantages over other natural fibers, they have a tendency to absorb water over time [12]. This reduces their wettability by the hydrophobic polymer resin, which leads to the absence of interfacial bonding between the fiber and the matrix. This condition limits the adhesive strength of biocomposites and leads to a decrease in mechanical properties [13]. In this case, the authors of the paper recommend pre-treatment of SPF using physical or chemical methods [14, 15]. The processed lignocellulosic fiber has a rougher surface, which helps to increase the number of activation zones for the formation of a chemical bond with the matrix. The creation of a strong adhesive bond at the fiber-matrix interface ensures high cohesive strength of the biocomposite and ensures the use of lignocellulosic fiber for the manufacture of household products, car structures, and also in the aerospace industry. The main benefit of SPF is the durability of the fiber due to less exposure to heat and moisture compared to coir or other natural fibers. SPF is resistant to the influence of salt water, so the fiber can be used for the operation of biocomposite products in a seawater environment.

**Setting tasks.** The purpose of the work is to determine the cohesive strength of glutinous biocomposite materials, which are filled with finely dispersed wood flour and modified with hydrophobic additives (dry oil Oksol, sunflower oil).

**Presentation of the main material.** The homogeneity of the composition is ensured by mixing the components with a rotation frequency of the working body of 300 Hz. Pressing of the composition is carried out in a press mold using a hydraulic press with a speed of movement of the lower traverse of 25 mm/s. Heat treatment consisted in heating the mold with the composition to a temperature of 150°C for 90 minutes, followed by cooling and removal of the biocomposite sample. Compressive strength was determined according to the ASTM D695 "Compression Testing of Rigid Plastics" method.

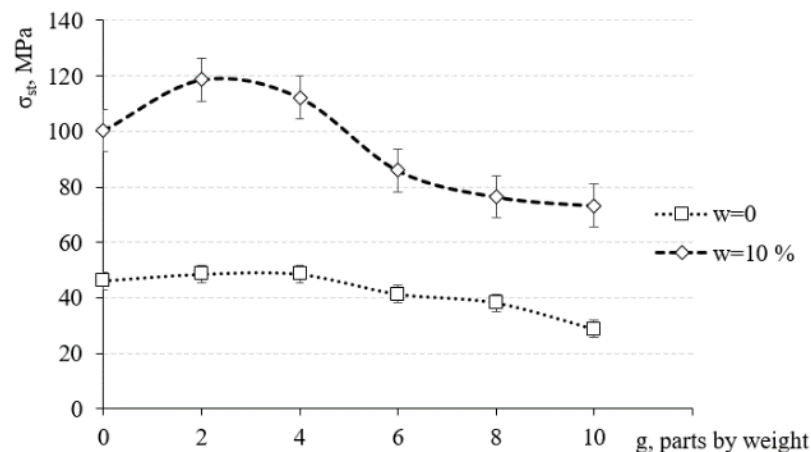
The compressive strength limit of biocomposite materials with an optimal content of wood flour, which do not contain additives, is 46.2 MPa (Fig. 1). The use of a modifying additive in the amount of 2-4 parts by weight leads to an increase in the compressive strength limit by 5%, which is associated with the arrangement of filler particles due to the introduction of the additive. The modifying additive performs a lubricating function, which reduces the coefficient of friction and reduces the resistance to the movement of wood flour particles during the pressing operation. Therefore, an ordered homogeneous structure is formed. A further increase in the drying oil content leads to a decrease in compressive strength to 28.7 MPa, which is 37-42% less compared to the strength values of biocomposites without the content of

modifying substances. This is due to the increased content of the modifying additive, which performs the function of a plasticizer. Molecules of drying oil dissolve in the glutinous matrix, which leads to a decrease in the number of physical bonds between macromolecules of amino acids of the biopolymer matrix.

Conducting preliminary heat treatment of the composition, which ensured moisture loss in the amount of 10% by mass, leads to a sharp increase in the compressive strength limit of biocomposite materials to 100.3 MPa. This treatment made it possible to increase the mechanical characteristics of biocomposites by 50-55%, since the removal of excess water ensures the formation of additional physical bonds between the glutinous matrix and the filler.

The introduction of 2-4 parts by weight of drying oil per 100 parts by weight of the binder leads to a 12-15% increase in the compressive strength of biocomposites compared to the strength of the biocomposite material without a modifying additive. The use of a hydrophobic additive ensures a reduction in the porosity of the biocomposite material, since the drying oil additionally performs the function of a lubricating additive. In the case of formation of biocomposites with a smaller amount of moisture, amino acid macromolecules approach, as water molecules dissolve the biopolymer matrix. Water is an inhibitor of the structuring process of biopolymer material.

Strength limit of biocomposites containing up to 10 part by weight of the modifying additive decreases by 35-38% compared to the strength of biocomposites, which have an optimal drying oil content in the amount of 2-4 parts by weight. This is explained by the excess content of drying oil, the concentration of which increases when water is removed from the composition during preliminary heat treatment. Molecules of drying oil prevent the formation of physical bonds between the hydroxyl groups on the surface of the organic filler and the active groups of the glutinous binder.



**Fig. 1. The dependence of the compressive strength of biocomposites on the content of drying oil Oksol in the composition and the degree of moisture loss of the composition**

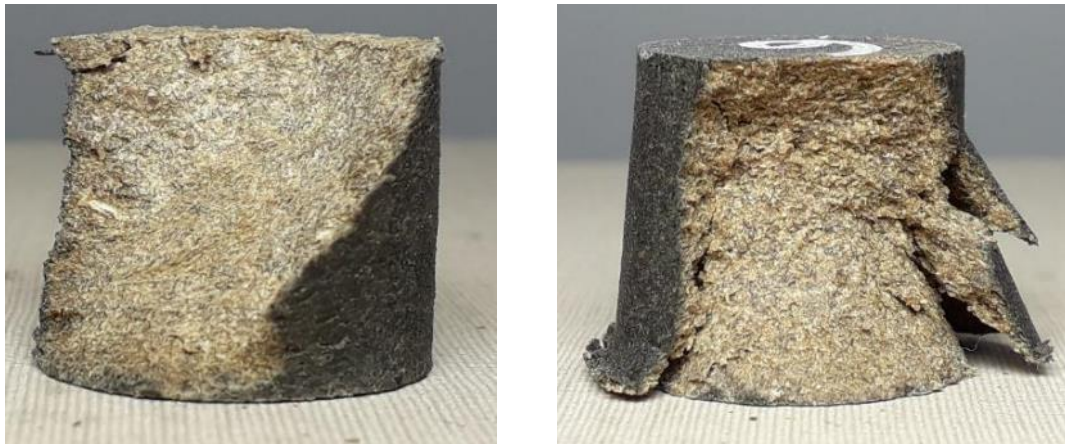
Destruction of biocomposite samples, the compositions of which contain moisture and 2 parts by weight drying oil Oksol, occurs through the formation of a crack, which is located at an angle of  $45^\circ$  to the direction of action of the destructive load (Fig. 2, a). This indicates the resistance of the biocomposite material to mechanical stress, as the material perceives elastic deformation and breaks brittlely without plastic deformation. In the case of compression of biocomposite samples with the content of 10 parts by weight drying oil Oksol there is a displacement of material layers with the formation of delaminations (Fig. 2, b). This is due to the presence of a modifying additive that forms individual inclusions. They are a stress concentrator, as a heterogeneous structure is formed due to the low solubility of oil in the biopolymer matrix in the presence of moisture.

The destruction of biocomposite samples, the compositions of which have a 10% smaller amount of moisture, occurs similarly to the nature of the destruction of biocomposite samples, the compositions of which did not lose moisture (Fig. 3). Crack propagation in a biocomposite sample containing 2 parts by weight of drying oil Oksol occurs at an angle of  $45^\circ$  to the direction of the load (Fig. 3, a).

This indicates the absence of plastic deformation, which is associated with the formation of a dense structure without defects and concentrators.



Under the influence of a static compressive load, biocomposite samples with a content of a modifying additive of 10 parts by weight destroy with the formation of a crack, which is also located at an angle of 45° (Fig. 3, b).



**Fig. 2. The general appearance of biocomposite samples (without removing moisture from the composition) after destruction with content of drying oil Oksol: a – 2 parts by weight.; b – 10 parts by weight**

This indicates the ability of the biocomposite material to resist plastic deformation, since after heat treatment, the molecules of oils in the glutinous matrix dissolve in the absence of moisture. In biocomposites, a homogeneous structure is formed, but the strength decreases due to an insufficient number of physical and chemical bonds.



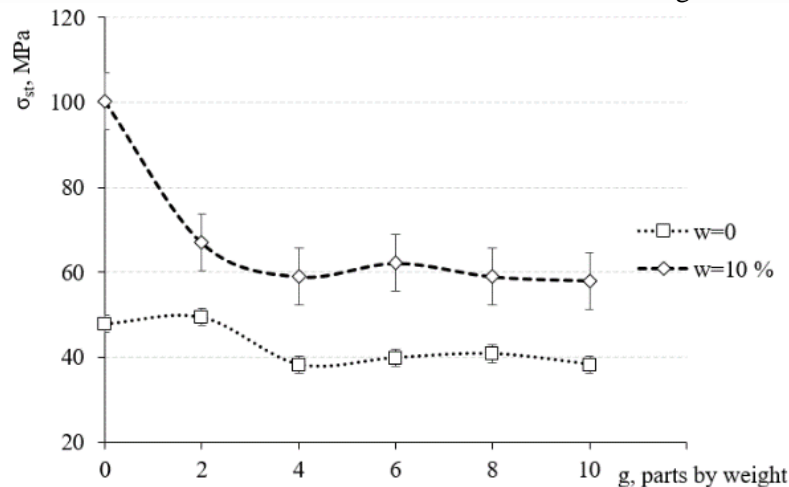
**Fig. 3. The general appearance of biocomposite samples (with removal of 10% of moisture from the composition) after destruction with content of drying oil Oksol : a – 2 parts by weight.; b – 10 parts by weight**

An increase in the strength limit under compression from 47.8 MPa to 49.4 MPa (Fig. 4) occurs in the case of the introduction of sunflower oil in the amount of 2 parts by weight. This is due to the small content of the lubricant additive, which has a dominant effect on the process of compacting the composition. The compressive strength limit decreases by 22-26% with an increase in the content of the additive to 4-10 parts by weight, which is due to the plasticizing effect of the modifying additive.

Preliminary treatment of the composition ensures removal of 10% moisture. This leads to a 33-35% decrease in the strength limit of biocomposites that contain sunflower oil in the amount of 2 parts by weight, compared to biocomposites without a modifying additive. The introduction of a larger amount of sunflower oil (4-10 parts by weight) leads to a further decrease of this characteristic by 13-15%, which is due to the increased content of the modifying additive.

The value of the strength limit of biocomposites, the compositions of which have a lower amount of moisture by 10%, is 58-67 MPa. The strength of biocomposites, the composition of which was not thermally treated to remove moisture, is 38-49 MPa. This indicates the ability of the biocomposite material to form a denser structure in the case of moisture removal from the composition, since during the main heat treatment

at a temperature of 150° C, water molecules are removed. This leads to the appearance of delaminations and cavities, which are stress concentrators and reduce the cohesive strength of the biocomposite material.



**Fig. 4. The dependence of the compressive strength of biocomposites on the content of sunflower oil in the composition and the degree of moisture loss of the composition**

Among biocomposites with a similar content of modifying additives, an increase in the compressive strength values of biocomposites whose compositions were thermally treated to remove moisture (10%) was found, from the range of values of 38-49 MPa to the range of values of 73-118 MPa. This is due to the ability of the oil to transition into a solid phase due to the removal of the volatile solvent during heat treatment, which causes the oil molecules to approach with the formation of bonds. Molecules of sunflower oil remain in the structure of the biocomposite material, since the modifying additive is not removed during heat treatment at a temperature of 150°C. The concentration of sunflower oil after heat treatment remains in the original state, which prevents the formation of the maximum number of physicochemical bonds between the active groups of macromolecules of the biopolymer binder and organic filler.

**Conclusions and prospects for further research.** Removing 10% of moisture from the composition during heat treatment provides a 50-55% increase in the compressive strength of biocomposite materials compared to biocomposites that contain excess moisture. This is due to the formation of the structure of the biopolymer matrix with higher cohesive strength in the case of the formation of the maximum number of physical bonds between gluten macromolecules.

Introduction of drying oil Oksol in the amount of 2-4 parts by weight to the composition leads to an increase in the strength limit of biocomposite materials by 12-15% compared to the unmodified material. Molecules of drying oil perform the function of a lubricating additive at the stage of pressing the composition so reduce the coefficient of friction between wood flour particles and ensures the formation of a dense structure of the biocomposite material due to the compact arrangement of particles in the glutinous matrix.

The destruction of biocomposite samples with a reduced amount of moisture in the composition and an optimal drying oil content (2-4 parts by weight) occurs as a result of the formation and propagation of a crack at an angle of 45° to the line of action of the compressive load. This type of destruction is explained by the absence of plastic deformation, since the formation of a rigid frame of the biopolymer matrix occurs due to the removal of the solvent from the drying oil during the heating of the composition in the mold. This additionally increases the cohesive strength of the glutinous matrix due to the formation of physical bonds between the components of the biocomposite material.

In the future, it is planned to determine the influence of the amount of compression force and the temperature of heating the composition on the mechanical characteristics of biocomposite materials that contain hydrophobic additives.

#### References

1. Syamsir A., Mubin S.M., Nor N.M., Anggraini V., Nagappan S., Sofan A.M., Muda Z.C. (2020). Effect of combined drink cans and steel fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete. *Journal of mechanical engineering and sciences*, 14, 6734-6742.

2. Kashytskyi V.P., Sadova O.L., Zabolotnyi O.V., Malets V.M., Mazurok V.S. (2022). Development of biocomposites filled with products of recycling of secondary raw materials of plant origin. *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, 1 (160), 95-102.
3. Kashytskyi V.P., Sadova O.L., Malets V.M. (2023). Properties and formation technology of glutinous biocomposite materials. Monograph – Primedia eLaunch, Boston, USA, 107.
4. Mohammed L., Ansari M., Pua G., et al. (2015). A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications. *International Journal of Polymer Science*, 2.
5. Perremans D., Hendrickx K., Verpoest I., et al. (2018). Effect of chemical treatments on the mechanical properties of technical flax fibres with emphasis on stiffness improvement. *Composites Science and Technology*, 160, 216-223.
6. Pickering K., Efendy M., Le T. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83, 98-112.
7. Kashytskyi V., Sadova O., Shehynskyi V. (2024). The development of gluten-based biocomposite materials with advanced hydrophobicity. *Commodity Bulletin*, 17(1), 27-35.
8. Srivastava K., Singh M., Mishra P., et al. (2019). Pretreatment of banana pseudostem fibre for green composite packaging film preparation with polyvinyl alcohol. *Journal of Polymer Research*, 26(4), 95.
9. Baillie C. (2004). *Green Composites: Polymer Composites and the Environment*. CRC Press; Woodhead Pub.
10. Scaffaro R., Maio A., Gulino E.F. (2021). Hydrolytic degradation of PLA/Posidonia Oceanica green composites: A simple model based on starting morpho-chemical properties. *Composites Science and Technology*. 213, 108930.
11. Misri S., Leman Z., Sapuan S., Ishak M. (2021). Mechanical properties and fabrication of small boat using woven glass/sugar palm fibres reinforced unsaturated polyester hybrid composite IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 11, 012015.
12. Jumaidin R., Sapuan S., Jawaid M., Ishak M., Sahari J. (2017). Thermal, mechanical, and physical properties of seaweed/sugar palm fibre reinforced thermoplastic sugar palm Starch/Agar hybrid composites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 97, 606-615.
13. Oladele I. O., Okoro A. M., Omotoyinbo J. A., Khoathane M. C. (2018). Evaluation of the mechanical properties of chemically modified chicken feather fibres reinforced high density polyethylene composites. *Journal of Taibah University for Science*, 12(1), 56-63.
14. Hamidon M.H., Sultan M.T., Ariffin A.H., Shah A.U. (2019). Effects of fibre treatment on mechanical properties of kenaf fibre reinforced composites: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 8, 3327-3337.
15. Vu C.M., Sinh L.H., Choi H.J. et al. (2017). Effect of micro/nano white bamboo fibrils on physical characteristics of epoxy resin reinforced composites. *Cellulose*, 24, 5475-5486.

Кузнєцов Ю.М., Гутник А.З.

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

## СУЧАСНИЙ СТАН ВИНАХІДНИЦТВА, ВИРОБНИЦТВА, АНАЛІЗ РАНІШЕ ВИКОНАНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ МОТОР-ШПИНДЕЛІВ

*Стаття присвячена аналізу сучасного стану винаходництва та виробництва мотор-шпинделів (М-Ш) для металообробних верстатів. Здійснено патентно-інформаційний аналіз, виявлено провідних виробників у Німеччині та Китаї. Зазначено різноманітність М-Ш та їх застосування у верстатобудуванні. Також розглянуто базу даних провідних розробників та виробників М-Ш для металообробних верстатів.*

*Ключові слова:* винахідництво, мотор-шпинделі, виробництво, патентно-інформаційні дослідження, верстати, металообробка.

Y. Kuznetsov, A. Hutnyk

## THE CURRENT STATE OF INVENTION, PRODUCTION, ANALYSIS OF PREVIOUS RESEARCH AND PROSPECTS FOR CREATING MOTOR SPINDLES

*The article investigates the contemporary state of invention and production of motor spindles (M-S) for metalworking machines. It conducts a patent-information analysis, identifying leading manufacturers in Germany and China. The diverse applications of M-S in machine tool construction are outlined. Additionally, it explores a database of prominent developers and manufacturers of M-S for metalworking machines.*

*Keywords:* invention, motor spindles, production, patent-information research, machine tools, metalworking.

### 1. Results of patent information research

One of the main machine components that provides forming movements in the cutting process on turning, drilling, milling, aggregate, grinding and other machines with rotary movement of a part or tool has always been a spindle unit (SU) as a drive for the main movement. Over time, during the evolution of the spindle unit, the kinematic chain from the energy source to the output link (part or tool) was shortened and turned into a single unit that combines the energy source, energy converters, transmission and amplification circuits and the actuator - a spindle with a clamping device for a part or tool in one whole. These are electric spindles, which have recently been called motor spindles (MS). The M-S is seen as one of the main elements representing the machine tool and is becoming a key object on the way to the transition to smart manufacturing.

Patent information research made it possible to identify trends and directions of technical improvements, to develop models of macro- and micro-evolution of M-S structures, and to determine a control sample of objects (evolutionary events).

Patent searches for inventions (utility models) were conducted for different countries of the world on the Internet (<http://gb.espacenet.com>), for Russia (<http://fips.ru>), for Ukraine in the "Databases and Information and Reference Systems" ([www.uip.vbases2.html](http://www.uip.vbases2.html)) in the section "Specialized Database "Inventions (Utility Models) in Ukraine".

Using various keywords, 2195 patents and copyright certificates for inventions and utility models were reviewed, of which 1250 patents were selected for further analysis after a thorough study of the translated content and illustrations in the titles of protection, i.e. the sample size was  $N_P = 1250$ ). The chronological depth of the search is 64 years ( $T_E = 64$ ).

The search for patent information was carried out under the IPC headings: H02K41/00; H02K1/06; H02K5/173; B23B17/00; B23B19/00; B23B19/02; B23B47/00; B23B47/06; B23Q1/70; B23Q3/00; B23Q5/00; B23Q5/10; B24B41/04; B24B47/12; F16C32/00.

The number of objects (control sample) is 104 objects (the power of the control sample of evolutionary events  $N_{PK} = 103$ ). The geography of patent holders' countries within the control sample is presented in Table 1 and Fig. 1.

According to the search results, it can be stated that patents on M-S were found in 9 countries. But most of all in China, the USSR, Ukraine and Russia, which allowed us to limit further search for the countries of origin (probably developers and researchers, which can only be assessed by publications due to commercial secrecy).

It should be noted that China became interested in and began to engage in M-S much later than other countries, with a high intensity of development, acquisition of rights to them and their

commercialization with the advantage of technology transfer to other countries of the Euro-Asian and American continents. This is evidenced by the revised catalogs of different countries.

Table 1.

**Distribution of the number of patents by patent holder countries included in the control sample**

UA	SU	RU	CN	US	DE	JP	FR	SK
20	18	11	36	8	6	2	2	1

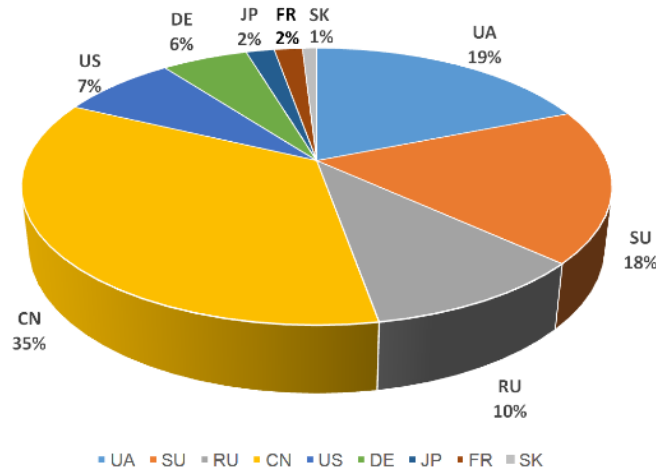


Figure 1. Share of patent-holding countries within the control sample

**2. Motor-spindle manufacturers [3-6, 8-10]**

Therefore, based on the results of the patent search, review of publications and a number of catalogs of M-S manufacturers, the main attention was focused on 2 countries: Germany and China.

It has been established that there are more than 300 manufacturing companies in Germany (+GF+, BIAХ, HSD, ZIMMER, BENZ, FISHER, GMN, SIEMENS, HSTec, Setco, BIGKAIZER, SRUTER, BZT, ISEL, HITECO, WOLONG, KURODA, NAKANISNI, TDM, ... ), which produce up to 400 types of M-S for various machine tools (milling, turning, grinding, multipurpose, woodworking and special-purpose), but there is not much information about the designers and researchers.

At the same time, Chinese government agencies, scientists and industrialists pay great attention to the design, research and production of M-S, with the involvement of specialists from other countries, including Europe and the United States.

According to the partially completed search for countries and companies producing M-S, they are currently produced in the following countries: Japan (JP), Germany (DE), France (FR), China (CN), Italy (IT), Russia (RU). The most famous manufacturers in these countries are: DMU, ELTE, Franz Kessler, Weiss, Diebold, Antecs, Cyttec, Henninger, IMT, NSK, FANUC, KITAGAWA, HOWA, SUDA, SIEMENS, SAUTER, GRUNDFOS, DUPLOMATIC, SMW AUTOBLOC and others.

Below are examples of electromechanical systems (EM systems) of the M-S type, which are most widely used in production (Fig. 2-8). These EMSs are non-self-propelled, i.e., they provide only rotational motion n, and additional non-axial feed drives are used for translational motion of the spindle.

M-Ss belong to a special class of complex dynamic systems of natural and natural-anthropogenic origin that can realize both translational and rotational motion and represent a variety of evolving species. Such systems are used in metalworking complexes, turning, milling, drilling, grinding, multipurpose and other machine tools.

The idea to reduce the number of gearing mechanisms of the gearbox was embodied in the creation of M-S, which combined a drive motor and the spindle itself. The first M-S began to appear in the 70s of the twentieth century as motor-spindle assemblies for wrenching machines. With the further development of technology in the machine tool industry, motor-spindles began to appear that could realize the feed movement with the help of gears and couplings, using pneumatic systems, using hydraulic systems, using screw gears, etc.

The spindle unit manufactured by IBAG (Fig. 3, a) are adapted to all toolholders known on the world market. The integrated clamping systems HSK according to DIN 69893, BT, BBT, IBAGSKI,

SKAPTOCoromant are selected by customers depending on the size of the spindle and the maximum rotational speed required.

The IBAGSKI system is preferred for small and medium-sized spindles, while the HSK is recommended for spindles with a diameter exceeding 120 mm.

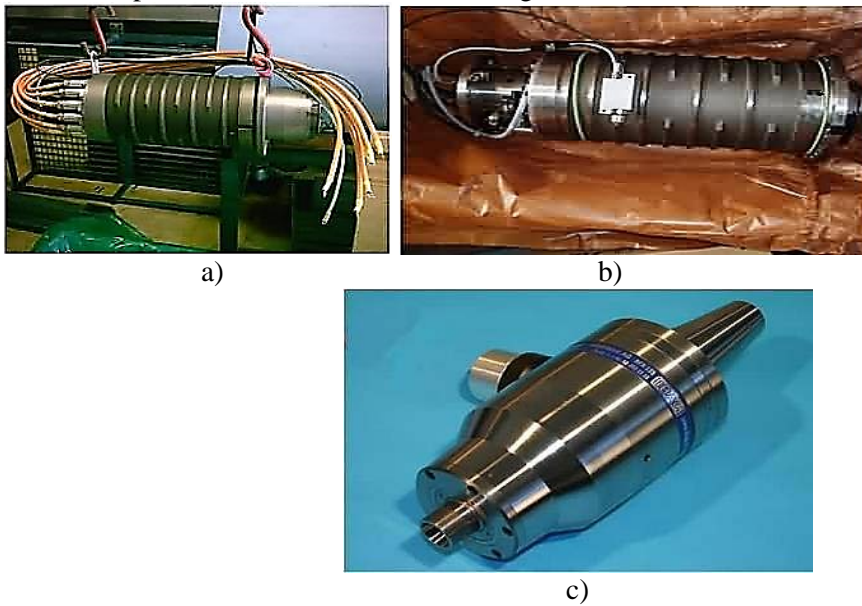


Fig. 2. Motor spindles of the company: a - DMU and DekelMah, b - Artikelnummer, c - HFK with water cooling



Fig. 3. Motor spindles: a - IBAG medium-sized for drilling, milling and high-speed machining;

b - small-sized for engraving with high precision; c - powerful large-sized for manufacturing molds and dies in the automotive industry

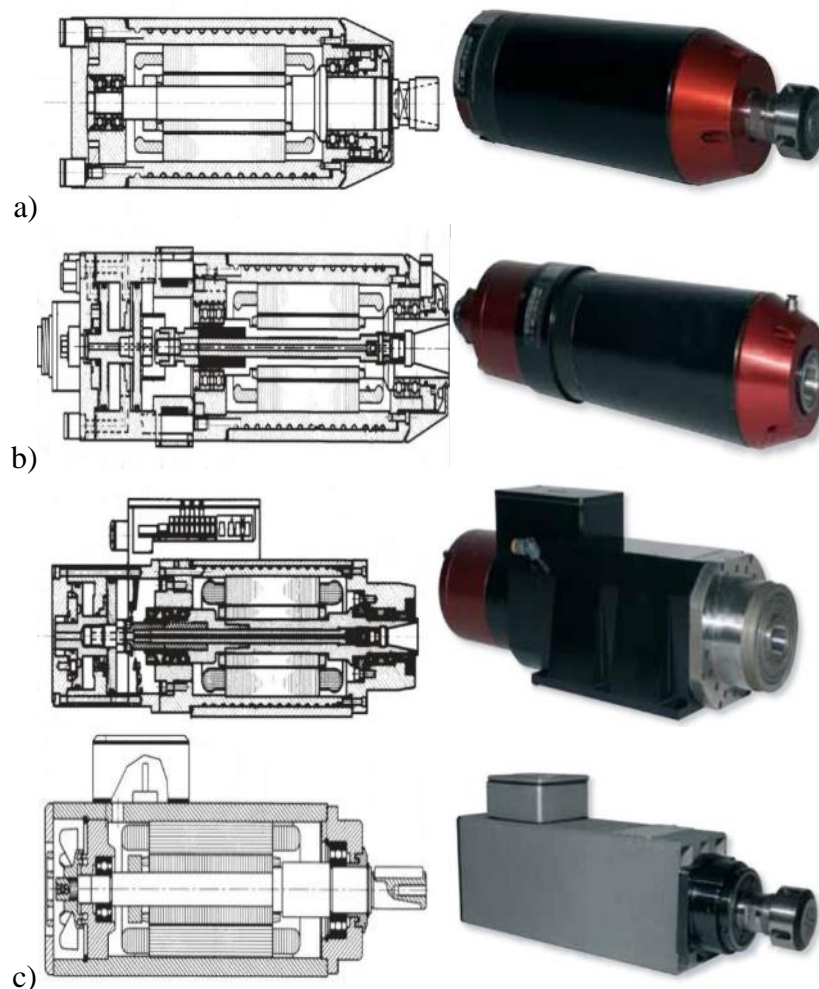


**Fig. 4. Motor spindles with magnetic (a) and hydrostatic (b) bearings**

High-speed liquid-cooled M-S ELTE (Fig. 5, a) of the AF series are designed to be used as the main motion drive for milling and engraving machines and mold making machines.

The AF CU is the newest series of liquid-cooled M-S ELTEs (Fig. 5, b). It was developed on the basis of the AF series and is characterized by the presence of a quick-change chuck for clamping the tool.

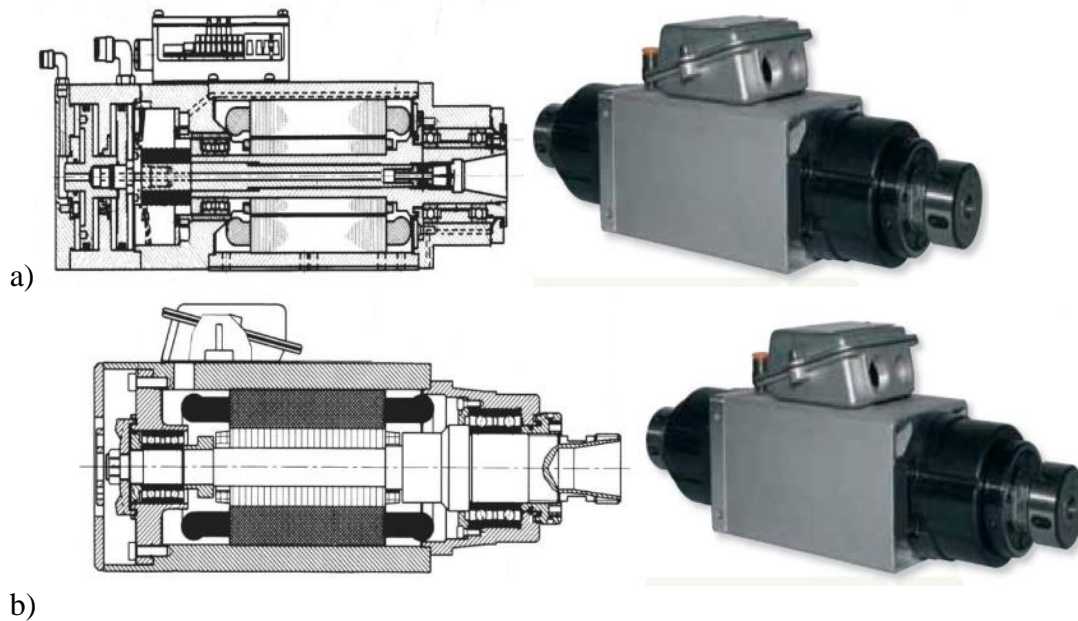
ELTE PE series M-S (Fig. 5, c) are designed specifically for use in cutting machines and are designed for operation with increased axial and radial impact loads.



**Fig. 5. ELTE high-speed spindles of the AF (a), AF CU (b) and PE (c) series**

TMA is a series of high-speed M-S ELTE with automatic tool change (Fig. 6, a). The spindles are equipped with a forced ventilation system. Bearings and motor windings are cooled by compressed air and a built-in independent fan.

Thus, the results of the patent information search indicate that the class of EM systems of the "motor-spindle" type is a powerful class of EM transducers that is developing. Therefore, research and innovative developments in this area are currently relevant and promising.



**Fig. 6. Motor spindles of TMA (a) and TMPE (b) series by ELTE**

M-S ELTE of the TMPE series (Fig. 6, b) are equipped with a collet clamp and are designed to work with a tool loaded in both axial and radial directions.

According to the principle of operation, M-S are of alternating (synchronous and asynchronous types) and direct current. The most widely used are asynchronous and synchronous motors. The type of motor is primarily chosen depending on the required diameter and length of the gearbox, operating mode, power and number of revolutions. The type of cooling, the type and number of bearings, the tool clamping system, and the winding connection scheme are also taken into account. Built-in asynchronous motors are usually three-phase and are driven by special electric drives - HF (high frequency) frequency converters.

M-S are mass-produced with diameters ranging from 16 mm to 360 mm. The number of revolutions varies from 8000 rpm to 80000 rpm. The power for asynchronous M-S ranges from 1.2 to 100 kW, and for synchronous M-S from 4.2 to 82 kW.

In M-S, the size and power of the motors that drive the rotary motion are strictly limited by the dimensions of the spindle. Bearing dimensions are also a critical factor in spindle design.

The geometrical parameters of the motor rotor determine the selection of bearing sizes, which in turn determine the load capacity, stiffness and maximum spindle speed, so the motor characteristics must be matched to the bearing capabilities.

As well as spindle motors in various designs, Siemens offers complete motor spindles. The modular range of motor spindles covers milling, drilling, turning and grinding applications. Siemens' expertise in M-S is concentrated in the subsidiary Weiss Spindeltechnologie GmbH.

The company produces M-S for milling, turning and grinding. In addition, Weiss Spindeltechnologie GmbH also designs and manufactures customized solutions. They can be designed with an available power range of up to 130 kW and up to 1250 Nm without a gearbox or up to 3280 Nm with an integrated gearbox. M-S are available with synchronous and asynchronous motor technologies.

Figure 7 shows the variants of SIEMENS motor spindles.

The Chinese company Changzhou LINNAN Special Motor Factory was founded in 2013 and is a technological and professional manufacturer of spindles for air-cooled CNC machines, engraving spindles, water-cooled and air-cooled M-S spindles, spindles with automatic tool changers, etc.

Fig. 8 shows the M-S mod. GDZ70X65-700W with air cooling, rated power 700 W, maximum rotation speed 18000 rpm.

Fig. 9 shows the milling M-S mod. GDZ85-2.2KW with a power of 2.2 kW and a maximum rotational speed of 24000 rpm. The milling machine is directly cooled by air, which makes it possible to operate safely and reliably in the event of dust and coolant splashes. This type of M-C is usually maintenance-free, as the AC motor does not have a commutator in its design.





**Fig. 7. SIEMENS motor spindles: a) SP series - mod. 2SP120 and mod. 2SP125); b) F series - mod. F150A); c) D series - mod. D175/375), d) S series - mod. SM120)**



**Fig. 8. Spindle motor mod. GDZ70X65-700W with air cooling**



**Fig. 9. Milling spindle motor mod. GDZ85-2.2KW**

Fig. 10 shows the M-S milling machine mod. GDZ120X103-6KW with a power of 6 kW with a clamping collet, a maximum rotational speed of 18000 rpm and a low noise level.



Fig. 10. Milling spindle motor GDZ120X103-6KW

### 3. Database of leading developers, researchers and manufacturers of motor spindles for metalworking machines [2]

The database was created based on the results of an information search and analysis of open access information resources (promotional products; catalogs; prospectuses of international specialized exhibitions; information digests, etc). The database contains organized information on leading European research institutions, companies and manufacturers of modern motor spindles (Germany, Switzerland, Italy, as well as developers and manufacturers in Japan, China and Taiwan) whose products are intended for CNC machines, metalworking centers and special-purpose machines. The database contains brief information on the name and country of the developer (manufacturer), the main areas of research and development and types of market products, contact addresses of their head offices and consulting centers, as well as up-to-date information on the presence of representative offices in Ukraine.

The leading firms and companies involved in the development, research and production of motor spindles include: 1. FISCHER Spindle Group AG. 2. Siemens Electric motors, Spindel- und Lagerungstechnik Fraureuth GmbH, Neudecker & Jolitz (Himmel), BZT Maschinenbau GmbH, CNC-STEP GmbH & Co. KG, CTR Norte GmbH & Co. KG, Fiege, Weiss Gmb (Germany). 3. Teknomotor, HSD SpA (Italy). 4. BIG KAISER, TDM SA, GF Machining Solutions - Step-Tec, IBAG Switzerland AG, FISCHER AG - Präzisionsspindeln, TDM SA (Switzerland), MicroLab, Precision Technology Co., Ltd. Spintech Precision Machinery, Akira-Seiki Co., Ltd (Taiwan), Changlong Motor Co., Ltd. (China). FANUC (Japan).

### 4. Prospects for the development of motor spindles [1,11]

M-S systems are complex combined electromechanical structures that include mechanical and electromagnetic parts. The mechanical part includes the spindle itself, and the electromagnetic part includes the windings that are the source of the electromagnetic field.

The combined EM system is a spatial composition of at least two elementary structures, each of which performs its own function in the system (Fig. 11). Therefore, in such a combined system, the spatial shape and number of moving and stationary parts, air gaps, power and control systems is determined by a specific target function, the corresponding spatial geometry and the number of combined elementary EM structures.

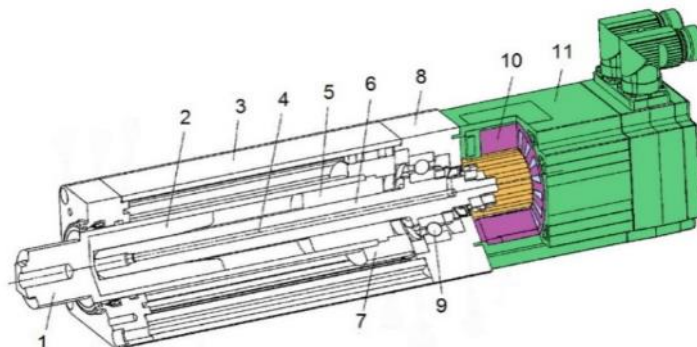
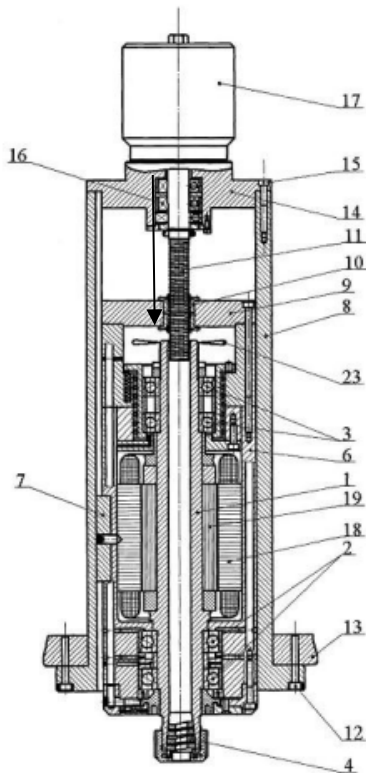


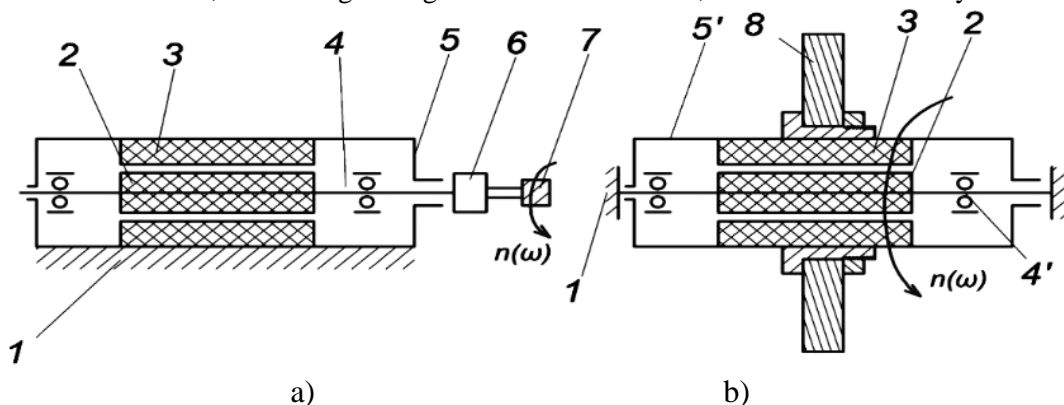
Fig. 11. Motor-spindle in section: 1 - spindle; 2 - support cylinder; 3 - housing of the mechanical part M-S; 4 - lubrication compartment; 5 - spindle running gear; 6 - spindle nut; 7 - centering guide; 8 - casing; 9 - bearing; 10 - motor stator; 11 - motor housing

The main attention was paid to the self-propelled M-S, in which the main motion and feed drives with a helical gear are combined (Fig. 12).



*Fig. 12. Self-acting M-S according to the patent of Ukraine No. 65488 on the basis of M-S by EBAG: 1 - spindle; 2 - front support; 3 - rear support; 4 - collet clamping chuck; 5 - cover with seals; 6 - M-S body with foam function; 7 - key; 8 - flange-type body; 9 - cover with nut; 10 - feed screw; 11 - feed screw; 12, 15 - fixing screw; 13 - movable platform of the MPS; 14 - cover; 15 - supports for screw 11; 17 - stepper motor for feeding*

The design of self-propelled M-S can be different, which affects the construction of calculation schemes taking into account the range of guides, their location, including on machines with parallel structure mechanisms (PSM). Stiffness, accuracy, and dynamic characteristics depend on the design. For example, when changing the scheme of electric current supply to the stator and rotor windings, M-S can be used both with a fixed body (Fig. 13, a) in the traditional design, when an actuator, such as a cylindrical cutter in a clamping chuck, is located on the rotor axis, and with a movable body with a fixed rotor (Fig. 13, b), when an actuator, such as a grinding wheel or a disk cutter, is located on the body.



*Fig. 13. M-S with moving rotor (a) and stator (b) using the genetic inversion operator: 1 - fixed base; 2 - rotor; 3 - stator; 4 - rotating spindle; 4' - non-rotating spindle-shaft; 5 - fixed M-S body; 5' - moving M-S body; 6 - clamping chuck; 7 - cylindrical cutter; 8 - grinding wheel.*

One of the schemes of a self-acting M-S with a helical gear is shown in Fig. 14.

When voltage is applied to the stator winding 4, a magnetic field is generated that interacts with the two-layer active surface of the rotor 6 and thus causes the spindle 7 to rotate at the required speed  $n$ . To ensure the feed of the spindle, voltage is applied to the electric motor 1, the revolutions of which are converted by the CNC system through the screw pair 2, 3 into the translational movement of the pinola 5, providing the required feed  $S$ . Options for the technical implementation of the synthesized chromosome  $S_{33}$  will be discussed in Section 2.4.

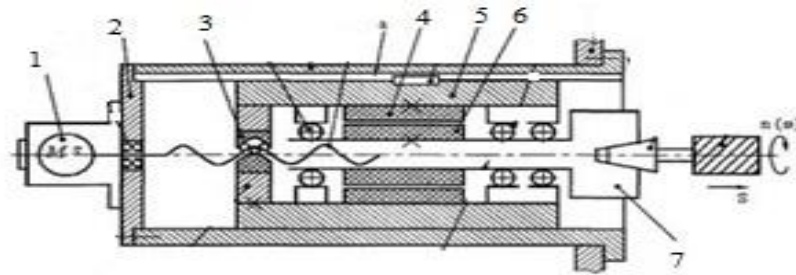


Fig. 14. Principal kinematic diagram of a self-acting M-S flange type

The following 4 design schemes were selected for use in different machines (Fig. 15):  
 a) with a base for guides along the length of the M-S body;  
 b) with an increased base in length due to additional extension of the guides;  
 c) with guides in the form of fixed rods arranged in parallel in the plane of the M-S axis;  
 d) option "b" with its location on the movable platform of the machine with PSM.

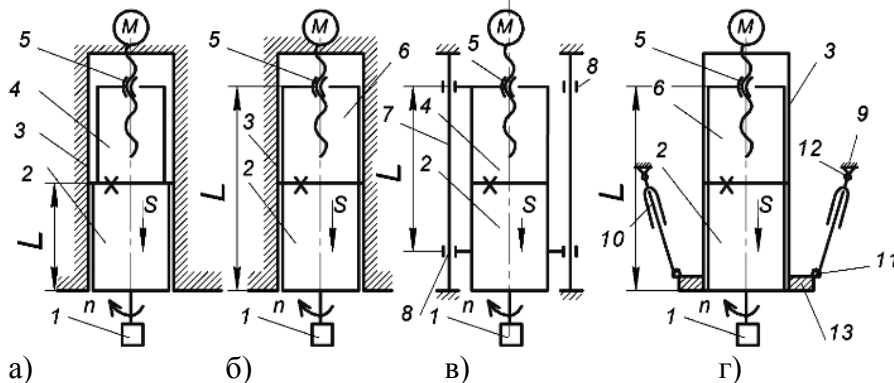


Fig. 15. Constructive diagrams of variants of self-propelled M-S with a helical gear for further theoretical studies

In embodiment 1 (Fig. 15, a), the body M-S 2 of the traditional design is rigidly connected to the cup 4, in which the nut of the screw pair 5 (sliding or rolling) is located, the screw of which receives revolutions from the stepping or tracking electric motor M according to the program from the machine's CNC system. This, in addition to the revolutions  $n$  of the main motion tool, provides coordinate movement with the feed  $S$  of the M-S 2, as pinions in the guides 3.

To increase the stiffness of the spindle assembly in variant 2 (Fig. 15, b) by reducing the skew angles, the pinion is extended by a glass 6, which is made of the same diameter as the body M-S 2.

It is possible to perform the guides in the form of fixed parallel rods 7 (Fig. 15, c) with sliders 8 at a distance  $L$ . In this case, it is not necessary to perform the glass 6 according to the scheme in Fig. 6, b, but it is possible to use the glass 4 according to the scheme in Fig. 6, a.

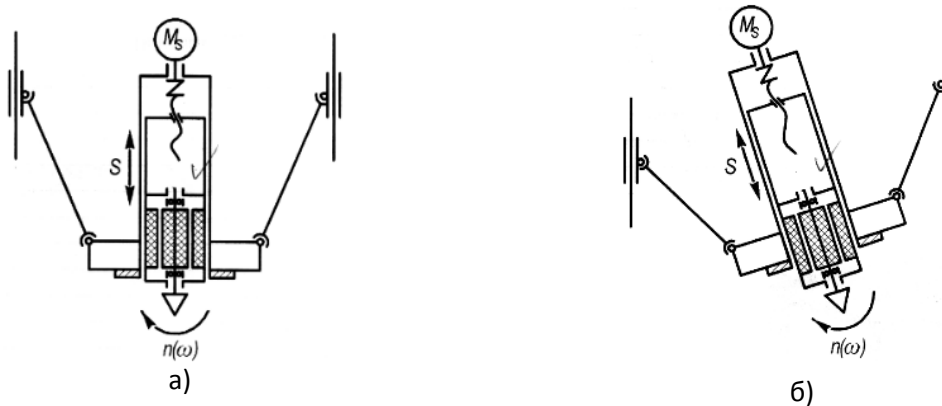
Option 4 provides for the location of the spindle assembly on a movable platform 13 (Fig. 15, d) of a machine with a parallel structure mechanism (PSM) and rods 10, which are connected to the platform by means of hinge joints 11, and hinges 12 to the fixed part of the machine. It is possible to make rods of variable length or constant length, where the upper joints of the connection are located on gradually moving slider supports, the movement of which is set by the CNC system. The location of the self-propelled M-S on a movable platform allows machining surfaces or holes at an angle using the feed  $S$  of the self-propelled M-S, rather than the movements of the entire platform with a larger mass (Fig. 16).

### Conclusions and recommendations

1. The results of the patent information research made it possible to carry out a thematic patent search for inventions (utility models) related to M-S for machine tools for various purposes, to find competitors and possible partners in the creation of new designs and to determine the role of Ukrainian scientists in this area with high probability.

2. It has become obvious, as a global trend in high-speed machining, the transition from multi-link drives of the main rotational motion to a single-link drive, where the spindle assembly of the machine

is made in the form of a M-S, the stator of which is the body of the spindle assembly (spindle headstock), and the rotor is a spindle with an end for fixing a tool or part.



**Fig. 16. An example of using a self-powered M-S on a machine with an PSM and rods of constant length: a - vertical position; b - angular position**

3. Currently, M-S are manufactured for various machine tools (milling, turning, grinding, multi-purpose, woodworking and special-purpose), but the vast majority are for milling machines with supports in the form of liquid-cooled ball bearings and collet clamps.

4. Self-acting M-Ss that perform rotational (main drive function) and translational (feed drive function) forming movements are still not manufactured. It was possible to combine these movements in the design of the M-S due to the universal genetic crossing operator, which made it possible to move to hybrid systems that became the object of this research.

5. The pioneers in the creation of self-powered (hybrid) M-S were scientists of the departments of machine design of the Institute of Mechanical Engineering and Electromechanics of the FEA of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, as an example of an interdisciplinary approach to solving current problems. The next step in the improvement and monitoring to improve the technical and economic performance of CNC machines and expand their functionality in remote control is the creation of intelligent M-S.

## References

1. The concept and progress of intelligent spindles: A review Hongrui Caoa, Xingwu Zhanga, Xuefeng Chenb // International Journal of Machine Tools & Manufacture, №112, 2017.-p.p.21-52 [www.elsevier.com/locate/ijmactool](http://www.elsevier.com/locate/ijmactool).
2. Research on the Effect of Spindle Speed on the Softening and Hardening Characteristics of the Axial Operating Stiffness of Machine Tool Spindle Jiandong Li, Qiang Wang, Xurui Sun, Jue Qu, Ang Qiu, Wei Kang, Shuaijun Ma // Lubricants 2022, 10, 132. <https://doi.org/10.3390/lubricants10070132a>
3. [https://www.spindelhersteller.com/ru/prodotti/shpindeli\\_tokarnogo\\_stanka.php](https://www.spindelhersteller.com/ru/prodotti/shpindeli_tokarnogo_stanka.php)
4. [https://www.preciserotation.ru/index/shpindeli\\_diebold\\_motor\\_shpindeli\\_diebold/0-58](https://www.preciserotation.ru/index/shpindeli_diebold_motor_shpindeli_diebold/0-58).
5. <https://mall.industry.siemens.com/mall/ru/ru/Catalog/Products/10030549>
6. [https://machine-service.ru/spindle\\_shpindel\\_taiwan\\_royal\\_motorized\\_spindles](https://machine-service.ru/spindle_shpindel_taiwan_royal_motorized_spindles) Мотор-шпиндели Royal
7. <https://ctbservo.com/wp-content/uploads/2020/05/202001161202225.pdf> Мотор-шпиндели серии ES CTB Co.,Ltd
8. <https://www.hedelius.de/ru/tehnologii/motor-shpindeli-s-zhidkostnym-ohlazhdeniem/motor-shpindeli-s-zhidkostnym-ohlazhdeniem.html> HEDELIUS
9. <https://www.mtmarchetti.com/ru/prodotti/x11-elettromandrino-motorizzato.html> M.T. S.r.l
10. <https://peronspeedinternational.it/ru/ehlektroshpindeli.html> Peron Speed International - RU
11. K.O. Oliinik Oporability analysis of spindle-motor hybrid electromechanical system //Mech. Adv. Technol. Vol.5, No.1, p.p. 89-96

О.О. Ченчева, Є.Є. Лашко, С.В. Сукач, Д.В. Резнік

*Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського*

## ІНТЕГРАЛЬНА ОЦІНКА РИЗИКІВ ПІД ЧАС ОБРОБЛЕННЯ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

*У статті визначено, що є значне перевищення гігієнічних регламентів хімічних речовин у повітрі робочої зони під час свердлування карбоновмісних композитів у положенні стоячи та сидячи, а також під час переміщення та закріплення оброблюваної заготовки. Установлено, що показники шумового навантаження перевищують гранично допустимі значення під час виконання відповідного виробничого завдання, за винятком операції переміщення та закріплення заготовки, що безпосередньо пов'язано зі квазікрихкою структурою такого типу композиційних матеріалів. Водночас, зафіксовано перевищення рівня вібрації від роботи свердлувального верстата, а також відповідність її нормативним значенням під час переміщення та закріплення заготовки. Використання швидкої оцінки всього тіла (REBA) показало, що підняття, встановлення та перенесення заготовок, а також виконання отворів у верхньому стоячому та сидячому положенні є завданням із дуже високим рівнем ризику, яке потребує термінових дій з метою упередження настання травматичних подій. У результаті дослідження запропоновано використовувати новий підхід (Integrated risk assessment, IRA) з метою отримання інтегральної оцінки ризиків під час оброблення високотехнологічних композиційних матеріалів, який ураховує кожний окремий фактор у комплексній взаємодії.*

*Ключові слова:* інтегральна оцінка, високотехнологічні композиційні матеріали, пилове забруднення, шумове навантаження, вібрація, ергономічні чинники.

## INTEGRATED RISK ASSESSMENT DURING THE MACHINING OF HIGH-TECH COMPOSITE MATERIALS

*The article determines that there is a significant excess of hygienic regulations of chemicals in the air of the working area during drilling of carbon-containing composites in the standing and sitting positions, as well as during moving and fixing the workpiece. It has been established that the noise load indicators exceed the maximum permissible values during the performance of the corresponding production task, except for the operation of moving and fixing the workpiece, which is directly related to the quasi-brittle structure of this type of composite materials. At the same time, an excess of the vibration level from the operation of the drilling machine was recorded, as well as its compliance with the regulatory values during the movement and fixation of the workpiece. The use of rapid entire body assessment (REBA) showed that lifting, setting and carrying workpieces, as well as drilling holes in the upper standing and sitting positions, is a very high-risk task that requires urgent action to prevent the onset of traumatic events. As a result of the study, it is proposed to use a new approach (Integrated risk assessment, IRA) to obtain an integrated risk assessment during the processing of high-tech composite materials, which takes into account each individual factor in complex interactions.*

*Keywords:* integrated assessment, high-tech composite materials, dust pollution, noise load, vibration, ergonomic factors.

### Постановка проблеми.

Оцінка впливу шкідливих виробничих факторів під час оброблення карбоновмісних композитів є важливою складовою у процесі створення безпечних умов праці й охорони здоров'я працівників. Основні шкідливі фактори, які виникають під час роботи свердлувальника із зазначеним типом композиційних матеріалів, згрупуємо відповідно до джерела їхнього походження:

#### 1. Фізичні фактори:

– запыленість робочої зони: під час оброблення карбоновмісних композитів утворюється дрібнодисперсний пил, який може проникати у легені, викликаючи респіраторні захворювання й інші проблеми зі здоров'ям.

– шум: робота свердлувального обладнання для оброблення композиційних матеріалів часто супроводжується високим рівнем шуму, що може призводити до зниження слуху й інших проблем зі здоров'ям;

– вібрація: вплив вібрацій від свердлувального обладнання може спричинити захворювання опорно-рухової системи та негативно впливати на кровообіг в організмі людини.

2. Ергономічні фактори: багаторазові нахили, підняття важких елементів заготовок, пересування та тягнення вантажів, а також робота у незручних положеннях тіла є звичайною практикою особливо в умовах виконання конструкційних отворів і фінішної обробки деталей різноманітного призначення.

Додатково до зазначеного, порівняно із працівниками інших галузей промисловості, свердлувальники піддаються вищому рівню ризику через низку інших факторів ризику, а саме:

психологічним стресам унаслідок високої концентрації уваги, довгої робочої зміни, тривалого перебування у положенні стоячи, сидячи чи нахилиючись, ізоляції та необхідності забезпечення підвищеного рівня точності виконання отворів для прецензійності збірки на робочому місці.

Отже, необхідно безпосередньо враховувати показники запиленості, шуму, вібрації й ергономічних ризиків для визначення загального показника навантаження на працівника під час здійснення ним трудової діяльності.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Існує декілька класифікацій методик оцінювання ризиків, наприклад, техніки оцінювання поділяються на кількісні, якісні та комбіновані [1–3]. При вдосконаленні методик найбільш перспективним напрямком є зосередження насамперед на кількісних методиках, що найкраще зарекомендували себе на практиці [4]. Проте, необхідно враховувати той факт, що існуючі методичні підходи до оцінки професійних ризиків не можуть вважатися універсальними для підприємств різних галузей, а результативність їхнього використання значною мірою залежить від конкретних виробничих умов.

#### **Постановка завдань.**

Метою дослідження є оцінка впливу шкідливих виробничих факторів під час оброблення карбоновмісних композитів із метою отримання його інтегрованого показника.

Для досягнення зазначеної мети необхідно вирішити такі задачі:

- дослідження пилового забруднення робочої зони під час оброблення карбоновмісних композитів;
- експериментальне визначення шумового навантаження й установа рівня вібрації від роботи свердлувального обладнання;
- дослідження ергономічних ризиків роботи свердлувальника у залежності від різних положень тіла під час виконання відповідного виробничого завдання.

#### **Викладення основного матеріалу.**

На початку необхідно здійснити оцінювання впливу факторів навколишнього середовища на робочому місці (пил, шум, вібрація), яка проводилася за атестаційними картами умов праці свердлувальника. Визначення показників із трьох зазначених факторів проводилось у зв'язку з тим, що вони найбільше впливають на фізичний стан свердлувальника та призводять до поширених професійних захворювань. Після встановлення фактичних даних факторів зовнішнього середовища (пилу, шуму, вібрації) їхні показники порівнювали із гранично допустимими значеннями, які зафіксовані у відповідних нормативних документах. Найбільше відхилення від норми виявлено й ураховано при оцінці впливу на величину індексу навантаження під час виконання відповідного виробничого завдання [5–7]. Результати визначення впливу факторів навколишнього середовища свердлувальника наведені у табл. 1.

За результатами вимірювання показників впливу навколишнього середовища на свердлувальника можна зробити такі висновки:

- спостерігається значне перевищення гігієнічних регламентів хімічних речовин у повітрі робочої зони при свердлуванні карбоновмісних композитів у положенні стоячи та сидячи, а також під час переміщення та закріплення оброблюваної заготовки;
- показники шумового навантаження суттєво перевищують ГДК під час виконання відповідного виробничого завдання, за винятком нахилання, що безпосередньо пов'язано зі квазікрихою структурою такого типу композиційних матеріалів;
- спостерігається значне перевищення рівня вібрації від роботи свердлувального верстата, а також відповідність нормативним значенням під час переміщення та закріплення заготовки.

Для кількісної оцінки впливу кожного із зазначених виробничих факторів, які наявні на робочому місці свердлувальника, на рівень професійного ризику запропоновано використання власної методики бальної оцінки шкідливих чинників,  $k_{Rin.шч}$ :

$$k_{Rin.шч} = \frac{R_{вимір.шч}}{R_{ГДЗ.шч}} * , \quad (1)$$

де  $R_{вимір.шч}$  – вимірне значення шкідливого чинника;

$R_{ГДЗ.шч}$  – гранично допустиме значення шкідливого чинника.

\*у випадку якщо після розрахунку інтегрованої показник шкідливого чинника менше/дорівнює одиниці, тоді його значення для подальших розрахунків ухвалюємо за одиницю (табл. 1).

Табл. 1

**Показники впливу середовища на індекс навантаження свердлувальника у залежності від різних положень тіла у вигляді відповідних розрахункових коефіцієнтів**

№	Пил, мг/м <sup>3</sup>			Шум, ДБ			Вібрація, ДБ		
	Фактичний	ГДЗ*	$k_{Rin.пил}$	Фактичний	ГДЗ*	$k_{Rin.шум}$	Фактичний	ГДЗ*	$k_{Rin.вібр.}$
1**	19	2-4	5,45	103	80	1,28	122	90	1,31
	23			101			122		
	21			105			115		
	23			102			116		
	23			102			113		
2**	19	2-4	5,1	100	80	1,2	110	90	1,26
	20			99			112		
	20			95			115		
	22			97			117		
	21			90			111		
3**	8	2-4	1,8	71	80	1	60	90	1
	6			75			65		
	9			79			55		
	7			76			57		
	6			78			60		

\*ГДЗ – гранично допустиме значення фактору

\*\*положення тіла працівника: стоячи (1); сидячи (2); переміщення та закріплення оброблюваної заготовки (3)

Робітники механообробних цехів високотехнологічних композиційних матеріалів на основі вуглецевих волокон значною мірою піддаються ергономічним травмам і пов'язаним з ними ризикам.

Розлади опорно-рухового апарату призводять до значних операційних витрат для роботодавців через можливе виникнення браку в дороговартісній заготовці з карбонового волокнистого композиту, але з ергономічної точки зору було проведено недостатньо досліджень ризиків і пов'язаних з ними методів ідентифікації, оцінки та розробки превентивних заходів.

Оскільки травми опорно-рухового апарату розвиваються протягом тривалого періоду часу та мають накопичувальний ефект, важко визначити, як часто вони виникають і коли саме відбулося надмірне навантаження.

Одне з найскладніших завдань для свердлувальника – робота з ручним інструментом. Через незручне положення тіла під час роботи з ними, кількість маніпуляцій з ними та швидкість роботи, відносно підвищуються ризики розвитку захворювань опорно-рухового апарату (ЗОРА). Основними фізіологічними факторами, які впливають на таке завдання, є висока повторюваність, використання значної м'язової сили, тривалий робочий день і локальна м'язова втома.

Різні типи та розміри карбоновмісних заготовок і комплектуючих мають різну вагу, до того ж як правило це елементи з початковою викладкою волокна на форми зі складним геометричним рельєфом, що додає складності у переміщенні, закріпленні, обробленні цієї заготовки.

Через пов'язані з цим ризики, встановлення та закріплення заготовки має виконуватися відповідно до робочих процедур із використанням двох-трьох працівників. Проте, через виробничі обставини, нестачу персоналу й економічну необґрунтованість наявності додаткового робітника, часто спостерігається, що закріплення, переміщення й оброблення елементів конструкції виконує тільки одна особа.

Під час роботи з великими заготовками складної геометричної форми часто доводиться нахилитися, згинатися та скручувати спину.

Порушення опорно-рухового апарату через незручні пози можуть вражати м'язи, суглоби та сухожилля у всіх частинах тіла, оскільки кістки тіла слугують опорою для руху людини та з'єднуються між собою суглобами. Крім того, м'язи людини з'єдані з кістками за допомогою сухожилля.

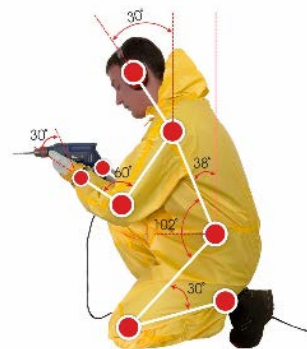
Через специфіку завдання, під час роботи з ручним свердлувальним обладнанням задіяний цілий ряд м'язів і суглобів. Нижня ділянка спини, черевний прес, трицепс, дельтоподібний м'яз і гамеллус є основними м'язами, що використовуються під час роботи зі свердлувальним обладнанням, а хребцеві, колінні, зап'ясткові, тазостегнові, плечові та фасеткові суглоби є основними суглобами, які задіяні під час такої операції. Через незручне положення тіла під час багаторазових маніпуляцій можуть стискатися нерви та подразнюватися сухожилля.



Стратегії профілактики ЗОРА часто зосереджуються на основних факторах ризику, таких як сила, поза та повторення дій. Для того, щоб виконати оцінку ризику та визначити основні фактори ризику, які відіграють роль при роботі зі свердлувальним обладнанням, було проведено постуральний аналіз. Для цього було проведено спостереження за операцією «Виконання конструкційних отворів заготовки крила» й обрано найбільш незручні положення тіла. Знімок для аналізу постави був зроблений під час виконання отворів у верхній (рис. 1) і нижній (рис. 2) частині заготовки, а також переміщення, підйому та закріплення заготовки (рис. 3). Ці пози зустрічаються найчастіше і передбачають більші зусилля та м'язову активність, що спричиняє більший дискомфорт для працівників. У цьому завданні задіяні всі частини тіла, включаючи руки, пальці, плечі, спину, шию, ноги та зап'ястя, які можуть постраждати від порушень опорно-рухового апарату.



**Рис. 1. Положення тіла працівника під час виконання отворів ручним інструментом у положенні стоячи**



**Рис. 2. Положення тіла працівника під час виконання отворів ручним інструментом у положенні сидячи**



**Рис. 3. Положення тіла працівника під час переміщення та закріплення оброблюваної заготовки**

Методи аналізу постави та пози є скринінговими інструментами, які дають можливість оцінити ризик настання травматичних подій, виявити основні його фактори та визначити

пріоритетність коригувальних заходів. Хоча для вибору відповідного методу аналізу постави були враховані звичайні параметри, такі як час для спостереження й аналізу, необхідні деталі, частота виконання завдання, пов'язані з цим витрати, події та тип занять, але для динамічних завдань, коли всі частини тіла рухаються, рекомендується вибирати між Системою аналізу роботи Ovaco (OWAS) або Швидкою оцінкою всього тіла (REBA). Враховуючи той факт, що методика REBA чутлива до оцінки ризику саме для опорно-рухового апарату під час виконання різноманітних завдань, є більш надійною, а її результати можуть бути перевірені, було обрано саме цю методику. Як показано на робочому аркуші оцінки REBA, при оцінці частин тіла, задіяних у підйомі та переміщенні заготовки, та з урахуванням деяких параметрів, таких як вага вантажу, способи захоплення вантажу, загальна оцінка REBA досягла 11 балів на основі таблиці рівнів дій, така оцінка визначає позу як дуже високий рівень ризику, для якого необхідні негайні дії. Чек-листи оцінки ергономічних ризиків представлені на рисунках 4–6.

Під час підняття та переміщення карбонових заготовок задіяні всі частини тіла, такі як руки, пальці, плечі, спина, шия, ноги та зап'ястя, які можуть призвести до порушення роботи опорно-рухового апарату. Під час роботи з ручним свердлувальним обладнанням спостерігалися випадки застосування надмірної сили, нахилів, згинання талії та скручування спини. Багато травм, пов'язаних з ручним переміщенням під час виконання таких завдань, є кумулятивними та виникають у результаті багаторазового виконання одних і тих же дій з поганою поставою та незручною позою. Рух і прискорення швидкості роботи, особливо під час згинання та скручування, можуть збільшити кількість сили, яка прикладається до тіл. Використання швидкої оцінки всього тіла (REBA) показало, що підняття, встановлення та перенесення заготовок, а також виконання отворів у верхньому стоячому та сидячому положенні є завданням із дуже високим рівнем ризику, яке потребує термінових дій з метою упередження настання травматичних подій.

Зважаючи на специфіку механообробної галузі із застосуванням ручного інструменту, вирішення питань ергономіки та людського фактору в організації має характеризуватися міждисциплінарним підходом. Робота з технологіями, людськими факторами й організацією у рамках добре структурованого підходу до вирішення ергономічних питань буде більш ефективною. З точки зору управління ризиками, пріоритетом має бути усунення випадків травматизму працівників й акцентування уваги на концепції науки ергономіки.

Головним кроком зменшення ризиків є розподіл обов'язків і виділення достатніх ресурсів для впровадження ергономічних програм, спрямованих на вирішення проблем ергономіки та людського фактору під час оцінки ризиків, проектуванні майбутніх обробних свердлувальних операцій під час виготовлення конструкційних отворів у елементах складної геометричної форми. Зміна організаційної культури має вирішальне значення, а заохочення працівників повідомляти про розлади опорно-рухового апарату та, зокрема, про травми спини є фундаментальним для покращення ситуації.

Наполегливо рекомендується запровадити цикл роботи/відпочинку, щоб зменшити рівень ризику, а також попередні медичні перевірки стану здоров'я, щоб переконатися, що люди фізично придатні для виконання такого типу складних завдань.

Отже, з метою отримання інтегральної оцінки ризиків під час оброблення високотехнологічних композиційних матеріалів пропонуємо використовувати новий підхід (Integrated risk assessment, IRA), який ураховує кожний окремий фактор і кількісно пов'язаний із відношенням отриманого показника впливу у чисельнику та відповідного гранично допустимого значення у знаменнику (за формулою 1).

Використовуючи експериментальні усереднені дані, можемо скористатися такою формулою для його обчислення й унесемо отримані результати до таблиць 2–4:

$$R_{IRA} = R_{epzo} \times k_{Rin.nul} \times k_{Rin.шум} \times k_{Rin.вібр}, \quad (2)$$

де  $k_{Rin.nul}$ ,  $k_{Rin.шум}$ ,  $k_{Rin.вібр}$  – бальні показники запиленості, шумового навантаження та вібрації (за формулою 1);  $R_{epzo}$  – ергономічний показник, який було розраховано відповідно чек-листу за методикою REBA (рис. 4–6).

У результаті дослідження встановлено показник навантаження, який характеризує працю свердлувальника під час виконання відповідного робочого завдання й встановлено його відповідність такій шкалі оцінки ризиків (рис. 4–6).

Для зниження впливу цих факторів рекомендується впроваджувати такі заходи:

– використання систем вентиляції та фільтрації для видалення карбоновмісного пилу;

ERGONIMICS PLUS REBA Таблиця оцінки співробітників Назва завдання: Дата:

**А. Аналіз шиї та тулуба**

Крок 1: Визначте положення шиї  
 10-20° +1    20°+ +2    назовні +2

Крок 1а: Налашуйте...  
 Якщо шия скручується: +1  
 Якщо шия згибается: +1

Крок 2: Знайдіть положення тулуба  
 0-30° +1    30-60° +2    60°+ +3    60°+ +4

Крок 2а: Налашуйте...  
 Якщо тулуб скручується: +1  
 Якщо тулуб згибается: +1

Крок 3: Ногі  
 Налашуйте 30-60° +1    >60° +2    Додати +1    Додати +2

Крок 4: Оцінка постави вгорі в таблиці А  
 Використовуючи значення з кроків 1-3 вище, знайдіть оцінку в Таблиці А

Крок 5: Додайте показник Сими/Навантаження  
 Якщо навантаження < 11 фунтів: +0  
 Якщо навантаження від 11 до 22 фунтів: +1  
 Якщо навантаження > 22 фунтів: +2  
 Відрегулювати: якщо сила удару або швидкого наростання: додайте +1

Крок 6: Оцінка А, пошук рядка в таблиці С  
 Додайте значення з кроків 4 і 5, щоб отримати Оцінку А.  
 Знайдіть у Таблиці С.

**Оцінки**

Таблиця А

		Шия		3	
		1	2	3	4
Ноги		1	2	3	4
Тулуб	1	1	2	3	4
Постава	2	2	3	4	5
Оцінка	3	2	4	5	6
4	3	5	6	7	8
5	4	6	7	8	9

Таблиця Б

		Нижня рука			2		
		Зап'ястя			1	2	3
Верхня Рука	1	1	2	3	1	2	3
Оцінка	2	1	2	3	4	5	6
3	3	4	5	6	7	8	9
4	4	5	6	7	8	9	10
5	5	6	7	8	9	10	11
6	6	7	8	9	10	11	12

Таблиця С

		Оцінка А			Оцінка Б			11					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	1	2	3	3	4	5	6	7	7	7	7
2	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	7	8
3	2	3	3	3	4	5	6	7	7	8	8	8	8
4	3	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9
5	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9	9
6	5	5	5	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10
7	6	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10	11
8	7	7	7	8	9	9	10	10	10	11	11	11	11
9	8	8	8	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12
10	9	9	9	10	10	11	11	11	12	12	12	12	12
11	10	10	10	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12
12	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Таблиця С Оцінка + Оцінка Активності = REBA оцінка

8 + 1 = 9

**Б. Аналіз руки та зап'ястка**

Крок 7: Визначте положення плеча  
 20° +1    20° +2    20° +2    20-45° +3    45-90° +4    90° +4

Крок 7а: Налашуйте...  
 Якщо плече підняте: +1  
 Відведення плеча: +1  
 Якщо рука підтримується або людина нахилється: -1

Крок 8: Визначте положення нижньої частини руки:  
 60-100° +1    100° +2    80° +2

Крок 9: Визначте положення зап'ястя:  
 15° +1    15°+ +2    15°+ +3

Крок 9а: Налашуйте...  
 Якщо хрестик зігнутий від середньої лінії або скручений: додайте +1

Крок 10: Оцінка постави вгорі в таблиці Б  
 Використовуючи значення з кроків 7-9 вище, знайдіть оцінку в Таблиці Б

Крок 11: Додайте оцінку зчеплення  
 Добре піднята рукоятка та потужна рукоятка середнього рівня, добре: +0  
 Прийнятний, але не ідеальний утримання за руку або прийнятне зчеплення з іншою частиною тіла, справедливо: +1  
 Тримання рук неприйнятно, але можливо, погано: +2  
 Без рук, незручно, небезпечно Будь-якою частиною тіла, неприпустимо: +3

Крок 12: Оцінка Б, знайдіть колонку в Таблиці С  
 Додайте значення з кроків 10 і 11, щоб отримати Оцінку В. Знайдіть крок 6 стовпця, щоб отримати оцінку Таблиці С.  
 +1 Для викликое швидкі великі зміни пози або нестійку основу

Крок 13: Оцінка активності  
 +1 і або більше частин тіла утримуються довше 1 хвилини (стійка)  
 +1 Повторювані дії з невеликою дальністю (більше 4 разів на хвилину)  
 +1 Для викликое швидкі великі зміни пози або нестійку основу

**Оцінка**  
 1 = Незначний Ризик  
 2-3 = Низкий Ризик. Можливо згодиться зміна.  
 4-7 = Середній ризик. Подальше дослідження. Незабаром зміниться.  
 8-10 = високий ризик. Досліджуйте та впроваджуйте зміни  
 11+ = дуже високий ризик. Впровадити зміни.

Рис. 4. Оцінка ступеня ризику за системою REBA при виконанні отворів ручним інструментом у положенні стоячи

ERGONIMICS PLUS REBA Таблиця оцінки співробітників Назва завдання: Дата:

**А. Аналіз шиї та тулуба**

Крок 1: Визначте положення шиї  
 10-20° +1    20°+ +2    назовні +2

Крок 1а: Налашуйте...  
 Якщо шия скручується: +1  
 Якщо шия згибается: +1

Крок 2: Знайдіть положення тулуба  
 0-30° +1    30-60° +2    60°+ +3    60°+ +4

Крок 2а: Налашуйте...  
 Якщо тулуб скручується: +1  
 Якщо тулуб згибается: +1

Крок 3: Ногі  
 Налашуйте 30-60° +1    >60° +2    Додати +1    Додати +2

Крок 4: Оцінка постави вгорі в таблиці А  
 Використовуючи значення з кроків 1-3 вище, знайдіть оцінку в Таблиці А

Крок 5: Додайте показник Сими/Навантаження  
 Якщо навантаження < 11 фунтів: +0  
 Якщо навантаження від 11 до 22 фунтів: +1  
 Якщо навантаження > 22 фунтів: +2  
 Відрегулювати: якщо сила удару або швидкого наростання: додайте +1

Крок 6: Оцінка А, пошук рядка в таблиці С  
 Додайте значення з кроків 4 і 5, щоб отримати Оцінку А.  
 Знайдіть у Таблиці С.

**Оцінки**

Таблиця А

		Шия		3	
		1	2	3	4
Ноги		1	2	3	4
Тулуб	1	1	2	3	4
Постава	2	2	3	4	5
Оцінка	3	2	4	5	6
4	3	5	6	7	8
5	4	6	7	8	9

Таблиця Б

		Нижня рука			2		
		Зап'ястя			1	2	3
Верхня Рука	1	1	2	3	1	2	3
Оцінка	2	1	2	3	4	5	6
3	3	4	5	6	7	8	9
4	4	5	6	7	8	9	10
5	5	6	7	8	9	10	11
6	6	7	8	9	10	11	12

Таблиця С

		Оцінка А			Оцінка Б			9					
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	1	2	3	3	4	5	6	7	7	7	7
2	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	7	8
3	2	3	3	3	4	5	6	7	7	8	8	8	8
4	3	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9
5	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9	9
6	5	5	5	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10
7	6	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10	11
8	7	7	7	8	9	9	10	10	10	11	11	11	11
9	8	8	8	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12
10	9	9	9	10	10	11	11	11	12	12	12	12	12
11	10	10	10	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12
12	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Таблиця С Оцінка + Оцінка Активності = REBA оцінка

8 + 1 = 9

**Б. Аналіз руки та зап'ястка**

Крок 7: Визначте положення плеча  
 20° +1    20° +2    20° +2    20-45° +3    45-90° +4    90° +4

Крок 7а: Налашуйте...  
 Якщо плече підняте: +1  
 Відведення плеча: +1  
 Якщо рука підтримується або людина нахилється: -1

Крок 8: Визначте положення нижньої частини руки:  
 60-100° +1    100° +2    80° +2

Крок 9: Визначте положення зап'ястя:  
 15° +1    15°+ +2    15°+ +3

Крок 9а: Налашуйте...  
 Якщо хрестик зігнутий від середньої лінії або скручений: додайте +1

Крок 10: Оцінка постави вгорі в таблиці Б  
 Використовуючи значення з кроків 7-9 вище, знайдіть оцінку в Таблиці Б

Крок 11: Додайте оцінку зчеплення  
 Добре піднята рукоятка та потужна рукоятка середнього рівня, добре: +0  
 Прийнятний, але не ідеальний утримання за руку або прийнятне зчеплення з іншою частиною тіла, справедливо: +1  
 Тримання рук неприйнятно, але можливо, погано: +2  
 Без рук, незручно, небезпечно Будь-якою частиною тіла, неприпустимо: +3

Крок 12: Оцінка Б, знайдіть колонку в Таблиці С  
 Додайте значення з кроків 10 і 11, щоб отримати Оцінку В. Знайдіть крок 6 стовпця, щоб отримати оцінку Таблиці С.  
 +1 Для викликое швидкі великі зміни пози або нестійку основу

Крок 13: Оцінка активності  
 +1 і або більше частин тіла утримуються довше 1 хвилини (стійка)  
 +1 Повторювані дії з невеликою дальністю (більше 4 разів на хвилину)  
 +1 Для викликое швидкі великі зміни пози або нестійку основу

**Оцінка**  
 1 = Незначний Ризик  
 2-3 = Низкий Ризик. Можливо згодиться зміна.  
 4-7 = Середній ризик. Подальше дослідження. Незабаром зміниться.  
 8-10 = високий ризик. Досліджуйте та впроваджуйте зміни  
 11+ = дуже високий ризик. Впровадити зміни.

Рис. 5. Оцінка ступеня ризику за системою REBA при виконанні отворів ручним інструментом у положенні сидячи

**ERGONOMICS PLUS REBA Таблиця оцінки співробітників** Назва завдання: \_\_\_\_\_ Дата: \_\_\_\_\_

**A. Аналіз ший та тлуба**

Крок 1: Визначте положення ший  
 +1 10-20° +2 20°+  
 Крок 1a: Налашуйте...  
 Якщо шия скручується: +1  
 Якщо шия згибається: +1

Крок 2: Знайдіть положення тлуба  
 +1 0° +2 20-60° +3 60°+  
 Крок 2a: Налашуйте...  
 Якщо тлубо скручується: +1  
 Якщо тлубо згибається: +1

Крок 3: Ноги  
 +1 30-60° +2 >50° +3 >50°  
 Крок 4: Оцінка постави вгорі в таблиці А  
 Використовуючи значення з кроків 1-3 вище, знайдіть оцінку в Таблиці А

Крок 5: Додайте показник Сими/Навантаження  
 Якщо навантаження < 11 фунтів: +0  
 Якщо навантаження від 11 до 22 фунтів: +1  
 Якщо навантаження > 22 фунтів: +2  
 Відрегулюйте якщо сімк устроу або швидкого наростання: додайте +1

Крок 6: Оцінка А, пошук рядка в таблиці С  
 Додайте значення з кроків 4 і 5, щоб отримати Оцінку А. Знайдіть у Таблиці С.

**Оцінка**  
 1 = Низький Ризик  
 2-3 = Низький Ризик. Може знадобитися зміна.  
 4-7 = середній ризик. Подальше дослідження. Незабаром зміниться.  
 8-10 = високий ризик. Дослідуйте та впровадьте зміни  
 11+ = дуже високий ризик. Впровадити зміни.

**Оцінки**

Таблиця А

		Шия													
		1				2				3					
Ноги		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		
Тубо		1	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	5	6
Постава		2	2	3	4	5	3	4	5	6	4	5	6	7	8
Оцінка		3	2	4	5	6	4	5	6	7	5	6	7	8	9
		4	3	5	6	7	5	6	7	8	6	7	8	9	9
		5	4	6	7	8	6	7	8	9	7	8	9	9	9

Таблиця Б

		Зап'ястя				Нижня рука					
		1		2		1		2		3	
Верхній		1	1	2	2	1	2	1	2	3	3
Рука		2	1	2	3	2	3	4	5	5	5
Оцінка		3	3	4	5	5	6	7	8	8	8
		4	4	5	6	7	8	8	9	9	9
		5	6	7	8	8	9	9	9	9	9
		6	7	8	8	8	9	9	9	9	9

Таблиця С

		Оцінка Б												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Оцінка А		1	1	1	1	2	3	3	4	5	6	7	7	7
		2	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	8
		3	2	3	3	4	5	6	7	7	8	8	8	8
		4	3	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9
		5	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9
		6	6	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10
		7	7	7	7	8	9	9	10	10	10	11	11	11
		8	8	8	8	9	10	10	10	10	11	11	11	11
		9	9	9	9	10	11	11	11	11	12	12	12	12
		10	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12
		11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12
		12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Таблиця С Оцінка + Оцінка Активності = REBA оцінка

**Б. Аналіз руки та зап'ястя**

Крок 7: Визначте положення плеча  
 +1 у розширенні +2 20° 20° 50° 20-45°  
 Крок 7a: Налашуйте...  
 Якщо плече падає: +1  
 Якщо плече підтримується або лодка навантається: -1

Крок 8: Визначте положення нижньої частини руки  
 +1 60-100° +2 100° +3 >8°

Крок 9: Визначте положення зап'ястя  
 +1 15° +2 15°+ 15°+ 15°+

Крок 9a: Налашуйте...  
 Якщо хрестик зігнутий від середньої лінії або скручений: додайте +1

Крок 10: Оцінка постави вгорі в таблиці Б  
 Використовуючи значення з кроків 7-9 вище, знайдіть оцінку в Таблиці Б

Крок 11: Додайте оцінку зчеплення  
 Добре підтримана рукоятка та потужна рукоятка середнього рівня, добре: +0  
 Прийнятний, але не ідеальний утримання за руку або прийнятне зчеплення з іншою частиною тіла, Оцінка зчеплення справедливо: +1  
 Тримання рук неприйнятно, але можливо, погано: +2  
 Без ручок, незручно, небезпечно будь-якою частиною тіла, Неприпустимо: +3

Крок 12: Оцінка Б, знайдіть колонку в Таблиці С  
 Додайте значення з кроків 10 і 11, щоб отримати Оцінку Б. Знайдіть крок 6 стовпця, щоб отримати оцінку Таблиці С. +1 Для виключас швидкі великі зміни пози або нестійку основу

Крок 13: Оцінка активності  
 +1 1 або більше частин тіла утримуються довше 1 хвилини (стійка)  
 +1 Повторювані дії з невеликою дальністю (більше 4 разів на хвилину)  
 +1 Для виключас швидкі великі зміни пози або нестійку основу

Рис. 6. Оцінка ступеня ризику за системою REBA для операції переміщення заготовки

- застосування засобів індивідуального захисту, таких як респіратори, захисні окуляри, рукавички та спеціальний одяг;
- забезпечення належного технічного обслуговування обладнання для зменшення рівня шуму та вібрації;
- організація регулярних медичних оглядів для працівників, які займаються обробкою карбоновмісних композитів;
- навчання працівників щодо безпечних методів роботи з високотехнологічними матеріалами й обладнанням, яке використовується для їхнього оброблення.

Табл. 2

Складові ризику			Шкідливі фактори та м'язове навантаження працівника	Позначення	Оцінки
Небезпека	Небезпечна подія	Наслідки			
Вплив шкідливих чинників та переван-	Профзахворювання (захворювань дихальної системи, глухуватість і глухота, вібраційна хвороба,	Втрата працездатності		$k_{Rin,пил}$	5,45
				$k_{Rin,шум}$	1,28

таження м'язів	порушення опорно-рухового апарату)		Визначення бального показника рівня вібрації	$k_{Rin.вiбр.}$	1,31
			Визначення показника ергономічних ризиків	$R_{ерго}$	11
Інтегральна оцінка ризиків (IRA)				$R_{IRA}$	100,5

Табл. 3

**Оцінка індексу навантаження свердлувальника у положенні сидячи**

Складові ризику			Шкідливі фактори та м'язове навантаження працівника 	Позначення	Оцінки
Небезпека	Небезпечна подія	Наслідки			
Вплив шкідливих чинників та перевантаження м'язів	Профзахворювання (захворювань дихальної системи, глухуватість і глухота, вібраційна хвороба, порушення опорно-рухового апарату)	Втрата працездатності	Визначення бального показника пилового забруднення	$k_{Rin.пил}$	5,1
			Визначення бального показника шумового навантаження	$k_{Rin.шум}$	1,2
			Визначення бального показника рівня вібрації	$k_{Rin.вiбр.}$	1,26
			Визначення показника ергономічних ризиків	$R_{ерго}$	9
Інтегральна оцінка ризиків (IRA)				$R_{IRA}$	69,4

Табл. 4

**Оцінка індексу навантаження свердлувальника під час переміщення та закріплення оброблюваної заготовки**

Складові ризику			Шкідливі фактори та м'язове навантаження працівника 	Позначення	Оцінки
Небезпека	Небезпечна подія	Наслідки			
Вплив шкідливих чинників та перевантаження м'язів	Профзахворювання (захворювань дихальної системи, глухуватість і глухота, вібраційна хвороба, порушення опорно-рухового апарату)	Втрата працездатності	Визначення бального показника пилового забруднення	$k_{Rin.пил}$	1,8
			Визначення бального показника шумового навантаження	$k_{Rin.шум}$	1
			Визначення бального показника рівня вібрації	$k_{Rin.вiбр.}$	1
			Визначення показника ергономічних ризиків	$R_{ерго}$	11
Інтегральна оцінка ризиків (IRA)				$R_{IRA}$	19,8

Оцінка інтегрального ризику  $R_{IRA}$ 

Бали		Рівень ризику
1		Незначний
2–3		Низький
4–7		Середній
8–10		Високий
11+		Дуже високий

**Висновки.**

У результаті виконаного комплексного дослідження можна зробити висновок що:

1. наявне значне перевищення гігієнічних регламентів хімічних речовин у повітрі робочої зони під час свердлування карбоновмісних композитів у положенні стоячи та сидячи, а також під час переміщення та закріплення оброблюваної заготовки;

2. показники шумового навантаження перевищують ГДЗ під час виконання відповідного виробничого завдання, за винятком операції переміщення та закріплення заготовки, що безпосередньо пов'язано зі квазікрихкою структурою такого типу композиційних матеріалів;

3. наявне перевищення рівня вібрації від роботи свердлувального верстата, а також відповідність нормативним значенням під час переміщення та закріплення заготовки;

4. використання методики швидкої оцінки всього тіла (REBA) показало, що підняття, встановлення та перенесення заготовок, а також виконання отворів у верхньому стоячому та сидячому положенні є завданням із дуже високим рівнем ризику, яке потребує термінових дій з метою упередження настання травматичних подій;

5. запропоновано використовувати новий підхід (Integrated risk assessment, IRA) з метою отримання інтегральної оцінки ризиків під час оброблення високотехнологічних композиційних матеріалів, який ураховує комплексний вплив кожного окремого фактору, а саме: пилового забруднення, шумового навантаження, вібрації й ергономічних ризиків.

**Список використаних джерел:**

1. Nygaard, N.P., Thomsen, G.F., Rasmussen, J., Skadhauge, L.R., Gram, B. (2022). Ergonomic and individual risk factors for musculoskeletal pain in the ageing workforce. *Journal BMC Public Health*, 22, 1975.

2. Vijayakumar, R., Choi, J.-h. (2022). Emerging Trends of Ergonomic Risk Assessment in Construction Safety Management: A Scientometric Visualization Analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 16120.

3. Yokoyama, K., Iijima, S., Ito, H., Kan, M. (2013). The socio-economic impact of occupational diseases and injuries. *Industrial Health*, 51(5), 459–461.

4. Kruzhilko, O., Polukarov, O., Kalinchyk, V., Tkalych, I. (2019). Improvement of the workplace environmental physical factors values monitoring by determining the optimal interval for their control. *Archives of Materials Science and Engineering*, 99/1–2, 42–49.

5. Tsopa, V., Cheberiyachko, S., Cheberiyachko, Y., Deryugin, O., Chencheva, O., Rieznik, D., Klimov, E., Lashko, Y., Pashko, D., & Biliaieva, V. (2024). Development of a new ergonomic risks management algorithm on the example of drivers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(3 (128)), 38–49.

6. Ченчева, О. (2023). Аналіз фракційного складу пилу робочої зони при свердлуванні композиційних матеріалів на основі карбонових волокон. *Екологічна безпека та природоохористування*, 46(2), 100–108.

7. Резнік, Д. (2023). Експериментальні дослідження шумового забруднення механообробних дільниць. *ВІСТІ Донецького гірничого інституту*, 2(53).60–70.

Л. Ю. Федік, Ю. Л. Гунько

Луцький національний технічний університет

**АНАЛІЗ НАЙБІЛЬШ ПОШИРЕНИХ ПРОМИСЛОВИХ РОБОТІВ СВІТОВИХ ЛІДЕРІВ EPSON, YAMAHA І PANASONIC**

У статті викладені особливості застосування промислових роботів як робочих машин контрольно-управляючих інформаційних систем, що забезпечують автоматизацію технологічних процесів і операцій, зв'язують їх у системи виробничих комплексів, працюють автоматично з гнучкою технологією. А також щорічні світові темпи випуску промислових роботів, проведений аналіз існуючих моделей цих автоматичних пристроїв світових лідерів EPSON, YAMAHA і PANASONIC. Зокрема, промислові роботи EPSON отримали широке застосування роботів-маніпуляторів і SCARA-роботів через забезпечення ефективного застосування виробничих приміщень, виконання рухів не по прямій, а в обхід перешкод або в обмеженому просторі з корисним навантаженням до 20 кг для механічного чи електричного збирання, вибору і розміщення, комплектації і дозування невеликої ваги. На відміну від промислових роботів EPSON роботи YAMAHA задають тон у продажах роботів SCARA вантажопідйомністю до 50 кг, які забезпечують переміщення і збирання великих компонентів, універсальності, відсутності практично всіх вібрацій, що виникають у результаті уповільнення моменту руху руки. Широке застосування отримали оригінальні зварювальні роботи PANASONIC для дугового та віддаленого лазерного зварювання і універсальні маніпулятори, що оптимально доповнюють зварювальні роботи цього виробника.

**Ключові слова:** промисловий робот, маніпулятор, лідер, EPSON, YAMAHA, PANASONIC.

L. Fedik, Y. Hunko

**ANALYSIS OF THE MOST COMMON INDUSTRIAL WORKS OF WORLD LEADERS EPSON, YAMAHA AND PANASONIC**

The article outlines the features of the use of industrial robots as working machines of control and management information systems that provide automation of technological processes and operations, connecting them into systems of production complexes that work automatically with flexible technology. As well as the annual global rate of production of industrial robots, an analysis of the existing models of these automatic devices from the world leaders EPSON, YAMAHA and PANASONIC was carried out. In particular, EPSON industrial work has seen widespread use of robotic manipulators and SCARA work by ensuring the efficient use of industrial premises, performing movements not in a straight line, but around obstacles or in confined spaces with a payload of up to 20 kg for mechanical or electrical cleaning, selection and placement, configuration and dosage of light weight.

In contrast to EPSON industrial robots, YAMAHA's work sets the tone for sales of SCARA robots with a lifting capacity of up to 50 kg, which provide the movement and collection of large components, versatility, and the absence of almost all vibrations that arise as a result of slowing down the moment of arm movement. Original PANASONIC welding works for arc and remote laser welding and universal manipulators that optimally complement the welding works of this manufacturer are widely used.

**Key words:** industrial robot, manipulator, leader, EPSON, YAMAHA, PANASONIC.

**Постановка проблеми.** Промисловість, як сектор економічного зростання держави, є галуззю національної економіки і підвищення її ефективності визначається прискоренням науково-технічного прогресу та впровадженням автоматизації.

Перехід до автоматизації виробництва здійснюється завдяки використанню промислових роботів, які є робочими машинами контрольно-управляючих інформаційних систем, забезпечують автоматизацію технологічних процесів і операцій, зв'язують їх у системи виробничих комплексів, працюють автоматично з гнучкою технологією.

Застосування роботів забезпечує зниження витрат на виробничий процес, підвищення продуктивності праці та якості продукції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** За даними Міжнародної федерації робототехніки (International Federation of Robotics, IFR), у 2022 році в світі діяло більше 3,9 млн промислових роботів. При цьому, їх щільність (кількість роботів у розрахунку на кожні 10 тис. працюючих) у всьому світі досягла середньої відмітки 151 одиницю, за останні шість років показник зріс більше ніж у два рази. Очікується, що до 2028 року щорічні темпи зростання доходів від різних роботів становитимуть від 15 до 20% [1-3].

**Вирішення невирішених раніше частин.** Дослідження випускаючих промислових роботів EPSON, YAMAHA і PANASONIC.

**Формулювання цілей статті** аналіз існуючих моделей промислових роботів світових лідерів у випуску цих пристроїв компаній EPSON, YAMAHA і PANASONIC для проектування систем автоматизації.

**Викладення основного матеріалу.** Компанія EPSON пропонує широкий вибір унікальних високошвидкісних, високоточних промислових роботів. Рушійним критерієм при цьому є гарантована надійність компонентів, які дозволяють автоматизувати виробництво.

Роботи EPSON призначені для навантаження і розвантаження деталей (вкладання вантажів на піддони), встановлення, переміщення, обробки деталей (пиляння, подрібнення, свердління, шліфування), збирання. Їх особливістю є сенсорні технології QMEMS (Quartz MEMS) із спеціальним гіро-сенсорами, що дозволяють суттєво знизити залишкові вібрації, прискорити продуктивність, не втрачаючи точності слідування траєкторії руху маніпулятора, а також застосовуючі пристосування серії Spider, які відкривають широкі можливості цим автоматичним пристосуванням. Крім цього притаманна унікальна конструкція, що забезпечує компактність і надзвичайно високу швидкість.

Внаслідок цих винятковостей вдалося випустити перші і єдині робототехнічні системи SCARA з абсолютно циліндричною системою обхвату, дозволяючі працювати в будь-яких положеннях у робочій зоні та скорочувати тривалість циклів.

Компанію EPSON сьогодні вважають лідером із виробництва SCARA-роботів (Selective Compliance Articulated Robot Arm), то б то роботизованої «руки», основою якої є важільна система, забезпечуюча переміщення кінцевої ланки в площині за рахунок обертового приводу важилів механізму. Інакше кажучи - це система осей, обертання яких дозволяє переміщувати «кисть» робота вздовж потрібної траєкторії, попередньо запрограмованої інженером. У результаті шестиосьова складна «робо-рука» має більш ефективне застосування виробничих приміщень, саме у випадках, коли потрібно виконувати рух не по прямій, а в обхід перешкод або в обмеженому просторі.

Нині EPSON випускає більше 300 моделей SCARA-роботів різних розмірів із охоптом від 175 до 1000 мм, корисним навантаженням до 20 кг, і з можливістю вбудованого промивання. Серед яких належне місце зайняли моделі для чищення кімнат і призначені для виконання стерильних дій.

До прикладу, шестиосьовий робот компанії працює на заводі з виробництва/збирання контейнерів із чорнилами для офісних принтерів Epson WorkForce Pro RIPS [4-5].

Слід зазначити, що високошвидкісні шестиосьові роботи EPSON ProSix мають високу точність переміщення, за стандартної тривалості циклу не вище 0,37 секунди з повторюваністю  $\pm 0,02$  мм, що гарантує їх високу пропускну спроможність і рентабельність, а роботи EPSON LS3 SCARA - інтелектуальну технологію керування рухом, яка дозволяє швидко виконувати операції на високій швидкості, рівні вібрації, а відповідно високій продуктивності і мають конкурентоспроможну ціну. Завдяки цим винятковостям промислові роботи застосовують для механічного чи електричного збирання, вибору і розміщення, комплектації і дозування.

У той же час EPSON LS3 SCARA з чотирма руками 400 мм із високими циклами, максимують продуктивність завдяки швидкості 6000 мм/с із точним переміщенням деталей, які сконфігуровані згідно ISO 4, що сприяє чистоті та високій якості продукції.

Марка робота EPSON RC90 заслуговує на увагу через наявність потужного, економічного і простого драйвера, високого і економічного керування рухом, простого настроювання через USB, більш високого профіля руху і керування траєкторією, наявності сервосистеми PowerDrive, що надає покращене сервокерування для прискорення розгону/тормозіння з пуском/зупинкою, швидкі цикли і час виконання програми, а також велику гнучкість під час виконання в якості автономного ведомого пристрою чи з ПК, що може застосовуватися до серій EPSON G/RS SCARAS, модулів EZ, шестиосьового C3/PS/S.

Серія роботів G3 користується популярністю в споживачів через оптимальні цикли, швидкість, точність. Ця серія являє собою компактну, швидку і потужну конструкцію з прямим або закругленим важілем довжиною від 250 до 350 мм, із маленькими ручками, що може обробляти вантажі вагою до 3 кг.

На відміну від попереднього пристрою марки роботів G3 SCARA Robots 250 мм вважають ідеальними, під час вибору пристрою високої продуктивності і низької вартості. Більше того він забезпечує велику ефективність відбитків і унікальну вигнуту конструкцію рукоятки, за час циклу 0,41 секунди. У відповідності до ISO Clean і ESD для напівпровідників і статико-чутливих доповнень досягається максимальна швидкість майже 4400 мм/сек, що забезпечує швидке і точне переміщення деталей. Робот обладнаний потужним, простим і високопродуктивним контролером RC700A, який вважають прогресивним у сфері керування роботами на базі ПК.

Роботи SCARA T6 All-in-One і Synthis T3 і T використовують для збору і розміщення, збирання, обробки деталей і пакування як у автомобільній, машинобудівній галузі, так і в інших



галузях через автоматизацію промислових площадок без втрати часу на дорогі комплексні рішення. Роботи цієї марки обладнані вбудованим високопродуктивним контролером RC700A, новою технологічною функцією зниження вимог до простору і спрощене налаштування.

Внаслідок вказаних особливостей роботи EPSON застосовують для автоматизації лабораторних процесів. Серед яких серії моделей C3 із шістьма осями, G і RS. Роботи цих серій застосовують для пакування піпеток, закупорювання пробірок, обробки пробірок під час діагностування, аналізів крові, точного розподілу рідини для аналізу ДНК, тестування лікарських препаратів, контролю пробірок. Зокрема, для обробки карт крові робот EL653S SCARA, дозування рідини в чашки Петрі - E2L653S SCARA, та автоматизовані лабораторії RS3 SCARA, C3-A601SR, C3 і G1.

Крім цих моделей роботів компанії EPSON користується популярністю робот Flexion N2 із шістьма осями та складним кронштейном, який має високі вимоги до ефективного переміщення і точного розміщення для сумісної роботи з людьми. Він досконалий під час застосування у виробництві, де є потреба у невеликих роботах на робочих місцях. Таке ж застосування має робот EPSON WorkSense W-01 («Берті»), який є першим дворукиком роботом на колесах для дрібносерійного виробництва і автоматизації складних завдань у невеликих приміщеннях. Функції роботів EPSON WorkSense W-01 подані в таблиці 1 [5].

Табл. 1.

Функції роботів EPSON WorkSense W-01

Функція	Особливість
Зір	Наявність чотирьох «головних» камер, а також двох камер, встановлених у руки. Це забезпечує можливість з точністю визначити положення об'єктів, з якими працює, в тому числі під час зміни їх положення
Сенсорика	Руки робота мають у наявності високочутливі і високоточні датчики Epson. Робот-Берті здатен виконувати делікатне збирання, транспортування і інші завдання, які потребують контролю зусилля щоб уникнути пошкодження об'єктів. Універсальні руки, можуть захоплювати, затискати об'єкти різних форм і розмірів, входять у комплект поставки. Вони можуть маніпулювати інструментами і пристосуваннями, розробленими для людей
Логіка	Може точно визначити положення і орієнтацію об'єктів в тривимірному просторі, тому навіть якщо робот переміщений, він може відразу почати роботу без потреби зміни програмування. То б то Берті може гнучко адаптуватися до раптових змін виробництва. Робот самостійно визначає траєкторію руху своїх семи осьових рук
Виконання завдань	Два семиосьових маніпулятора робота рухаються як людські руки. Подвійні важелі переміщуються незалежно один від одного, що дозволяє роботу виконувати завдання, які одорукий робот не може виконати

Серед роботів, які випускає японська транснаціональна компанія YAMAHA роботи типу SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm), які дозволяють дуже швидко, повторювано і точно рухатися в горизонтальній площині. Їх конструкція заснована на двокомпонентному плечі, рух якого забезпечується поворотними шарнірами з вертикальною віссю обертання, і головці, оснащений призматичним шарніром, що забезпечує вертикальне переміщення. Всього 4 осі обертання.

Компанія YAMAHA займає світове лідерство у випуску промислових роботів з довжиною руки від 120 до 600 мм і діапазоном від 240 до 1200 мм. Серед яких SCARA Orbit, які завдяки центральній установці осі обертання останнього сегмента руки отримують доступ до будь-якої точки робочого поля. Ця технологія робить їх надзвичайно ефективними з точки зору необхідного виробничого простору. Залежно від моделі та довжини руки роботи SCARA випускають вантажопідйомністю до 50 кг, що дозволяє переміщувати і збирати великі компоненти.

Однак найважливішою особливістю роботів YAMAHA SCARA є їх універсальність. Це означає, що вони є рухомою основою, на якій користувач розміщує потрібні йому інструменти. Роботи SCARA широко застосовуються для точного свердління та загвинчування.

Найпростішим і ефективним рішенням використання у виробництві роботів YAMAHA є грейфери. Вони керуються тими ж контролерами, що й роботи, і повністю з ними сумісні. Що дозволяє у свою чергу дуже легке встановлення, експлуатацію та можливість роботи всієї виробничої лінії за однією програмою. Поза тим швидке складання надає майже нескінченний діапазон можливостей, завдяки використанню адаптерів для роботів, універсальних тримачів, які дозволяють монтувати і швидко змінювати інструменти на вибір користувача. Своєрідність роботів-грейферів є можливість працювати самостійно чи в групах у складі виробничої лінії. Крім цього вільно поєднувати ці пристрої у виробничі системи дозволяє керування одними контролерами та програмним забезпеченням усіх роботів YAMAHA. Програмне забезпечення роботів схоже на Excel і вирізняється простотою та інтуїтивною зрозумілістю і для його освоєння зазвичай потрібно не більше одного дня. Оскільки всі роботи YAMAHA повністю сумісні один із одним, то це дозволяє їм виконувати більш складні завдання, будувати нові лінії та модернізувати існуючі.

Враховуючи особливості конструкції роботи YAMAHA зазвичай використовуються для монтажу цілих пристроїв. Найчастіше для цього роботи SCARA оснащені головками, що піднімають вантаж за допомогою вакууму чи захвату, а також головками із заклепуваннями чи затягуванням гвинтів. Слід зазначити, що об'єкти, які потрібно переміщувати та складати, – це як дуже легкі так і важкі.

У роботів YAMAHA SCARA усунені практично всі вібрації, що виникають у результаті уповільнення моменту руху руки, через винятковість конструкції, адже вони не використовують приводні паси. Це дозволяє також досягти найкоротшого реального часу циклу та найвищої повторюваності. У зв'язку з цим широке застосування роботи SCARA отримали під час виробництва електроніки.

У цій галузі роботи типу YAMAHA SCARA використовувалися як елемент паяльно-дозуючих роботів REECO. Перші випуски яких задовольняють потреби промисловості в автоматизації процесу прецизійної пайки різьбових деталей, а також в усіх ситуаціях, за яких використання пайки хвилиною чи ручне паяння неефективне. При цьому головка робота SCARA оснащена паяльним жалом і автоподавачем сполучного матеріалу, а робот Reeco обладнаний дозувальною головкою, яка може працювати з різними типами клапанів. Це дозволяє точно наносити практично будь-яку речовину гелевої консистенції, зменшує витрати, усуваючи людські помилки, що зазвичай можуть бути результатом нанесення занадто великої кількості (витік, бруд, вартість самої речовини) чи невеликої дози речовини (знищення, необхідні виправлення, погіршення естетики). Робот може автоматизувати застосування таких речовин, як наприклад: силікони, клеї, мастила, фарби в місцях, де необхідна правильна доза та точний розподіл. Потенційне використання такого пристрою вийшло за рамки застосування в електронній промисловості і набуло поширення в харчовій та кондитерській для нанесення орнаментів і написів із пасти, глазури чи шоколаду.

Серед винятковостей роботів YAMAHA є можливість доповнення системами зору. Ця технологія дозволяє ще ширше використовувати роботи для таких операцій, як Pick&Place, які найчастіше виконуються за допомогою захватних головок або, як в електронній промисловості, вакуумних головок. Система зору здатна сама розпізнавати запрограмовану форму (наприклад, компонент), що значно прискорює процес калібрування та зменшує участь співробітників, підтримується тими самими контролерами та програмним забезпеченням, що й інші системи та роботи YAMAHA. Це зі свого боку дозволяє легко та швидко встановлювати і експлуатувати системи без додаткового навчання [6-7].

На сьогодні зварювальні роботи наявні у кожного великого виробника промислових роботів. Проте, PANASONIC є однією з найбільших японських машинобудівних корпорацій з виробництва оригінальних зварювальних роботів і універсальних маніпуляторів.

Роботи для дугового зварювання GIII TAWERS і Active GIII TAWERS з вбудованим інверторним імпульсним джерелом живлення на 350 А, підходить для зварювання MAG, MIG і TIG. Оптиміальні зварювальні процеси досягаються за рахунок застосування вбудованого в контролер робота інверторного джерела живлення, що забезпечує повну синергію в межах загальної системи керування. Серед особливостей модернізованої системи дугового зварювання є різноманітність активних сигналів. На відміну від вказаних роботів високопотужна система дугового зварювання TAWERS GIII має вбудоване інверторне імпульсне джерело живлення 500 А, первинне інверторне джерело живлення 100 кГц із вторинним керуванням комутацією.

Крім роботів для дугового зварювання PANASONIC випускає роботів LAPRISS для віддаленого лазерного зварювання. Вони складаються з лазерної трепануючої головки,

встановленої на роботі Panasonic з безшовним інтерфейсом між компонентами процесу та автоматизації.

Роботи маніпулятори PANASONIC характеризуються вантажопідйомністю від 80 до 220 кг, досяжністю до 2,66 м і оптимально доповнюють зварювальні роботи цього виробника, якщо потрібне переміщення заготовки між зварювальними позиціями.

Так робот GIII оснащений вбудованим контролером інверторного джерела живлення. Даний пристрій працює виключно з джерелами живлення Panasonic або зварювальними джерелами Miller. Цей робот має стандартні функції програмного забезпечення, що включають в себе переплетення, розміщення, відображення вугла, перекриття та повторну спробу запуску дуги. А також у ньому застосована технологія сервокерування Panasonic, управління лазерною трепануючою голівкою для створення декількох зварювальних малюнків і функцій променя, що робить лазерну голівку надзвичайно компактною і легкою.

Особливістю наступного робота PANASONIC HS-220GIII є максимальне корисне навантаження 220 кг, максимальна швидкість осі 120 %/с, обертаюче і згинання зап'ястя, величина зап'ястя 145, зкручування останнього 220, і маса 955 кг [8].

**Висновки.** Роботи змінюють структуру роботи промислового виробництва, підвищують продуктивність праці, якість продукції та точність її виготовлення. Найбільш часто ці автоматичні пристрої замінюють людей під час виконання небезпечних і монотонних операцій: зварювання, фарбування, паяння, пакування, різання, збирання, переміщення, компонування матеріалів і операцій з обробки зовнішнього вигляду продукції.

Порівняльний аналіз виробників промислових роботів EPSON, YAMAXA і PANASONIC підтверджує стале збільшення об'єму їх продажів завдяки універсальності, простоті експлуатації та збільшенню функціональності. Їх вибір здійснюється згідно характеру виконуваних операцій, виду виробництва, вантажопідйомності і інших технічних характеристик.

Найбільш затребуваним типом промислових роботів у EPSON є роботи-маніпулятори та SCARA-роботи (Selective Compliance Articulated Robot Arm), то б то роботизованої «руки». Завдяки забезпеченню ефективного застосування виробничих приміщень, саме у випадках, коли потрібно виконувати рух не по прямій, а в обхід перешкод або в обмеженому просторі. EPSON випускає більше 300 моделей цих роботів із корисним навантаженням до 20 кг для механічного чи електричного збирання, вибору і розміщення, комплектації і дозування невеликої ваги.

На відміну від попереднього виробника роботи YAMANA SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) дозволяють швидко, повторювано і точно рухатися в горизонтальній площині. Залежно від моделі та довжини руки роботи SCARA випускають вантажопідйомністю до 50 кг, що дозволяє переміщувати і збирати великі компоненти. До основних переваг роботів YAMANA SCARA слід віднести їх універсальність і відсутність практично всіх вібрацій, що виникають у результаті уповільнення моменту руху руки.

Світове лідерство промислових роботів японської машинобудівної корпорації PANASONIC забезпечується оригінальними зварювальними роботами і універсальними маніпуляторами. Серед яких роботи для дугового та віддаленого лазерного зварювання, а також роботи маніпулятори, що оптимально доповнюють зварювальні роботи цього виробника.

**Перспективи подальших досліджень.** Проектування систем автоматизації із застосуванням роботів EPSON, YAMAXA і PANASONIC.

#### **Інформаційні джерела:**

1. Федік Л. Ю., Гунько Ю. Л. Аналіз промислових роботів світових лідерів FANUC, YASKAWA, ABB, KUKA. Матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції з автоматичного управління присвяченої Дню ракетно-космічної галузі України: Збірник наукових праць / Під редакцією Г.В. Рудакової та ін. Херсон-Хмельницький: Видавництво ФОП Вишемирський В. С., 2024. С. 34-36

2. Промислові роботи. Їх види та використання. Режим доступу: <https://srobotics.ua/stati/promislovi-roboti-yikh-vidi-ta-vikoristannya/> (дата звернення 15.04.2024)

3. Історія розвитку робототехніки. Робототехніка: історія розвитку, ситуація в Україні. Режим доступу: <https://nanitrobot.com/history-robotics/> (дата звернення 15.04.2024)

4. 40 років забезпечення максимально ефективної роботи виробничої лінії. Роботизовані системи від Epson: точні, швидкі та надійні. Режим доступу: <https://www.epson.ua/uk-UA/robots> (дата звернення 15.04.2024)

- 
5. Забезпечте максимально ефективну роботу своєї виробничої лінії. Роботизовані системи від Epson: точні, швидкі та надійні. Режим доступу: <https://www.epson.ua/uk-UA/Продукти/Роботи/c/robot> (дата звернення 15.04.2024)
  6. Industrial robots. URL: <https://global.yamaha-motor.com/business/robot/> (дата звернення 15.04.2024)
  7. Yamaha Motor Co., Ltd.industrial robots. Режим доступу: <https://www.directindustry.com/product-manufacturer/yamaha-motor-co-ltd-industrial-robot-85494-2514.html> (дата звернення 15.04.2024)
  8. Welding Equipment & Robotics. Режим доступу: <https://na.panasonic.com/us/factory-equipment-solutions/welding-equipment-robotics/> (дата звернення 15.04.2024)

С.Л. Куцик, О.А. Мікуліч

Луцький національний технічний університет, кафедра прикладної математики та механіки

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ЕФЕКТИВНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ 3D-ДРУКУ

*В роботі представлено результати експериментальних досліджень зміни ефективних характеристик у елементах 3D друку за наявності геометричної неоднорідності та їх армування. Дослідження проведені у випадку стискувальних випробувань вздовж та впоперек орієнтації волокон. Для проведення досліджень використовувалися тестові зразки, виготовлені на 3D принтері з використанням PETG пластику. Встановлено, що дія стискувального навантаження у напрямку, перпендикулярному друку зразків, дозволяє збільшити пружні характеристики на 12%. На основі експериментальних досліджень вивчено ефективність використання армуючих елементів оптимізацію механічних та міцнісних характеристик деталей. Запропонований у роботі підхід дозволяє оптимізувати експлуатаційні характеристики деталей, виготовлених 3D друком.*

*Ключові слова:* Філамент, FDM-технологія, ефективні характеристики

S.L. Kutsyk, O.A. Mikulich

### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF EFFECTIVE CHARACTERISTICS CHANGING FOR 3D PRINTING ELEMENTS

*The paper presents the results of experimental research on the change of effective characteristics in 3D printing elements in the presence of geometric heterogeneity and their reinforcement. The study was carried out in the case of compression tests along and across the orientation of the fibers. Test samples made on a 3D printer using PETG plastic were used for the research. It was established that the action of the compressive load in the direction perpendicular to the printing of the samples increases the elastic characteristics by 12%. Based on experimental studies, the effectiveness of the use of reinforcing elements and the optimization of the mechanical and strength characteristics of the parts were studied. The approach proposed in the work allows the optimize the operational characteristics of parts manufactured by 3D printing.*

*Keywords:* Filament, FDM technology, effective characteristics

**Постановка проблем.** Використання адитивного виробництва, що є технологією пошарового автоматизованого створення тривимірних об'єктів, істотно зросло у сучасній інженерії. Застосування таких технологій сьогодні дозволяє значно розширити та продовжити експлуатаційні терміни багатьох машин, оскільки дає можливість швидкої заміни деталей без значних технологічних труднощів. В наш час 3D друк стає все більш поширеним та універсальним методом виробництва який зустрічається як в домашніх умовах, так і на виробництві та навчанні. Ця технологія характеризується ефективністю при виготовленні складних деталей за короткий проміжок часу без значних фінансових затрат, що дозволяє отримати різноманітні елементи: від невеликих деталей, таких як шестерні, дрібні запчастини, до будівництва будинків.

Проте, використання технологій 3D друку дає лише можливість отримати деталі, аналогічні за формою та розміром, але, не завжди, аналогічні за міцнісними характеристиками. Крім того, технологія друку істотно впливає на експлуатаційні характеристики відповідних деталей. Слід відмітити, що не у всіх випадках можливе натурне випробування деталей, отриманих 3D друком.

Тому, **метою дослідження** є експериментальне дослідження зміни ефективних характеристик матеріалів, отриманих 3D друком, за різних режимів навантажування.

**Огляд літературних джерел.** В роботах [1-4] було проаналізовано результати випробувань на розтяг, згин та стиск зразків з різною орієнтацією друку, швидкості, щільності заповнення, товщиною та було встановлено, що найбільшу міцність мають зразки зі стільниковою структурою. Крім того, експериментально підтверджено, що швидкість друку має значний вплив на якість зразка, при тому що такі характеристики, як: мікротвердість, модуль Юнга мало залежать від швидкості друку.

В [5], [6] представлені результати досліджень механічних властивостей зразків, які виготовлені з PETG пластику без включень і з армуванням. В даних роботах проаналізовано вплив армування на механічні властивості пластику його позитивний та негативний вплив на механічні характеристики деталі, а також потенційну можливість використання 3D технології для покращення властивостей матриці і її зв'язку з волокнами армування.

В роботі [7], [8] було проаналізовано вплив таких факторів, як додавання армуючих волокон, схема заповнення та швидкість випробування на розтяг та стиск. В результаті було встановлено, що механічні властивості композиту збільшують міцність зразків до 30%, у випадку коли напрям армуючих волокон збігається з напрямом друку. Також для вибору оптимального філаменту для друку матриці, було проаналізовано різні види пластику які могли бути застосовані для

випробувань, їхні механічні характеристики. Тому на основі [9], було зроблено висновок, що найкращим по механічним характеристикам та простоті друку буде PETG пластик. Ще одним важливим фактором при виборі параметрів друку були такі, як температура нагріву філаменту та стола. На основі [10], нами було вибрано встановити оптимальну температуру нагріву сопла – 240 °С та стола – 80 °С.

Одним з аспектів, якому нами було приділена велика увага, це вибір оптимального напрямку волокон при випробуванні дослідних зразків на стиск. На основі дослідження [11], було проаналізовано чисельне моделювання та поведінку пластику в залежності від осі стискання. Також був проведений аналіз впливу розміру, тобто вибору оптимального розміру досліджуваних зразків на його механічні характеристики. В роботі [12] було встановлено, що механічні властивості друківаних полімерів залежать від розміру, але не залежать від типу матеріалу і найбільший вплив «ефект розміру» має на згин та розтяг, а лише потім на стиск та модуль пружності. Однак чіткої загальної тенденції в цьому відношенні авторами не було встановлено.

В роботі [13] на основі аналітично-числових підходів досліджено вплив ефективних механічних характеристик на концентрацію напружень у пластинах з подвійно періодичною системою підкріплених отворів. На основі даних числового експерименту можна зробити висновок, що використання у перфорованих пластинках замкнутих підкріплювальних накладок на отворах дає можливість значно знизити концентрацію напружень на них та збільшити ефективні механічні характеристики такої композиції.

**Методика дослідження.** Для проведення дослідження, використовувався PETG пластик від «Monofilament». Цей вид філаменту характеризується хорошим поєднанням фізико-механічних характеристик і простоти 3D друку. Це робить його зручним матеріалом для 3D друку об'єктів за технологією FDM, які можуть піддаватися постійному або динамічному навантаженню. Його можна використовувати для виготовлення деталей машин, деталей 3D-принтера, захисних корпусів, деталей для автомобілів та багато іншого.

Механічні характеристики філаменту [14]: густина – 1,25 г/см<sup>3</sup>, температура експлуатації – 0...+70 °С, міцність на розтяг – 50 МПа, відносне видовження при розриві – 24%, модуль пружності при розтягу – 1920 МПа, модуль пружності при згині – 1980 МПа, міцність при згині – 76 МПа, твердість за Роквеллом – 104, водопоглинання – 3% (за 24 год. при 23 °С).

Друк зразків проводився на 3D-принтері «KLEMA 180» з наступними параметрами друку: швидкість друку – 50 мм/с; щільність заповнення – 90%; висота шару – 0,2 мм. Для дослідження зміни механічних та міцнісних характеристик друківаних виробів було виготовлено три групи досліджуваних зразків, які стискалися вздовж та поперек волокон.

Перша група зразків мала вигляд куба зі сторонами 20x20x20 мм. На рис. 1 представлено дослідні зразки, що стискалися вздовж та впоперек волокон (напрямок деформування показано стрілками). Випробування на стиск проводилося на дослідній машині МІ-40КУ з граничним навантаженням 40 кН при швидкості 2 мм/хв навантаженням, що відповідає випадку статичного навантаження. На основі діаграм стиску зразків, представлених на рис. 1, було вивчено ефективні механічні характеристики матеріалу, отриманого при 3D друці, в залежності від напрямку деформування.

Для вивчення впливу концентраторів напружень на зміну ефективних характеристик матеріалів, отриманих 3D друком, було досліджено другу (рис. 1 в, з) та третю (рис. 1 д, е) групи дослідних зразків, виготовлених у вигляді прямокутного паралелепіпеда, що послаблений системою чотирьох тунельних порожнин кругового перерізу, які друкувалися різним типом з наявністю і відсутністю підсилень отворів.

Для вивчення впливу концентраторів напружень та режимів експлуатації на ефективні характеристики та механічну поведінку відповідних елементів було проведено експериментальні дослідження на стиск відповідних дослідних зразків, що виготовлені шляхом 3D друку (рис. 1 в, д) з вільними отворами та у випадку наявності підсилень (рис. 1 з, е), та зазнають навантаження у напрямку, що відповідає напрямку друку (рис. 1 в, з) та перпендикулярний до нього (рис. 1 д, е). Для підсилення отворів дослідних зразків другої та третьої групи використовувалася алюмінієва трубка (рис. 2) діаметром 10 мм та товщиною стінки 1 мм. Трубка розміщувалася по всій довжині отвору.

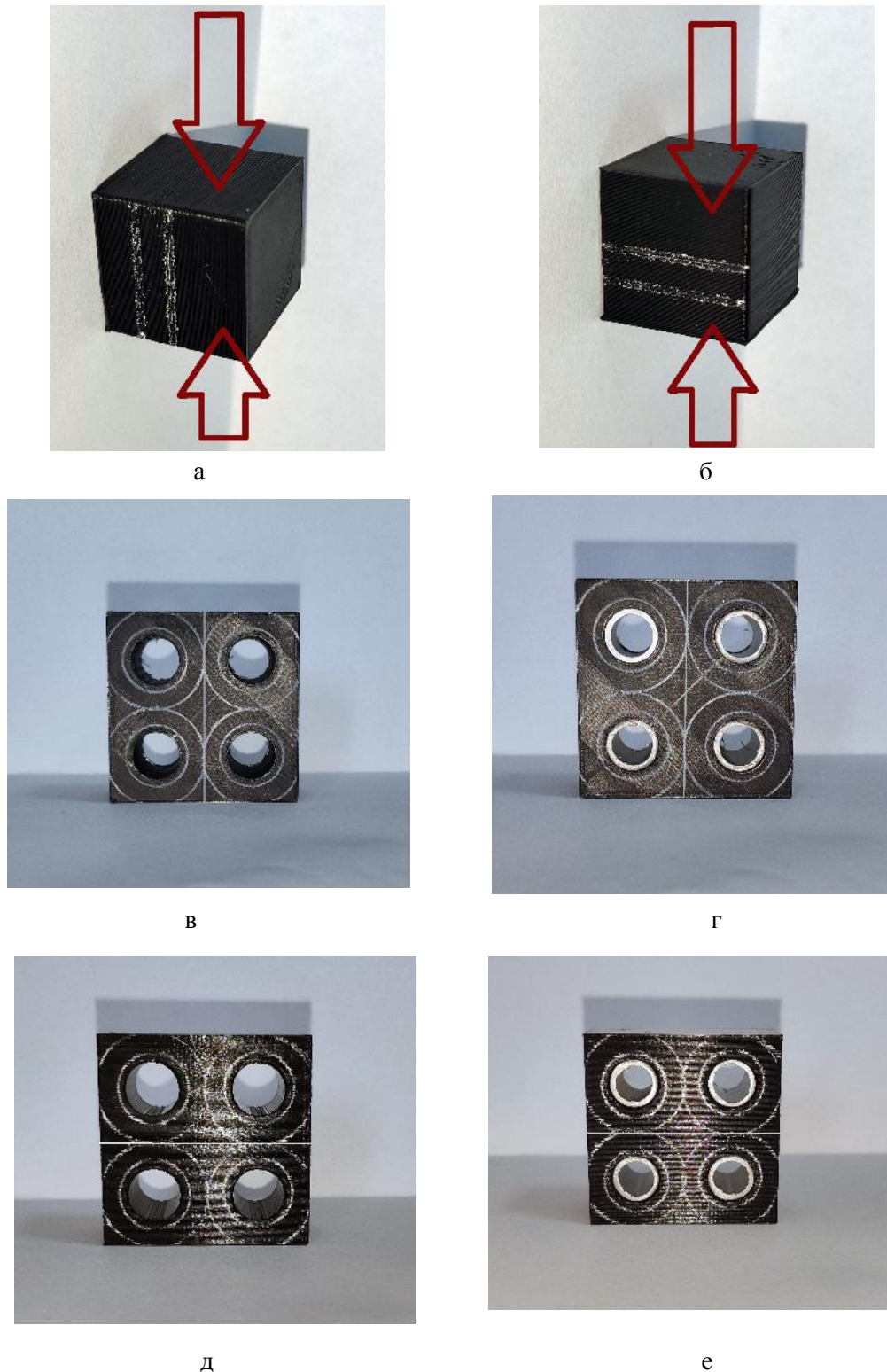


Рис. 1. Різні групи дослідних зразків

Для вивчення впливу концентраторів напружень та режимів експлуатації на ефективні характеристики та механічну поведінку відповідних елементів було проведено експериментальні дослідження на стиск відповідних дослідних зразків, що виготовлені шляхом 3D друку (рис. 1 в, д) з вільними отворами та у випадку наявності підсилень (рис. 1 г, е), та зазнають навантаження у напрямку, що відповідає напрямку друку (рис. 1 в, г) та перпендикулярний до нього (рис. 1 д, е). Для підсилення отворів дослідних зразків другої та третьої групи використовувалася алюмінієва трубка (рис. 2) діаметром 10 мм та товщиною стінки 1 мм. Трубка розміщувалася по всій довжині отвору.

Ефективні характеристики матеріалу: межа текучості, межа пропорційності, модуль Юнга розраховувалися за формулами [15], [16], [17]:

$$\sigma_T = \frac{P_T}{S_0}, \sigma_{II} = \frac{P_{II}}{S_0}, E = \frac{\Delta P}{\Delta l},$$

де  $P_T$  – навантаження, яке відповідає межі текучості;

$P_{II}$  – навантаження, яке відповідає межі пропорційності;

$S_0$  – площа поперечного перерізу зразка до випробування.

На основі проведених досліджень з діаграм навантажень зразків (рис. 3, 4) ми визначили модуль Юнга для зразка який стискався вздовж волокон  $E = 398$  МПа та поперек волокон  $E = 517$  МПа, межа текучості при цьому становила  $\sigma_T = 29$  МПа та  $\sigma_T = 42$  МПа відповідно.

Враховуючи, що відношення модуля Юнга вздовж та поперек волокон рівне 0,769 можна стверджувати, що матеріал проявляє істотну анізотропію механічних властивостей залежно від напрямку стискання. Тому актуальним є вивчення впливу напрямку прикладання зовнішнього навантаження на експлуатаційні властивості деталей.



Рис. 2. Алюмінієва трубка для армування зразків

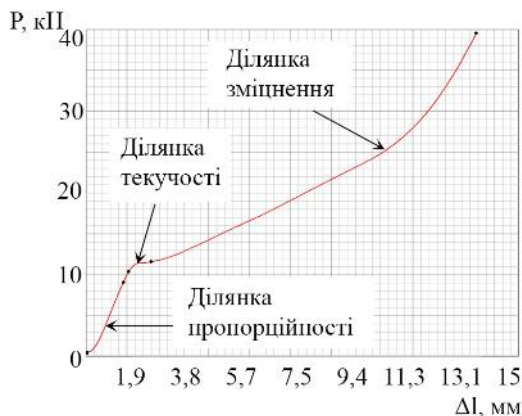


Рис. 3. Діаграма навантажень зразка першої групи, який стискався вздовж волокон

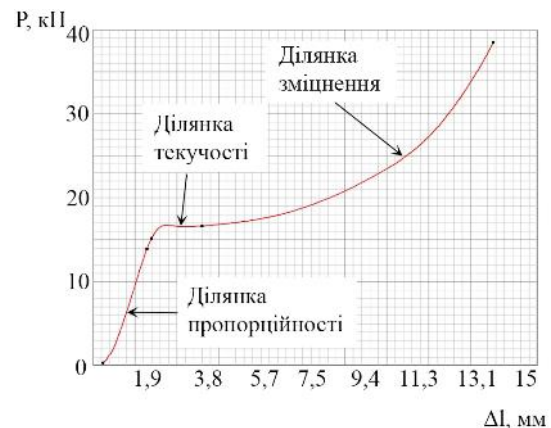


Рис. 4. Діаграма навантажень зразка першої групи, який стискався поперек волокон

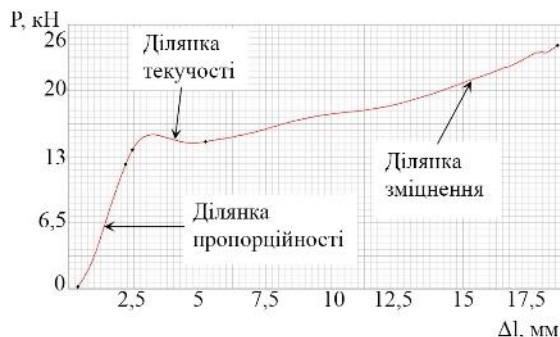


Рис. 5. Діаграма навантажень зразка другої групи з системою вільних отворів, який стискався вздовж волокон

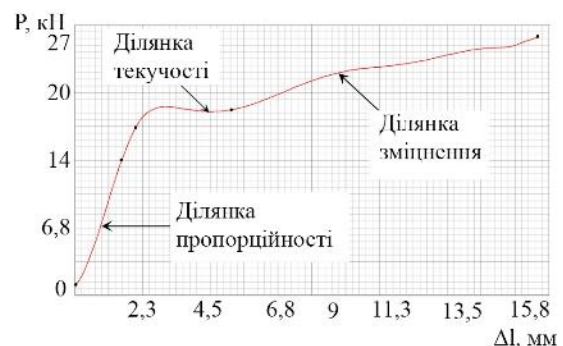


Рис. 6. Діаграма навантажень зразка другої групи з системою підкріплених отворів, який стискався вздовж волокон

На рис. 6, 7, 8, 9 зображені діаграми навантажень зразків другої та третьої групи, котрі стискалися поперек та вздовж волокон.



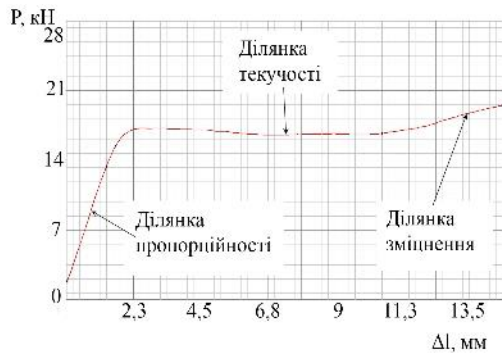


Рис. 7. Діаграма навантажень зразка третьої групи з системою вільних отворів, який стискався поперек волокон

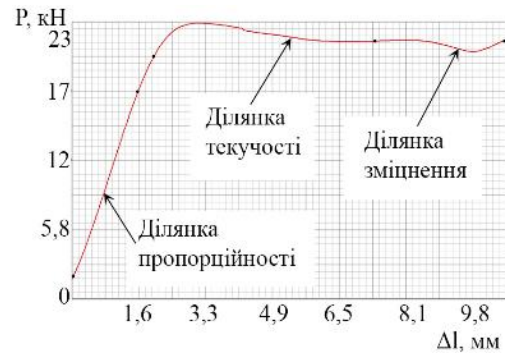


Рис. 8. Діаграма навантажень зразка третьої групи з системою підкріплених отворів, який стискався поперек волокон

На рис. 3-8 зображені діаграми стискання досліджуваних зразків: рис. 3, 4 – діаграми навантажень першої групи зразків, рис. 5, 6 – діаграми навантажень другої групи зразків, рис. 7, 8 – діаграми навантажень третьої групи зразків.

З отриманих діаграм навантажень, нами було розраховано ефективні міцнісні характеристики матеріалів: межу пропорційності та межу текучості для всіх груп зразків. Для першої групи зразків, які стискалися вздовж волокон ці значення становили – 25 та 29 МПа, та поперек волокон – 35 та 42 МПа відповідно. Для другої групи з вільними отворами вздовж волокон – 33, 36 МПа, для третьої групи з вільними отворами поперек волокон – 35 та 42 МПа. Для другої групи зразків з підкріпленими отворами – 37,5 і 46 МПа відповідно, та третьої групи з підкріпленням – 43 та 53 МПа.

**Результати досліджень.** Результати експериментальних випробовувань показують, що межа пропорційності зразків третьої групи, які стискалися поперек волокон з вільними отворами мають кращі механічні характеристики ніж ті, що стискалися вздовж волокон (зразки другої групи) на 6% і на 15% відповідно для підкріплених отворів поперек волокон (III група зразків), а ніж вздовж волокон (II група зразків). Межа текучості для зразків з вільними отворами поперек волокон (III групи) на 17% більша ніж для зразків вздовж волокон (II група) і відповідно з підкріпленими отворами на 15% зразки поперек волокон (III група) проявили кращі механічні характеристики.

У ході проведення експерименту (дослідження зразків другої групи з вільними і підкріпленими отворами) встановлено, що у випадку коли дія стискувального навантаження співпадає з напрямком друку зразка межа пропорційності на 12% є меншою, ніж для зразків, що піддаються стиску у напрямку, перпендикулярному напрямку друку зразків (III група). Крім того, межа текучості є більшою на 14% у випадку коли напрям друку зразка є перпендикулярним, (для зразків III групи) напрямку дії стискаючого навантаження.

На рис. 9-11 наведено вигляд дефектів, що утворилися у зразках під час випробувань.

Експериментальні дослідження показали, що під час руйнування за дії стискувального навантаження не у всіх випадках (рис. 6) на границі отворів утворитися тріщини (рис. 5, 7, 8) в наслідок концентрації напружень. Проте, слід відмітити, що в у випадку підсилення отвору (рис. 6) за дії навантаження вздовж волокон після випробування зразка тріщини на границі отворів не спостерігалися, що може свідчити про те, що армування позитивно впливає на механічні властивості зразка, що підтверджується отриманими результатами.

У випадку коли зразок стискався вздовж волокон з системою вільних отворів (рис. 5), то на зразку в процесі деформації утворилися тріщини (рис. 9). Також тріщини спостерігалися у випадку стискання зразка поперек волокон (рис. 7) з системою вільних отворів (рис. 10). Після проведеного випробування встановлено, що тріщини утворювались і росли не лише паралельно до напрямку волокон, а й перпендикулярно, розриваючи волокна, а також впоперек волокон для випадку деформування зразка з системою підкріплених отворів (рис. 8). Виявлений тип руйнування (рис. 11) міг виникнути через напрям розміщення волокон.

Під час експериментальних досліджень виявлено, що після деформування зразка можна помітити, що верхня права трубка, деформувалась лише на 30%, що викликало додаткове напруження на отвір який розміщувався під нею. У цьому випадку видно, що деформація трубки

значно більша ніж в отворах зліва, в сумі ці два фактори і спричинили утворення концентратора напружень – тріщини в даному зразку.

Підсумовуючи вищесказане можна зробити загальний висновок, що зразки котрі стискалися поперек волокон мають кращі механічні характеристики від зразків вздовж волокон.



*Рис. 9. Виявлена тріщина зразка другої групи з системою вільних отворів*



*Рис. 10. Виявлена тріщина зразка третьої групи з системою вільних отворів*



*Рис. 11. Виявлена тріщина зразка третьої групи з системою підкріплених отворів*

**Висновки.** Отримані у роботі результати експериментальних досліджень впливу орієнтації волокон та наявності армування дозволяють підібрати оптимальні режими експлуатації для деталей, виготовлених при 3D друку. Проведені дослідження дозволили дослідити зміну ефективних характеристик матеріалів, отриманих 3D друком, за різних напрямків дії стискувального навантаження. Експериментальні дослідження геометрично-неоднорідних тіл, що послаблені системою тунельних порожнин кругового перерізу з вільними та підкріпченими отворами, дозволило встановити ефективність використання армуючих елементів на оптимізацію механічних та міцнісних характеристик деталей.

#### **Список використаних джерел:**

1. T. Galeta, P. Raos, J. Stojšić, I. Pakši, Influence of Structure on Mechanical Properties of 3D Printed Objects, J. Procedia Engineering 149 (2016) pp. 100-104.
2. K. Durgashyam, M. Indra Reddy, A. Balakrishna, K. Satyanarayana, Experimental investigation on mechanical properties of PETG material processed by fused deposition modeling method, J. Materials Today: Proceedings 18 (6) (2019) pp. 2052-2059.
3. A. Saxena, A. K. Srivastava, P. K. Kushwaha, S. Sharma, An investigation on the influence of three-dimensional printing orientation on the tensile and flexural strength of polymer and plastic materials, J. Mechanics of Advanced Materials and Structures IF 2.8 (2024).
4. J. Loskot, D. Jezbera, R. Loskot, D. Bušovský, A. Barylski, K. Glowka, P. Duda, K. Aniołek, K. Voglová, M. Zubko, Influence of print speed on the microstructure, morphology, and mechanical properties of 3D-printed PETG products, J. Polymer Testing 123 (2023).
5. K. Szykiedans, W. Credo, D. Osiński, Selected Mechanical Properties of PETG 3-D Prints, J. Procedia Engineering 177 (2017) pp. 455-461.
6. S. H. Reza Sanei, Z. Lash, J. Servey, F. Gardone, C. P. Nikhare, Mechanical Properties of 3D Printed Fiber Reinforced Thermoplastic, ASME 2019 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (2019).
7. T. Fisher, J. Humberto S. Almeida Jr, B.G. Falzon and Z. Kazanci, Tension and Compression Properties of 3D-Printed Composites: Print Orientation and Strain Rate Effects, J. Polymers 15(7) (2023)
8. M. Batista, J. M. Lagomazzini, M. Ramirez-Peña and J. M. Vazquez-Martinez, Mechanical and Tribological Performance of Carbon Fiber-Reinforced PETG for FFF Applications, J. Appl. Sci. 13 (23) (2023).

9. J. Sedlak, Z. Joska, L. Hrbackova, E. Jurickova, D. Hrusecka, O. Horak, Determination of Mechanical Properties of Plastic Components Made by 3D Printing, *J. Manufacturing Technology* 22 (6) (2022) pp. 733-746.

10. F. J. O. Ribeiro, M. F. O. de Miranda, N. dos S. Saad, A. Z. Guarato, Experimental analysis on the mechanical properties of PETG parts made with fused deposition modeling manufacturing, Conference: 25th International Congress of Mechanical Engineering (2019)

11. J. M. Mercado-Colmenero, M. D. La Rubia, E. Mata-Garcia, M. Rodriguez-Santiago and C. Martin-Doñate, Experimental and Numerical Analysis for the Mechanical Characterization of PETG Polymers Manufactured with FDM Technology under Pure Uniaxial Compression Stress States for Architectural Applications, *J. Polymers (Basel)* 12 (10) (2020).

12. H. Sadaghian, B. Dadmand, M. Pourbaba, S. Jabbari and J. H. Yeon, The Effect of Size on the Mechanical Properties of 3D-Printed Polymers, *J. Sustainability* 16 (1) (2024).

13. Сулим Г., Пастернак Я., Куцик С. Концентрація напружень та ефективні механічні характеристики пластинок із подвійно періодичними системами підкріплених отворів. // Вісник ТНТУ. – 2012. – Том 67. – № 3. – С. 7–16.

14. <https://3ddevice.com.ua/>

15. [https://en.wikipedia.org/wiki/Young%27s\\_modulus](https://en.wikipedia.org/wiki/Young%27s_modulus)

16. <https://www.sciencedirect.com/topics/physics-and-astronomy/proportional-limit>

17. [https://en.wikipedia.org/wiki/Yield\\_\(engineering\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Yield_(engineering))

**Рецензент:** Делявський Михайло Володимирович, доктор технічних наук, професор

## 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](mailto: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 невіршених 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 лівє поле – 2 см, правє поле 2,5 см. Від краю до колонтитула верхнього – 1,25 см, нижнього – 1,25 см.
3. Шапка статті: індекс УДК, ініціали та прізвища авторів розміщується на один абзац нижче шрифтом 11 пт, назва організації – набираються з нового рядка шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по центру. Назва статті розміщується на один абзац нижче назви організації, набирається шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з напівжирним виділенням і вирівнюється по центру.
4. **Анотації** українською та англійською мовами набираються з абзацного відступу шрифтом Time New Roman Cyr розміром 9, курсив, напівжирний 300-500 друкованих знаків з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюються по ширині; англійською мовами розширена анотація 700-1000 друкованих знаків.
5. Нижче анотацій обов'язково вказуються ключові слова шрифтом Time New Roman Cyr, курсив, напівжирний 9 пт.
6. Основний текст розміщується на 1 см нижче анотацій, набирається з абзацного відступу 1 см шрифтом Time New Roman Cyr розміром 11 пт з одинарним міжрядковим інтервалом і вирівнюється по ширині.
7. Для набирання формул застосовувати редактор формул MS WORD (використовувати шрифти: Symbol, Time New Roman Cyr; розміри шрифтів: звичайний 12 пт, крупний індекс 7 пт, дрібний індекс 5 пт, крупний символ 18 пт, дрібний символ 12 пт). Формула вирівнюється по центру і не повинна займати більше 5/6 ширини рядка.
8. Якщо в статті присутні ілюстрації, необхідно розташовувати їх по тексту, вирівнюючи підписи (*Рис. 1. Схема ...*) по ширині з абзацного відступу 1 см. Другий екземпляр ілюстрації необхідно подати на окремому листі. Ілюстрації повинні бути чіткими та контрастними.
9. Таблиці розташовувати по тексту, причому їх ширина повинна бути на 1 см менша ширини рядка. Над таблицею поставити її порядковий номер (*Табл. 1*) вирівнюючи по правому краю, під яким розмістити назву таблиці вирівнюючи по центру.

10. Література подається загальним списком в кінці рукопису згідно з вимогами державного стандарту через 1 см від останнього рядка.
11. **Обов'язково** подати статтю. на лазерному диску. Статті можна також пересилати електронною поштою за такою адресою: **naukovi\_notatki@lutsk-ntu.com.ua**
12. До статті **обов'язково** додається **рецензія від** провідного вченого за науковим спрямуванням статті та **авторська довідка** у письмовому та електронному вигляді за вказаною формою:

**Прізвище, Ім'я, По-батькові**

**Місце роботи, посада, науковий ступінь, вчене звання**

**Наукові інтереси, ORCID**

**Назва статті та особисті підписи усіх авторів**

**Адреса для листування, телефон, e-mail, контактну особу**

14. В кінці статті обов'язково вказуються 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. Іванов<sup>1</sup>, П.П. Петров<sup>2</sup>***Луцький національний технічний університет<sup>1</sup>  
Тернопільський національний технічний університет<sup>2</sup>***НАБЛИЖЕНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ОСІ КОНОЇДА, ПРЕДСТАВЛЕНОГО ДИСКРЕТНИМ  
КАРКАСОМ ТВІРНИХ***Розроблено алгоритм наближеного визначення осі коноїда, представленого дискретним каркасом  
спільних твірних.**Ключові слова: вісь коноїда, дискретний каркас, твірна.***I. Ivanov, P. Petrov****AXIS APPROXIMATE DEFINITION OF CONOID DESCRIBED BY THE SET OF  
STRAIGHT LINES***The algorithm of axis approximate definition of conoid described by the set of straight lines is made. The approximate  
conoid axis is a line. Conoid is created by straight lines.**Keywords: conoid axis, discretely carcass of straight lines.***Постановка проблеми.** На коноїді, представленому дискретним каркасом.....**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Наскільки відомо автору з.....**Постановка завдань.** В роботі поставлено мету – розробити алгоритм.....**Викладення основного матеріалу.** Для наближеного визначення осі використовувалася така властивість коноїдів: усі твірні поверхні перетинають її вісь [1].

формула (1)

Рисунок

*Рис. 1. Назва рисунка**Табл. 1.***Назва таблиці****Висновки.** В статті розроблено алгоритм наближеного.....**Список використаних джерел:****ПБ, посада, науковий ступінь, вчене звання рецензентів статті.**

---

Ціна договірна

**Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки».**

Комп'ютерний набір та верстка: О.Д. Клименко

Наклад 300 прим.

**Веб-сайт збірника:**

**[http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi\\_notatky](http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/naukovi_notatky)**

**Довідки за e-mail: [naukovi\\_notatki@lutsk-ntu.com.ua](mailto:naukovi_notatki@lutsk-ntu.com.ua)**

Рекомендовано до друку Вченою радою Луцького національного технічного університету, протокол № 6 від 24 січня 2024 р.

Свідоцтво Державної реєстраційної служби України серія КВ, № 15901-4373ПР від 13.11.2019 р.

**ISSN: 24-15-39-66**

Відділ іміджу та промоції Луцького національного технічного університету  
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75

© Луцький національний технічний університет, 2024 р.