

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 75

Луцьк 2023

**Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки».**

**Включено до категорії Б Переліку наукових фахових видань України (відповідно до Порядку формування Переліку наукових фахових видань України, затвердженого наказом МОН України від 15 січня 2018 року № 32, зареєстрованого в Мін'юсті України 06 лютого 2018 року за № 148/21600) 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.**

DOI 10.36910/6775.24153966.2023.75

***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 № 12 від 30 червня 2023 р.

Свідоцтво Міністерства юстиції України про державну реєстрацію:  
Серія КВ №15901-4373ПР від 13.11.2009 р.

**ISSN: 24-15-39-66**

© Луцький національний технічний університет, 2023 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;

**Сомов Дмитро Олександрович** к.т.н., доц., доцент кафедри прикладної механіки 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;

**Савчук Петро Петрович** д.т.н., проф., п.н.с. НДЧ Луцького національного технічного університету;

**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;

**Пастернак Ярослав Михайлович** д.ф.-м.н., доц., завідувач 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

<i>Зміст</i> .....	5
<i>Р.Г. Редько, Р.А. Склярів, В.В. Шанайда</i> Порівняльно-правовий аналіз законодавства в області інтелектуальної власності в країнах ЄС та Україні.....	9
<i>Й.Й. Лучко, Б.З. Парнета, А.Я. Пенцак</i> Дослідження і посилення коротких консолей та вузлів спряження ригелів і колон серії ПС-04-2.....	15
<i>Б.О. Пальчевський, Л.М. Маркіна</i> Інтелектуальна система керування процесом приготування замісу і його водно-теплової обробки при виробництві спирту.....	22
<i>В.І. Лавріненко, Г.Д. Ільницька, В.В. Смоквіна, О.Б. Логінова, І.М. Зайцева, В.В. Тимошенко</i> Вплив об'ємних та поверхневих дефектів вихідних шліфпорошків алмазу марки АС6 на зміну їх фізико-механічних властивостей.....	27
<i>О. С. Безсмертний</i> Застосування стенду для дослідження робочих коліс відцентрового насоса створених методом 3D друку.....	32
<i>Н.О. Олійник, Г.Д. Ільницька, Г.А. Петасюк, Г.А. Базалій</i> Особливості фізико-механічних характеристик порошку алмазу марки АС20 зернистості 100/80 та продуктів його флотаційного розділення.....	36
<i>І.В. Кругляк, Б.П. Середа</i> Підвищення надійності зубчастих коліс натискного механізму блюмінгу.....	40
<i>А.О. Мартинович, П.О. Гуменюк</i> Моделювання транспортних потоків при дослідженні руху на керованих перехрестях.....	44
<i>В.І. Захарчук, О.В. Захарчук, В.В. Шваб'юк, В.В. Ярошук</i> Заходи щодо розширення використання газових палив в технологічних транспортних засобах.....	52
<i>О.П. Чигвінцева, І.В. Рула, Ю.В. Бойко</i> Дослідження термічних і трибологічних властивостей вуглепластика на основі фенілону С-2.....	57
<i>О.М. Пилипенко, Л.Г. Полонський, Я.А. Степчин, В.М. Ночвай, Д.О. Сомов, Дахнюк О.П.</i> Кінематика вібромеханічного шліфування покриттів.....	62
<i>В.С. Волкотруб, Л.О. Гуменюк</i> Автоматизація процесу виявлення тріщин на основі обробки зображень.....	67
<i>С.В. Луньов, П.Ф. Назарчук, О.В. Бурбан</i> Особливості тензоопору монокристалів N-GE при сильних одновісних тисках.....	74
<i>О. М. Рощенко</i> Інноваційні технології 3d друку у промисловості: загальний аспект.....	78
<i>А.В. Кузьмов</i> Дилатансійно чутлива модель пластичності пористих матеріалів отримана аналітичними методами мікромеханіки.....	85
<i>С.П. Шимчук, Н.П. Зайчук, М.С. Півницький, І.В. Орловський, Яцек Щот</i> Проблема імпортозаміщення матеріалів конструкційного призначення машинобудівними підприємствами України.....	92
<i>В.І. Шваб'юк, Т.В. Фурс, Н.В. Коменда, С.Б. Мікуліч</i> Інтегральні рівняння задачі дифракції хвиль у пружних середовищах з включеннями за дії нестационарних навантажень.....	95
<i>В.І. Лавріненко, Г.Д. Ільницька, В.В. Смоквіна, І.М. Зайцева, Г.А. Петасюк, Л.Й. Котинська, Д.Г. Міндіч</i> Домішки та включення в алмазних зернах, як фактор, який необхідно враховувати при застосуванні алмазних шліфпорошків в алмазному інструменті.....	99
<i>О.В. Іванюк</i> Утилізація червоного шламу в технології неорганічних пігментів: термодинамічні аспекти.....	105
<i>Р.В. Пузік, В.Ю. Кондусь, І.В. Павленко, А.С. Твердохліб</i> Аналіз перспектив зменшення енергоспоживання вільновихрових насосів для перекачування рідин з включеннями.....	113
<i>Н.Ю. Імбірович, О.І. Звірко, О.Ю. Повстяной, А. І. Дубіцкі</i> Особливості формування та морфології поверхні біо-покриттів, насичених природними кремністими сполуками.....	120
<i>А.М. Степанчук, С.Ю.Тесля, Сунь Ціхао, Д. Є. Чижська</i> Закономірності отримання порошків сплаву Al-15Fe з дисперсно зміцненою структурою методом механічного диспергування розплаву.....	126
<i>А.В. Мініцький, К.В. Поліщук, О.І. Юркова, Н.В. Мініцька, С.О. Наконечний</i> Вплив способу введення нікелевої звязки на структуру і властивості сплавів на основі вольфраму.....	134
<i>В.О. Лукашук, І.С. Кондіус, Л.Ю. Федік</i> Автоматизована система керування темпер-камерою під час технологічного процесу виробництва темного плиткового шоколаду.....	140

<b>І.В. Красіков, І.Є. Красікова, В.В. Картузов</b> Вплив розмиття зображення структури матеріалу на визначення її мультифрактальних характеристик.....	146
<b>Н.О. Олійник, Г.Д. Ільницька, Г.А. Петасюк, О.М. Сизоненко, Г.А. Базалій, С.Д. Заболотний</b> вплив імпульсного оброблення високовольтними електричними розрядами та флотаційного розділення на фізико-механічні та морфометричні характеристики порошків синтетичного алмазу марки АС20 зернистості 100/80.....	154
<b>Д. М. Квашук, І. Г. Бабічев</b> Похибка дискретного методу вимірювання кутових прискорень валів електродвигунів.....	158
<b>Ю.В. Трофімова, І.С. Кондіус, Л.Ю. Федік</b> Особливості проектування ліній зв'язку обчислювальних мереж об'єктів систем автоматизації.....	168
<b>В. М. Максимич</b> Ієрархічна гетероструктура, синтезована на основі напівпровідникової матриці селеніду індію і супрамолекулярного комплексу тіосечовина<дихлорид кобальту>: виготовлення та фізичні властивості.....	172
<b>С.А. Федосов, Д.А. Захарчук, О.В., Замуруєва, Ю.В. Коваль</b> Рівень Фермі в кристалах n-CdSb з глибокими енергетичними рівнями дефектів.....	180
<b>Н.В. Данилюк</b> Фотокаталітична деградація типових антибіотиків.....	186
<b>В.В. Наход, М.І. Скіпалький, П.В. Сахнюк, О.В. Замуруєва, С.А. Федосов</b> Моделювання процесів формування гетероструктур.....	193
<b>О. В. Верешко, Св.Св. Гомон</b> Напружено-деформований стан згинальних дерев'яних елементів в умовах впливу агресивного кислотного середовища з врахуванням повних діаграм деформування матеріалу.....	200
<b>Р.Я. Швець, Ф.О. Іващишин</b> Електропровідні властивості мультипошарового інтеркалату InSe<прополіс>.....	206
<b>З.С. Сірко, О.Ю. Цапко, І.О. Швачич, Н.О. Толстушко, М.М. Толстушко</b> Вогнезахист целюлозовмісних матеріалів.....	213
<b>О.В. Андрійчук, М.О. Щьоголев</b> Застосування методів підтримки прийняття рішень та обчислювальної лінгвістики для визначення рівня соціальної напруженості.....	217
<b>З.С. Сірко, Д.П. Торчишевський, В.М. Грицун, Н.О. Толстушко, М.М. Толстушко</b> Інструмент для шліфування профільних погонажних виробів із деревини та деревинних матеріалів.....	225
<b>З.С. Сірко, Д.П. Торчишевський, В.М. Грицун, Н.О. Толстушко, М.М. Толстушко</b> Механічні властивості сталі марки 7ХНМФБ для виготовлення дереворізальних пил.....	228
<b>О.Є. Андрейків, І.Я. Долінська, С.В. Настасяк</b> Моделювання росту систем тріщин у металевих пластинах за дії довготривалого розтягу і воденьвмісних середовищ.....	231
<b>А.В. Подворний, В.М. Трач</b> Вплив шаруватості на напружено-деформований стан анізотропних циліндричних оболонок під осьовим тиском в просторовій постановці.....	240
<b>О. А. Нестеров</b> Метод підвищення циклічної тріщиностійкості сталей морських портових конструкцій.....	246
<b>В.Г. Вербицький, А.Є. Бондаренко, Є.М. Місько, О.О. Разбойніков</b> До побудови математичної моделі просторових вертикальних коливань зчленованого автопотяга.....	251
<b>О.О. Чайка</b> Визначення параметрів стрічки льону в процесі її підбирання.....	257

## CONTENTS

<b>Contents</b> .....	7
<b>R. Redko, R. Sklyarov, V. Shanaida</b> Comparative legal analysis of legislation in the branch of intellectual property in EU countries and Ukraine.....	9
<b>J. Luchko, B. Parneta, A. Pentsak</b> Research and strengthening of short consoles and connection nodes of beams and columns series IIS-04-02.....	15
<b>B. Palchevskiy, L. Markina</b> Intelligent system for controlling the process of batch preparation and its water-heat treatment in the production of alcohol.....	22
<b>V.I. Lavrinenko, H.D. Ilnytska, V.V. Smokvyna, O.B. Loginova, I.M. Zaitseva, V.V. Tymoshenko</b> Influence of volumetric and surface defects of the initial grinding powders of diamond grade AC6 on the change in their physical and mechanical properties .....	28
<b>O. S. Bezsmertnyi</b> Application of the stand for investigation of centrifugal pump impellers created by 3D printing method.....	32
<b>N.O. Oliinyk, G.D. Ilnytska, G.A. Petasyuk, G.A. Bazaliy</b> Features of the physical and mechanical characteristics of diamond powder, AC20 brand, grain 100/80, and the products of its flotation separation.....	36
<b>I.V. Kruglyak, B.P. Sereda</b> The reliability of the gears of the pressure blooming mechanism.....	40
<b>A. Martynovych, P. Humeniuk</b> Modeling of traffic flows in the study of traffic at controlled intersections.....	44
<b>V. Zakharchuk, O. Zakharchuk, V. Shvabyuk, V. Yaroshchuk</b> Measures to expand the use of gas fuels in technological vehicles.....	52
<b>O.P. Chigvintseva, I.V. Rula, Ju.V. Boyko</b> Research of thermal and tribological properties carbon plastic based on phenylone C-2.....	57
<b>O. Pilipenko, L. Polonsky, Ya. Stepchin, V. Nochvay, D. Somov, O. Dakhnyuk</b> Kinematics of vibro-mechanical grinding of coatings.....	62
<b>V. Volkotrub, L. Gumeniuk</b> Automation of the crack detection process based on image processing...	67
<b>S.V. Luniov, P.F. Nazarchuk, O.V. Burban</b> Peculiarities of the tensoresistance of N-GE single crystals at the strong uniaxial pressures.....	74
<b>O. Roschenko</b> Innovative 3D printing technologies in industry: general aspect.....	78
<b>A. Kuzmov</b> Micromechanics based dilatancy-sensitive plasticity model of porous materials in closed-form analytical solutions.....	85
<b>Shymchuk S.P., Zaichuk N.P., Pivnytskyi M.S., Orlovskiy I.V., Jacek Shchot</b> The problem of import substitution of materials for construction purposes by machine-building enterprises of Ukraine.....	92
<b>V.I. Shvabyuk, T.V. Furs, N.V. Komenda, S.B. Mikulich</b> Integral equations of wave diffraction problem in elastic media with inclusions under the action of non-stationary load.....	95
<b>V.I. Lavrinenko, H.D. Ilnytska, V.V. Smokvyna, I.M. Zaitseva, H.A. Petasiuk, L.Yo. Kotynska, D.H. Mindich</b> Impurities and inclusions in diamond grains as a factor to be considered when using diamond grinding powders in diamond tool.....	99
<b>E.V. Ivanyuk</b> Utilization of red sludge in technology of inorganic pigments: thermodynamic aspects.....	105
<b>R. Puzik, V. Kondus, I. Pavlenko, A. Tverdokhlib</b> Analysis of the prospects for reducing energy consumption of torque flow pumps for pumping liquids with inclusions.....	113
<b>N.Yu. Imbirovych, O.I. Zvirko, O.Yu. Povstianoi, A.Dubicki</b> Features of the formation and surface morphology of biocoatings saturated with natural silicon compounds.....	120
<b>A.N. Stepanchuk, S.Y. Teslia, Qihao Sun, D. Ye. Chyzhska</b> The process of obtaining Al-15fe powder with dispersion strengthened microstructure by centrifugal atomization.....	126
<b>A.V. Minitskiy, K.V. Polyshchuk, O. I. Yurkova, N.V. Minitska, S.O. Nakonechnyi</b> Influence of the method of nickel bonding on the structure and properties of tungsten-based alloys.....	134
<b>V.O. Lukashuk, I.S. Condius, L.Y. Fedik</b> Automated control system of the temperature chamber during the technological process of the production of dark bar chocolate.....	140
<b>I.V. Krasikov, I.E. Krasikova, V.V. Kartuzov</b> The effect of image blurring on the determination of its multifractal characteristics in material structures.....	146
<b>N.O. Oliinyk, H.D. Ilnytska, G.A. Petasyuk, O.N. Sizonenko, G.A. Bazaliy, S.D. Zabolotnyi</b> Influence of impulse processing with high-voltage electrical discharges and flotation separation on the physical-mechanical and morphometric characteristics of AS20 brand synthetic diamond powder with granularity 100/80.....	154

<b>D. Kvashuk, I. Babichev</b> Methodological error of discrete methods of measuring constant angular accelerations of electric motors shaftsю.....	158
<b>Yu.V. Trofimova, I.S. Kondius, L.Y. Fedik</b> Features of computer network communication line design automation system objects.....	168
<b>V. M. Maksymych</b> Hierarchical heterostructure synthesized on the basis of an indium selenide semiconductor matrix and supramolecular complex thiourea<cobalt(II) chloride>: fabrication and physical properties.....	172
<b>S. Fedosov, D. Zakharchuk, O. Zamurujeva, Yu. Koval</b> Fermi level in <i>n</i> -CdSb crystals with defect deep energy levels.....	180
<b>N.V. Danyliuk</b> Photocatalytic degradation of some typical antibiotics.....	186
<b>V. Nakhod, M. Skipalskiy, P. Sakhniuk, O. Zamurujeva, S. Fedosov</b> Modeling of processes forming heterostructures.....	193
<b>O. V. Vereshko, S.S. Homon</b> The stressed and deformed state of bending wooden elements under influence of an aggressive acid environment taking into account complete diagrams of the deformation material.....	200
<b>R. Ya. Shvets, F.O. Ivashchyshyn</b> Electrical properties of multilayer intercalate InSe<propolis>.....	206
<b>Z.S. Sirko, O.Y. Tsapko, I.O. Shvachych, N.O. Tolstushko, M.M. Tolstushko</b> Fire protection of cellulose-containing materials.....	213
<b>O.V. Andriichuk, M.O. Shchoholiev</b> Application of decision-making and computational linguistic methods for overall estimation of the level of social tension.....	217
<b>Z.S. Sirko, D.P. Torchylevskiy, V.M. Hrytsun, N.O. Tolstushko, M.M. Tolstushko</b> A tool for grinding profiled wood products and wood materials.....	225
<b>Z.S. Sirko, D.P. Torchylevskiy, V.M. Hrytsun, N.O. Tolstushko, M.M. Tolstushko</b> Mechanical properties of steel grade 7XHMФБ for manufacturing wood cutting saws.....	228
<b>O.Ye. Andreykiv, I.Ya. Dolinska, S.V. Nastasyak</b> Simulation of the growth of crack systems in metal plates under the action of long-term stretching and hydrogen-containing environments.....	231
<b>A.V. Podvornyi, V.M. Trach</b> Influence of layering on the stress-strain state of anisotropic cylindrical shells under axial pressure in a spatial formation.....	240
<b>O. A. Nesterov</b> A method of increasing cyclic crack resistance of steel of marine port structures.....	246
<b>V.G. Verbytskyi, A.E. Bondarenko, E.M. Misko, O.O. Razboinikov</b> To the construction of a mathematical model of spatial vertical oscillations of an articulated train.....	251
<b>O.O. Chaika</b> Determination of linen ribbon parameters in the process of its selection.....	257

УДК: 608.1/3 (075.347.77)

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.1

**Р.Г. Редько<sup>1</sup>, Р.А. Склярів<sup>2</sup>, В.В. Шанайда<sup>2</sup>***Луцький національний технічний університет<sup>1</sup>**Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя<sup>2</sup>***ПОРІВНЯЛЬНО-ПРАВОВИЙ АНАЛІЗ ЗАКОНОДАВСТВА В ОБЛАСТІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ В КРАЇНАХ ЄС ТА УКРАЇНІ**

*У матеріалах статті розглянуті основні напрями розвитку сучасного законодавства окремих країн Європи в сфері інтелектуальної власності (ІВ). Розглянуто та проаналізовано різноманітні шляхи адаптації законодавства різних країн Європи щодо інтелектуальної власності до вимог законодавства європейського союзу. Авторами встановлено, що законодавства ряду країн європейського союзу в питаннях захисту ІВ зберегли національні особливості попри загальну адаптацію до єдиного європейського законодавства у сфері патентування та єдиної європейської патентної системи. Визначено необхідність впровадження в Українське законодавство спеціального Кодексу законів про інтелектуальну власність, який би дозволив гармонізувати національне законодавство України у сфері ІВ до Директив та законів ЄС.*

*Ключові слова: інтелектуальна власність, кодифікація, Європейський союз, Кодекс законів про інтелектуальну власність.*

**R. Redko, R. Sklyarov, V. Shanaida****COMPARATIVE LEGAL ANALYSIS OF LEGISLATION IN THE BRANCH OF INTELLECTUAL PROPERTY IN EU COUNTRIES AND UKRAINE**

*The materials of the article consider the main directions of the development of modern legislation of individual European countries in the branch of intellectual property (IP). Various ways of adapting the legislation of different European countries regarding intellectual property to the requirements of the legislation of the European Union have been considered and analyzed. The authors investigated that the legislation of several European Union countries, in matters of IP protection, preserved national peculiarities during general adaptation to the unified European legislation in the branch of patenting and the unified European patent system. We research the need to introduce into Ukrainian legislation a special Code of Laws on Intellectual Property, which would allow harmonizing the national legislation of Ukraine in the branch of IP with EU Directives and laws, was determined.*

*Key words: intellectual property, codification, European Union, Code of laws on intellectual property.*

**Постановка проблеми.** Широке використання інтернет-технологій та їх впровадження у повсякденне життя, застосування сучасних матеріалів, розробка перспективних конструкцій механізмів, машин та технологій, постійне вдосконалення комп'ютерної техніки сприяє швидкій індустріалізації світу. На фоні невідмінної інформатизації суспільства зростає роль інтелектуальної власності (ІВ) як предмету правових відносин, а також вдосконалення законодавчої бази відповідно до тенденцій, які склалися в світі за останні роки. Інтелектуальна власність стає рушієм розвитку сучасного інформаційного суспільства, сприяє активізації трансферу технологій та ліцензійної діяльності, дозволяє сформувати глобальний ринок прав на об'єкти ІВ та забезпечує ріст інноваційної активності по всьому світі.

Україна є незалежною державою з високим інтелектуальним потенціалом. Завдяки розвитку правової бази з ІВ відбувається залучення інвестицій в економіку нашої країни. Суттєві фінансові впливання ведуть до макроекономічного зростання, що можливо лише за умови функціонування такої законодавчої бази в середині країни, яка не суперечитиме міжнародному законодавству в галузі інтелектуальної власності [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Переважна більшість нормативно-правових актів, що стосуються ІВ, та регулюють відносини у даній сфері, були прийняті на початку 90-х років ХХ століття. Україна впровадила власне законодавство після розпаду Радянського Союзу, створюючи національну систему інтелектуальної власності. Прийняті в ті роки закони та нормативно-правові акти відповідали потребам того часу.

Після підписання 16 вересня 2014 р Угоди про асоціацію України з ЄС ситуація дещо змінилася, національне законодавство у сфері ІВ потребує оновлення. Ця проблема активно дискутується в колах наукової та юридичної спільноти. Питаннями систематизації та кодифікації норм ІВ займалися такі вчені та науковці як О. Підпригора [2], О. Святоцький [3], В. Дроб'язко та О. Орлюк [4], Р. Стефанчук [5], М. Потоцький [6], Р. Шишка [7], В. Крижна [8] та інші. В своїх

працях вони піднімають питання стосовно систематизації законодавства сфери ІВ, а також реформування існуючої системи правової охорони в Україні. Існуюче законодавство України у сфері ІВ часто є суперечливим, багато законодавчих положень часто дублюються [9].

На фоні європейського поступу України ми спостерігаємо процес глибинного реформування вітчизняного законодавства у сфері ІВ, свідченням чого є здійснені в останні роки реформи в системі управління державними інституціями. Так Україна почала процес гармонізації свого законодавства із загальноєвропейським, що є однією із умов для набуття членства в Європейському Союзі (ЄС) [10].

В 2020 році в Україні було прийнято ряд законодавчих актів, які забезпечили правову базу для проведення інституційної реформи в державній системі охорони ІВ [11, 12]. Створено Національний орган інтелектуальної власності (НОІВ), державну організацію, яка займається питаннями правової охорони інтелектуальної власності в Україні. Згідно закону встановлено спеціальну юридичну конструкцію, яка передбачає, що НОІВ є статусом, а не юридичною особою. Це означає, що усі основні функції НОІВ виконує юридична особа публічного права (організація), яка не є органом влади і яка за майновою ознакою належить державі. Згідно чинного законодавства Міністерство розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України (Мінекономіки) є центральним органом виконавчої влади, який займається формуванням та здійснює реалізацію державної політики у сфері ІВ [6].

Продовженням реформи стало створення Українського національного офісу інтелектуальної власності та інновацій (УКРНОІВІ), розпорядження про це було прийняте КМУ 28 жовтня 2022 року за № 943-р. УКРНОІВІ визначено суб'єктом, що виконує функції НОІВ.

Наступним логічним кроком є вдосконалення та гармонізація законодавства у сфері прав ІВ, а тому вивчення досвіду країн ЄС у цьому напрямку набуває актуальності та потребує детального аналізу та дослідження.

**Постановка завдань.** Оновлення нормативно-правової бази щодо захисту прав інтелектуальної власності в країнах Європи носить системний характер. Аналіз цього законодавчого процесу викликає певний інтерес, а досвід переформатування принципів права щодо інтелектуальної власності може бути корисним для реорганізації, модифікації та вдосконалення чинного законодавства України в напрямі права інтелектуальної власності.

**Викладення основного матеріалу.** Щорічно в ЄС публікують велику кількість різноманітних нормативно-правових актів, частина з яких стосується законодавства в галузі інтелектуальної власності. Характерною ознакою законодавства ЄС є толерантне ставлення до розвитку норм національного права ІВ членів асоціації [13]. Вони мають право самостійно визначати свою політику, але при цьому дотримуватися загальноприйнятих директив та міжнародних угод, які ратифіковані на національному рівні.

В період з 1973 по 1975 роки були прийняті Європейська патентна конвенція [14] та Конвенція про європейський патент для спільного ринку (Конвенція про патент співтовариства) [15]. Остання в 1985 році була перейменована в Угоду про патент Співтовариства. Ці нормативні акти дозволили здійснити в європейських країнах своєрідну правову уніфікацію [16]. На їх основі було створено єдине європейське законодавство у сфері патентування та єдину європейську патентну систему. Пізніше національними відомствами країн були ухвалені нові патентні закони або розроблені на основі Європейської патентної конвенції нові редакції таких законів [17].

**Італія.** Конституція Італії передбачає видання виконавчою владою законів-декретів, які становлять більше половини чинного законодавства про інтелектуальну власність [18]. Так, зокрема, норми права стосовно промислової власності викладені в Кодексі промислової власності (Codice della proprietà industriale) [18], а авторського та суміжного права - Законом про авторське право №633/19411 [19]. Кодекс промислової власності є комплексним документом, в якому викладені законодавчі ініціативи, що регулюють питання цивільно-правового та адміністративно-правового регулювання сфери ІВ. В ньому детально розглянуті процедурні питання стосовно набуття права промислової власності, а також особливості діяльності патентних повірених. Також велика увага приділяється функціонуванню Відомства з патентів і торговельних марок.

**Португалія.** В Португалії, як і в Італії, діяльність державних інституцій в області промислової власності регулюється відповідним Кодексом (Código da propriedade industrial) [20], а авторського та суміжних прав - теж Кодексом (Código do direito de autor e dos direitos conexos)

[21]. В останній редакції Кодексу промислової власності Португалії об'єднані законодавчі норми, що однозначно регулюють правову охорону об'єктів промислової власності (винаходів, корисних моделей, промислових зразків) та засобів їх комерціалізації (торговельних марок, фірмових найменувань та емблем, найменувань походження та географічних зазначень). Окремі розділи цього Кодексу стосуються набуття та захисту прав на об'єкти промислової власності, а також окремих адміністративних процедур, які з цим пов'язані.

**Франція.** Певний дослідницький інтерес викликає Кодекс інтелектуальної власності Франції (Code de la Propriété Industrielle), який був прийнятий в 1992 році [22]. Фахівці вважають його кращою формою систематизації норм права в галузі ІВ. Даний документ містить дві частини – законодавчу та регламентну. Законодавча частина вводиться в дію законом, а регламентна – декретом. Така структура дозволяє позбутися дублювання норм права та уникнути певних суперечностей у законодавстві [5, 23,]. Деякі спеціалісти в галузі права вважали, що дане законодавство слід взяти за основу для країн ЄС. Оскільки в Європейських країнах порівняно мала кількість норм, які є загальними для всіх видів результатів інтелектуальної діяльності, то даний Кодекс не був прийнятий за основу спільного законодавства [24]. В 2005 році у Франції схвалено Регламентацію права на інтелектуальну власність, в якій прописано процедуру отримання охоронного документу (патенту) для всіх об'єктів промислової власності, а також поданий механізм отримання примусових ліцензій [25].

**Польща.** Вхідження Республіки Польща (РП) до структур Європейського Союзу спричинило зміну національного законодавства в області ІВ. Національні правові акти було приведено у відповідність до стандартів ЄС. Так в липні 2020 року в РП розпочалась реформа цивільного судочинства, де було започатковане окреме провадження у справах про ІВ.

Суттєвих змін зазнав Закон «Право промислової власності» (projekt ustawy Prawo własności przemysłowej) [26], в якому кількість статей зросла майже в два рази (зі 327 до 498). Зміни, внесені до даного Закону, спрямовані на прискорення процедури отримання правової охорони на об'єкти промислової власності, а також гармонізацію чинного законодавства до діючих норм ЄС та інших міжнародних норм у галузі ІВ [27].

**Бельгія.** В законодавстві Бельгії питанням ІВ присвячена 11 книга Кодексу економічного права (Code de droit économique) [28]. В ньому на законодавчому рівні висвітлені питання захисту основних об'єктів інтелектуальної власності (патенти, торговельні марки, майнові права на сорти рослин, авторське та суміжні права). Зокрема слід відзначити, що окремими розділами виділені такі об'єкти правової охорони як комп'ютерні програми, бази даних, топографії та напівпровідники. В Кодексі висвітлені законодавчі норми стосовно правозастосування законодавства до об'єктів ІВ.

Країни Балтії, а саме Латвія, Литва та Естонія пішли по шляху гармонізації своїх національних законодавств в області ІВ, які були сформовані після розпаду Радянського Союзу, у відповідності до директив ЄС. Цей процес відбувався з врахуванням національних позицій і їх законодавство в галузі ІВ має певні національні особливості [29].

**Латвія.** Закон про патенти в Латвії було оновлено у 2007 році шляхом його приведення у відповідність до директив ЄС. Згідно нового законодавства автор може подавати міжнародні заявки на патент відповідно до правил ЄС. При цьому він набуває немайнові права, які передбачають визнання його винахідником патенту, а також він має право відмовитися від права власності на патент [30]. Багато статей даного закону присвячені питанням комерціалізації, а саме можливості продажу об'єктів ІВ та передачі прав авторства, якщо такий об'єкт виконаний за договором.

**Литва.** Законодавство Литви в області ІВ було транспоноване через Директиви 2004/48/ЄС щодо забезпечення прав інтелектуальної власності («Директива щодо забезпечення дотримання») через первинне законодавство. В національне законодавство були внесені зміни, які дозволили гармонізувати основні правові норми. Такі зміни торкнулися Закону Литви про авторське право та суміжні права, Закону про патенти, Закону про товарні знаки, Закону про зразки, Закону про правову охорону топографії напівпровідникової продукції та Закону про правову охорону сортів рослин. При цьому в Литві були прийняті більш суворі заходи стосовно порушень в галузі ІВ, ніж це було прописано в Директиві про забезпечення виконання [31].

**Естонія.** За підтримки ЄС в Естонії в рамках національної програми «Розвиток кращого законодавства» в 2015 році було розроблено Кодекс інтелектуальної власності (Code of Civil Procedure) [32]. Його основні положення гармонізовані із законодавством ЄС згідно Директиви



2004/48/ЕС. Основні зміни в законодавстві Естонії стосувались примусового виконання законодавства при порушенні прав власників охоронних документів [33].

**Німеччина.** Законодавство Німеччини в області ІВ було розроблене задовго до того, як Німеччина стала членом Європейського Союзу. Після вступу країни в асоціацію закони були змінені та доповнені для їх сумісності з правилами ЄС щодо захисту інтелектуальної власності. В Німеччині, на відміну від інших Європейських країн, не створювали спеціальний Кодекс. Законодавці віддали перевагу введенню правил для різних типів прав інтелектуальної власності в окремих законах. На сьогоднішній день на території Німеччини правочинними є наступні нормативні документи: Закон про авторське право (UrhG), Закон про патенти (PatG), Закон про торговельні марки (MarkenG), Закон про корисну модель (GebrMG), Закон про зразки (GeschMG), Закон проти недобросовісної конкуренції (UWG) [34].

**Австрія.** Право ІВ в Австрії регламентується Патентним законом (das Österreichische Patentgesetz), Законом про правовий захист зразків (Musterschutzgesetz), Законом про охорону торгових знаків (Markenschutzgesetz) та Законом про авторські права (Urheberrechtsgesetz). Всі ці закони були повністю адаптовані до законодавства ЄС. Також в Австрії крім основного законодавства, яке безпосередньо пов'язане з ІВ, діє ряд спеціальних законів та кодексів, які забезпечують виконавчі провадження на виконання законів про інтелектуальну власність [35].

**Великобританія.** Законодавча система Великобританії для захисту прав стосовно об'єктів ІВ використовує єдиний консолідований закон про авторське право, промислові зразки і патенти (Copyright, Designs and Patents Act, 1988) [36]. Цей закон зазнав всебічної критики [37], але він є ефективним і залишається одним з основних в сфері ІВ Великобританії.

Також в англосаксонській системі права велику роль відіграє взаємодія норм закону з прецедентом. Судові прецеденти мають часте застосування на практиці, вони дають тлумачення законодавчих норм та додатково врегульовують питання у сфері промислової власності. Найбільш вагомими серед них є: Справа Sabaf проти MFI; Campbell проти MGN Limited; Regina проти Johnston та інші [38].

Слід зазначити, що після виходу Великобританії зі складу ЄС відбувається процес поступового оновлення їх законодавства у відповідності до національних та міжнародних норм [39].

На Європейському рівні в останні роки все частіше піднімається питання про розробку єдиного Європейського кодексу права інтелектуальної власності [5]. Він би міг допомогти виробити єдині підходи до регламентації права ІВ в країнах членах асоціації, а його створення дозволило б сформулювати єдиний набір правил на основі кращих положень з національних правопорядків та забезпечити ефективний захист прав інтелектуальної власності.

**Висновки.** Вважаємо, що Україні слід піти по шляху європейських партнерів, прийняти єдиний кодифікований законодавчий акт, а саме Кодекс законів про інтелектуальну власність, який би враховував вимоги Директиви 2004/48/ЕС щодо забезпечення прав інтелектуальної власності. Це дозволило б уніфікувати та об'єднати норми права стосовно захисту прав ІВ, позбутися невиправданого дублювання деяких законодавчих норм та підготувати національне законодавство до норм ЄС.

#### Список використаних джерел:

1. Playda Nemlioglu. A Comparative Analysis of Intellectual Property Rights: A case of Developed versus Developing Countries, *Procedia Computer Science*. 2019. Vol. 158, pp. 988-998. DOI: 10.1016/j.procs.2019.09.140
2. Підпригора О. А. Чи потрібний Україні Кодекс про інтелектуальну власність? / О. А. Підпригора // Унів. наук. зап. – 2005. – № 1–2 (13). – С. 75–79.
3. Право інтелектуальної власності : академічний курс: Підручник для студ. вищих навч. закл. / О. А. Підпригора [та ін.] ; ред. О. А. Підпригора, О. Д. Святоцький ; Акад. прав. наук України, Науково-дослід. ін-т інтелект. власності. - 2.вид., перероб. та доп. - К. : Видавничий дім "ІнЮре", 2004. - 670 с.
4. Правове забезпечення сфери інтелектуальної власності в Україні в контексті Європейської інтеграції: концептуальні засади : монографія / [В. С. Дроб'язко та ін. ; за наук. ред. О. П. Орлюк] ; Нац. акад. прав. наук України, НДІ інтелект. власності. - К. : Лазурит-Поліграф, 2010. – 464 с.



5. Стефанчук Р. О. До питання про кодифікацію законодавства у сфері інтелектуальної власності. *Право України*. № 11/2016. С. 86–91.
6. Потоцький М. Національний орган інтелектуальної власності: правовий статус та функції [Електронний ресурс] / Микола Потоцький. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.hsa.org.ua/blog/natsionalnyj-organ-intelektualnoyi-vlasnosti-pravovuj-status-ta-funktsiyi>.
7. Шишка Р. Б. Кодифікація законодавства у сфері інтелектуальної власності: за та проти. *Вісник Запорізького національного університету. Юридичні науки*. 2013. № 3. С. 83-87.
8. Крижна В. Варіанти кодифікації законодавства у сфері інтелектуальної власності. *Теорія і практика інтелектуальної власності*. 2010. № 1. 110-115.
9. Микола Потоцький. Кодифікація законодавства України про інтелектуальну власність : матеріальний та процесуальний аспекти. *Теорія і практика інтелектуальної власності*. 2021. № 6. С. 5–16.
10. Folliard-Monguiral A., Rogers D. The Community Trade Mark and Designs System and the Enlargement of European Union // *European Intellectual Property Review*. — 2004. — V.26. — Issue 2.
11. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо створення національного органу інтелектуальної власності» від 16.06.2020 № 703-IX [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/703-20#Text>
12. Закон України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України (щодо реформи патентного законодавства)» від 21.07.2020 № 816-IX. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/816-20#Text>
13. Tritton G. et al. *Intellectual Property in Europe*. 3;d edn. — London: Sweet & Maxwell, 2007.
14. Friedrich - Karl Beier, *The European Patent System*, 14. *Vanderbilt Law Review* 1 (2021). Режим доступу: <https://scholarship.law.vanderbilt.edu/vjtl/vol14/iss1/1>
15. Бабич Ж.В. Європейський патент як дієвий інструмент захисту прав промислової власності в ЄС. *Молодий вчений*. 2015. № 7 (22). Частина 2. С. 16-20.
16. Орлюк О. П., Андрощук Г. О., Горнісевич А. М., Федорова Т. Ю. Законодавство Європейського Союзу та держав-членів Європейського Союзу у сфері інтелектуальної власності : науково-практичне видання / за заг. ред. О. П. Орлюк. Київ : НДІ ІВ НАПрНУ, Лазурит-Поліграф, 2010. 262 с.
17. Капіца Ю. Єдиний європейський патент і нові можливості патентування в Європейському Союзі. *Теорія і практика інтелектуальної власності*. 2016. № 2. С. 17-27.
18. CODICE DELLA PROPRIETÀ INDUSTRIALE (DECRETO LEGISLATIVO 10 FEBBRAIO 2005, N. 30, AGGIORNATA CON LE MODIFICHE INTRODOLTE DAL LEGGE 29 LUGLIO 2021, N. 108) Режим доступу до ресурсу: <https://www.wipo.int/wipolex/en/text/585924>
19. LEGGE 22 APRILE 1941, N. 633 SULLA PROTEZIONE DEL DIRITTO D'AUTORE E DI ALTRI DIRITTI CONNESSI AL SUO ESERCIZIO (AGGIORNATA CON LE MODIFICHE INTRODOLTE DAL LEGGE 21 SETTEMBRE 2022, N. 142). Режим доступу до ресурсу: <https://www.wipo.int/wipolex/en/text/585941>
20. CÓDIGO DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL (APROVADO PELO DECRETO-LEI N.º 110/2018 DE 10 DE DEZEMBRO DE 2018 E ALTERADO PELO DECRETO-LEI N.º 9/2021 DE 29 DE JANEIRO DE 2021) Режим доступу до ресурсу: <https://www.wipo.int/wipolex/en/text/584980>
21. CÓDIGO DO DIREITO DE AUTOR E DOS DIREITOS CONEXOS (APROVADO PELO DECRETO-LEI N.º 63/85 DE 14 DE MARÇO DE 1985, E ALTERADO ATÉ AO DECRETO-LEI N.º 9/2021 DE 29 DE JANEIRO DE 2021) Режим доступу до ресурсу: <https://www.wipo.int/wipolex/en/text/583948>
22. Еннан Р. Є. Кодифікація у сфері інтелектуальної власності в ЄС: досвід Франції / Еннан Р // *Юриспруденція сьогодні: між апологією і креативністю*. Пам'яті проф. Ю.М. Оборотова : (до 75-річчя від дня народж. д. ю. н., проф. Ю. М. Оборотова): матер. Міжнар. наук.-практ. конф. (Одеса, 17 верес. 2021 р. / Нац. ун-т «Одеська юрид. академія»; за заг. ред. А. Ф. Крижановського. – Одеса : Фенікс, 2021. – С. 219–223.
23. FRANCE. CODE DE LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE (VERSION CONSOLIDÉE AU 30 JUIN 2022). Режим доступу до ресурсу: <https://www.wipo.int/wipolex/en/legislation/details/21533>
24. Taylor R. Against an Integrated Intellectual Property Code: A Response to «Reforming Intellectual Property Law: An Obvious and Not;so;Obvious Agenda» // *Intellectual Property Quarterly*. — 2009. — Issue 3. — P. 281–287.

25. Зінич Любомир. Особливості правового регулювання використання винаходів за законодавством Франції. Національний юридичний журнал. 2015. С. 136–138.
26. Projekt ustawy – Prawo własności przemysłowej. Режим доступу до ресурсу: <https://legislacja.rcl.gov.pl/docs//2/12359055/12874004/12874005/dokument552321.pdf>
27. Directive 98/71/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 1998 on the legal protection of designs. Режим доступу до ресурсу: [https://euipo.europa.eu/tunnel-web/secure/webdav/guest/document\\_library/contentPdfs/law\\_and\\_practice/cdr\\_legal\\_basis/EUR-Lex%20-%2031998L0071\\_en.htm](https://euipo.europa.eu/tunnel-web/secure/webdav/guest/document_library/contentPdfs/law_and_practice/cdr_legal_basis/EUR-Lex%20-%2031998L0071_en.htm)
28. CODE DE DROIT ÉCONOMIQUE (MIS À JOUR LE 21 AVRIL 2022). Режим доступу: <https://www.wipo.int/wipolex/en/text/584987>
29. Janušauskaitė, Kristina. “Aspects of Enforcement of IP Rights in the Baltic Countries in View of the Implementation of the EU Enforcement Directive.” Implementation of the EU Enforcement Directive in the Baltic Countries: Experience in View of the Development of Protection of Intellectual Property Rights, 1st ed., Nomos Verlagsgesellschaft mbH, 2010, pp. 83–226. JSTOR, <http://www.jstor.org/stable/j.ctv941sj9.8>.
30. Aleksei Kelli, Age Vārv, Tõnis Mets, Vadim Mantrov, Ramūnas Birštonas, Carri Ginter. "Different regulatory models of transfer of industrial property rights in the Baltic States: A plea for harmonized approach". International Comparative Jurisprudence 1:8-17. <https://www.ceeol.com/search/article-detail?id=599871>
31. Kviėtkus, Ž., & Beldeninoviene, J. (2019). Enforcement of Intellectual Property Rights in Lithuania. In F. Petillion (Ed.), Enforcement of Intellectual Property Rights in the EU Member States (pp. 757-786). Intersentia. doi:10.1017/9781780687827.020
32. CODE OF CIVIL PROCEDURE (CONSOLIDATED TEXT OF JANUARY 7, 2017). Режим доступу: <https://www.wipo.int/wipolex/en/text/432542>
33. Jents, L., & Kärson, M. (2019). Enforcement of Intellectual Property Rights in Estonia. In F. Petillion (Ed.), Enforcement of Intellectual Property Rights in the EU Member States (pp. 339-370). Intersentia. doi:10.1017/9781780687827.011
34. Hoppe, D. (2019). Enforcement of Intellectual Property Rights in Germany. In F. Petillion (Ed.), Enforcement of Intellectual Property Rights in the EU Member States (pp. 435-522). Intersentia. doi:10.1017/9781780687827.014
35. Wegrostek, M. (2019). Enforcement of Intellectual Property Rights in Austria. In F. Petillion (Ed.), Enforcement of Intellectual Property Rights in the EU Member States (pp. 49-92). Intersentia. doi:10.1017/9781780687827.004
36. COPYRIGHT, DESIGNS AND PATENTS ACT 1988 (CHAPTER 48, UPDATED ON JUNE 14, 2021) Режим доступу: <https://www.wipo.int/wipolex/en/text/583537>
37. Бочарова Н. В. Законодавче забезпечення права інтелектуальної власності в країнах Європи. Порівняльно-правові дослідження. 2009. № 2. С. 118–123.
38. Эннан Р. Е. Правовая охрана изобретений в зарубежных странах. Актуальные проблемы держави і права: зб. наук. праць. Одеса: Юридична література, 2012. Вип. 66. С. 239–247.
39. UNITED KINGDOM. THE INTELLECTUAL PROPERTY (EXHAUSTION OF RIGHTS) (EU EXIT) REGULATIONS 2019 (S.I. 2019/265). Режим доступу до ресурсу: <https://www.wipo.int/wipolex/en/text/579998>

**Рецензент:** Повстяной Олександр Юрійович. д.т.н., професор ЛНТУ

Й.Й. Лучко<sup>1</sup>, Б.З. Парнета<sup>2</sup>, А.Я. Пенцак<sup>2</sup>

*Львівський національний університет природокористування<sup>1</sup>  
Національний університет «Львівська політехніка»<sup>2</sup>*

## ДОСЛІДЖЕННЯ І ПОСИЛЕННЯ КОРОТКИХ КОНСОЛЕЙ ТА ВУЗЛІВ СПРЯЖЕННЯ РИГЕЛІВ І КОЛОН СЕРІЇ І І С-04-2.

*У даній роботі представлено результати дослідження міцності вузлів спряження зовнішніх стінових панелей і колон та ригелів і колон серії ІІС-04-02, яка використана при зведенні корпусу біологічного факультету Ужгородського державного університету у м. Ужгороді. У роботі описано основні відомості про будівлю, проектування і її будівництво. Виконано перевірочний розрахунок опорного столика підсилення консолей колон і опорних ніш панелей. На основі натурного обстеження і перевірочних розрахунків були розроблені відповідні рекомендації для підсилення вузлів спряження ригелів і колон.*

*Ключові слова:* колони, консоли, спряження вузлів, підсилення, обстеження.

**J. Luchko, B. Parneta, A. Pentsak**

## RESEARCH AND STRENGTHENING OF SHORT CONSOLES AND CONNECTION NODES OF BEAMS AND COLUMNS SERIES IIS-04-02

*This paper presents the study results of the strength of the joints for external wall panels and columns and crossbars and columns of the IIS-04-02 series, which was used in the construction of the building of the Faculty of Biology of the Uzhgorod State University in the city of Uzhhorod. The paper describes basic information about the building, its design and construction. The main reasons that require research and development of recommendations for panels and columns junctions strengthening and crossbars and columns strengthening and their short consoles. Also, the data on identified design errors, shortcomings and defects in the construction and manufacture and transportation of reinforced concrete structures are given.*

*The verification calculation of the support table of the reinforcement of the column consoles and the support niches of the panels was performed. On the basis of a field survey and relevant calculations, appropriate recommendations were developed for strengthening the joints of crossbars and columns.*

*Key words:* columns, consoles, conjugation of nodes, reinforcement, examination.

**Вступ. Проблема та актуальність.** На сьогоднішній день сучасні будівлі і споруди відіграють найважливішу роль суспільства будь-якої країни і суттєво впливають на життя людей. Кількість і якість сучасних зведених будівель і споруд є об'єктивним показником розвитку економіки цивілізованих держав, її науки, культури, виробництва та добробуту народу. Кожна будівля і споруда повинна відповідати певним експлуатаційним властивостям, які повинні зберігатися протягом всього терміну служби, завдяки технічно-правильній експлуатації. Важливість цієї проблеми пов'язана насамперед із технічним станом будівель і споруд та інженерних систем, які здебільшого були зведені у 70 – 90 роках і сьогодні перебувають у переважно задовільному технічному стані. Однак, частина із них внаслідок фізичного зношення стали непридатними, а в окремих випадках, потенційно небезпечними для подальшої їх експлуатації. Також наявність достатньо значної кількості будівель і споруд, будівництво яких було зупинено у 80-х роках, зокрема, з причин фінансування та зміни виробничих технологій, ставить на перший план проблему дослідження їх залишкового ресурсу несучої здатності їх конструкцій та можливого їх перепрофілювання. Особливого занепокоєння викликає технічний стан великопанельних житлових будинків, в яких закінчується проектний термін експлуатації за останні 25 – 30 років і відбулося їх прискорене фізичне і моральне старіння. Також потрібно звернути особливу увагу на одну із найважливіших проблем – житловій. Зокрема, із 10,4 млн. будівель житлового фонду країни, 4,7 тис. – аварійних, а 36 тис. віднесено до категорії старих, не придатних для подальшої експлуатації і кожна третя будівля потребує капітального або поточного ремонту. Тому дослідження і посилення залізобетонних конструкцій корпусу УжНУ які наведені в даній роботі та спостереження за ними протягом 40 років є актуальними і заслуговують на опублікування.

Для покращення технічного стану будівель і споруд було розроблено і прийнято державними органами України відповідні постанови. Зокрема, відповідно до ст. 11 Закону України Про архітектурну діяльність (687-14) та постанови Кабінету Міністрів України від 11 липня 2007 року №903 затверджено порядок здійснення технічного нагляду під час будівництва об'єкта

архітектури. Ці постанови значно вплинули на якість будівництва та дотримання правильної експлуатації будівель і споруд тривалої експлуатації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Кожна будівля і споруда повинна відповідати певним експлуатаційним характеристикам, які мають зберігатися протягом всього терміну експлуатації. Основою надійності і довговічності експлуатації будівлі і споруд є попередження фізичного зношення, а також усунення дефектів і пошкоджень, які виникають при експлуатації, що досягається застосуванням системи обстежень та планово запобіжними ремонтами. Критичний аналіз науково-технічних джерел [1-6] дає підставу стверджувати, що в останні три десятиріччя сформувався і дістав розвиток науковий напрямок досліджень конструкцій будівель і споруд тривалої експлуатації, які зазнають агресивної дії повітряного ґрунтового і водного середовищ та на підставі досліджень із застосуванням сучасних технологій і матеріалів.

Розглянемо деякі із них: у роботах [1,2] описано технічну експлуатацію і реконструкцію та основи організації технічної експлуатації. Зокрема, у роботі [1] викладено основи організації технічної експлуатації будівель і споруд, розглянуто питання реконструкції міської забудови і найбільш доцільні рішення щодо реконструкції. Також описана модернізація будівель із врахуванням їх об'ємно-планувальних рішень та конструктивних особливостей і технічного стану. Наведено рекомендації з ремонту та підсилення конструктивних елементів з використанням сучасних матеріалів і технологій. А у роботі [2] викладено основи організації технічної експлуатації будівель та інженерних споруд. Наведено перспективи та особливості технічної експлуатації та доцільність рішень по її організації.

У роботі [3] ґрунтовно висвітлені питання обстеження, реконструкція будівель та споруд і посилення їх конструктивних елементів. Розглянуто практичні підходи до реконструкції, та забудови різного призначення, що враховують реальний технічний стан, а також при необхідності результати техніко-економічної доцільності переорієнтації (перепрофілювання).

Зокрема, у роботі [4] на підставі результатів технічного обстеження виробничих і цивільних об'єктів узагальнено характерні ознаки і властивості деградації залізобетонних конструкцій. У ході обстеження виявлені значні пошкодження і дефекти, які пов'язані із тривалою експлуатацією у повітряному середовищі помилки, недоліки і дефекти, які були допущені при проектуванні і зведенні вказаних об'єктів. Це залізобетонні конструкції обертових печей цементного заводу у м. Миколаєві, та корозійне руйнування естакади придністровської ГЕС і руйнування конструкцій заводу «Три бетони» у м. Стрий, руйнування конструкцій паркінгу гірськолижного курорту «Буковель» та руйнування залізобетонних конструкцій басейну готелю «Прикарпаття» у м. Трускавець і на багатьох об'єктах (більше 40), на яких автори досліджували деградацію залізобетонних конструкцій. На основі цих досліджень були встановлені основні помилки, допущені на стадії проектування, дефекти і недоліки будівництва та недоліки тривалої експлуатації будівель і споруд. Також запропоновано сучасні технології і матеріали для ремонтно-відновлюваних робіт.

У роботі [5] наведено результати роботи мостів, які були збудовані в Україні після повеней 1998 – 2001 рр. та тривалої експлуатації. Розглянуто реальні ситуації на прикладах залізобетонного балкового мосту через р. Тиса у м. Хуст, монолітного рамно-консольного побудованого у 2000 р., попередньо зруйнованого під час повені в 1998 р. Наведено фрагмент карти проїзної частини цього мосту, на якій показано дефекти – тріщини, які з'явилися менш ніж через 2 роки експлуатації. Також обстеженнями встановлено великий розкид міцності бетону при зведенні проїзної частини мосту і виявлено, що між деякими прогонами нема проектного зазору між торцями балок, що може суттєво вплинути на напружено-деформований стан конструкцій.

Було також обстежено шість сталезалізобетонних мостів, побудованих після повені 1998 р. у Кобелецькій та Косівській полянах із різних (11,8 і 23,6 м) прогонів. На рисунках показано влаштування проїзної частини мостів у період будівництва та їх випробування на статичні і динамічні навантаження. Потрібно зазначити, що в цих сталезалізобетонних мостів, збудованих у 2000 р., кращий стан ніж у згаданих раніше, але і у них зафіксовано тріщини.

Якщо наведені приклади свідчать про неякісне виконання робіт у період будівництва мостів, то в елементах конструкцій мостів тривалої експлуатації маємо природну деградацію фізико-механічних властивостей матеріалу. Ці дані підтверджуються на прикладі обстеження шляхопроводу в м. Мукачево, який експлуатується 30 років. Представлено схему зниження ресурсу споруди (мосту). Отже, в цій роботі встановлені помилки проектування, дефекти і

недоліки будівництва залізобетонних (сталезалізобетонних) мостів і шляхопроводів тривалої експлуатації.

У роботі [6] на основі виконаних натурних досліджень сформульовано проблеми деградації бетонних і залізобетонних конструкцій будівель і споруд тривалої експлуатації та відзначено її актуальність. Проаналізовано авторами низку робіт із вказаної проблеми. Зокрема, описано результати технічної діагностики багатьох будівель і споруд, як новозбудованих так і тривалої експлуатації. Відзначено необхідність періодичного проведення технічної діагностики для виявлення помилок на стадії проектування, дефектів та недоліків будівництва та недоліків експлуатації будівель і споруд. Також, використовуючи сучасні технології та матеріали, автори визначили переваги застосування їх для ремонтно-відновлювальних робіт бетонних і залізобетонних конструкцій на ряді об'єктів тривалої експлуатації.

**Мета.** Метою роботи є на основі аналізу науково-технічних джерел та натурних досліджень розробити рекомендації з підсилення вузлів спряження коротких консолей колон та усунення виявлених дефектів і пошкоджень для забезпечення несучої здатності залізобетонних конструкцій на сейсмічне навантаження 7 балів.

### **Виклад основного матеріалу дослідження та аналіз.**

**1. Загальні відомості.** Обстеження та дослідження і посилення коротких консолей колон серії ПС-04-2 по недобудованому об'єкту біологічного факультету Ужгородського національного університету. Згідно програми досліджень, необхідно виконати обстеження коротких консолей колон серії ПС-04-2 будівлі, яка зводиться для біологічного факультету Ужгородського державного університету у м. Ужгороді. Конструктивне рішення серії ПС-04-2 було введено у дію 31.07.1980 р. відповідним наказом міністерства. Проект біологічного факультету Ужгородського державного університету виконано Українським філіалом проектного інституту ДПРОВУЗ СРСР у 1989 р. Конструктивна схема каркасу прийнята з кроком колон 6х6 м і додатковим кроком 3х6 м. Колони із жорстким кріпленням ригелів та плитами перекриття утворюють жорстку систему для сприйняття вертикальних і горизонтальних навантажень. Проект розроблено для застосування у районах із сейсмічністю у 7 балів. На час обстеження велись загальнобудівельні роботи, закінчувався монтаж колон, ригелів і плит перекриття і почався монтаж стінових панелей в осях 3–1С.

Основними причинами, які спонукали необхідність дослідження і посилення були такі: відсутність вихідного контролю за якістю конструкцій що поставляється на будівельний майданчик; слабкий контроль ВТК і заводської лабораторії за виготовленням залізобетонних виробів; неточність оснастки для виготовлення колон і зовнішніх стінових панелей (збільшення їх власної ваги); порушення технології будівництва і перевищення допусків і відхилень вимогам норм, понизили несучу здатність (жорсткість) корпусу і стійкості будівлі у цілому. У зв'язку з цим, потрібно було дати рекомендації з посилення вузлів спряження коротких консолей колон.

**2. Натурні дослідження.** Натурними обстеженнями було встановлено наступне: закладні деталі на колонах у місцях установки ригелів, встановлені в основному по проекту. Однак, у деяких колонах втоплені у бетон і мають невеликі відхилення від проектного положення; у результаті недосконалої форм для виготовлення колон серії ПС-04-2 у деяких із них при виготовленні (розпалубці) утворюються волосяні тріщини між короткими консолями і колонами, а також раковини, сколи консолей. Ремонт на заводі цих деталей неефективний; при обстеженні колон на споруджуваному об'єкті виявлено, що частина коротких консолей (кулачків) пошкоджені у процесі транспортування і складування на будівельному майданчику; перед монтажем зовнішніх стінових панелей не укладено цементний розчин М100 згідно проекту; неякісно виконано замонолічування стиків колон-ригелів (раковини, сколи, не вібрований бетон); на ригелях у деяких місцях відсутні хомути передбачені проектом; має місце відхилення колон від вертикалі, суміжні колони у різних площинах, а також відмітки суміжних колон неоднакові (різниця 30–40 мм); коливання розмірів між осями колон, у деяких місцях вище норми (до 50–60 мм); до 25% завищено власну вагу зовнішніх стінових панелей і простінків; проектом непередбачені у середніх колонах закладні деталі МК-16, МК-17, МК-12, МК-15. У цих місцях проходить виступ арматури діаметром 30 мм,  $l=150-180$  мм, недосконала конструкція армування вузла консолей колони (серію зняли з виробництва). Об'єкт виконується цієї серії, як завершення другої черги.

**3. Перевірочний розрахунок опорного столика і консолей колони.** Збір навантаження розміри і схема армування консолей і колони наведено в роботі [7], бетон класу С20 (В25), арматура класу (А400С) А-III.



**Розв'язок.** Напруження зминання у місцях прикладання навантаження не повинні перевищувати межу міцності  $f_{ck}=14,5\text{МПа}$ . Виходячи з цієї умови визначаємо мінімальний виліт консолі  $l_{\text{min}}^{\text{TK}}$ :

$$l_{\text{min}}^{\text{TK}} = Q / (b f_{ck} \gamma_{b2}) = 78140 / (40 \cdot 14,5 \cdot (100) \cdot 0,9) = 1,5\text{см},$$

де:  $Q$  – максимальна розрахункова реакція від панелі;  $b$  – ширина площадки опирання панелі на консоль;  $\gamma_{b2}$  – коефіцієнт умов роботи бетону, який враховує довготривалість дії навантаження.

Приймаємо конструктивно і умови обпирання зовнішніх стінових панелей виліт консолі  $l_{\text{min}}^{\text{TK}} = 15\text{см}$ . Висоту перерізу консолі розраховуємо по перерізу у грані колони. Робочу висоту перерізу  $d_0$  визначаємо за умови забезпечення міцності бетону по похилій полосі між опорою і навантаженням, причому права частина умови не повинна перевищувати  $2,5 f_{ctk} b d_0$  (умова виконується для коротких консолей при наявності в них поперечної арматури), де  $b_c$  – ширина консолі.

$$Q \leq \frac{1,5 \cdot f_{ctk} b_c d_0^2}{a} \quad \text{звідки} \quad d_0 \geq \sqrt{\frac{Q}{1,5 f_{ctk} b_c}}$$

а віддаль від точки прикладання опорної реакції до грані колони буде:

$$a = l_c - \frac{Q}{2b f_{ctk} \gamma_{b2}} = 1,5 - \frac{78140}{2 \cdot 40 \cdot 14,5(100) \cdot 0,9} = 14,3\text{см},$$

де  $l_c$  – довжина вильоту консолі.

Розрахунковий згинальний момент визначають за такою формулою [7]:

$$M = \left[ 1,25Q(l)_c - \frac{Q^2}{2b f_{ctk} \gamma_{b2}} \right] = 1,25 \cdot 78140 \cdot \left[ 15 - \frac{78140}{2 \cdot 40 \cdot 14,5(100) \cdot 0,9} \right] = 14,3\text{см},$$

Спеціальний коефіцієнт  $A_0$  визначаємо за формулою:

$$A_0 = \frac{M}{f_{ck} \gamma_{b2} b_c d_0^2} = \frac{1390000}{14,5(100) \cdot 0,9 \cdot 36 \cdot 11,52} = 0,147\text{см},$$

Тоді за таблицею знаходимо  $\xi = 0,16$ ;  $\eta = 0,92$ .

Знаходимо потрібно площу перерізу поздовжньої арматури:

$$A_s = \frac{M}{\eta d_0 R_s} = \frac{1390000}{0,92 \cdot 11,5 \cdot 365(100)} = 2,95\text{см}^2,$$

Приймаємо  $4\emptyset 12 \text{ A400 C (A-III)}$ ;  $f_{yd} = 4,52\text{см}^2$ .

Отже, міцність короткої консолі забезпечена.

**Розрахунок підсилення опорного столика короткої консолі.**

Задавшись висотою шва, знаходимо довжину шва  $l_{\text{ш}}$  за формулою:

$$l_{\text{ш}} = \frac{Q}{2\beta_f \cdot k_f \cdot R_{wf}} = \frac{78140}{2 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 185(100)} = 5\text{см},$$

Приймаємо конструктивно довжину шва  $l_{\text{ш}} = 150 - 20 = 130\text{см}$ . Для з'єднання позицій 1 – 2 [7],

$$l_{\text{ш}} = \frac{78140}{0,7 \cdot 0,8 \cdot 185(100)} = 7,5\text{см},$$

Приймаємо конструктивно довжину шва =  $280 - 50 = 230\text{мм}$ , для з'єднання позицій 2 – 3

$$l_{\text{ш}} = \frac{78140}{2 \cdot 0,7 \cdot 0,8 \cdot 185(100)} = 3,8\text{см},$$

Приймаємо загальну довжину шва конструктивно  $150 - 40 = 110\text{мм}$ .

У місцях з'єднання опорного столика із закладними деталями МК-16, МК-17; МК-12 МК-15:

$$l_{\text{ш}} = \frac{Q}{\beta_f \cdot k_f \cdot R_{wf}} = \frac{78140}{0,7 \cdot 0,6 \cdot 185(100)} = 10\text{см}$$

Приймаємо конструктивно  $l_{\text{ш}} = 18\text{см}$ .

Отже, міцність опорного столика забезпечена.

Схема існуючого армування та геометричні розміри консолей колон по серії ПС-04-02 наведено на рис.1.

Оскільки при збільшенні навантаження на 25 % існуючі опорні консолі (рис.1) отримували надлишкові напруження. Тому Українським філіалом інституту ДІПРОВУЗ на підставі

розрахунків несучої здатності було уточнено армування коротких консолей колон, яке наведено на рис. 2.

Конструкція опорного столика для підсилення короткої консолі наведена на рис.3.

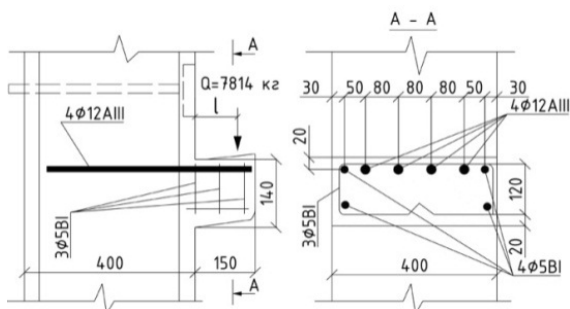


Рис.1. Схема армування та розміри консолі колони

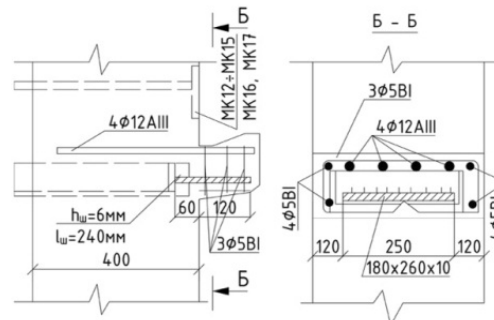


Рис. 2. Схема посилення армування консолей колон (з індексом «У»)

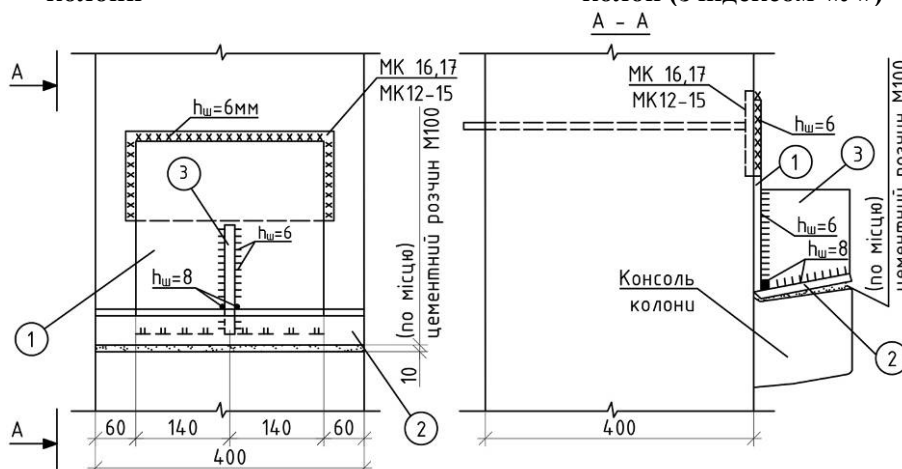


Рис.3. Конструкція опорного столика для підсилення короткої консолі.

**4. Рекомендації з підсилення коротких консолей колон.** На підставі дослідження коротких консолей колон біологічного факультету Ужгородського університету можна запропонувати такі рекомендації із забезпечення несучої здатності коротких консолей серії ПС-04-2:

1. Виконати посилення коротких консолей колон в осях 1-Г-14-Г, 9 -3, 5,7,9 за схемою на рис.3 [7].

2. По решті осей колон посилення коротких консолей виконувати при наявності механічних пошкоджень консолей або закладних деталей у вузлах спряження ригель-колонна, колонна-коротка консоль.

3. У колонах поставлених на об'єкт та маркованих додатковим індексом "У", посилення не виконувати.

4. У місцях де відсутні закладні деталі МК-14, МК-15, МК-16, МК-17 і наявні випуски арматури над консолями необхідно по місцю у опорних столиках вирізати отвори. Опорний столик насадити на випуски арматури. Після чого отвори опорних столиків обварити зварним швом не менше 8 мм і зрізати виступаючу частину арматури та зачистити, щоб не заважало монтажу панелі.

5. Армування консолі колон індексом "У" розроблене у роботі [7] показано на рис.2, рис.3. Міцність консолі із вказаним армуванням забезпечена.

6. Натурні обстеження підтверджують про те, що тріщини у консолях виникають у результаті технологічних факторів при знятті опалубки з колони, складуванні їх на спеціальні тіліжки-опори (складування колон опираючі на консоль після розпалубки призводять до їх руйнування), а також транспортування і монтажу.

#### Наукова новизна та практична значимість.

На підставі аналізу науково-технічних джерел та натурних обстежень і теоретичних досліджень виконано посилення і відновлення несучої здатності ригелів і колон серії ПС-04-02 з

врахуванням сейсмічних навантажень для регіонів у 7 балів. Зокрема, виконано розрахунок посилення коротких консолей колон та відновлення їх проектних параметрів.

На основі експериментально-теоретичних досліджень були розроблені рекомендації для посилення коротких консолей колон і описано технологію ремонтно-відновлюваних робіт. У роботі також вказано на допущені помилки на стадії проектування та дефекти і недоліки при зведенні будівлі біологічного корпусу УДУ.

**Висновки.** На основі критичного аналізу науково-технічних джерел та натурних обстежень (досліджень) і розрахунків залізобетонних конструкцій будівлі біологічного факультету УДУ, розрахунків несучої здатності коротких консолей колон та опорного столика та їх підсилення можна зробити такі висновки:

1. На підставі дослідження були встановлені причини, які призвели до необхідності обстеження залізобетонних конструкцій будівлі яка зводилась. Зокрема: відсутність вхідного контролю за якістю збірних конструкцій; незадовільний технічний контроль ВТК і заводської лабораторії; неточності в оснастці для виготовлення колон і зовнішніх стінових панелей; порушення технології будівництва і перевищення допусків і відхилень вимогам норм. Ці порушення понизили несучу здатність корпусу і стійкість будівлі в цілому на сейсмічні навантаження в районі 7 балів.

2. На основі натурних обстежень були виявлені: помилки на стадії проектування, дефекти і недоліки будівництва, які зводяться до наступного:

- закладні деталі в окремих колонах мають недопустимі відхилення від проектного положення;
- у результаті застосування неякісної оснастки (форми) для виготовлення колон серії Пс -04-2 у деяких із них при виготовленні утворюються волосяні тріщини між короткими консолями і колонами, а також раковини і сколи консолей;
- при обстеженні колон в стадії зведення будівлі біологічного факультету УДУ виявлено, що частина коротких консолей пошкоджена в процесі транспортування і складування на будівельному майданчику;
- під час монтажу зовнішніх стінових панелей на багатьох стиках (консолях) не вкладено шар цементного розчину М100 згідно проекту та неякісно виконується замонолічування вузлів ригель-колона (виявлено раковини, сколи, неякісно провібровані місця стику);
- на ригелях в окремих місцях відсутні хомути, які передбачені проектом, та має місце відхилення колон від вертикалі, суміжні колони у різних площинах, а також різні відмітки суміжних колон ( $\pm 30 - 40$  мм), коливання розмірів між осями колон (у окремих місцях вище норми (до  $50 - 60$  мм));
- проектом не передбачені в окремих колонах закладні деталі МК-16, МК-17, МК-12, МК-15, а в цих місцях проходять випуски арматури діаметром 30 мм,  $l=150 - 180$  мм. Недосконала конструкція армування вузла консоль-колона (серія знята з виробництва). Об'єкт виконується з цієї серії як завершення другої черги.
- суттєво завищена власна вага зовнішніх стінових панелей і простінків до 25%.

3. Врахувавши помилки при проектуванні, дефекти і недоліки будівництва, було виконано збір навантаження та перевірочний розрахунок параметрів коротких консолей, їх несучої здатності для обпирання панелі, розрахунок опорного столика на зминання (місцеве стиснення) зовнішніх стінових панелей.

4. На підставі обстежень і досліджень були розроблені пропозиції щодо ліквідації дефектів і пошкоджень коротких консолей колон та вузлів спряження ригелів і колон. Також описано процес і технологія відновлення їх несучої здатності до проектних параметрів.

#### **Список використаних джерел:**

1. Гавриляк А.І. Технічна експлуатація, реконструкція і модернізація будівель Ж Навч.посібник / А.І.Гавриляк, І.Б.Базарник, Р.І.Кінаш і ін.// за ред. А.І.Гавриляка Львів.-Вид-цтво НУ «Львівська політехніка», 2006.– 540 с.

2. Гавриляк А.І. Основи технічної експлуатації будівель та інженерних систем. / Навч.посібник. – Львів: Вид-цтво НУ «Львівська політехніка». 2009. – 292 с.



3. Іваник І.Г. Основи реконструкції будівель і споруд / Навч.посібник./ І.Г.Іваник, С.І.Віхоть, Р.С.Пожар і ін.// За ред І. Іваника – Львів: Вид-цтво НУ «Львівська політехніка», 2010. – 276с.

4. Лучко Й. Й. Основні фактори середовища, які впливають на деградацію транспортних споруд із залізобетонних і металевих гофрованих конструкцій / Й.Й. Лучко// Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій: матеріали XXII Міжнародного науково-практичного форуму, 5–7 жовтня 2021 р.: у 2 т. Львів: ННВК “АТБ”. 2021. – Т. 2. – С. 203–206.

5. Лучко Й. Й. Дослідження збудованих мостів які були зруйнованих повенями на Україні в 1998 і 2001 роках та тривалої експлуатації /Й. Й. Лучко, І. І. Кархут, І. Б. Кравець // Зб. наук. праць “Мости і тунелі: Теорія, дослідження, практика”. – Дніпро, 2021. – Вип. 20. – С. 26–38.

6. Luchko J. Degradating concrete and reinforced building structures and long-term structures / J. Luchko, B. Nazarevich, V. Kovalchuk // Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, – Odessa: OSACEA, 2022. –no. 86. – page 35–46.

7. Отчет по теме: Исследование и разработка рекомендаций по усилению коротких консолей колон серии ИИС–04–2 по объекту «Биологический факультет Ужгородского университета». – Львов: ФМИ им Г.В. Карпенко АН УССР, 1991.– 17с.

**Рецензент:** Хміль Р.Є., професор кафедри будівельних конструкцій та мостів Національного університету «Львівська політехніка», доктор технічних наук, доцент.

УДК: 681.516.75

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.3

Б.О. Пальчевський, Л.М. Маркіна

Луцький національний технічний університет<sup>1</sup>**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПРИГОТУВАННЯ ЗАМІСУ І ЙОГО ВОДНО-ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СПИРТУ**

*В статті проведено аналіз стадії приготування та розварювання замісу при виробництві спирту з крохмалевмісної сировини. Під час виконання цієї стадії через вплив зовнішніх збурень не завжди вдається отримати задані значення технологічних параметрів, що призводить до необхідності їх коректування. В роботі описано запропоновану трьохконтурну систему керування процесом приготування замісу, яка забезпечує корекцію технологічних параметрів на основі контролю концентрації сухої речовини та в'язкості замісу, та розроблений алгоритм функціонування цієї системи керування.*

*Ключові слова:* водно-теплова обробка, система керування, виготовлення спирту, в'язкість

B. Palchevskiyi, L. Markina

**INTELLIGENT SYSTEM FOR CONTROLLING THE PROCESS OF BATCH PREPARATION AND ITS WATER-HEAT TREATMENT IN THE PRODUCTION OF ALCOHOL**

*The article analyzes the stage of preparation and boiling of the mixture during the production of alcohol from starch-containing raw materials. During the implementation of this stage, due to the influence of external disturbances, it is not always possible to obtain the set values of the technological parameters, which leads to the need for their correction. The work describes the proposed three-circuit control system for the dough preparation process, which provides correction of technological parameters based on the control of the concentration of dry matter and the viscosity of the dough, and the developed algorithm for the functioning of this control system.*

*Key words:* hydrothermal treatment, control system, production of alcohol, viscosity

**Постановка проблеми.** За останні десятиліття керування технологічними процесами стає все більш важливим для харчової промисловості через його здатність мінімізувати виробничі витрати і покращувати якість харчових продуктів. Зважаючи на те, що процес виробництва спирту відноситься до слабо формалізованих, а його стадії описуються в основному нелінійними рівняннями або взагалі не мають математичного опису, то для побудови надійної системи керування процесом, доцільно використати ланцюжок його постадійних моделей, зв'язаних між собою умовами переходу від однієї стадії процесу до іншої.

Технологічний процес виготовлення спирту складається з послідовності окремих стадій, на кожній з яких передбачено отримання проміжного продукту, що повинен мати відповідні значення технологічних показників:

$$X_i = \{X_i^1, X_i^2, \dots, X_i^n\}$$

де  $i$  - номер стадії виробництва,

$n$  - технологічний показник напівпродукту.

Однак, під впливом зовнішніх збурень, а також за рахунок непередбачених змін у ході виконання технологічного процесу після виконання конкретної стадії не завжди вдається отримати бажані показники. Це пов'язано з тим, що тут відбуваються складні мікробіологічні й біохімічні процеси, які мають незворотний характер. У результаті наступні стадії виробництва, будуть проходити за непередбачених регламентом умов, що призведе до випуску продукції з низькими показниками якості. У зв'язку з цим виникає задача розробки алгоритмів автоматизованого корегування технологічних режимів на кожній стадії в залежності від результатів, отриманих на попередній стадії. Особливо це стосується початкових стадій виробництва, а саме приготування замісу із водно-зернової суміші та його водно-теплова обробка (ВТО), які визначають подальше протікання процесу виробництва спирту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Однією з найвідповідальніших стадій виробництва спирту з крохмалевмісної сировини є розварювання, яке залежить як від характеристик зернової сировини, так і від режимів її підготовки до ВТО [2, 4]. Тому на сьогоднішній день при одержанні спирту із зерна точність технологічних режимів при проведенні першої основної стадії є однією із ключових проблем [2, 6, 8]. З іншої сторони,

складність процесів на цій стадії та значні коливання характеристик вхідних матеріалів загальмували автоматизацію керування дільницею підготовки оцукрованого сусла із зерна. Зниження рухливості технологічного середовища на стадії приготування замісу призводить до погіршення умов протікання ферментативного гідролізу крохмалю та некрохмалистих полісахарид [1, 6, 7]. Окрім того, погіршуються умови міжапаратного переміщення напівфабрикату, що викликає втрати при виробництві спирту.

**Постановка завдань.** Оскільки корегування технологічних режимів необхідно виконувати на попередній стадії процесу, то у складі системи управління такими процесами необхідно передбачити використання прогнозованих моделей. Ці моделі дозволять визначити скореговані значення технологічних режимів, які необхідно підтримувати на плинній стадії виробництва з урахуванням технологічних показників, отриманих на попередній стадії. Для вирішення даного завдання необхідно розробити автоматизовану систему керування, яка б забезпечувала регулювання параметрів технологічного процесу та підтримувала їх в регламентованих межах.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо стадію приготування замісу і його ВТО при виробництві спирту, як сукупність етапів (рис.1). Пов'яжемо етапи початкової стадії виробництва спирту (одержанням замісу зерна із рідиною і його ВТО) між собою. Детальний розгляд етапів ВТО дає чітке розуміння про тісний взаємозв'язок всіх параметрів. Якщо технологічний процес триває за визначених регламентом умов, то підтримання регламентованих показників технологічних режимів забезпечує отримання напівпродукту із заданими показниками якості та забезпечує значну мінімізацію енергетичних ресурсів.

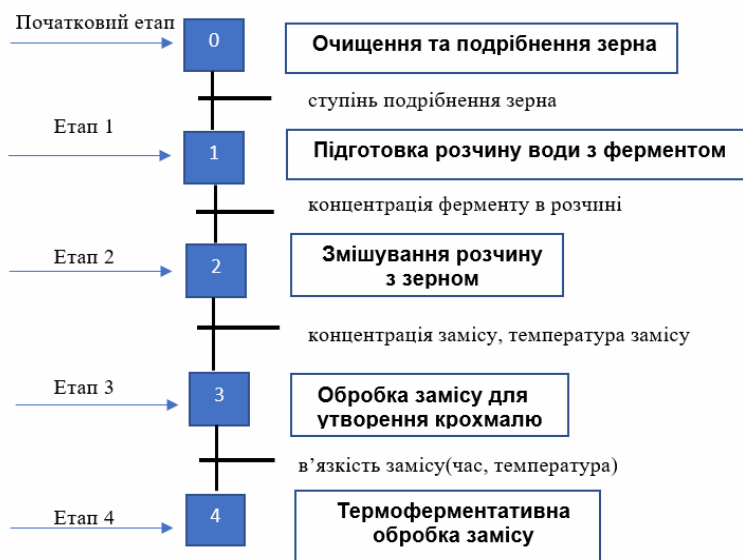


Рис. 1. Схема взаємозв'язаних моделей етапів приготування замісу і його ВТО

**Початковим етапом** є очищення та подрібнення зерна, яке надходить на виробництво спирту. Основною проблемою використання зерна для виготовлення спирту є забезпечення чистоти сировини, в першу чергу усуненню мікробіологічних забруднень і механічних домішок [1]. Подрібнення зерна - важлива стадія його підготовки до розварювання, оскільки якість і рівномірність помелу обумовлюють температурний режим водно-теплової обробки і ступінь втрат вуглеводів на цій стадії технологічного процесу. Помел повинен бути однорідним: прохід через сито діаметром 1,0 мм повинен бути не менше 95% [3,4]. Як відомо, сировиною для виробництва спирту є пшениця, жито, кукурудза.

Наступний **етап 1** передбачає підготовку розчину води з ферментом. Ферменти виконують роль каталізаторів білкового походження [2]. Застосування ферментних препаратів сприяє інтенсифікації технологічних процесів, підвищення виходу, поліпшенню якості готової продукції, забезпечує раціональне використання сировинних ресурсів [5]. Тому саме якість і кількість ферментних препаратів суттєво впливає на якість зернового сусла. Кількість використання даних препаратів визначається згідно регламенту технологічного процесу, який в свою чергу залежить від виду сировини, ступеня її подрібнення та кількісного співвідношення її з водою [6]. Особлива увага приділяється використанню ферментних препаратів селективної дії, що дозволить знизити температуру термоферментативної обробки замісів та забезпечують більш глибокий гідроліз біополімерів зерна [7].

На **етапі 2** змішування розчину з зерном і отримання замісу одним із важливим моментів є дотримання співвідношень рідких та сипких складових процесу 2,5-3,0 л на 1 кг помелу. Кількість води змінюють у залежності від крохмалистості і вологості зерна з урахуванням того, щоб концентрація суслу була 18-20 % за цукроміром.

Обробка замісу **на етапі 3** для утворення крохмалю передбачає регулювання температури замісу у залежності від дисперсності помелу зерна та змішування у відповідному співвідношенні розчину з зерном. Температурні режими замісів знаходяться в межах від 40° С до 80° С залежно від сировини [10,11]. Характеристиками замісу будуть концентрація сухої речовини і температура замісу. В свою чергу температура замісу визначає температурні показники, витрату пари та ступінь вивільнення крохмалю на наступній стадії – термоферментативної обробки. Складності виникають тоді, коли на попередній стадії виробництва не отримано передбачені регламентом технологічні показники. Наприклад виникає необхідність зниження температури замісу через різке зростання його в'язкості [9]. Це пов'язано з тим, що двофазна суміш (вода-зернові частки) змінює свої структурно-механічні властивості через початок процесу клейстеризації крохмалю [9], а це в свою чергу вимагає змін технологічних режимів наступної стадії, що призводить до додаткових витрат енергоресурсів.

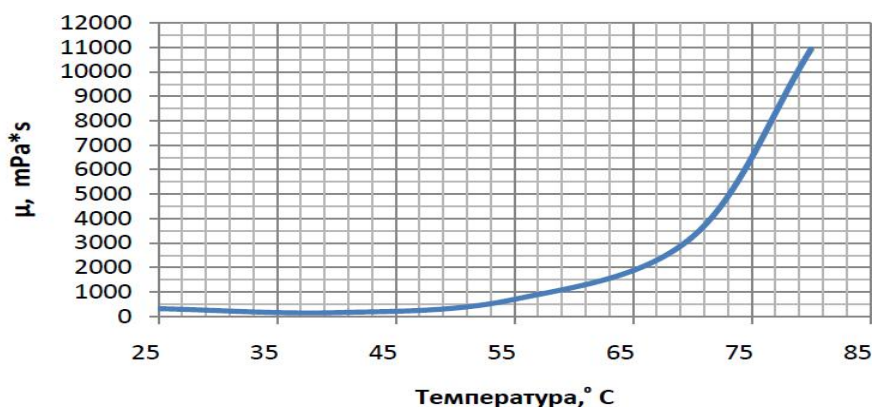


Рис.2. Зміна в'язкості водно-зернової суспензії в процесі її нагріву від 25°С до 85°С [10]

Як бачимо, особливістю підготовки замісу є те, що основний показник його якості - ступінь утворення крохмалю в замісі – не контролюється, а визначається приблизно за тривалістю теплової обробки при заданій температурі. Це обумовлює складності, які виникають тоді, коли на попередній стадії виробництва не отримано передбачені регламентом технологічні показники. Очевидно, що ситуація може бути покращена, якщо визначати ступінь крохмалистості замісу перед його подачею на наступну стадію обробки. Нами визначено, що таким показником може слугувати в'язкість замісу. Забезпечення заданої в'язкості замісу утворює передумови стабільності теплової його обробки і усуває необхідність зміни технологічних режимів на наступній стадії [1, 7, 9].

У всіх існуючих способах керування процесом підготовки зернового замісу є відсутність контролю за його в'язкістю, що не дозволяє використати теплові режими обробки, які забезпечили би ефективне проведення операції термоферментативної обробки суслу. Нині в'язкість зернових сумішей під час виробництва спирту не контролюється. На в'язкість замісів впливають ступінь подрібнення зерна, гідромодуль ( $m$ ) та застосовувані ферментні препарати та їх кількість у замісі. При зміні типу зерна, розміру помелу, гідромодуля змішування, швидкості підвищення температури тощо, в'язкість замісу змінюється, тому передбачити в'язкість замісу, щоб уникнути його контролю, складно.

Оскільки корегування управляючих дій (технологічних режимів) необхідно виконувати перед початком виконання наступного етапу, то у складі системи управління такими процесами необхідно передбачити використання прогнозованих моделей, за допомогою яких можливо визначити скореговані значення технологічних режимів, що необхідно підтримувати на плинній стадії виробництва з урахуванням технологічних показників, отриманих на попередній стадії. На основі викладених міркувань було розроблено алгоритм поетапного відтворення процесу, який дозволив зв'язати в єдину систему всі етапи та технологічні режими процесу приготування замісу і його водно-теплової обробки.

Нами було розроблено систему керування в'язкістю замісу, що забезпечила покращення якості керування процесом підготовки замісу шляхом підвищення стабільності параметрів напівпродукту після стадії приготування замісу [5]. Автоматичне приготування замісу із крахмалевмісної сировини здійснюється в чанку-змішувачі із мішалкою та пристроєм подачі пари

для нагріву замісу. Автоматичне керування процесом приготування замісу проводять за допомогою системи керування, що складається із трьох контурів управління. Перший контур забезпечує задане співвідношення ферменту та гарячої води в деструктураторі крохмалю, другий контур забезпечує задане співвідношення подрібненого зерна і водного розчину деструктуратора крохмалю в замісі, третій контур забезпечує стабілізацію в'язкості крохмалевмісної маси шляхом регулювання температури  $T$  всередині бункера замісу за допомогою регулятора подачі пари (рис.3).

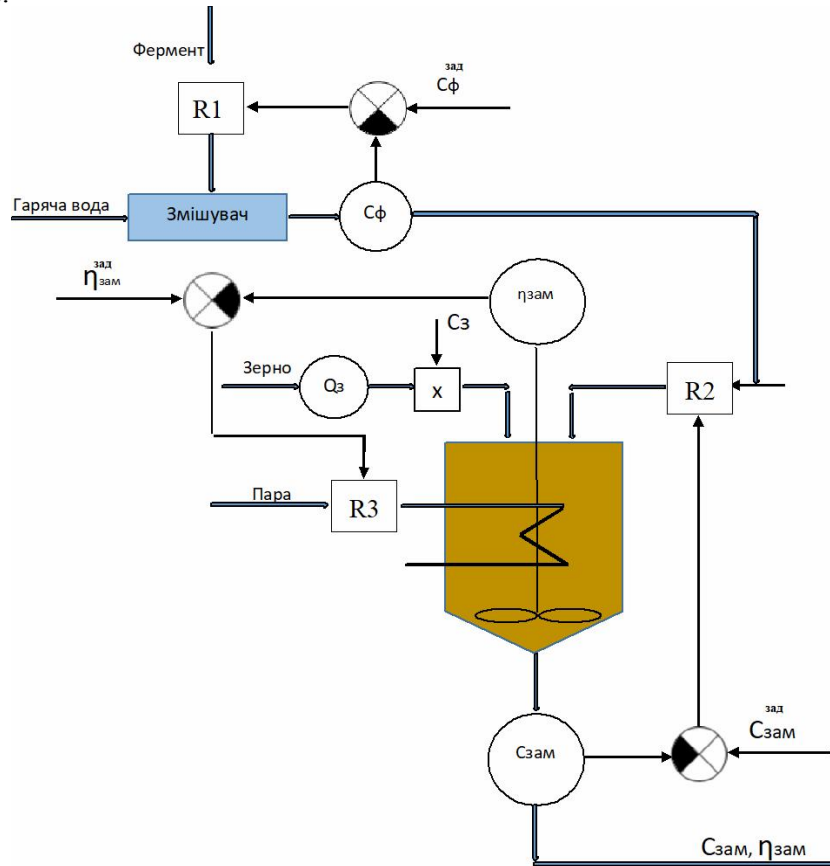


Рис.3. Трьохконтурна система керування процесом підготовки замісу

Змішування гарячої води з ферментами здійснюється у відповідному співвідношенні. Задане значення концентрації ферменту з водою порівнюються з поточним значенням в елементі порівняння 1 і у разі виникнення помилки неузгодженості  $E_{\phi} = (C_{\phi}^{зад} - C_{\phi})$  сигнал надходить до регулятора R1, який змінює кількість ферменту, що надходить на змішування.

Наступний контур передбачає регулювання концентрації отриманого замісу. В змішувач неперервно надходить подрібнене зерно  $Q_z$ . Сигнал відповідної концентрації зерна  $C_z$  подається в блок перемноження, де перемножується з сигналом, який відповідає витраті зерна  $Q_z$ . Вихідний сигнал відповідає величині  $Q_z C_z$ , що і забезпечує надходження зерна відповідної кількості і концентрації в змішувач, куди також надходить змішана вода з ферментом. На виході з змішувача відбувається контроль концентрації замісу, яка в блоці порівняння 2 порівнюється з заданою. Помилка неузгодження надходить до регулятора R2, який змінює кількість рідких компонентів в замісі.

Третій контур регулювання передбачає регулювання в'язкості замісу, на величину якої впливають ступінь помелу зерна, його характеристики, вологість зерна та інші збурення. В'язкість визначається за допомогою вимірювання потужності, яка витрачається мішалкою при заданій швидкості обертання (наприклад, 100 об/хв). При постійній нарузі живлення мішалки потужність характеризується струмом, що використовується мішалкою. При побудові характеристики струм - в'язкість замісу значення струму живлення мішалки характеризує в'язкість замісу, значення якої подається на блок порівняння. Отримане значення помилки неузгодженості  $E_{\eta} = (\eta_{зам}^{зад} - \eta_{зам})$  надходить до регулятора R3, який змінює кількість пари, що подається в змішувач.

### Висновки

1. Аналіз літературних джерел показав, що практично у всіх існуючих способах керування процесом підготовки зернового замісу відсутній контроль за його в'язкістю, що не дозволяє використати теплові режими обробки в степені, достатній для забезпечення ефективного проведення наступної стадії термоферментативної обробки сула.

2. Початкові стадії процесу виробництва спирту, а саме стадії приготування замісу та його ВТО відносяться до слабо формалізованих, тому було запропоновано для побудови надійної системи керування його постадійне і поетапне математичне моделювання, яке включає окрім моделей окремих стадій і етапів також і моделі переходу від одного етапу чи стадії до іншого.

3. Розроблений алгоритм поетапного відтворення процесу дозволив зв'язати в єдину систему всі етапи та технологічні режими процесу приготування замісу і його водно-теплової обробки, а також забезпечити стабільне дотримання регламентних показників.

4. Впровадження трьохконтурної системи керування процесом підготовки замісу забезпечило контроль та регулювання всіх необхідних параметрів, що дозволило вплинути на зміну режимів розварювання, а саме зменшення витрат пари, зниження витрат зброджуваних речовин на стадії бродіння та покращення якості та кількість спирту.

### Список використаних джерел

1. Громковская Л.К. Реологическая характеристика замесов из зерна, используемых в производстве спирта / Известия Вузов. Пищевая технология, №1-2, 1996.- с.27-29.
2. Технологія спирту. В.О.Маринченко, В.А.Домарецький, П.Л.Шиян, В.М.Швец, П.С.Циганков, І.Д.Жолнер. /Під ред. проф. В.О.Маринченка. - Вінниця: "Поділля-2000", 2003. - 496 с.
3. Леденев В.П. Гидрообработка зернового сырья в технологии получения спирта / В.П. Леденев, М.Е. Чурмасов, Р.А. Петров, В.В. Кононенко, О.С. Журба // Ликероводочное производство и виноделие, 2003. № 9 (45). С. 4-6
4. Шиян, П. Л. Інноваційні технології спиртової промисловості. Теорія і практика [Текст]: монографія / П. Л. Шиян, В. В. Сосницький, С. Т. Олійнічук. – К.: Видавничий дім «Асканія», 2009. – 424 с
5. Патент на корисну модель № 151663 UA МПК(2022) C12C 7/04, G05B 15/00. Спосіб автоматичного керування приготуванням замісу при виробництві етилового спирту із крохмалевмісної сировини /Пальчевський Б.О., Маркіна Л.М.,- № u 202200653; Заявл. 14.02.2022; Опубл. 25.08.2022, Бюл.№ 34.- 3с.
6. Изучение динамики изменения физико-химических показателей сула спиртового производства на стадиях механико-ферментативной обработки при увеличении концентрации зерновых замесов / А. А. Пушкарь, Д. В. Хлиманков, В. И. Соловей, Ю. С. Пусовская // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2019. – Т. 57, № 2. – С. 238–251. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2019-57-2-238-251>
7. Agafonov G.V., Kovaleva T.S., Yakovlev A.N., Muravev A.S., Yakovleva S.F. Optimization of water-heat treatment of barley batch (mix) in ethanol production. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2020. vol. 82. no. 3. pp. 131–138. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2020-3-131-138
8. Casey, G. P. Ethanol tolerance in yeasts / G. P. Casey, W. M. Ingledew // Crit. Rev. in Microbiology. – 1986. – Vol. 13, №3. – P. 219–280. <https://doi.org/10.3109/10408418609108739>
9. Yakovlev A N, Agafonov G V, Yakovleva S F, Romanyuk T I, Zueva N V, Kovaleva T S 2020 Refining process and properties of polysaccharide xylanase IOP Conference Series: Earth and Environmental Science p 640
10. A study of ethanol tolerance in yeast / T. D'Amore [et al.] // Crit. Rev. in Biotechnology. – 1990. – Vol. 9, N 4. – P. 287–304. <https://doi.org/10.3109/07388558909036740>
11. R. Folly, R. Berlim, A. Salgado, R. França and B. Valdman. ADAPTIVE CONTROL OF FEED LOAD CHANGES IN ALCOHOL FERMENTATION /Brazilian Journal of Chemical Engineering, vol. 14, № 4 ; <https://doi.org/10.1590/S0104-66321997000400012>



УДК 621. 921:661.65

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.4

V.I. Lavrinenko, H.D. Ilnytska, V.V. Smokvyna, O.B. Loginova,  
I.M. Zaitseva, V.V. Tymoshenko

## INFLUENCE OF VOLUMETRIC AND SURFACE DEFECTS OF THE INITIAL GRINDING POWDERS OF DIAMOND GRADE AC6 ON THE CHANGE IN THEIR PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES

*V. Bakul Institute for Superhard Materials National Academy of Sciences of Ukraine*

*The results of the investigation of the power of grinding powders diamond of brand DS with a grain size of 200/160-80/63, synthesized in Ni-Mn-C systems, presented in this article. It is shown that initial grinding diamonds distinguish between themselves for a different amount of volume and surface defects, which lead to a change in magnetic and mechanical properties. The increase in the compound of volume defects in the grinding powder of diamond with a grain size of 200/160 is twice as large in the diamonds with the inclusion of that house in the diamonds with a grain size of 80/63, which contributes to an increase in their magnetic properties by about 4 times and leads to decrease in their heat resistance by 1.5 times. The change in surface defects determined in the form of the coefficient of surface activity of diamond grinding powders of grain sizes from 200/160 to 80/63 indicates a decrease in the coefficient of surface activity of diamond grinding powders to a lesser extent for diamonds of larger sizes.*

*Keywords:* grinding powders of synthetic diamond, physical and mechanical characteristics, volume and surface defects, heat resistance.

В.І. Лавріненко, Г.Д. Ільницька, В.В. Смоквина, О.Б. Логінова,  
І.М. Зайцева, В.В. Тимошенко

## ВПЛИВ ОБ'ЄМНИХ ТА ПОВЕРХНЕВИХ ДЕФЕКТІВ ВИХІДНИХ ШЛІФПОРОШКІВ АЛМАЗУ МАРКИ АС6 НА ЗМІНУ ЇХ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

*У роботі наведено результати дослідження властивостей шліфпорошків алмазу марки АС6 зернистостей 200/160-80/63, синтезованих в системах Ni-Mn-C. Показано, що вихідні шліфпорошки алмазу відрізняються між собою за різним вмістом об'ємних та поверхневих дефектів, що призводить до зміни їх магнітних та механічних властивостей. Зростання вмісту об'ємних дефектів у шліфпорошках алмазу визначених кількістю неспалимих залишків для зернистості 200/160 у два рази більше у порівнянні з вмістом включень та домішок у алмазах зернистості 80/63, що сприяє посиленню їх магнітних властивостей приблизно у 4 рази та зниженню їх термостійкості у 1,5 рази. Зміна поверхневих дефектів визначених у вигляді коефіцієнту поверхневої активності шліфпорошків алмазу зернистостей від 200/160 до 80/63 свідчить про зниження коефіцієнта поверхневої активності шліфпорошків алмазу меншою мірою для алмазів більш крупних розмірів.*

*Ключові слова:* шліфпорошки синтетичного алмазу, фізико-механічні характеристики, об'ємні та поверхневі дефекти, термостійкість.

**Introduction and problem statement.** Synthetic diamonds and tools made from them are widely used in mechanical engineering. However, the possibilities for extensive growth in the use of diamonds in industry are now practically exhausted; a sharp increase in the efficiency of their use is necessary. The performance of any diamond tool is largely determined by the properties of diamonds.

The properties of diamond powders, in turn, are determined by technologies of synthesis, extraction, processing, classification by size and shape, sorting by physical and chemical properties, surface modification, which ensures the production of powders with desired properties.

Serial diamond powders of domestic and foreign production are a set of grains of a certain grain size, which differ significantly in the main technological quality characteristics. As a rule, the value of one or another qualitative characteristic of a powder (strength, heat resistance, surface roughness, isometric) is an average value over the entire volume of the powder. Therefore, in order to obtain diamond powders that are uniform in strength and geometric characteristics, it is necessary to improve their physical-mechanical and physical-chemical properties by developing methods for influencing volumetric defects in grains by the action of force fields (gravitational, magnetic, electric) and chemical and thermochemical treatments.

But a detailed study of the process of changing the physicochemical and physicochemical properties of synthetic diamond grinding powders and the development of new and improvement of existing methods of influencing volumetric and surface defects of abrasive diamond grains has not been carried out and there is no such information in the existing literature.

**Analysis of the latest research and publications.** In tool production, low-strength synthetic diamond powders AC6-AC20 are widely used in the processing of hard alloys, ceramics, glass and other

brittle materials. One of the most important ways to achieve a higher class of processed surface and increase the wear resistance of diamond tools is to increase the uniformity of diamond powders in terms of grain composition, strength, and defect content used in the tool.

In the works of Lavrinenko V.I., Pasechny O.O., Ilnitska G.D. [1-3] it has been shown that an increase in the content of the main fraction of diamond grinding powders of individual grain sizes is essential for reducing the wear rate of grinding wheels and leads to an increase in the uniformity of the linear dimensions of diamond grains, which helps to increase the wear resistance of the tool. During the operation of a diamond abrasive tool, the main type of wear of synthetic diamonds is the brittle destruction of individual protruding parts of the diamond grain due to the development of microcracks in it upon contact with the machined surface of the part. In this regard, to improve the performance of abrasive tools, it is important to improve methods for producing synthetic diamond powders for abrasive purposes with different contents of volumetric defects and with high uniformity in strength and linear dimensions.

The dimensions of diamond crystals, the number of inclusions in them and their strength largely depend on the rate at which the crystals increase in size. In the working volume of a high-pressure apparatus, it is impossible to provide equal conditions for increasing the size of all crystals due to inhomogeneity of temperature and pressure, which leads to the formation of diamond crystals with different physical and mechanical characteristics. In such cases, the inclusion represents volumetric defects in diamond crystals, which have a strong impact on the thermostability of diamonds, which directly affects the performance characteristics of the diamond tool [4, 5].

The growth of diamond crystals is accompanied by the formation of a crystal surface, that is, the boundary of a solid body with the environment. The general thermodynamic property of the surface is the excess of surface energy relative to the volume and the presence of surface tension, which affects the crystallization of diamonds and the reconstruction of their surface.

Therefore, the purpose of the work is to study the influence of volumetric and surface defects of the original AC6 diamond grinding powders on changes in their physical and mechanical characteristics

**Research materials and methods.** The investigation of the properties of the initial grinding powders of the AS6 diamond was carried out on diamonds of grain size 200/160-80/63, synthesized in Ni-Mn-C systems.

At the Institute of Superhard Materials named after V.M. Bakulya of the National Academy of Sciences of Ukraine has developed a technology for obtaining diamond grinding powders of the AC4-AC50 grades, which includes the grinding of diamond raw material, its separation according to the size and shape of the diamond grains. According to this technology, diamond samples of grain size 200/160-80/63 were produced, in which their properties were evaluated. Research this samples was carried out using methods developed at the Institute of Superhard Materials.

The physical and mechanical characteristics of the powders were determined: strength in the form of breaking load under static compression at room temperature (P, N) and after heat treatment at 1100 °C according to the heart resistance was calculated in the form of the coefficient of thermal stability ( $K_{TS}$ ), coefficients of uniformity in strength (Kunif.p) and linear dimensions (Kunif.l.d.); measured the specific magnetic susceptibility ( $\chi$ ), the content of the main fraction (OF). The quantitative content of surface defects was estimated by the coefficient of surface activity (Ka), volume defects in diamond grains were determined in the form of unburned residue (un/r).

**Presentation of the main research material.** Results and their discussion. The results of studies of initial diamond grinding powders of grain size 200/160-80/63 are presented in Table 1.

Table 1.

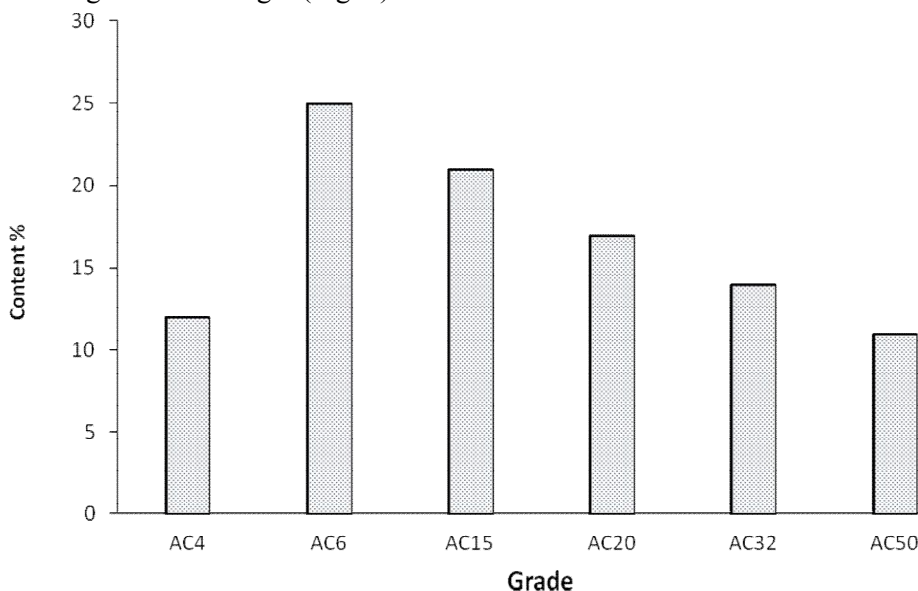
**Characteristics of the initial diamond grinding powders of different grain sizes**

Grit size	Characteristics of abrasive powders				
	OF, %	P, N	$K_{TS}$ , %	Kunif.p, %	Kunif.l.d, %
200/160	70	9,5	21	24	20
160/125	72	7,4	22	25	22
125/100	73	6,3	29	23	21
100/80	74	5,9	30	24	20
80/63	70	4,9	32	23	18



As follows from the table. 1, the initial diamond grinding powders of various grit sizes in terms of strength are classified as AC6, the content of the main fraction in the powders is at the level of 70-74%. The coefficient of uniformity in linear dimensions is 23-18%. The heat resistance of the original powders (in the form of coefficient of thermal stability) varies for diamonds from 20 to 32%. The coefficient of uniformity in strength for diamond grinding powders is not higher than 25%.

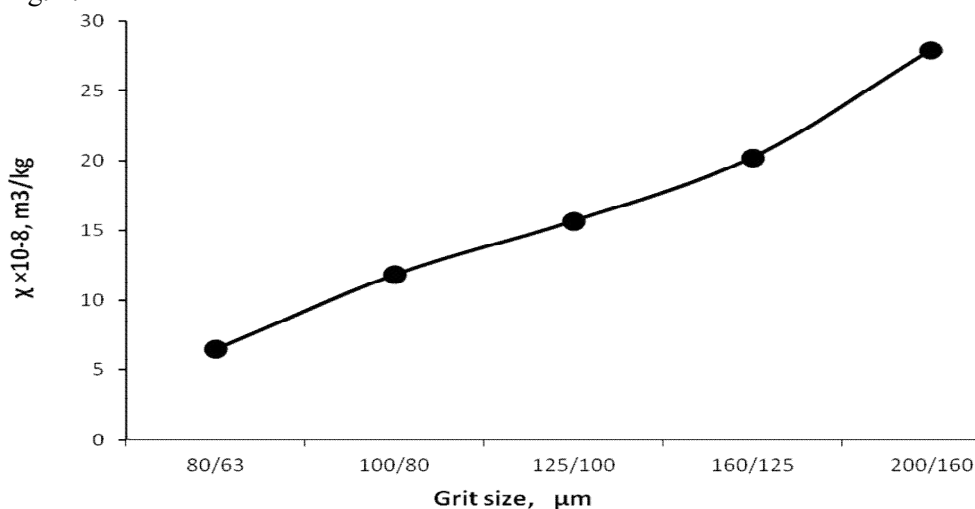
Usually, serial diamond powders of domestic and foreign production are a set of grains of a certain granularity, which differ significantly in terms of the main technological characteristics of quality. Therefore, for diamonds with a grain size of 160/125, was performed an analysis of the diamond content by brands according to their strength (Fig. 1).



**Fig. 1. Content of diamond grains of different grades in the original diamond grinding powders of 160/125 grain size, synthesized in the systems: Ni-Mn-C**

As follows from Fig. 1, the uniformity of the initial diamond grinding powders of grade AC6 content from diamond different grades from AC4 to AS50, поєтому uniformity in strength grinding diamond of grade AC6 grit size 160/125, is 25%.

The change in the magnetic properties (in the form of a change in the specific magnetic susceptibility) of the initial diamond grinding powders of grade AC6 with grain sizes 80/63–200/160 is shown in Fig. 2.



**Fig.2. Specific magnetic susceptibility of diamond grinding powders of grain size 80/63–200/**

From fig. 2 You can trace a steady trend of increasing specific magnetic susceptibility with increasing granularity of powders. Thus, the specific magnetic susceptibility of diamond grinding powders with a grain size of 200/160 is almost 4 times greater than the specific magnetic susceptibility of diamond grinding powders with a grain size of 80/63.

The increase in the content of volumetric defects, determined by the number of unburned residue (un/r) of diamond grinding powders with grain sizes 80/63–200/160, is monotonically increasing and is due to the fact that with an increase in the rate of crystal growth, the content of intracrystalline metallic inclusions captured by growing crystals from the crystallization medium increases. The increase in the content of intracrystalline inclusions and impurities is approximately two times greater for diamonds with a grain size of 200/160 compared to the content of inclusions and impurities in diamonds with a grain size of 80/63 (Fig. 3).

Analyzing the data in Fig. 4, it is clear that the decrease in the surface activity coefficient of AC6 diamond grinding powders with grain sizes from 80/63 to 250/200 is significantly less for larger diamond sizes. Thus, the surface activity coefficient for diamonds with a grain size of 80/63 is approximately 2 times greater than for diamonds with a grain size of 250/200.

Thus, the original AC6 grade diamond grinding powders with grain sizes 80/63–250/200 differ from each other in the different content of volumetric and surface defects, which leads to a change in their magnetic and mechanical properties.

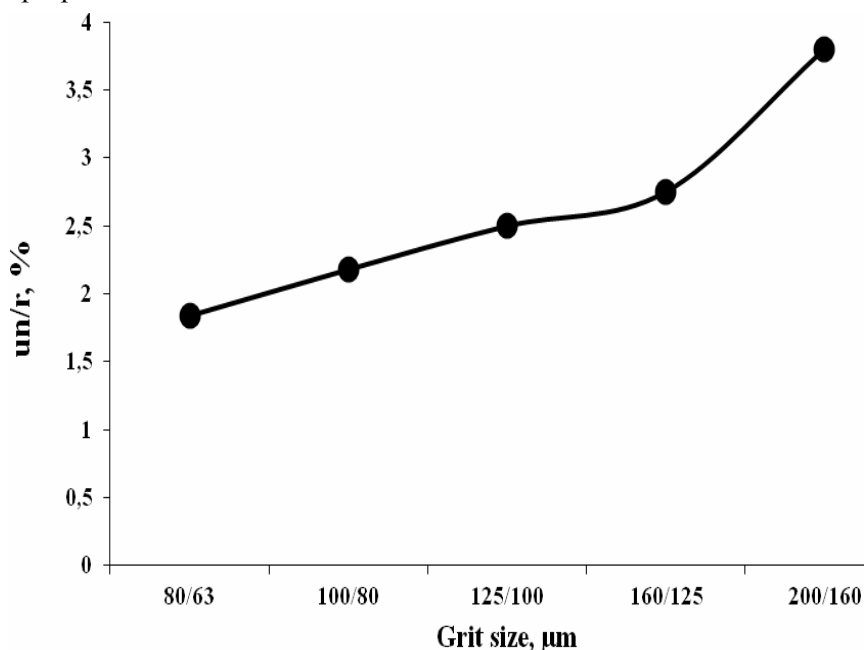


Fig 3. Contents of intracrystalline inclusions and impurities in diamond crystals of grain size 80/63–200/160

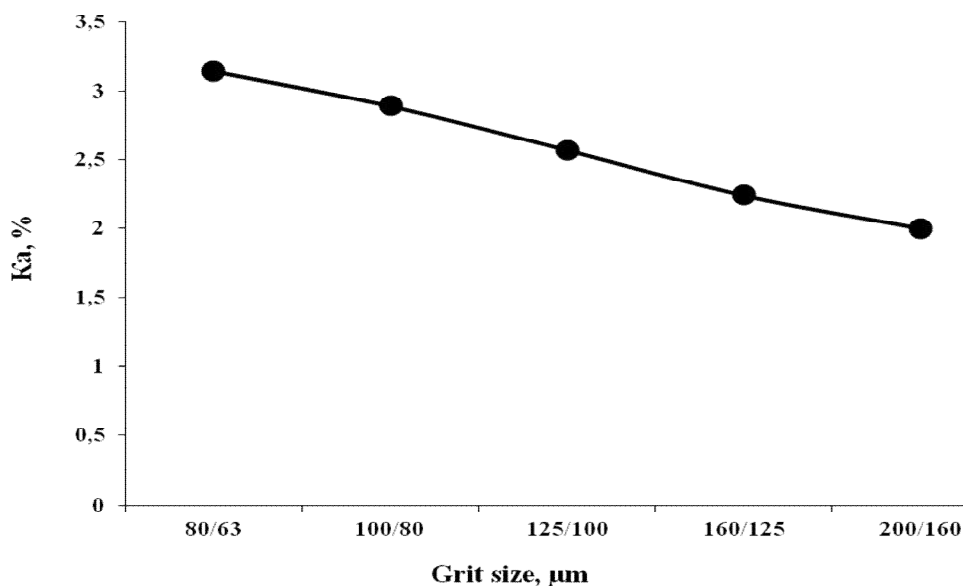


Fig 4. Change in surface imperfections of diamond grinding powders with grain sizes 80/63–200/160

**Conclusions.**

1. It has been established that the initial grinding powders of AC6 grade diamonds with grain sizes 200/160–80/63 differ from each other in the different content of volumetric and surface defects, which leads to a change in their magnetic and mechanical properties.

2. It has been shown that the increase in the content of volumetric defects, determined by the amount of unburnt residues of diamond grinding powders with a grain size of 200/160, is twice as high as compared to the content of inclusions and impurities in diamonds with a grain size of 80/63, which contributes to an increase in their magnetic properties by approximately 4 times. which helps to reduce their heat resistance (in the form of a thermal stability coefficient) by 1.5 times.

3. The change in surface defects, defined as the surface activity coefficient of diamond grinding powders with grain sizes from 200/160 to 80/63, indicates a decrease in the surface activity coefficient of diamond grinding powders to a lesser extent for larger diamond sizes.

**List of sources used:**

1. Lavrinenko V.I. Solid abrasive materials in machining: an encyclopedic reference book. [Text]/V.I. Lavrinenko, M.V. Novikov - K.: INM im. V.M. Bakulya NAS of Ukraine, 2013. – 456 p.

2. Superhard materials. Receipt and application [Text]. Monograph in 6 volumes / Under the general editorship. N.V. Novikov. – M.: ISM im. V.N. Bakulya, Research and Production Center "ALKON" NANU, 2007. Т. 6: Diamond-abrasive tools in machining technologies / Ed. A.A. Shepelevo. – M.: ISM im. V.N. Bakulya, IPC "ALKON" NASU, 2007. – 340 p.

3. Ilnitskaya G. D. Influence of the structure of diamond crystals on the physical and mechanical properties of diamond powders // Superhard materials: creation and application. K.: INM NAS of Ukraine. – 2007. pp. 189–196.

4. Study of the possibilities of improving the performance properties of AC20 synthetic diamond grinding powders by changing their dimensional and physicochemical characteristics Lavrinenko V.I., Ilnitskaya G.D., Petasyuk G. and other Superhard materials. – 2018 – No. 4. – P. 59-70.

5. Ilnytska G.D., Lavrinenko V.I., Smokvina Diamonds for grinding tools, cut in various systems Kiev, "Vydavnitsa "Naukova Duma" NAS of Ukraine", 2021. – 167 p.

**Reviewer:**

Kovalenko Tetyana Viktorivna, senior researcher at the Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ph.D.

О. С. Безсмертний

Сумський державний університет

## ЗАСТОСУВАННЯ СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ КОЛІС ВІДЦЕТРОВОГО НАСОСА СТВОРЕНИХ МЕТОДОМ 3D ДРУКУ

*Робота присвячена проектуванню стенду для перевірки робочих коліс насосного обладнання, створених за допомогою технології 3D друку. Описані у роботі методи дозволять оцінити ефективність виготовлених робочих коліс та забезпечити їх оптимальну роботу в майбутньому. Ця стаття репрезентована у рамках реалізації договору №ДЗ / 134 - 2022 від 21 жовтня 2022 р. між МОН України та Сумським державним університетом на виконання науково-технічної роботи «Розроблення насоса реакторного відділення для систем спеціальної каналізації реакторів українських атомних електростанцій»*

**Ключові слова:** експериментальні дослідження, насосне обладнання, 3D друк, прототипи, робоче колесо, стенд, абразив, робоча рідина, відцентровий насос, CoPET, позиціонування, дихлоретан, тестування.

O. S. Bezsmertnyi

## APPLICATION OF THE STAND FOR INVESTIGATION OF CENTRIFUGAL PUMP IMPELLERS CREATED BY 3D PRINTING METHOD

*The work is devoted to the design of a stand for checking impellers of pumping equipment created using 3D printing technology. The methods described in the work will make it possible to evaluate the efficiency of the manufactured impellers and ensure their optimal operation in the future. This article is represented in the framework of the implementation of the contract No. DZ / 134 - 2022 of October 21, 2022 between the Ministry of Education and Culture of Ukraine and Sumy State University for the implementation of scientific and technical work "Development of a reactor compartment pump for special sewage systems of reactors of Ukrainian nuclear power plants"*

**Key words:** experimental research, pumping equipment, 3D printing, prototypes, impeller, bench, abrasive, working fluid, centrifugal pump, CoPET, positioning, dichloroethane, testing.

**Постановка проблеми.** Застосування технології 3D друку дозволяє вирішити проблему, пов'язану з важкою і дорогавартісною процедурою виготовлення прототипів робочих коліс для насосного обладнання. Традиційні методи, такі як фрезерування або відливання, вимагають значних витрат часу і коштів на підготовку необхідного обладнання та матеріалів. Крім того, вони можуть бути неефективними у випадку необхідності виготовлення прототипів в невеликих обсягах.

Завдяки 3D друку можливо значно скоротити час і знизити витрати на виготовлення прототипів, а також проводити більш детальні дослідження робочих коліс. Крім того, зміни в конструкції можна внести швидко та легко, що забезпечує швидкий процес вдосконалення робочих коліс.

Таким чином, використання 3D друку є ефективним способом вирішення проблеми виготовлення прототипів робочих коліс для насосного обладнання. Цей метод дозволяє знизити витрати на процес розробки, зменшити час на виготовлення прототипів та створити більш ефективні робочі колеса з високою продуктивністю.

**Аналіз публікацій.** Дослідження з використанням 3D друку робочих коліс насосів є досить новим напрямком, тому публікацій на цю тему ще не так багато. Проте, існує кілька наукових статей та публікацій, які відображають досвід використання 3D друку в цій галузі.

Загальна тенденція у статтях на тему тестування пластику, виготовленого методом 3D-друку, полягає в тому, що цей метод вирішує проблему складності виробництва та використання пластмас з різними властивостями. Для тестування пластиків, що виготовлені методом 3D-друку, дослідження проводяться на їх механічні властивості, міцність, еластичність, стійкість до тертя та інші параметри.

Стаття опублікована в журналі "Additive Manufacturing" у 2018 році, також досліджувала міцність пластику, виготовленого за допомогою 3D друку. У статті описувалась методика тестування міцності зразків з пластику, виготовлених різними технологіями 3D друку. Дослідження виявили, що міцність пластику, виготовленого за допомогою FDM (Fused Deposition Modeling) технології, залежить від налаштувань друкарської машини, таких як швидкість друку, температура і шарова товщина. Крім того, автори статті порівняли міцність пластику, виготовленого за допомогою 3D друку, з міцністю пластику, виготовленого за допомогою

традиційних методів виробництва. Результати показали, що пластик, виготовлений за допомогою 3D друку, має меншу міцність порівняно з традиційними методами виробництва[1].

Інша стаття досліджує властивості пластиків, що виготовлені методом FDM (Fused Deposition Modeling) 3D-друку. Дослідження показали, що використання різних типів пластиків, таких як ABS, PLA, PETG, Nylon та інші, дозволяє отримати матеріали з різними механічними властивостями, які можна використовувати для виробництва функціональних деталей [2].

Отже, взагалі можна сказати, що статті, присвячені тестуванню міцності пластику, виготовленого методом 3D друку, демонструють, що міцність залежить від налаштувань друкарської машини і технології виробництва. Крім того, результати досліджень порівнюють міцність пластику, виготовленого за допомогою 3D друку, з міцністю пластику, виготовленого традиційними методами, що дає змогу зробити висновок про конкурентоспроможність технології 3D друку в даній області.

**Мета дослідження.** Розробка методики тестування робочих коліс насосів, виготовлених методом 3D друку з використанням різних технологій і матеріалів, зокрема CoPET, і встановлення оптимального процесу їх виготовлення для забезпечення необхідної міцності та довговічності.

**Методика експерименту.** Основна методика експерименту для даної статті полягає у створенні та тестуванні прототипів робочих коліс за допомогою 3D друку, а також використанні спеціального стенду (Рис.1) для перевірки зносостійкості цих коліс. Детальніше методика експерименту може бути описана наступним чином:

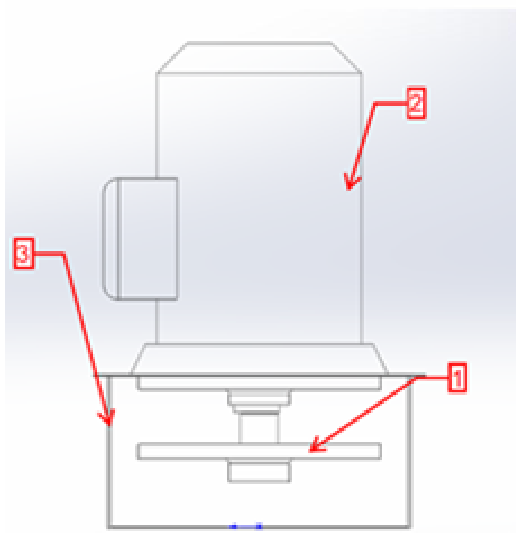
1. Створення 3D моделі робочих коліс.
2. Виготовлення прототипів робочих коліс за допомогою 3D друку:
  - Вибір матеріалу для друку (CoPET) [3].
  - Налаштування параметрів друку (положення робочого колеса відносно столу 3D принтера (Рис.2), друк горизонтально чи вертикально, друк з хімічною обробкою пластику та без неї).
  - Друк прототипів соплом 0.4 мм.
  - Обробка прототипів розчином дихлоретану.
3. Підготовка стенду для перевірки зносостійкості робочих коліс:
  - Заповнення циліндричної ємності абразивною робочою рідиною.
  - Занурення робочого колеса в робочу рідину.
  - Запуск електродвигуна для забезпечення обертання робочого колеса.
4. Тестування прототипів робочих коліс на стенді:
  - Протягом однієї години або до зруйнування колеса проводиться перевірка зносостійкості колеса за допомогою абразивної робочої рідини на стенді.
  - Запис результатів тестування для кожного прототипу робочого колеса, включаючи час тестування та ступінь зносу.
5. Аналіз результатів тестування та вибір оптимальної технології виготовлення прототипів робочих коліс:
  - Порівняння результатів тестування для кожного прототипу робочого колеса.
  - Вибір найбільш зносостійкого прототипу робочого колеса.

**Викладення основного матеріалу.** Основним матеріалом даної статті є дослідження доцільності використання технології 3D друку для створення прототипів робочих коліс насосного обладнання. Для цього запропоновано розробити стенд для перевірки зносу робочих коліс за рахунок застосування абразиву в робочу рідину.

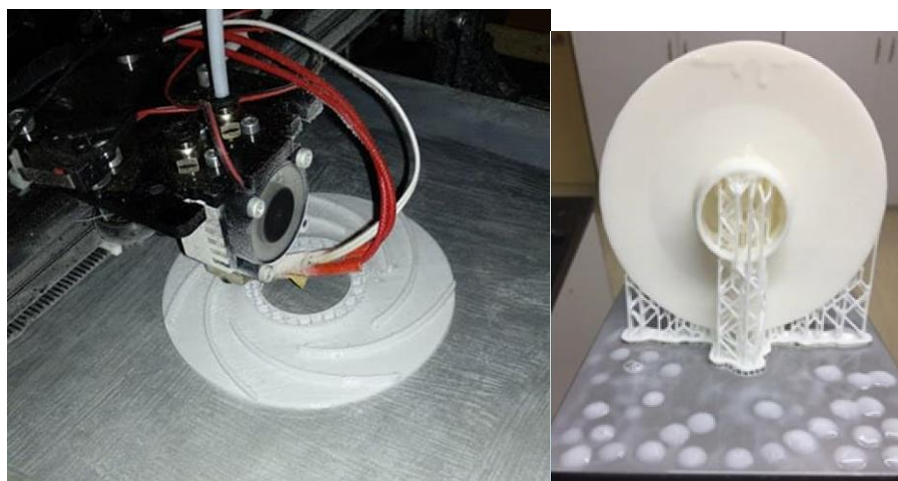
В цій статті розглянуто процес виготовлення прототипів робочих коліс з використанням технології 3D друку. Прототипи виготовлятимуться як суцільними (Рис.3а), так і з покривним диском, який буде друкуватися окремо (Рис.3б). Всі прототипи будуть виготовлені з CoPET. Позиціонування робочого колеса відносно столу 3D принтера буде відбуватися як горизонтально, так і вертикально [4].

Після друку прототипи будуть оброблюватися розчином дихлоретану (Рис.4), що дозволить зменшити шорсткість та заклеїти між собою шари пластику, підвищуючи міцність. Далі проведеться тестування прототипів на стенді, який дозволить оцінити їхню довговічність в умовах абразивного зносу.

Отримані результати дослідження дадуть змогу підібрати оптимальний процес виготовлення прототипів робочих коліс насосного обладнання, що в свою чергу може покращити ефективність та надійність роботи насосного обладнання.



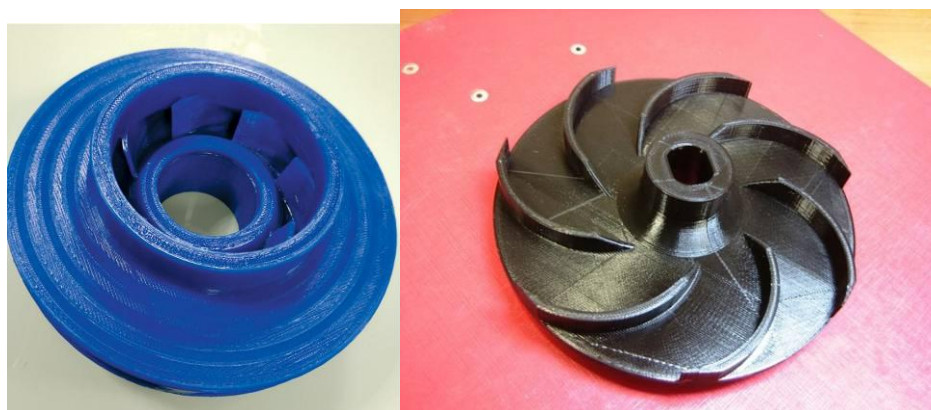
*Рис. 1. Схема випробувального стенду для прототипів робочих коліс*  
 1) робоче колесо; 2) електродвигун; 3) ємність з абразивною робочою рідиною



а)

б)

*Рис. 2. Позичіонування робочого колеса відносно столу 3D принтера*  
 а) горизонтально; б) вертикально.



а)

б)

*Рис. 3. Варіанти виготовлення робочих коліс методом 3D друку*  
 а) суцільне робоче колесо; б) покривний диск окремо.





Рис. 4. Результат обробки пластику дихлоретаном

**Висновки.** Виготовлення прототипів за допомогою 3D друку дозволяє провести експериментальні дослідження та перевірку ефективності робочих коліс перед їх виготовленням в серійному виробництві.

Таким чином, можна зробити висновок, що запропонована методика створення прототипів робочих коліс методом 3D друку та їх подальша перевірка на спеціальному стенді є важливим етапом у проектуванні насосного обладнання. Розроблений стенд дозволяє перевіряти знос робочих коліс за допомогою застосування абразиву в робочу рідину, що дозволяє підібрати оптимальну технологію виготовлення робочих коліс методом 3D друку. Застосування цієї методики може допомогти вирішити проблему з виготовленням складних геометричних форм робочих коліс, а також знизити час та витрати на їх виробництво.

**Список використаних джерел:**

1. Zolfagharian, A., Kouzani, A. Z., Khoo, S. Y., & Gibson, I. (2018). Strength and fracture toughness of 3D printed ABS material. *Additive Manufacturing*, 21, 190-196.
2. R. E. Starr, J. C. Starnes Jr., A. M. Wood, R. J. Jardine, J. A. Michopoulos, "Effect of FDM process parameters on the mechanical properties of ABS parts," *Additive Manufacturing*, vol. 19, pp. 81-91, 2018.
3. "Influence of Annealing on the Thermal and Mechanical Properties of Co-PET Parts Produced by Fused Filament Fabrication" (2020) автори: A. M. Leão, P. J. R. Gomes, R. F. Silva, та ін.
4. Jia, Z., Geng, P., Li, Y., Liu, X., & Xiong, Y. (2018). Investigation of Positioning Accuracy Improvement in FDM 3D Printing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(9-12), 2073-2083.

**Рецензент:**

**Ратушний Олександр Валерійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету.

N.O. Oliinyk, G.D. Ilnitska, G.A. Petasyuk, G.A. Bazaliy

## FEATURES OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF DIAMOND POWDER, AC20 GRADE, GRAIN 100/80, AND THE PRODUCTS OF ITS FLOTATION SEPARATION

*V. Bakul Institute for Superhard Materials National Academy of Sciences of Ukraine*

*The physico-mechanical characteristics of AC20 diamond powder with a grain size of 100/80 and the products of its flotation separation were studied. Separation was carried out in one stage. The work uses well-known methods of researching synthetic diamond powders. Static strength was investigated using the DA-2 device, morphometric characteristics were investigated using the DiaInspect. OSM device. It was established that the use of flotation separation of AC20 diamond powder with a grain size of 100/80 allows to obtain diamond powder with an increased strength index under static compression by 23.8%, increased uniformity in strength by 25.0%, a significantly reduced proportion of impurities and inclusions, and morphometric characteristics close to the original powder.*

*Key words: synthetic diamond grinding powder, flotation, strength, morphometric characteristics*

Н.О.Олійник, Г.Д. Ільницька, Г.А. Петасюк, Г.А.Базалій

## ОСОБЛИВОСТІ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОШКУ АЛМАЗУ МАРКИ АС20 ЗЕРНИСТОСТІ 100/80 ТА ПРОДУКТІВ ЙОГО ФЛОТАЦІЙНОГО РОЗДІЛЕННЯ

*Досліджено фізико-механічні характеристики порошку алмазу марки АС20 зернистості 100/80 та продуктів його флотаційного розділення. Розділення проведено в одну стадію. В роботі використано відомі методики дослідження порошків синтетичного алмазу. Статичну міцність досліджено з використанням приладу ДА-2, морфометричні характеристики досліджено з використанням приладу DiaInspect. OSM. Встановлено, що застосування флотаційного розділення алмазного порошку марки АС20 зернистості 100/80 дозволяє отримати порошок алмазу з підвищеним показником міцності при статичному стисканні на 23,8 %, підвищеною однорідністю за міцністю на 25,0 %, суттєво зниженою часткою домішок та включень, морфометричними характеристиками близькими до вихідного порошку.*

*Ключові слова: порошок синтетичного алмазу, флотація, міцність, морфометричні характеристики*

### Introduction

Modern engineering technologies require the use of high-quality and uniformity synthetic diamond powders.

It is known that the quality of diamond powders is mainly determined by the conditions of synthesis, the chemical and physical treatments used in the extraction of diamond raw materials and the production of powders have a significant impact on them [1].

Improving the quality of the powder is achieved by various methods of its sorting. For example, flotation separation (flotation) is used.

Doctor of Technical Sciences Bogatyreva H.P. conducted and published the most famous studies devoted to the application of the method of flotation separation of synthetic diamond powders. It has been shown that using the flotation distribution of diamond particles it is possible to sort synthetic diamond powder by strength [2].

It is known that the process of flotation separation is based on differences in the energy state of the surface of powder particles. The process is carried out with the use of a small amount of flotation reagents (Morah's salt solution as an agitator and fatty acid emulsion as a collector). Diamond particles with a smoother (less energetic) surface adsorb apolar fatty acid dimers due to Van der Waals forces.

Particles with a developed defective surface (more energetic) - adsorb polar dimers due to "hydrogen bonding".

As a result, smoother particles fall into the foam product, and rough particles into the chamber.

The presence of iron ions of Mohr's salt in the pulp increases the selectivity of fatty acid action due to greater adsorption of iron ions on the rough surface of diamond particles, which contributes to the adsorption of polar dimers and fatty acid ions [2, 3].

The method of flotation separation is used for powders with an average particle size of 0.1–0.04 mm and less than 100  $\mu\text{m}$  [4].

A significant interest of the work lies in the study of the characteristics and properties of synthetic diamond powders, which are used in abrasive tools and can be adjusted by the flotation method [2, 5, 6].



The purpose of the work is to study the physical and mechanical characteristics of the products of flotation separation of diamond powder, which is intended for use in abrasive tools.

### Research methodology

The diamond powder synthesized in the Ni-Mn-C system was studied. Powder grade - AC20, grain size 100/80

The products (foam and chamber) obtained as a result of flotation separation of the original powder were studied.

The process is carried out in one stage. Separation products are chemically purified from flotation reagents. In the paper, the strength indicators were determined during static compression according to the DSTU 3292-9 method using the DA-2 device [7].

Well-known methods, which were developed at the V.M. Bakul Institute of Information Technology, determined the size distribution of powder particles, the specific magnetic susceptibility of the powder ( $\chi$ ,  $\cdot 10^{-8}$ , m<sup>3</sup>/kg) and the mass fraction of impurities in the form of non-combustible residue (% by mass).

Morphometric characteristics were determined using the DiaInspect.OSM device [8].

The minimum (Fmin,  $\mu\text{m}$ ) and maximum (Fmax,  $\mu\text{m}$ ) Feret diameters, grain height (H), grain projection roughness (Rg), external specific surface index (Fpt., m<sup>2</sup>/kg) were determined.

The conceptual meaning of these characteristics is presented in the methodological materials of the manufacturer of the DiaInspect.OSM device [8] and in the publications of the authors of this article, for example, in [3, 9].

### Results of the work and their discussion.

The results of the study of the distribution of particles of the original powder and flotation products by size are presented in Fig. 1.

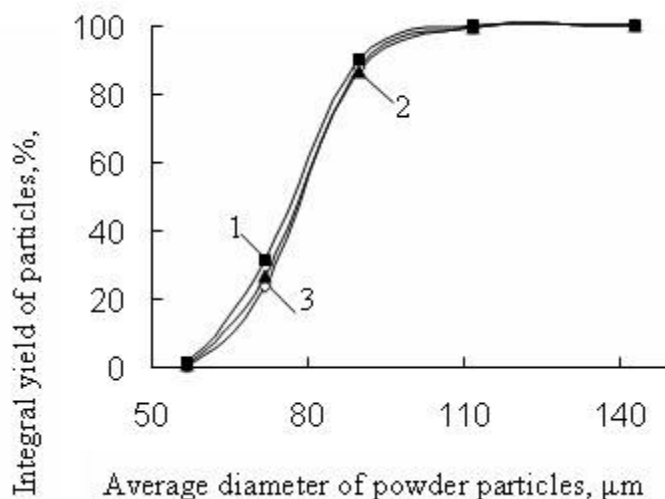


Fig. 1. Integral distribution of particles of the initial powder and flotation products (1 - chamber product, 2 - foam product, 3 - initial powder) by size.

It follows from the results (Fig. 1) that the size distribution of the particles of the original powder and flotation products is almost completely different.

The interval of distribution of diamond particles by size is 30-160 microns. The largest number of particles of the original powder (99.32%), foam product (99.01%), chamber product (98.96%) is in the range of 80-125 microns.

Physico-mechanical and morphometric characteristics of the original powder and the products of its flotation separation are given in table. 1.

The results show that the number of particles in the foam product is much smaller than in the chamber product. The mass of foam and chamber products differs by 6.5 times.

Compared to the chamber product, the foam product is characterized by a reduced specific surface area, a low content of impurities and inclusions, increased strength under static compression and uniformity in strength.

The morphometric characteristics of the products of flotation distribution are close in value to the characteristics of the original powder.

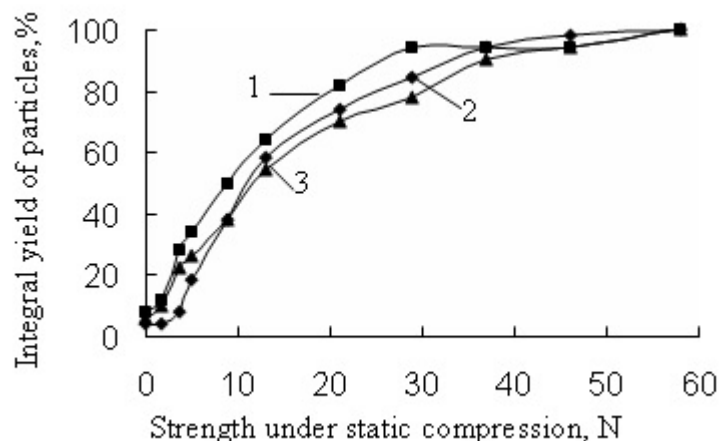
Distribution by grain strength during static compression of particles of the original powder and flotation products is presented in Fig. 2.

It follows from the results that the distribution of particles of the original powder and products of flotation distribution are close.

Table 1.

**Characteristics of the initial powder of the AC20 grade with a grain size of 100/80 and the products of its flotation separation**

Indexes	AC20 diamond powder, grain size 100/80	Powder separation products	
		Foam product	Chamber product
Mass fraction of the powder sample, %	100	13,41	86,55
Specific magnetic susceptibility, (average value), $\chi_s \cdot 10^{-8}$ m <sup>3</sup> /kg	0,810	0,002	0,780
Mass fraction of impurities - non-combustible residue, % by mass	1,48	0,20	0,99
Strength index under static compression, N	13,0 [6]	16,5	12,5
Uniformity in strength, %	16,0	20,0	14,0
F <sub>max</sub> , $\mu$ m (average value / uniformity of the indicator)	133,71 / 0,692	137,74 / 0,7197	138,59 / 0,7211
F <sub>min</sub> , $\mu$ m (average value / uniformity of the indicator)	102,83/0,7017	104,63 / 0,7258	105,09 / 0,7154
R <sub>g</sub> , (average value / of the indicator)	1,0569 / 0,7588	1,0615 / 0,7450	1,0609 / 0,7317
F <sub>pt.</sub> , m <sup>2</sup> / kg (average value)	20,70	21,90	21,23



**Fig. 2. Integral distribution of particles of the original powder and flotation products (1 - chamber product, 2 - foam product, 3 - original powder) according to the strength of grains during static compression**

The mathematical linear approximation of the distribution curves shows that the tangent of the slope angle of the curves differs. The tangent of the angle of inclination of the distribution of the foam product is 1.86, the chamber product is 1.60, and the initial powder is 1.68. Therefore, the distribution of the powder particles of the foam product according to the strength of the grains during static compression is the most uniform.

#### Conclusions

The application of flotation separation of AC20 diamond powder with a grain size of 100/80 allows to obtain a diamond powder characterized by an increased strength index under static compression by

23.8%, an increased homogeneity in strength by 25.0%, a significantly reduced number of inclusions compared to the initial values powder.

Compared to the chamber product, the foam product is characterized by a reduced specific surface area, a low content of impurities and inclusions, increased strength under static compression and uniformity in strength.

The morphometric characteristics of the products of flotation distribution are close in value to the characteristics of the original powder. The distribution of particles of the powder of the foam product according to the strength of the grains during static compression is the most uniform.

### References

1. Bogatyreva, G.P., Oleinik, N.A., Nevstruev, G.F., Il'nitskaya, G.D., Basaliy, G.A. (2004) Vliyanie sposobov dezintegratsiialmazno-grafitovogo materiala na pokazateli kachestva almaznogo syr'ya i poroshkov [The influence of methods of disintegration of diamond-graphite material on the quality indicators of diamond raw materials and powders]. *Porodorazrushayushchiy i metalloobrabatyvayushchiy instrument – tekhnika i tekhnologiya yego izgotovleniya i primeneniya – Rock cutting and metalworking tools - equipment and technology of its manufacture and application* (5nd Issue, p. 169–173). ISM im. V.N. Bakulia NAN Ukrainy.
2. Bogatyreva, G.P. (1972). Sortirovka almazov po prochnosti flotatsiyey [Sorting of diamonds by strength by flotation]. *J. Sinteticheskiye almazy – Synthetic diamonds*, (3), p. 23–25.
3. Bogatyreva, G.P., Petasyuk, G.A., Bazalii, G.A., Shamraeva, V.S. (2009). On Morphometric Uniformity of Diamond Micron Powders. *J. Superhard Materials*, 31(2), p. 126–134.
4. Bogdanov, O.S., & Olevskiy, V.A. (Eds.). (1982). *Podgotovitel'nyye protsessy: Spravochnik po obogashcheniyu rud [Preparatory processes: Handbook of ore dressing]*. Nedra.
5. Oliynyk, N.O., Ilynska, G.D., Bazaliy, G.A. (2023). Zmina fizyko-mekhanichnykh kharakterystyk shlifporoshku almazu marky AS20 zernystosti 100/80 pid vplyvom flotatsiynoho rozdilennya [Change in the physical and mechanical characteristics of diamond grinding powder of the AS20 grade of 100/80 under the influence of flotation separation]. *Suchasni pytannya vyrobnytstva ta remontu v promyslovosti i na transporti – Modern issues of production and repair in industry and transport* (p. 81–83). ATM of Ukraine.
6. *Poroshky almazni syntetychni. Zahalni tekhnichni umovy [Synthetic diamond powders. General technical conditions]*. (DSTU 3292-95).(1997). Kyiv: Derzhstandart of Ukraine.
7. Loshak, M., Aleksandrova, L., Kosenchuk, T. (2013). Mitsnist krystaliv almazu za statychnoho navantazhennya [Strength of diamond crystals under static load]. *Metrolohiya ta prylady – Metrology and instruments*, 2 (40). P. 11–15.
8. DiaInspect.OSM. Automated particle analysis for superabrasives and surface analysis 2010. Operation guide Version 1.2.8. <https://vdiamant.de/languages/diainspect-osm.html>.
9. Petasyuk G.A., Bogatyreva G.P. (2000). Extrapolation-Analytical Method for Determination of Outer Specific Surface of Powders of Superhard Materials. *Journal of superhard materials*. 30 (6) 375–383.

**Reviewer:** Pavlo BARVITSKY, candidate of technical sciences, researcher at researcher at the V. Bakul Institute for Superhard Materials National Academy of Sciences of Ukraine.

**I.V. Kruglyak, B.P. Sereda**

*Dnipro State Technical University*

## **THE RELIABILITY OF THE GEARS OF THE PRESSURE BLOOMING MECHANISM**

*The operations of strengthening of cantilever intermediate and central gears, which are constantly in engagement, are considered, and methods of forming a protective layer obtained using composite saturating charges.*

*Keywords: cantilever gear, reliability, surface hardening, hardness, wear resistance*

**І.В. Кругляк, Б.П. Серєда**

## **ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС НАТИСКНОГО МЕХАНІЗМУ БЛЮМІНГУ**

*Розглянуто операції зміцнення консольних, проміжних та центральних шестерень, що постійно знаходяться в зачепленні, намічені методи формування захисного шару, отриманого з використанням композиційних насичуючих середовищ.*

*Ключові слова: консольна шестерня, надійність, поверхнєве зміцнення, твердість, зносостійкість.*

### **Statement of the problem.**

Strengthening of parts of machines and mechanisms in industrial engineering for metallurgical production is to ensure the reliability and durability of parts of the blooming press mechanism. The wear resistance of the gears was increased using composite saturating media, which provide minimal hardening costs and significantly reduce energy consumption.

The design and principle of operation of the high-speed pushing mechanisms shown on the blooming consists of: screw drive and is driven by two flanged vertical electric motors with a capacity of 640 kW each. The cantilever gears are mounted on the motor shafts. The intermediate and center gears are constantly engaged, which ensures synchronized movement of the screws. In order to improve the reliability of gears, it is necessary to strengthen their surface layer, which is obtained with minimal thermo-kinetic load and increased surface hardness, which directly affects their wear resistance.

Analysis of the latest research and publications.

It is possible to change the properties of the surface in the necessary direction by various methods [1–4]. The existing methods of hardening can be divided into two kinds:

- application on the surface of a new material with the necessary properties;
- changing the composition of the surface layer of the metal, alloying with boron, titanium, tungsten and other elements that provide the desired change in properties.

In the first case, well-known coatings such as galvanic, chemical and others are used. Non-metallic materials are also applied to the surface of metal alloys.

In the second case, the surface layers of the metal are subjected to diffusion chemical heat treatment (CHT), which results in the formation of a new alloy composition on the surface of the product, different from the core of the product [5].

Purpose of the work is to process gears with minimal time for the formation of protective layers and thermo-kinetic load on the part to increase their reliability.

### **Materials and research results**

The study was carried out on the samples of technical iron and steel (AISI/ASTM) 3140, C102,1045 and W108 in diameter of 20 mm and width of 10 mm. The composition of complex functionally active charge consisted of: energy composition, technical boron, aluminum ASD-1, aluminum oxide, silicon Cr1, titanium of ПТХ5-1 brand, tungsten powder and gas-transport agent, which was composed of ammonium chloride – NH<sub>4</sub>Cl and sodium fluoride – NaF.

*Study of wear resistance of protective layers.* conducted on the machine friction SMT-1 conducted according to GOST 23.224–86, DSTU 336–96 (GOST 30431–96) in terms of sliding friction with lubrication with automotive tractor oil (GOST 858 –78 without the additive) the scheme roller – pad, at

speed of counterbody (roller) 500 rpm. Counterbody was made of U8A steel with subsequent hardening and low tempering to hardness of 61 ... 63 NRC. The coatings were applied to the test piece.

After coating, the sample was quenched from temperature  $t_z = 820$  °C in water and tempered at  $t_p = 180$  °C. The load on the test specimen, which remained stationary during the tests, was:  $P = 500$  N. During the first 30 minutes, the specimens were preconditioned and then tested for 5 hours.

The type and design of the pressing mechanisms depends on the purpose of the rolling mill [6]. For example, crimping and heavy plate mills are equipped with high-speed pressing mechanisms that lower or raise the top roll at speeds ranging from 10.0 (TLS sheet stands) to 300 mm/s (large blooms) during pauses between passes. On thin strip mills, in addition to setup, the pressing device regulates the gap between the rolls, preventing the rolls from being of different thicknesses along their length, which requires high accuracy of roll positioning during rolling. For this purpose, such mills are equipped with low-speed NMs. The speeds of the pressure screws do not exceed 0.1–1.0 mm/s for hot rolling quarto stands, 0.05–0.15 mm/s for cold rolling, and 0.005–0.8 mm/s for multi-roll mills. The high-speed pressing mechanism is designed to provide a large movement of the top roll up to 1600 mm.

On the 1300 blooming machine, the screws are driven by two flanged vertical electric motors with a capacity of 640 kW each. The cantilever gears are mounted on the motor shafts. The intermediate and central gears are constantly in gear, which ensures synchronized movement of the screws that move in the nuts mounted in the cage frame. To ensure that the cushion can be moved with one screw if necessary, for example, to eliminate roll skew, a hydraulic cylinder is used to disengage the satellite gear from the pinion gear. The advantages of the considered designs compared to worm gears are higher efficiency and ease of manufacturing gears and reliability in operation; the disadvantage is an increase in the height of the stand.

The blooming mill 1500 is equipped with a quick-acting pressure mechanism. Each pressure screw is driven by a 640 kW DC motor (700 rpm) through a gear  $i = 3.08$ , the speed of the pressure screw to 180 mm/s. The maximum force on the screw when rolling 12 MN. The total weight of pushing mechanisms of the working stand is 88.7 tons [7].

Synchronization of rotation of both pressure screws is provided by the presence of parasite gears, which are in meshing with the work gears; when adjusting the position of the upper roll one of the parasite gears is disengaged from the meshing by means of a hydraulic cylinder. At the top end of the pressure screw installed device for measuring wear on the thread of the pressure nut, parasite gears that are meshed with the work gears; when adjusting the position of the upper roll one of the parasite gears is removed from the meshing with the help of a hydraulic cylinder.

Powders of chromium oxide, aluminum oxide, silicon oxide, boron powder, aluminum powder, crystalline silicon, ammonium chloride, sodium fluoride were used to obtain siliconized coatings, alloyed with chrome, aluminum and boron.

The use of the silicon component (CrS) leads to a double ignition due to the beginning of the reaction of reduction of aluminum, silicon oxide. The use of CrS leads to higher  $t_{max}$ , the optimum is the introduction of 7.5% wt. of silicon or 25% wt. of CrS.

Пр With up to 8% wt. of crystalline silicon in the mixture, the coatings consist of iron borides  $(Fe, Cr, Al, Si)B$  and  $(Fe, Cr, Al, Si)_2B$  doped with silicon.

As the silicon content in the mixture increases, above 15%, iron silicides appear in the layer, and the amount of high boride phase in the total layer thickness decreases. The formation of a borated layer begins due to the formation of a solid solution of boron, silicon, aluminum, and chromium in iron ( $\alpha$ -phase).

The silicon content on the surface is 0.3–0.42%, and in the  $Fe_2B$  phase 6.7–7.3%. Carbon is pushed deep into the sample, which leads to the formation of boron carbide phase - boride cementite type  $Fe_3B_{0.2}C_{0.8}$ .

During borosilicification of 3140 and W108 steels a solid boride layer is formed that has practically no needle structure; below it equiaxed grains of  $Fe_2B$  evenly distributed in the layer of siliceous ferrite are located. As the amount of boron in the SHS mixture increases, the continuity of the layer decreases.

Eutectic silicized layers doped with chromium, aluminum, and boron were obtained at temperatures above 1250 °C. The change in the layer structure occurs due to the different cooling rate of

the reactor. Changing the value of  $V_i$  obtained coatings, the microstructure of which has a characteristic honeycomb structure. At  $V_i = 15$  the microstructure has a dendritic shape of herringbone type. The direction of the dendrite branches has a radial character, which is connected with the direction of the cooling flow. The chromium is predominantly located in the surface zone, aluminum along the needles of the  $Fe_2B$  boride. This arrangement of chromium and aluminum allows the coatings to resist well the effects of corrosive and oxidizing environments.

The microhardness of multicomponent siliconized layers alloyed with aluminum and chromium on technical iron and steel C102 is in the 7100–8200 MPa range, on steel 1045 and W108 it reaches 15000–16800 MPa, which is due to the formation of chromium carbide phases like  $(Cr,Fe)_3C_2$ .

The surface microhardness of multicomponent boron-alloyed silicified layers is 20000–22000 MPa, which is associated with the presence of the  $FeB$  phase. Microhardness of the alloyed  $Fe_2B$  phase is 15000–16000 MPa. The obtained results indicate that silicon is displaced from the boride zone into the  $\alpha$  – phase sublayer, doping only the  $Fe_2B$  phase. It has a stepped character that can be explained by the phase composition of the layer determined by the type of borides.

Microhardness of the multicomponent silicized layer alloyed with chrome, aluminum and titanium on technical iron and steel C102 changes from 1800–2700 MPa; on the surface of steel 3140, 1045 and W108 from 19000–21000 MPa. Microhardness of silicide  $(Fe, Ti, Al, Cr)_5Si_3$  is 9500–10500 MPa, and  $\alpha$ -hard solution of titanium, silicon, aluminum and chromium in  $\alpha$  – iron 2500–3700 MPa.

The microhardness on the substrate with high carbon content has a step character, which is determined by the phase composition of the layer in which the titanium carbide is observed. While on the substrates with lower carbon content it has smoothly decreasing character.

Microhardness of the multicomponent siliconized layers alloyed with chrome, aluminum and tungsten on the surface of technical iron and steel C102 makes 2500–3000 MPa, on 3140, 1045 and W108 12500–14000 MPa. The microhardness on a substrate with high carbon content has not so pronounced step character as at alloying with chromium, aluminum and titanium that is determined by lower hardness of tungsten carbide. On substrates with lower carbon content, the curve does not have pronounced gradient drops.

Wear resistance tests were carried out on specimens made of steel 3140, 1045 and W108 ( $t_n = 1000$  °C,  $\tau_v = 60$  min) subjected to quenching (820–850 °C in water) and low tempering (200 °C) after saturation. For comparative analysis we used samples from those subjected to chemical treatment under steady-state isothermal conditions.

Tests on friction machine SMT-1 (sliding friction) showed that the best wear resistance of the considered coatings have siliconized layers, alloyed with boron, chromium and aluminum. Their wear resistance is 1.8 times higher than that of the samples with the base coating. The siliconized layers alloyed with Cr, Al have wear resistance 1.3 times higher, titanium 1.6 times higher and tungsten 1.1 times higher. As it is visible, wear resistance for the considered pairs of a friction and test conditions depends on microhardness of a surface layer.

Tests on the MT-5 friction machine (friction with impact) showed that the best wear resistance has siliconized layers, alloyed Cr, Al and W, which wore 1.6 times less than the base coating. Alloyed Cr, Al 1.5 times, Cr, Al and W 1.1 times, and alloyed Cr, Al and Ti 1.2 times less. As can be seen, under this test scheme, the wear resistance of contacting pairs is determined by the reduced total score of brittle fractur.

### Conclusions.

1. The microhardness of multicomponent silicized layers obtained under conditions of thermal self-ignition on the gears of the pressure mechanism increases with increasing carbon content in the substrate material, which is associated with the formation of carbide phases like  $Cr_3C_2$ ,  $(Ti,Fe)C$ . So at alloying of siliconized layers with boron the surface microhardness makes 20000–22000 MPa that is connected with formation of phase  $FeB$ .

2. It was established that alloying of siliconized layers with chrome and aluminum increases their wear resistance 1.3–1.5 times; with chrome, aluminum and boron – 1,1–1,4 times in comparison with a base article. Wear resistance when tested on the CMT-1 friction machine for the friction pairs under

consideration depends on the microhardness of the surface layer. Under impact test conditions on the MT-5 friction machine the wear resistance is determined by the brittleness of the layer.

3. In a series of studies, the highest value of total brittle fracture score  $Z_{100}$  is observed for multicomponent siliconized layers alloyed with chromium, aluminum and boron. In comparison with the basic coating, the reduced total brittle fracture score  $Z_{100}$  of the developed coatings is 1.3–1.5 times lower, which is explained by a shorter time of temperature influence and complex alloying of the formed phases.

#### List of references.

1. Sereda B.P., Kalinina N.E., Kruglyak I.V. Surface hardening of materials: monograph.: Zaporizhzhia: ZDIA, 2004. – 230 p.
2. Sereda B.P., Baskevych A.S., Kruglyak I.V., Kruglyak D.O., Sereda D.B. Surface hardening of structural materials using composite saturating media: monograph: DSTU. 2019. – 246
3. Sereda B.P., Bannikov L.P., Nesterenko S.V., Kruglyak I.V., Gaidaienko O.S., Sereda D.B. Surface hardening of materials working under conditions of complex influence of aggressive substances: monograph: DSTU. 2019. – 173 c.
4. Sereda B.P., Turpak S.M., Kruglyak I.V., Ostrohlyad O.O., Mukovska D., Sereda D.B., Kruglyak D.O. Increasing the operational stability and efficiency of industrial transport in the conditions of a metallurgical enterprise: monograph: DSTU. 2021. – 265 c.
5. Lakhtyn Y.M. Metallurgy and heat treatment of metals. – Moscow: Metallurgy, 1994. – p. 494.
6. Prishchip M.G. Equipment of rolling shops. A textbook for students of ZGIA metallurgical specialties of full-time and part-time education – Zaporizhzhia: ZIA, 2016. – 116 p.
7. Electronic. Resource [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/505014/mod\\_resource/content/1/%D0%93%D0%BB3.pdf](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/505014/mod_resource/content/1/%D0%93%D0%BB3.pdf)

А.О. Мартинович, П.О. Гуменюк

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

## МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ РУХУ НА КЕРОВАНИХ ПЕРЕХРЕСТЯХ

*Робота присвячена моделюванню транспортних потоків на керованих перехрестях, зокрема вивчення їх динаміки, взаємодії між транспортними засобами, впливу сигналів світлофорів та стратегій керування рухом на ефективність перехрестя. Розроблені моделі дозволять прогнозувати ефективність різних стратегій керування, виявляти проблемні ситуації та шукати шляхи їх усунення. Результати моделювання можуть бути використані для покращення руху на керованих перехрестях у реальних умовах. Це може призвести до зменшення заторів, затримок та покращення пропускної здатності перехрестя, що сприятиме підвищенню якості руху та зручності для водіїв та пасажирів. Крім того, отримані результати можуть бути використані при проектуванні та плануванні розвитку транспортних мереж та інфраструктури.*

*Ключові слова:* моделювання, Python, транспортні потоки, регулювання, перехрестя.

A. Martynovych, P. Humeniuk

## MODELING OF TRAFFIC FLOWS IN THE STUDY OF TRAFFIC AT CONTROLLED INTERSECTIONS

*This work is devoted to the modeling of traffic flows at controlled intersections, in particular, the study of their dynamics, interaction between vehicles, the impact of traffic signals and traffic control strategies on the efficiency of the intersection. The developed models will make it possible to predict the effectiveness of various control strategies, identify problem situations and look for ways to eliminate them. The modeling results can be used to improve traffic at controlled intersections in real-world conditions. This can lead to reduced congestion, delays, and improved intersection capacity, which will improve traffic quality and convenience for drivers and passengers. In addition, the results obtained can be used in the design and planning of transport networks and infrastructure development.*

*Key words:* modeling, Python, traffic flows, regulation, intersection.

**Постановка проблеми.** Розвиток міст зумовлює зростання кількості транспортних засобів, що призводить до збільшення транспортних потоків і підвищення навантаження на керовані перехрестя. Відправна точка вирішення проблеми полягає в розумному керуванні рухом, що дозволить забезпечити максимальну ефективність транспортної системи і зменшити затримки.

Моделювання транспортних потоків на регульованих перехрестях є важливою темою, що має значну актуальність в галузі автоматизації управління. Регульовані перехрестя, як правило, обладнані світлофорами або знаками зупинки, які управляють потоком транспортних засобів і пішоходів, і ефективність цих засобів регулювання може мати значний вплив на затори, безпеку та екологічну стійкість.

Розробляючи точні моделі транспортних потоків на регульованих перехрестях, можна краще зрозуміти фактори, які сприяють заторам і затримкам, і визначити стратегії для поліпшення транспортного потоку і скорочення часу в дорозі. Ці моделі також можна використовувати для оцінки впливу різних стратегій управління, таких як оптимізація часу сигналів світлофора або впровадження інтелектуальних транспортних систем.

Крім того, моделювання транспортних потоків на регульованих перехрестях важливе для проектування та планування транспортної інфраструктури. Ці моделі можна використовувати для прогнозування майбутніх обсягів руху і планування відповідної кількості та розташування перехресть, а також для визначення оптимального дизайну перехресть для забезпечення максимальної безпеки та ефективності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз потоків транспорту на керованих перехрестях допомагає зрозуміти, як розподіляється рух на перехресті, виявити проблеми перевантаження, заторів або недостатньої потужності на перехресті [1]. Одним з підходів до дослідження транспортних потоків на керованих перехрестях є імітаційне моделювання. Ці моделі дозволяють створити віртуальну модель перехрестя, де можна симулювати різні сценарії руху транспорту та вивчити їх вплив на пропускну здатність, час очікування та інші показники ефективності [2-4].



Імітаційні моделі зазвичай базуються на детальному моделюванні поведінки окремих транспортних засобів, їх реакції на сигнали світлофорів, правила дорожнього руху та інші фактори. Ці моделі враховують різні змінні, такі як густина руху, типи транспортних засобів, швидкість руху, поведінку водіїв тощо. Вони можуть бути використані для тестування різних сценаріїв регулювання світлофорів, встановлення пріоритетів руху, оптимізації сигналізації та інших аспектів керування рухом на перехрестях.

Сучасний рівень моделювання руху на керованих перехрестях характеризується використанням мікросимуляції та врахування розуміння поведінки водіїв. Мікросимуляція є потужним інструментом для моделювання руху транспорту на перехрестях. Вона враховує поведінку окремих транспортних засобів та пішоходів, їх взаємодію та реакцію на зміни у рухових умовах. Це дозволяє отримати докладні дані про пропускну спроможність, швидкість руху, затримки та інші параметри на перехрестях. Сучасні моделі враховують можливість водіїв змінювати смуги руху на перехрестях, що впливає на потік транспорту та пропускну спроможністьщо дає можливість точніше відтворювати реальні умови руху на перехрестях.

Моделі враховують розміщення транспортних засобів, пішоходів та інших учасників руху на перехрестях. Це дозволяє аналізувати взаємодію між ними та визначати можливі конфліктні ситуації. Деякі сучасні моделі відтворюють індивідуальні особливості водіїв, такі як їхні навички, рівень досвіду, поведінку та прийняття рішень, що дозволяє точніше відтворювати реальну ситуацію на дорозі та аналізувати вплив цих факторів на рух транспорту.

Майбутнє моделювання руху на керованих перехрестях характеризується такими тенденціями, як використання штучного інтелекту (ШІ), використання даних в реальному часі, розвиток системи "розумних" перехрестів та впровадження екологічних аспектів.

Існують спеціалізовані програмні засоби для моделювання транспортних потоків на керованих перехрестях, наприклад, AIMSUN, VISSIM, PARAMICS [5-7], однак вони є досить складними у використанні і вони є комерційним програмним забезпеченням, що може вимагати значних витрат.

**Постановка завдань.** Метою роботи є моделювання транспортних потоків при дослідженні руху на керованих перехрестях, а також застосування комп'ютерного моделювання для аналізу та оптимізації транспортних потоків.

**Викладення основного матеріалу.** Запропонована модель проїзду перехрестя включає чотири сценарії.

**Моделювання проїзду перехрестя зі світлофором окремими автомобілями.** Моделюється ситуація, коли окремі автомобілі прибувають до світлофора протягом 1-хвилинних інтервалів і обчислюється середній час очікування автомобілів.

Час прибуття автомобілів моделюємо, як рівномірно розподілену випадкову величину на інтервалі  $[0, 60]$  (тобто кожен окремий автомобіль має однакову ймовірність прибути у будь-який момент часу протягом хвилини).

Проведемо симуляції для значення greenTime (час зеленого кольору на світлофорі), починаючи з 0.6 секунди і з кроком 0.2 секунди (до 59.4 секунди) і для кожного значення greenTime обчислимо середнє значення для 20 незалежних прогонів моделі (прибуття автомобілів). Залежність очікування однією машиною від відношення часу зеленого кольору до загального часу світлофора до загального часу світлофора наведена на рисунку 1.

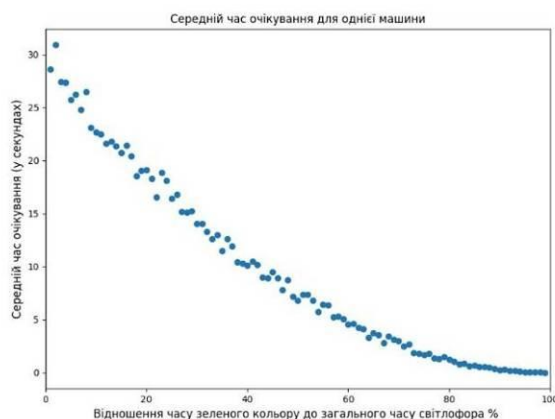


Рис. 1. Залежність очікування однією машиною від відношення часу зеленого кольору до загального часу світлофора.

З графіка видно, що коли відношення часу зеленого кольору до загального часу світлофора (greenTime %) низьке, середній час очікування становить приблизно 30 секунд. Так відбувається, оскільки загальний час червоного кольору становить близько 60 секунд, а очікуваний час прибуття автомобіля - 30 секунд, отже, в середньому кожен автомобіль має очікувати близько 30 секунд до того, як світлофор знову загориться зеленим.

Аналогічно, коли відношення часу зеленого та червоного кольору становить 50-50, середній час очікування знаходиться між 5 та 10 секундами. В цьому випадку ми можемо очікувати, що половина автомобілів прибуває між 0-30 секунд з часом очікування 0, а інша половина прибуває між 30-60 секунд з середнім часом очікування 15 секунд, що веде до загального середнього часу очікування 7,5 секунд.

Нарешті, коли світлофор майже все час вмикає зелений колір, середній час очікування становить близько 0 секунд, як і очікувалося.

**Моделювання проїзду перехрестя зі світлофором транспортним потоком.** Автомобілі, що прибувають, розглядаємо, як випадкову змінну Пуассона, і знову розглядаємо середній час очікування автомобіля на основі трьох змінних:

1. Швидкість прибуття автомобілів: від 2 до 38 за хвилину.
2. Частка зеленого часу (%) від 60-секундного інтервалу (світлофор зелений).
3. Швидкість пропуску автомобіля: кількість автомобілів, які можуть проїхати на світло за секунду, коли горить зелене світло.

Визначаємо функцію `calculateAverageWait(numcars, limit, redTime)`, яка обчислює середній час очікування для автомобілів, враховуючи кількість автомобілів, що прибули, ліміт автомобілів, які можуть проїхати через світлофор за секунду і час червоного світла.

Встановлюємо три різні типи змінних: час зеленого світла, швидкість прибуття автомобілів і посекундна швидкість для автомобілів. Визначаємо `gateVals` як список можливих значень швидкості прибуття автомобілів (від 2 до 40, з кроком 2), `passVals` як список можливих значень кількості автомобілів, які можуть проїхати через світлофор за секунду (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5), і `grVals` як список можливих значень відсотка зеленого світла від часу світлофора (0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7).

Проводимо дві різні симуляції з використанням цих змінних:

- перша симуляція змінює швидкість прибуття автомобілів та відсоток зеленого світла у часі роботи світлофора;
- друга симуляція змінює швидкість прибуття автомобілів і швидкість, з якою вони можуть проїхати через світлофор (транспортний потік).

Результати моделювання швидкості прибуття автомобілів та відсотку зеленого світла у часі роботи світлофора представлені на рисунку 2.

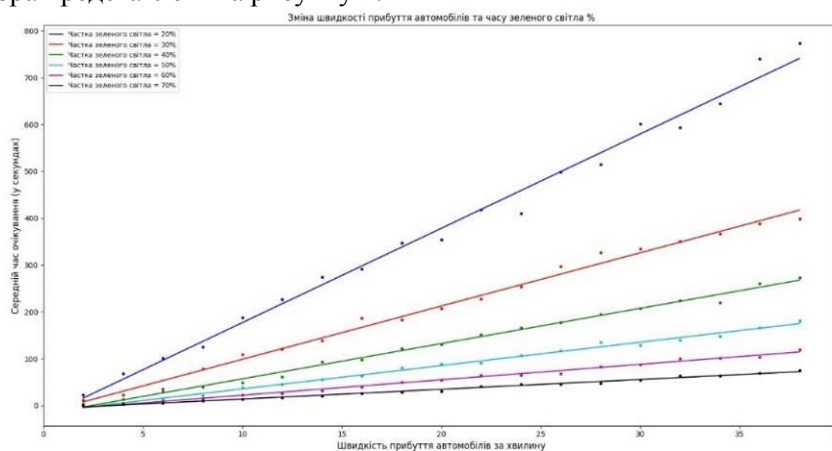


Рис. 2. Залежність часу очікування проїзду перехрестя зі світлофором від частки зеленого світла та швидкості прибуття автомобілів.

Коли автомобілі прибувають швидше, середній час очікування збільшується. Це означає, що чим більше автомобілів прибуває за певний період часу, тим довше автомобілі мають чекати перед світлофором. Однак, градієнт або темп зростання середнього часу очікування залежить від

відсоткового співвідношення між часом, коли світиться зелене світло, і часом, коли світиться червоне світло.

Наприклад, якщо зелене світло горить протягом 60% часу, а червоне світло - протягом 40% часу, то обмеження на кількість автомобілів, які можуть проїхати за зеленого світла, буде більшим, ніж у випадку, коли зелене світло горить лише 30% часу. Таким чином, чим більший відсоток зеленого світла, тим більше автомобілів можуть проїхати за цей час, і менше автомобілів мають чекати.

Отже, градієнт або швидкість зростання середнього часу очікування залежить від того, наскільки тривало горить зелене світло.

Для обчислення середнього часу очікування для групи автомобілів з різною швидкістю прибуття та іншими змінними використовується функція `calculateAverageWait`. Потім будується графік результатів за допомогою Matplotlib (рис. 3).

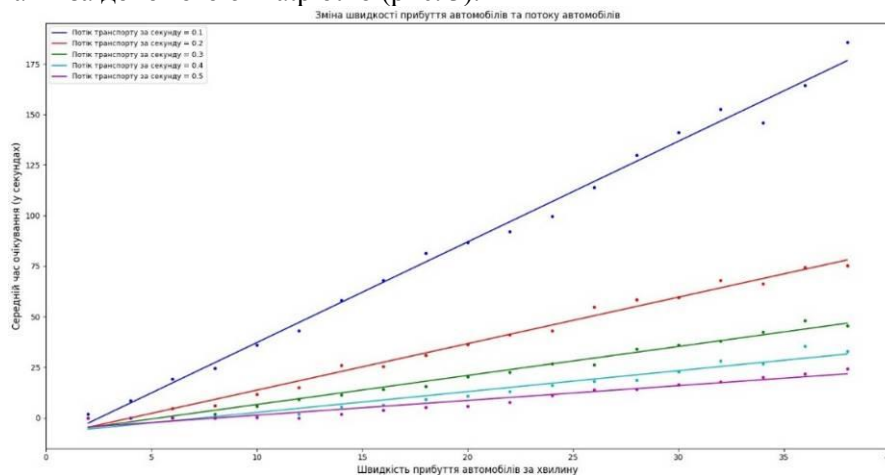


Рис. 3. Залежність часу очікування проїзду перехрестя зі світлофором від щільності потоку та швидкості прибуття автомобілів.

При зміні значення швидкості проходження автомобілів (транспортний потік), а не відсотку часу, протягом якого горить зелене світло, спостерігається подібна залежність. Зміна швидкості проходження автомобілів впливає на середній час очікування і градієнт залежить від цієї швидкості.

Наприклад, якщо автомобілі можуть проїхати світлофор за секунду з швидкістю 0.1, то обмеження на кількість автомобілів, які можуть проїхати за зеленого світла, буде меншим, ніж при швидкості 0.5. Таким чином, коли швидкість проходження автомобілів зростає, градієнт або темп зростання середнього часу очікування також зростає. Це означає, що зі збільшенням швидкості проходження автомобілів середній час очікування буде збільшуватися швидше.

**Моделювання проїзду перехрестя зі світлофором та можливістю блокування перехрестя.** За базову взято другу модель та додано можливість блокування перехрестя. Під час інтенсивного руху (тобто великої кількості автомобілів) транспортні розв'язки часто блокуються, оскільки автомобілі або залишаються на перехресті, коли світло стає червоним, або продовжують проїжджати після того, як світло стає червоним і, отже, блокують зустрічний рух.

Використаємо ймовірність блокування ( $p$ ), тобто, коли автомобілі прибувають на світлофор, то з ймовірністю  $p$ , перехрестя блокується, тому, навіть якщо є зелене світло, усі автомобілі повинні чекати повних 60 секунд (`greenTime + redTime`) до того, як вони матимуть можливість просунутися (або знову бути заблокованими з ймовірністю  $p$ ).

За результатами моделювання побудовано графіки залежності середнього часу очікування (в секундах) для кожного автомобіля від швидкості прибуття автомобілів за хвилину – рисунок 4.

Зі зростанням ймовірності блокування перехрестя середній час очікування автомобілів значно збільшується. Іншими словами, коли існує більша ймовірність блокування, автомобілі довше чекають на перехресті, щоб проїхати.

Крім того, варіабельність часу очікування (розкид значень) також збільшується при зростанні ймовірності блокування. Це означає, що коли перехрестя частіше блокується, час очікування автомобілів стає менш прогнозованим і може значно варіюватись від одного автомобіля до іншого навколо певної середньої лінії.

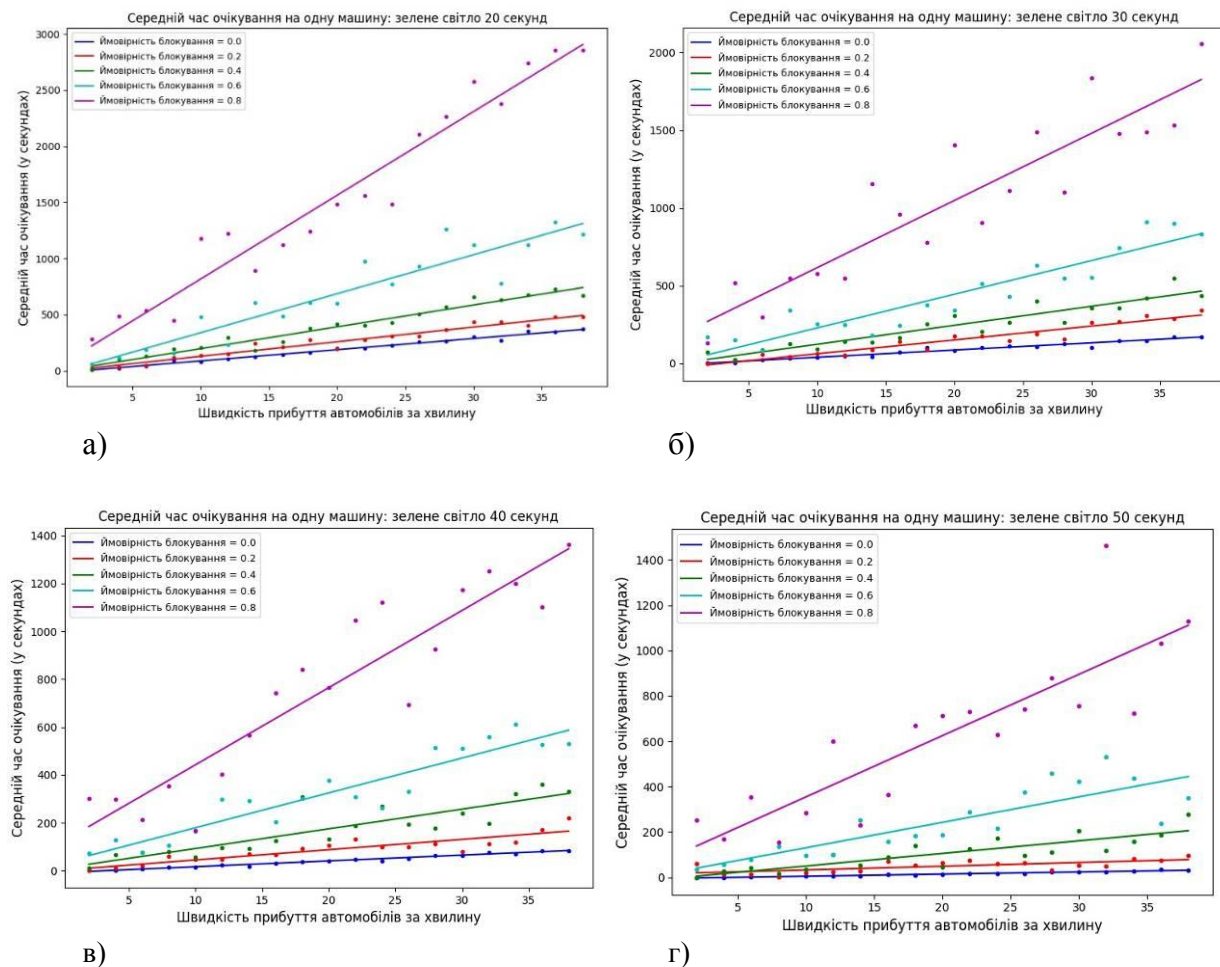
Тобто, ймовірність блокування перехрестя має суттєвий вплив на час очікування автомобілів, збільшуючи як середній час очікування, так і його варіабельність.

**Моделювання проїзду перехрестя зі світлофором з врахуванням інтенсивності руху.**  
Основні припущення щодо транспортного потоку:

1. Швидкість, з якою автомобілі можуть проїжджати на зелене світло, зменшується, оскільки трафік стає щільнішим – чим щільніший трафік тим в цілому всі автомобілі рухаються на перехресті повільніше.

2. Ймовірність того, що інші автомобілі заблокують перехрестя на зелене світло, також зростає зі щільністю руху. У більш інтенсивному трафіку більша ймовірність того, що автомобілі в кінцевому підсумку заблокують, коли відповідне світло стане червоним.

3. Якщо автомобілі й блокують перехрестя, то не на весь період зеленого світла, а на певний проміжок часу.



**Рис. 4. Залежність часу очікування автомобіля від швидкості прибуття автомобіля для різних значень ймовірності блокування ( $p$ ): а), б), в), г) – час зеленого світла на світлофорі 20,30,40,50 секунд відповідно.**

В моделі передбачено три типи дорожніх умов: легкий, середній та інтенсивний:

Невеликий рух (L):

- швидкість прибуття автомобілів: 8 автомобілів за хвилину,
- швидкість пропуску автомобіля: 1 автомобіль за секунду при зеленому сигналі світлофора,
- ймовірність блокування: 0,05,
- час блокування: 5% періоду зеленого світла.



Середній трафік (М):

- швидкість прибуття автомобілів: 12 автомобілів за хвилину,
- швидкість пропуску автомобіля: 0,9 автомобіля за секунду, коли горить зелене світло (90% від нормального показника),
- ймовірність блокування: 0,2,
- час блокування: 20% періоду зеленого світла.

Інтенсивний рух (Н):

- швидкість прибуття автомобілів: 20 автомобілів за хвилину,
- швидкість пропуску автомобіля: 0,72 автомобіля за секунду, коли горить зелений сигнал світлофора (72% від нормального показника),
- ймовірність блокування: 0,45,
- час блокування: 50% періоду зеленого світла.

Моделювання щохвилинне протягом одногодинного періоду. 60-хвилинний період розділено на п'ять різних підперіодів:

1. 5 хв
2. 15 хвилин інтенсивного руху
3. 20 хвилин із середнім трафіком
4. 15 хвилин інтенсивного руху
5. 5 хв

Для кожного 1-хвилинного періоду модель додає нову кількість автомобілів до черги очікування на основі швидкості прибуття та використовує функцію runTraffic, щоб:

- змоделювати ймовірність того, що перехрестя заблоковано,
- обчислити кількість автомобілів, які можуть проїхати,
- оновити час очікування для кожного автомобіля, який проїжджає,
- обчислити середній час очікування автомобілів, які проїхали за цей період,
- прибрати з черги машини, що проїхали,
- оновити час очікування для кожного з автомобілів, які все ще стоять у черзі.

Для кожного хвилинного інтервалу для автомобілів, які не проїхали на світло, додаємо 60 секунд до їх загального часу очікування.

Модель запускає симуляцію для 1000 ітерацій, і для кожної ітерації імітується 60 хвилин руху. Відстежується кількість автомобілів, що чекають на перехресті, кількість автомобілів, що проїхали, середній час очікування для автомобілів і час очікування для кожного автомобіля, що проїхав.

На рисунку 5 представлено розмір черги та кількість автомобілів, що пройшли перехрестя за 60 секунд.

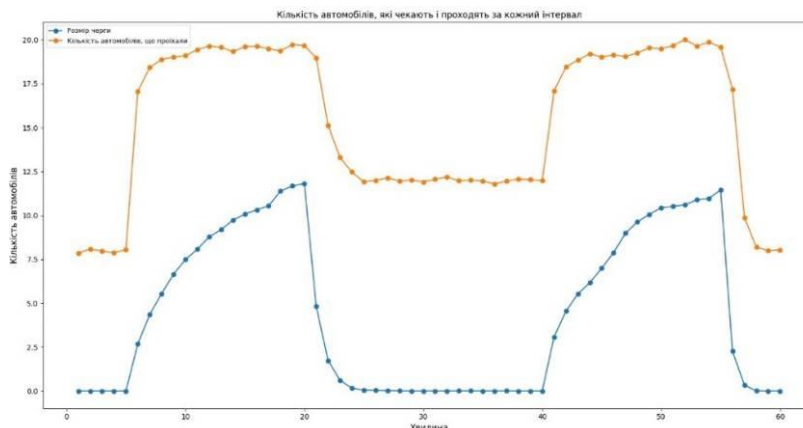


Рис. 5. Розмір черги та кількість автомобілів, що пройшли перехрестя за 60 секунд.

Аналізуючи дані, представлені на рисунку 5, можемо побачити, що кількість автомобілів, що очікують, майже нульова, коли рух автомобілів є слабким або середнім, і практично всі автомобілі можуть проїхати за визначений час. Однак, в інтенсивний період руху, розмір черги постійно зростає до максимального значення приблизно 12-13 автомобілів. Це свідчить про те, що

в інтенсивний трафік більша кількість автомобілів змушена чекати і більше автомобілів накопичуються в черзі перед світлофором.

Аналізуючи автомобілі, які проїжджають перехрестя, бачимо, що у кожній з умов дорожнього руху є досить стабільні, але різні показники пропуску. Це означає, що швидкість руху автомобілів через перехрестя залежить від умов руху, таких як інтенсивність руху, тривалість зеленого світла і ймовірність блокування.

Також варто зазначити, що невеликий шум може бути спричинений ймовірністю блокування перехрестя. Це означає, що іноді деякі автомобілі можуть блокувати рух інших, що може призвести до збільшення часу очікування для деяких автомобілів.

На рисунку 6 представлено середні значення та медіана часу очікування протягом 1000 тестів.

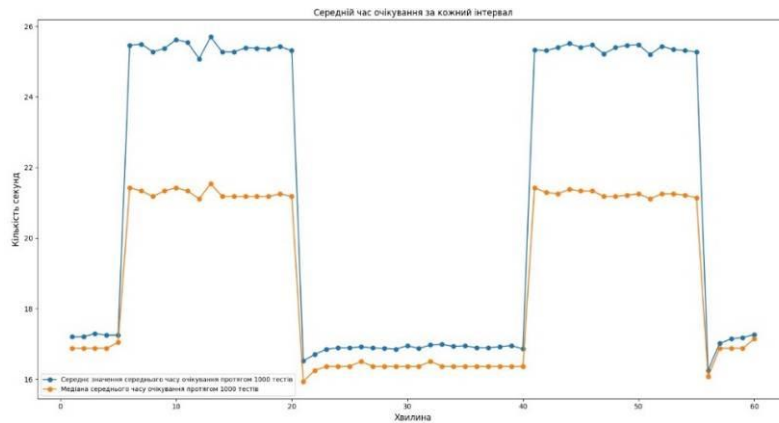
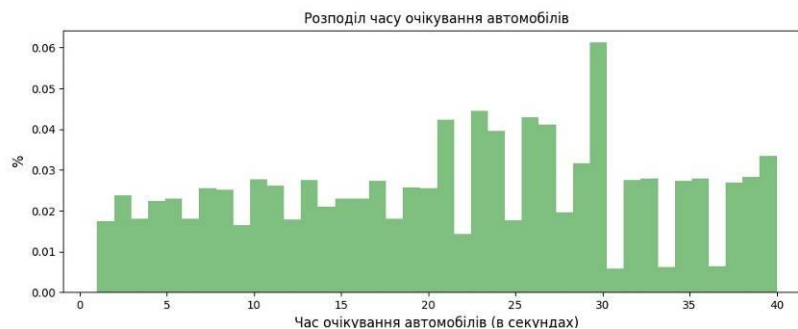


Рис. 6. Середні значення та медіана часу очікування протягом 1000 тестів.

Аналізуючи середні значення середнього часу очікування протягом 1000 тестів (рис. 6) можна зробити наступні спостереження: значення середнього часу очікування коливаються від 16 до 25 секунд; більшість значень знаходиться в діапазоні від 16 до 17 секунд або від 25 до 26 секунд. Є кілька значень, які виділяються, такі як 25.575 і 16.257. Ці значення можуть бути результатом блокування перехрестя, які призводять до високого чи низького часу очікування. Загалом, середні значення середнього часу очікування стабільні протягом 1000 тестів, що свідчить про стійкість та передбачуваність показника в даній моделі.

На рисунку 7 наведений розподіл часу очікування між усіма автомобілями.



а)



б)

Рис. 7. Розподіл часу очікування між усіма автомобілями: а – звичайний; б – кумулятивний варіант.

Аналізуючи розподіл часу очікування між усіма автомобілями, виявлено, що близько 90% автомобілів очікують не більше 40 секунд. Це свідчить про те, що більшість автомобілів успішно проходять перехрестя протягом розумного часу, а ті, що очікують, роблять це не занадто тривало. Дані результати надають краще розуміння процесу переходу автомобілів через перехрестя та демонструють стабільність та передбачуваність в середньому часу очікування.

**Висновки.** Таким чином, моделювання транспортних потоків при дослідженні руху на керованих перехрестях є ефективним інструментом для аналізу та оптимізації руху транспорту на перехрестях. Використання таких моделей дозволяє виявити потенційні проблеми в русі транспорту на керованих перехрестях, такі як затори, затримки, недостатня пропускна здатність, тощо.

Результати моделювання можуть бути використані для покращення руху на керованих перехрестях у реальних умовах. Розроблені моделі дозволять прогнозувати ефективність різних стратегій керування, виявляти проблемні ситуації та шукати шляхи їх усунення. Це може призвести до зменшення заторів, затримок та покращення пропускної спроможності перехрестя, що сприятиме підвищенню якості руху та зручності для водіїв та пасажирів. Крім того, отримані результати можуть бути використані при проектуванні та плануванні розвитку транспортних мереж та інфраструктури.

#### **Список використаних джерел:**

1. Transportation Research Board. (2010). Highway Capacity Manual (HCM). Washington, DC: National Academies Press.
2. Papageorgiou, M., Diakaki, C., & Dinopoulou, V. (Eds.). (2003). "Applications of advanced technology in transportation: proceedings of the Ninth International Conference on Applications of Advanced Technology in Transportation", May 26-30, 2002, Athens, Greece. Springer Science & Business Media.
3. Ben-Akiva, M. E., & Lerman, S. R. (Eds.). (1998). "Discrete choice analysis: theory and application to travel demand". MIT Press.
4. Hermann Kopetz. Traffic Flow Dynamics: Data, Models, and Simulation. Springer, 2008.
5. Jaime Barceló, Jordi Casas. Dynamic network simulation with AIMSUN / Dept. of Statistics and Operations Research, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, Spain. 2013.
6. VISSIM 4.0 [user manual] Visual Solutions Inc, 487 Groton Road, Westford, MA 01886. 2010. 494 с.
7. Paramics Technical Report. URL: <http://www.paramics-online.com> (дата звернення 25.05.2023).



**В.І. Захарчук, О.В. Захарчук, В.В. Швабюк, В.В. Ярошук**

*Луцький національний технічний університет*

## **ЗАХОДИ ЩОДО РОЗШИРЕННЯ ВИКОРИСТАННЯ ГАЗОВИХ ПАЛИВ В ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБАХ**

*Метою роботи є розробка заходів для забезпечення можливості ефективної експлуатації колісних тракторів та інших технологічних транспортних засобів на газових паливах. Переобладнано дизель Д-243 в газовий двигун з іскровим запалюванням та виконано його стендові випробування, які підтвердили його роботоздатність та показали хороші експлуатаційні показники. Потужність газового двигуна на рівні дизеля, сумарна токсичність відпрацьованих газів в 1,8 рази менша у порівнянні з дизелем, але витрата палива є більшою в газового двигуна. За тією ж технологією і з використанням тих же елементів переобладнано трактор МТЗ-80 для роботи на газових паливах. Виконані його дорожні випробування, які показали, що є певні особливості керування газовим двигуном та трансмісією такого трактора. Для забезпечення ефективної експлуатації технологічних транспортних засобів на газових паливах пропонується: встановлення високоенергетичної системи запалювання; розробка системи передпускового підігріву газового редуктора; розробка способів забезпечення технологічних транспортних засобів газовим паливом.*

*Ключові слова:* газові палива, природний газ, колісний трактор, технологічні транспортні засоби.

**V. Zakharchuk, O. Zakharchuk, V. Shvabyuk, V. Yaroshchuk**

## **MEASURES TO EXPAND THE USE OF GAS FUELS IN TECHNOLOGICAL VEHICLES**

*The aim of the work is to develop measures to ensure the possibility of efficient operation of wheeled tractors and other technological vehicles using gas fuels. The D-243 diesel engine was converted into a spark ignition gas engine and bench tests were carried out, which confirmed its operability and showed good performance. The power of the gas engine is at the level of a diesel engine, the total toxicity of exhaust gases is 1.8 times lower compared to a diesel engine, but fuel consumption is higher for a gas engine. The MTZ-80 tractor was converted to run on gas fuels using the same technology and elements. Its road tests were carried out, which showed that there are certain peculiarities in the control of the gas engine and transmission of this tractor. To ensure the efficient operation of technological vehicles running on gas fuels, it is proposed to: install a high-energy ignition system; develop a system for preheating the gas reducer; develop methods for providing technological vehicles with gas fuel.*

*Keywords:* gas fuels, natural gas, wheeled tractor, technological vehicles.

**Постановка проблеми.** В багатьох джерелах стверджується, що зараз перед людством стоять три основні проблеми: глобальне потепління, забруднення атмосфери великих міст, розширення застосування відновлюваних джерел енергії та енергетична безпека [1,2,3]. Як наслідок в жовтні 2014 р. Європейська рада схвалила обов'язкову ціль Європейського Союзу (ЄС) щодо скорочення викидів парникових газів щонайменше на 40% до 2030 р. порівняно з 1990 р. Крім того, обов'язковою метою ЄС є частка відновлюваної енергії принаймні у 27% в 2030 р.

В березні 2018 р. Єврокомісія заявила, що її амбітною метою є досягнення кліматичної нейтральності до 2050 р. [2, 3]. У багатьох джерелах зазначається, що транспорт викидає близько четверті викидів CO<sub>2</sub> в ЄС. Близько 75% CO<sub>2</sub> викидається автомобільним транспортом. Тому декарбонізація автомобільного транспорту є обов'язковою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Викиди CO<sub>2</sub> двигунами легкових автомобілів регулюються Директивою ЄС №443/2009 [4]. Відповідно до цього документу для автомобілів 1380 кг з 2021 р. граничне значення CO<sub>2</sub> становить 95 г, що відповідає витраті палива приблизно 3,8 л/100 км [5].

Поспішаючи виконати вимоги законодавства щодо CO<sub>2</sub>, автомобільна промисловість почала вкладати значні кошти у виробництво гібридних автомобілів і електромобілів. Але поки рівень ефективності електромобілів не досягне прийнятного рівня, альтернативні моторні палива залишатимуться реальними заміниками нафтових палив.

З наявних на сьогодні альтернативних видів палива газ природний газ вважається одним з найкращих заміників нафтових палив, оскільки з одного боку, він сумісний зі звичайними

двигунами з іскровим запалюванням або двигунами із запалюванням від стиснення, а з іншого боку, він є більш екологічно чистим завдяки меншим викидам шкідливих речовин з відпрацьованими газами [6, 7]. Існує багато наукових праць, які визнають природний газ екологічно чистим паливом [6], [8, 9]. Сприятливе співвідношення кількості водню до кількості вуглецю в метані (4) є причиною до 30% нижчих викидів CO<sub>2</sub> порівняно з бензином [11]. Фактично, як зазначено в [8, 9], спалювання природного газу призводить до найнижчих викидів CO<sub>2</sub> серед викопних палив. Більше того, якщо використовувати метан з біогазу, отриманого в результаті переробки відходів, то це ще більш ефективно.

Крім того, як зазначено в [10], двигун на природному газі викидає менші кількості оксиду вуглецю CO та незгорілих вуглеводнів СН. Додатковою особливістю роботи двигунів на природному газі є те, що основним незгорілим вуглеводнем у відпрацьованих газах є метан, який має незначну реакційну здатність у фотохімічному циклі смогу.

Що стосується потенціалу природного газу для значного зменшення викидів сажі і твердих частинок, це має першорядне важливість у світлі майбутнього застосування EURO7, яке буде враховувати наночастинки розміром менше 23 нм, [12 - 14].

В Україні дослідження доцільності використання природного газу транспортними засобами займались в Національному транспортному університеті під керівництвом Ю. Гутаревича та в Харківському національному автомобільно-дорожньому університеті під керівництвом Ф. Абрамчука [18]. Але досліджувались автомобільні двигуни. Дослідження тракторних двигунів та тракторів на газових паливах практично не виконувались.

Метою роботи є розробка заходів для забезпечення можливості ефективної експлуатації використовуваних в якості технологічного транспорту колісних тракторів на газових паливах.

**Основні результати досліджень.** Газові палива розглядаються як альтернативний заміник нафтових палив, особливо через можливість досягнення значного економічного ефекту та низьких викидів забруднюючих речовин, що на сьогодні є надзвичайно актуальним. В даний час використовуються два види газових палив: природний газ і пропано-бутанові суміші. Високі моторні властивості газових палив, зокрема, їх октанове число, забезпечує можливість використання високих ступенів стиснення і тому досягаються енергетичні показники не гірші у порівнянні з дизелями.

У разі використання колісних тракторів в якості засобів технологічного транспорту вони часто експлуатуються в умовах обмеженого повітрообміну при їх заїзді в тваринницькі приміщення, теплиці, склади, тощо, коли приходиться особливо рахуватися з кількістю та токсичністю викинутих з відпрацьованими газами шкідливих речовин, адже поруч з джерелом шкідливих викидів знаходиться обслуговуючий персонал та інші біологічні об'єкти. В приміщеннях двигуни технологічного транспорту працюють як на холостому ходу, так і під навантаженням.

В ЛНТУ переобладнано дизель Д-243 в газовий двигун з іскровим запалюванням та виконано його стендові випробування при роботі на природному газі, які підтвердили його роботоздатність та показали хороші експлуатаційні показники (рис. 1) [18]. Технічна характеристика газового двигуна та базового дизеля показана в табл. 1

Табл. 1

Коротка технічна характеристика дизеля Д-243 та його газової модифікації

№ п/п	Найменування параметрів	Значення параметрів	
		дизель	газовий
1.	Тип двигуна	дизель	газовий
2.	Кількість і розташування циліндрів	4, рядне вертикальне	
3.	Робочий об'єм, л	4,75	
4.	Ступінь стиску	16	12
5.	Номінальна потужність, кВт	55,1	57,3
6.	Максимальний крутний момент, Нм	274	280
7.	Паливо	Дизельне паливо	Природний газ
8.	Спосіб сумішоутворення	внутрішнє	зовнішнє
9.	Спосіб запалювання паливоповітряної суміші	від стиску	примусове запалювання від іскри

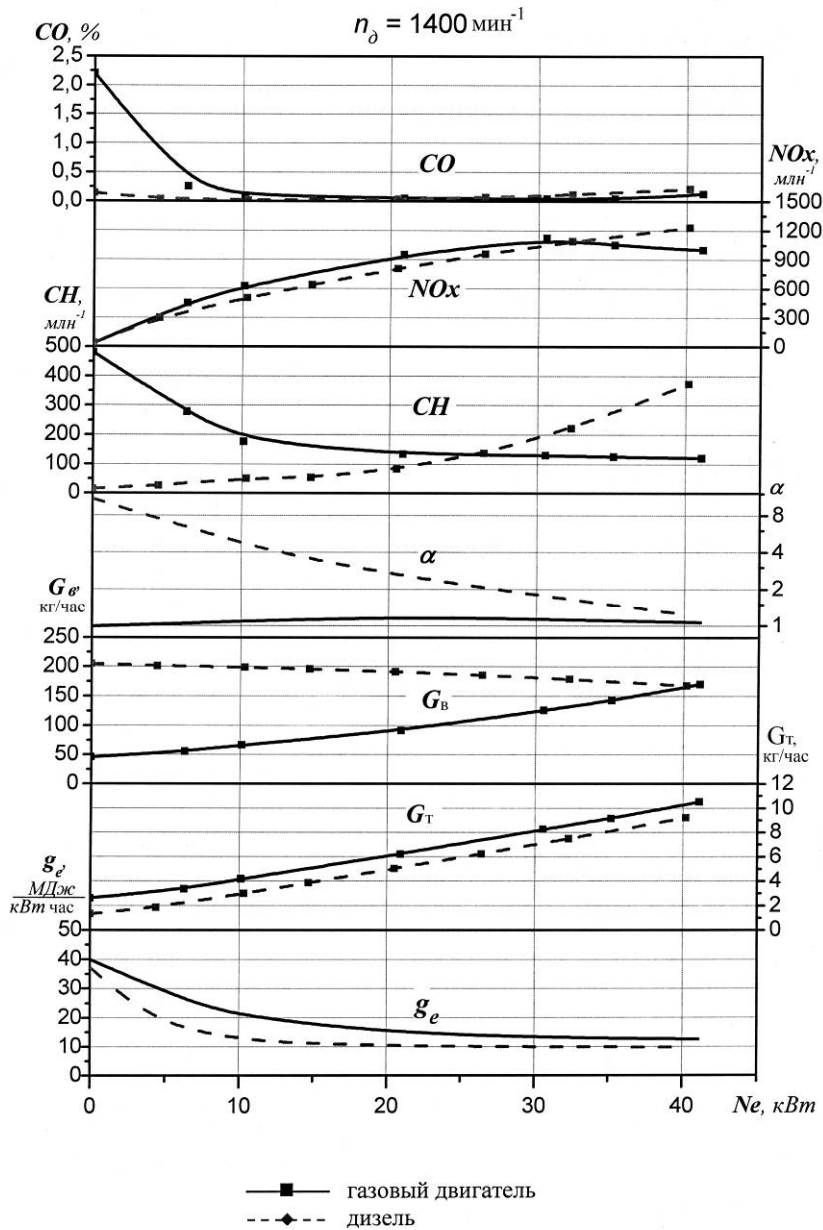
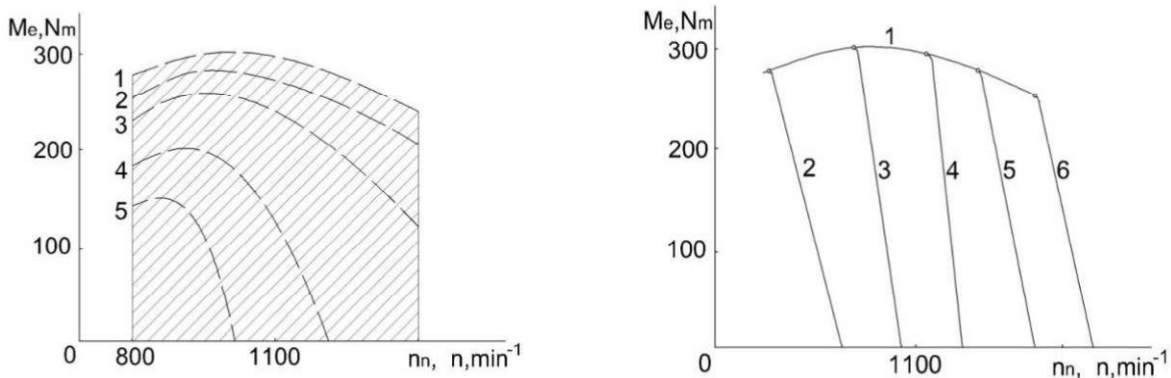


Рис. 1. Навантажувальні характеристики з заміром токсичності відпрацьованих газів газового двигуна Д-243 та базового дизеля

Попередньо математичним моделюванням робочого циклу визначено раціональне значення ступеня стиску газового двигуна (12 одиниць). На двигун була встановлена система запалювання серійного бензинового двигуна легкового автомобіля. Виконана порівняльна оцінка екологічних показників газового двигуна та базового дизеля за режимами циклу ESC. Сумарна токсичність відпрацьованих газів газового двигуна, приведена до оксиду вуглецю CO в 1,8 менша у порівнянні з дизелем. Це, в основному, завдяки відсутності сажі у відпрацьованих газах. Питома еквівалентна витрата палива газового двигуна є до 20% більшою внаслідок його роботи на більш багатих, близьких до стехіометричної, сумішах. Покращити паливну економічність можливо за рахунок організації роботи двигуна на бідних сумішах та застосуванні турбонаддуву. Для цього необхідно використовувати потужну високоенергетичну систему запалювання. Застосування такої системи запалювання дозволить також покращити запуск газового двигуна в холодну пору.

За тією ж технологією і з використанням тих же елементів переобладнано трактор МТЗ-80 для роботи на газових паливах. Виконані його дорожні випробування, які показали, що є певні особливості керування двигуном та трансмісією такого трактора. Розгін трактора з навантаженим

прицепом потрібно здійснювати з переключенням передач. Розгін трактора на одній передачі, як у випадку з дизелем з всережимним регулятором практично неможливий. Це пояснюється відмінністю характеру протікання швидкісних характеристик газового двигуна з іскровим запалюванням і дизеля з всережимним регулятором (рис. 2) і, відповідно, меншим запасом крутного моменту при роботі двигуна за частковими швидкісними характеристиками.

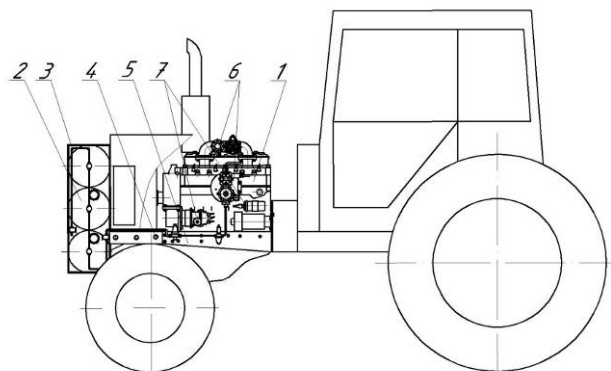


**Рис. 2. Швидкісні характеристики двигунів при різних положеннях органа керування паливopодачею: а – двигун з іскровим запалюванням; б – дизель; 1 – повна подача паливopовітряної суміші або палива; 2 – 6 – часткова подача палива або паливо повітряної суміші**

Поряд із перевагами використання природного газу транспортними засобами є і ряд недоліків, які обмежують використання цього виду палива: проблеми заправки, зміна деяких експлуатаційних якостей, зокрема утруднений запуск в холодну пору, підвищені вимоги до пожежної безпеки. Тому для забезпечення ефективної експлуатації технологічних транспортних засобів на газових паливах пропонується:

- встановлення високоенергетичної системи запалювання;
- розробка системи передпускового підігріву газового редуктора для полегшення пуску двигуна в зимовий період;
- розробка нових способів забезпечення технологічних транспортних засобів газовим паливом;

Що стосується передпускового підігріву, то зараз промисловістю випускаються різні види підігрівачів. При експлуатації трактора на газовому паливі потрібно вирішити питання його заправки газом. Адже газових заправок ще порівняно небагато і вони можуть розташовуватись на певній відстані від місця експлуатації трактора. Це може зробити доїзд власним ходом на заправку економічно невигідним. Виходом з положення може бути варіант встановлення на тракторі знімної касети з газовими балонами (рис. 3). Заправка трактора у цьому випадку буде здійснюватись заміною касети з порожніми балонами на касету з заправленими балонами.



**Рис. 3. Схема встановлення газових балонів на колісному тракторі:**

- 1 – двигун; 2 – газові балони; 3 – касета з балонами; 4 – болти кріплення касети до рами; 5 – рама трактора; 6 – елементи газової паливної апаратури; 7 – вузли системи запалювання

Особливості експлуатації трактора на природному газі зумовлені тим, що природний газ у своєму природному стані має дуже низьку енергетичну густину (0,0364 МДж/л) у порівнянні з бензином (34,2 МДж/л) та дизельним паливом (38,6 МДж/л). Отже, для забезпечення прийняттого запасу ходу, його необхідно стискати і зберігати на транспортному засобі під високим тиском - зазвичай 20 МПа. Таким чином, він досягає густини енергії 9 МДж/л. Це все ще не порівнянна з бензином і дизельним паливом величина, але це великий крок в отриманні прийнятної густини енергії. За роботи на газових паливах має місце утруднений запуск двигуна при низьких температурах внаслідок більш високої температури займання газоповітряної суміші та меншої швидкості її згоряння. Також важливою особливістю є те, що газові двигуни з іскровим запалюванням працюють за циклом Отто.

**Висновки.** Виконання запропонованих заходів дасть можливість розширити використання газових палив в технологічних транспортних засобах, що в свою чергу дозволить:

- у соціальній сфері – підвищити рівень задоволення потреб підприємств екологічно чистими видами палив; поліпшити екологічний стан у закритих приміщеннях, де працює технологічний транспорт; створити нові робочі місця.
- в економічній сфері – забезпечити ефективне використання паливних ресурсів, зменшити обсяг імпортованих нафтопродуктів, розширити обсяг конкурентноспроможного транспорту, що сприятиме економічному зміцненню підприємств та створення нових робочих місць;
- у технологічній сфері – освоїти переобладнання техніки для роботи на газових паливах, що дозволить зменшити собівартість перевезень та розширити паливну базу підприємств.

#### Література

1. "EU Directive 2015-1513," Brussels, 2014.
2. "Our Vision for A Clean Planet for All, European Commission," European Commission, Brussels, 2018.
3. "A Clean Planet for all. A European strategic longterm vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, European Commission," Brussels, 2018.
4. European Commission, *Regulation no 443/2009*. 2009.
5. ICCT, "EU CO2 EMISSION STANDARDS FOR PASSENGER CARS AND LIGHT-COMMERCIAL VEHICLES," 2014.
6. M. I. Khan, T. Yasmin, and A. Shakoор, "Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, no. December 2017, pp. 785-797, 2015.
7. EU, *DIRECTIVE 2014/94/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the deployment of alternative fuels infrastructure*. Official Journal of the European Union, 2014.
8. R. Tilagone, S. Venturi, and G. Monnier, "Natural gas - An environmentally friendly fuel for urban vehicles: The smart demonstrator approach," *Oil Gas Sci. Technol.*, vol. 61, no. 1, pp. 155-164, 2006.
9. G. T. Chala, A. R. A. Aziz, and F. Y. Hagos, "Natural Gas Engine Technologies: Challenges and Energy Sustainability Issue," *Energies*, vol. 11, no. 11, 2018.
10. T. Korakianitis, A. M. Narnasivayarn, and R. J. Crookes, "Natural-gas fueled spark-ignition (SI) and compressionignition (CI) engine performance and emissions," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 37, no. 1, pp. 89-112, 2011.
11. M. Westerhoff, "Natural gas. A chance to be grabbed," *MTZ*, vol. 76, no. February, pp. 9-13, 2016.
12. C. Pawsey, "Gasoline Particle Emissions and Particulate Filter Technology," Berlin, 2019.
13. C. C. Ambel *et al.*, "Cars with engines: can they ever be clean?," *Transp. Environ.*, 2018.
14. B. Giechaskiel, U. Manfredi, and G. Martini, "Engine Exhaust Solid Sub-23 nm Particles: I. Literature Survey," *SAE Int. J. Fuels Lubr.*, vol. 7, no. 3, pp. 950-964, 2014.
15. A. Liati, D. Schreiber, Y. Dasilva, and P. Dimopoulos, "Ultrafine particle emissions from modern Gasoline and Diesel vehicles: An electron microscopic perspective," *Environ. Pollut.*, vol. 239, pp. 661-669, 2018.
16. "Country comparison: natural gas production," *The CIA worldfactbook*. [Online]. Available: <https://www.cia.gov/library/publications/the-worldfactbook/rankorder/2249rank.html>. [ Accessed: 04-Oct 2019).
17. V. Iuga and R. Dudau, "Perspectivele gazelor naturale in Romania ~i modalitati de valorificare superioara a acestora Cuprins," Bucharest, 2018.
18. ZAHARCHUK V. The Choice of a Rational Type of Fuel For Technological Vehicles / Zaharchuk, V., Gritsuk, I., Zaharchuk, O., Golovan, A. et al., // SAE Technical Paper 2018-01-1759, 2018.

**Рецензент:** Скалига М.М., к.т.н., доцент, ЛНТУ

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

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМІЧНИХ І ТРИБОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВУГЛЕПЛАСТИКА НА ОСНОВІ ФЕНІЛОНУ С-2

*Досліджені основні термічні і трибологічні властивості вуглепластика на основі ароматичного поліаміду фенілон С-2, армованого метал-вмісним вуглецевим волокном. Показано, що армування поліамідного в'язучого хром-вмісним вуглецевим волокном у кількості 17 мас. % підвищує його термостійкість, знижує коефіцієнт тертя та збільшує зносостійкість і критерій працездатності матеріалу.*

*Ключові слова:* ароматичний поліамід фенілон С-2, хром-вмісне вуглецеве волокно, вуглепластик, термостійкість, коефіцієнт тертя, інтенсивність лінійного зношування, критерій працездатності

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

## RESEARCH OF THERMAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES CARBON PLASTIC BASED ON PHENYLONE C-2

*The main thermal and tribological properties of carbon fiber reinforced plastic based on aromatic polyamide phenylon C-2 reinforced with metal-containing carbon fiber have been researched. It is shown that the reinforcement of the polyamide binder with chromium-containing carbon fiber in the amount of 17 wt. % increases the thermal stability of the polymer by an average of 25-35°C. The study of the possible mechanism and the calculation of the kinetic parameters of the process of thermal destruction of the developed carbon fiber indicates that it is best described by the equation of one-dimensional diffusion. At all studied sliding speeds, the coefficient of friction of carbon fiber decreased with an increase in specific loads by 1.7-2.3 times, and the wear resistance of the material increased being in the range of  $5.0-3.5 \cdot 10^9$ . The performance criterion PV of carbon fiber was 1.2 MPa · m/s, which was 1.5 times higher than the criterion PV of phenylone C-2. The developed carbon fiber is recommended as an antifriction material for friction units of machines and mechanisms.*

*Key words:* aromatic polyamide phenylone C-2, chromium-containing carbon fiber, carbon plastic, thermal stability, coefficient of friction, intensity of linear wear, performance criterion

Інтенсивний розвиток сучасної техніки сприяє розширенню застосування тепло- і термостійких полімерів, що мають високі деформаційно-міцнісні характеристики, тривалу працездатність у широкому інтервалі температур і стійкість до впливу агресивних середовищ. Завдяки високій теплостійкості, втомлювальній міцності, покращеним механічним і електроізоляційним показникам ароматичний поліамід фенілон С-2 останнім часом широко застосовується для заміни інших видів полімерів, металу та гуми [1]. Поєднання цих властивостей з високою зносостійкістю при терті дозволило використовувати фенілон як матеріал для вузлів тертя [2]. Однак в умовах жорстких експлуатаційних режимів і поганого тепловідведення внаслідок недостатньо високих теплофізичних показників може відбуватися саморозігрів вузла тертя і, як наслідок, фенілон починає втрачати свою працездатність.

З метою створення нового полімерного композиту конструкційного призначення з покращеними експлуатаційними характеристиками ароматичний поліамід фенілон С-2 (ФС-2) армували хром-вмісним вуглецевим волокном (Cr-BB) у кількості 17 мас. %.

Хром-вмісне вуглецеве волокно, що містить у своєму складі оксид хрому  $Cr_2O_3$ , при температурі термічної обробки 800-900°C каталізує утворення фази нанорозмірного структурно-впорядкованого вуглецю, структурним елементом якого є графенові шари. Наявність в структурі Cr-BB мікронного розміру (діаметр волокна – близько 6-8 мкм) нанорозмірних фаз металу і структурно-впорядкованого вуглецю надає волокнистому наповнювачу комплекс нових властивостей, характерних для нанорозмірних об'єктів і відкриває широкі можливості їх практичного використання, зокрема, для виготовлення деталей конструкційного призначення [3].

Попередні наукові дослідження свідчать про те, що введення металу в структуру BB покращує його змочуваність полімерним в'язучим і впливає на взаємодію між полімером і наповнювачем на межі розподілу фаз, що сприяє покращенню міцнісних властивостей вуглепластику [4].

Одним із ефективних методів прогнозування поведінки полімерних композитів в умовах високих температур, є термогравіметричний метод аналізу (ТГА). Відомо, що термостійкість визначається тією температурною межею, при якій починається термічна або термоокиснювальна деструкція матеріалу, яка супроводжується виділенням летких продуктів. Внаслідок цього має місце втрата у масі досліджуваного зразка, що і лежить в основі термогравіметричного аналізу.

Диференційний термічний аналіз є чутливим методом, що дозволяє відзначати зміни, що відбуваються при нагріванні матеріалу і супроводжуються виділенням чи поглинанням тепла [5].

На початковому етапі досліджень вивчали дані термогравіметричного аналізу волокнистого наповнювача. Контур кривої ТГА “втраата-маси – температура” Cr-BB, представлений на рис. 1, свідчить про те, що поступове зменшення маси (0,4-4,2%) в інтервалі температур 300-423 К спостерігалось за рахунок видалення вологи і лише за температури 1073 К волокно почало втрачати 8,8 % маси (табл. 1).

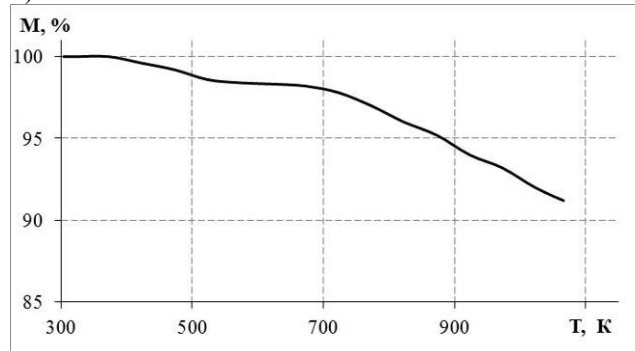


Рис. 1. Термогравіметрична крива Cr-BB

Табл. 1.

#### Термостійкість хром-вмісного вуглецевого волокна

Матеріал	T <sub>1</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>10</sub>
Cr-BB	493	773	881	–

Примітка: T<sub>1</sub>, T<sub>3</sub>, T<sub>5</sub>, T<sub>10</sub> – температури 1, 3, 5 та 10 % втрати маси, К

Результати проведених термічних досліджень (рис. 2) свідчили про те, що армування ароматичного поліаміду фенілон С-2 Cr-BB, дозволило суттєво підвищити його термостійкість (табл. 2). Зокрема, температура, при якій відбувалась 10, 20 і 30%-ва втрата маси зразків ВП відбувалась відповідно на 13, 22 і 35°C вище, ніж для вихідного полімеру.

Табл. 2.

#### Термостійкість фенілону С-2 і вуглепластика на його основі

Матеріал	Температура, °С				
	T <sub>0</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>10</sub>	T <sub>20</sub>	T <sub>30</sub>
ФС-2	82	170	407	452	482
ФС-2 + 17% Cr-BB	100	304	426	474	517

T<sub>0</sub>, T<sub>5</sub>, T<sub>10</sub>, T<sub>20</sub>, T<sub>30</sub> – температури початку, 5, 10, 20 та 30 % втрати маси, К

На кривій ТГА до температури 500 °С спостерігався плавний хід кривих фенілону С-2 і ВП на його основі без яскраво виражених змін (рис. 2б), а інтенсивна деструкція матеріалів, яка супроводжувалась суттєвою втратою маси, почала проявлятися при температурі 600 °С. На кривій ДТА на цій ділянці спостерігався екзотермічний пік, який характеризує процес розкладу полімерного в'язучого [6], при цьому його величина для ВП була більшою у порівнянні з вихідним полімером, що свідчить про більш інтенсивний процес розкладу ВП.

Визначення можливого механізму і розрахунок кінетичних параметрів процесу термодеструкції досліджуваних матеріалів здійснювали з використанням інтегральних кінетичних рівнянь різних механізмів гетерогенних процесів (табл. 3).

Критеріями вибору математичного рівняння були коефіцієнт кореляції прямої  $r$  у координатах рівняння Арреніуса і мінімум функції  $S$ :

$$S = f \{ \alpha(\tau), T(\tau), \Delta T(\tau), E_{акт.}, Z \},$$

$$S = \left( \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(\alpha_e - \alpha_p)^2}{m}} \right)^{1/2}$$

де:  $\alpha_e$ ,  $\alpha_p$  – експериментальні та розрахункові значення ступеня перетворення;  $m$  – кількість експериментальних даних;  $T$  – температура, К;  $E_{акт.}$  – енергія активації;  $Z$  – передекспоненціальний множник.



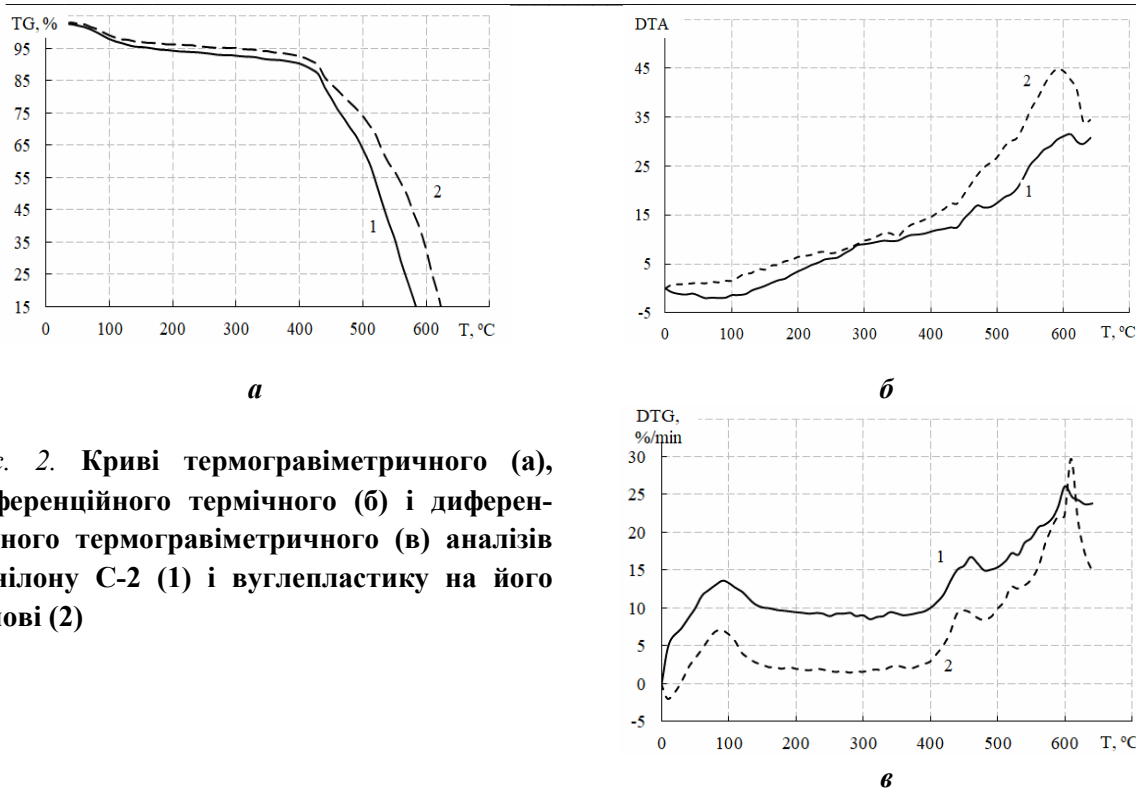


Рис. 2. Криві термогравіметричного (а), диференційного термічного (б) і диференційного термогравіметричного (в) аналізів фенілону С-2 (1) і вуглепластику на його основі (2)

Табл. 3.

Кінетичні рівняння різних механізмів гетерогенних процесів [7]

Кінетичне рівняння	Процес, що визначає швидкість реакції	Математичні рівняння
$k\tau = \alpha$	Зародкоутворення за степеневим законом $n = 1$	(1)
$k\tau = 2\alpha^{1/2}$	Зародкоутворення за степеневим законом $n = 2$	(2)
$k\tau = 2[1 - (1 - \alpha)^{1/2}]$	Реакція на границі розділу фаз: – циліндрична симетрія	(3)
$k\tau = 3[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]$	– сферична симетрія	(4)
$k\tau = -\ln(1 - \alpha)$	Випадкове зародкоутворення, одне ядро на кожен частку	(5)
$k\tau = 2[-\ln(1 - \alpha)]^{1/2}$	Випадкове зародкоутворення, рівняння Авраамі-Єрофєєва, $n = 2$	(6)
$k\tau = 3[-\ln(1 - \alpha)]^{1/3}$	Випадкове зародкоутворення, рівняння Авраамі-Єрофєєва, $n = 3$	(7)
$k\tau = 4[-\ln(1 - \alpha)]^{1/4}$	Випадкове зародкоутворення, рівняння Авраамі-Єрофєєва, $n = 4$	(8)
$k\tau = 1/2 \alpha^2$	Одномірна дифузія	(9)
$k\tau = (1 - \alpha)\ln(1 - \alpha) + \alpha$	Двовимірна дифузія, циліндрична симетрія	(10)
$k\tau = 3/2[1 - (1 - \alpha^{1/3})]^2$	Тривимірна дифузія, сферична симетрія	(11)
$k\tau = 3/2[(1 - 2/3\alpha) - (1 - \alpha)^{2/3}]$	Двовимірна дифузія, рівняння Гістлінга-Брунштейна	(12)

Результати розрахунку вихідних параметрів термодеструкції досліджуваних речовин: коефіцієнта кореляції ( $r$ ), мінімуму функції ( $S$ ), енергії активації ( $E_{акт.}$ ), передекспоненціального множника ( $Z$ ), розраховані за програмою [7], розробленою для ПК, наведені в таблиці 4.

Високі значення коефіцієнта кореляції та мінімальне значення функції  $S$  були отримані за кінетичним рівнянням одновимірної дифузії (9):

$$k\tau = 1/2 \alpha^2,$$

тому слід вважати, що саме це рівняння найбільш адекватно описує процес термодеструкції фенілону С-2 та ВП на його основі.

Дослідження трибологічних властивостей ароматичного поліаміду і ВП на його основі в режимі сухого тертя здійснювали на дисковій машині тертя.

Табл. 4.

## Кінетичні параметри термодеструкції матеріалів

Математичні рівняння процесу	$r$	$S$	$E_{акт.}$ , кДж/моль	$\lg Z$
ФС-2				
(1)	0,771	0,141	18,89	-2,73
(3)	0,776	0,133	24,449	-2,32
(4)	0,775	0,133	26,692	-2,15
(5)	0,770	0,144	31,865	-1,75
(9)	0,901	0,124	61,939	-1,05
(10)	0,893	0,203	68,457	-0,55
(11)	0,880	0,258	77,544	-0,31
(12)	0,889	0,258	71,391	-0,79
ФС-2 + 17 % Cr-BV				
(1)	0,494	0,144	8,467	-3,27
(3)	0,560	0,136	12,213	-2,96
(4)	0,576	0,135	13,655	-2,84
(5)	0,599	0,137	16,859	-2,57
(9)	0,887	0,118	47,649	-1,75
(10)	0,878	0,193	52,180	-1,36
(11)	0,864	0,246	58,024	-1,33
(12)	0,874	0,216	54,089	-1,67

Зношування зразка оцінювали за схемою диск (сталь 45, HRCэ 50, Ra = 0,08) – зразок ВП ( $\varnothing$  10 мм, висота 10 мм) при питомих навантаженнях  $P = 0,2-0,8$  МПа, швидкості ковзання  $v = 1, 1,5, 2,0$  м/с, шлях тертя складав 1000 м. Зношування зразків визначали на аналітичних терезах ВЛР-200 з точністю 0,0002 г.

Результати досліджень по вивченню впливу режимів експлуатації на трибологічні властивості зразків свідчили про те, що розроблений ВП має низький коефіцієнт тертя і гарну зносостійкість (рис. 3).

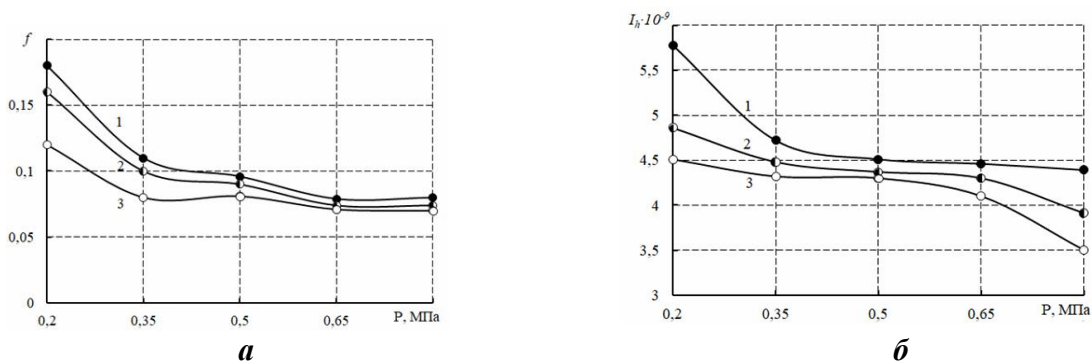


Рис. 3. Вплив питомого навантаження на коефіцієнт тертя (а) і інтенсивність лінійного зношування (б) зразків вуглепластика на основі фенілоу С-2, досліджених при швидкостях ковзання 1 (крива 1), 1,5 (крива 2) і 2 м/с (крива 3)

Найбільш високі значення коефіцієнта тертя і інтенсивності лінійного зношування зберігались для зразків ВП, що експлуатувались при швидкості ковзання  $v = 1$  м/с. В даних умовах при збільшенні питомого навантаження від 0,2 до 0,8 МПа відбувалось рівномірне падіння коефіцієнта тертя від 0,18 до 0,08, а інтенсивність лінійного зношування зменшилась майже на 25 %. Коефіцієнт тертя зразків ВП при експлуатації в умовах швидкостей ковзання 1,5 і 2 м/с при збільшенні питомого навантаження зменшувався від 0,16 до 0,074 та від 0,12 до 0,07 відповідно (рис. 3а).

Попередньо проведений рентгеноструктурний аналіз ВП (рис. 4) показав, що у порівнянні з вихідним полімером аморфне гало, яке спостерігалось на рентгенограмах в області кутів Вульфа-Брега  $2\theta = 20-30$  рад суттєво зменшилось. Вказаний факт дозволяє зробити висновок про те, що ВП має більш виражену кристалічну структуру у порівнянні з полімерним в'язучим. Це, в свою чергу, призводить до формування більш досконалої структури ВП, що дозволяє гальмувати розвиток деструкційних процесів у полімерній матриці при стиранні.

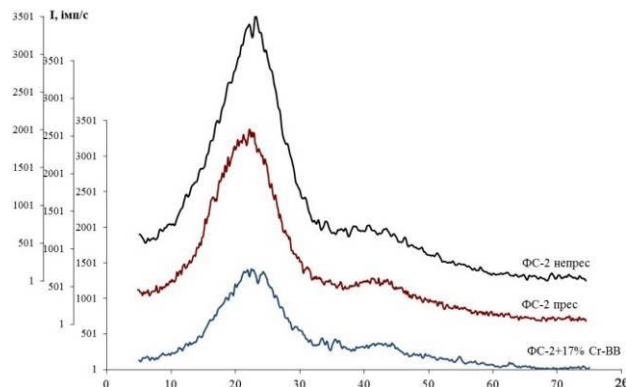


Рис. 4. Рентгенограми фенілону С-2 і вуглепластику на його основі, армованого 17 мас.% Cr-BB

Тому цілком закономірним є той факт, що зносостійкість ВП була значно вища, ніж у неармованого фенілону С-2. При  $v = 1,0$  м/с зносостійкість ВП була більш, ніж у 10 разів вища, ніж у чистого полімеру; при  $v = 1,5-2,0$  м/с зразки фенілону С-2 катастрофічно зношувались і втрачали свою працездатність, в то час, як ВП стабільно працював і мав інтенсивність лінійного зношування, яка знаходилась в межах  $5,0-3,5 \cdot 10^{-9}$  [8]. Критерій працездатності  $PV$  (добуток питомого навантаження на швидкість ковзання) для ВП дорівнює  $1,2$  МПа  $\cdot$  м/с і у  $1,5$  разів перевищував  $PV$  чистого полімеру, для якого він становив  $0,8$  МПа  $\cdot$  м/с.

Таким чином, проведений комплекс досліджень ВП на основі фенілону С-2, армованого 17 мас. % Cr-BB, свідчить про його покращені термічні і трибологічні властивості. Вказаний матеріал має підвищену термостійкість, низький коефіцієнт тертя, високу зносостійкість в широкому інтервалі режимів експлуатації, що дозволяє рекомендувати його до використання як матеріал вузлів рухомих з'єднань машин та механізмів.

#### Список використаних джерел:

- [1] Кацнельсон М.Ю., Балаев Г.А. Пластические массы. Свойства и применение: Справочник. Л.: Химия, 1978. – 384 с.
- [2] Справочник по пластическим массам / Под ред. В.М. Катаева, В.А. Попова, Б.И. Сажина. М.: Химия, 1975. – 568 с.
- [3] Сафонова А.М., Шпилевская Л.Е. Металлоуглеродные волокнистые наполнители и полимерные композиции на их основе // Перспективные материалы. – № 6. –2003. – С. 16-20.
- [4] Чигвинцева О.П., Рула І.В. Вуглепластик конструкційного призначення на основі ароматичного поліаміду і метал-вмісного вуглецевого волокна // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки», Луцьк, 2021, №71, С. 157-162.
- [5] Коршак В.В. Термостойкие полимеры. М.: Наука. 1969. С. 25.
- [6] Соколов Л.Б. Термостойкие и высокопрочные полимерные материалы. М.: Знание, 1984, 64 с.
- [7] Zuru A.A., Whitehead R., Criffiths D.L. A new technique for determination of the possible reaction mechanism from non-isothermal thermogravimetric data // Thermochim. Acta, 164, 1990. – P. 285-305.
- [8] Чигвинцева О.П., Рула І.В., Токар А.В., Кравченко С.В., Петрушина Г.О. Вивчення властивостей вуглепластика на основі фенілона С-2 // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки», Луцьк, Випуск 64, 2018, С. 236-242.

**Рецензенти:** О.Д. Деркач, Завідувач кафедрою експлуатації машино-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.

О.М. Пилипенко<sup>1</sup>, Л.Г. Полонський<sup>1</sup>, Я.А. Степчин<sup>1</sup>, В.М. Ночвай<sup>1</sup>, Д.О. Сомов<sup>2</sup>,  
Дахнюк О.П.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Державний університет «Житомирська політехніка»

<sup>2</sup>Одеський національний технологічний університет

<sup>3</sup>ТОВ «ЛРЗ «Мотор», начальник відділу матеріально-технічного забезпечення

## КІНЕМАТИКА ВІБРОМЕХАНІЧНОГО ШЛІФУВАННЯ ПОКРИТТІВ

У статті виконано кінематичний аналіз варіантів коливальних рухів заготовки для підвищення ефективності чорнових і чистових операцій вібромеханічного шліфування твердих газотермічних покриттів. На основі порівняння кінематики процесів абразивного вібромеханічного різання з лезовим зроблено висновки щодо раціонального застосування осевого, радіального та тангенціального напрямків вектору швидкості коливань в залежності від характеру операції, типу покриттів та його матеріалу, характеристики шліфувального круга.

**Ключові слова:** кінематика, шліфування, вібромеханічне різання, газотермічне покриття.

O. Pilipenko, L. Polonsky, Ya. Stepchin, V. Nochvay, D. Somov, O. Dakhnyuk

## KINEMATICS OF VIBRO-MECHANICAL GRINDING OF COATINGS

In the article, a kinematic analysis of options for oscillating movements of the workpiece is performed to improve the efficiency of roughing and finishing operations of vibromechanical grinding of solid gas-thermal coatings. Based on the comparison of the kinematics of abrasive vibromechanical cutting processes with blade cutting, conclusions were made regarding the rational use of axial, radial and tangential directions of the vibration speed vector depending on the nature of the operation, the type of coating and its material, and the characteristics of the grinding wheel.

**Key words:** kinematics, grinding, vibromechanical cutting, gas thermal coating

**Постановка проблеми.** Надійна робота деталей машин залежить від їх трибологічних властивостей та стійкості до різного виду поверхневого руйнування [1]. Одним із напрямків підвищення надійності і довговічності окремих деталей машин є використання ресурсозберігаючих технологій. Враховуючи велику твердість захисних газотермічних покриттів (ГТП), неоднорідність їх структури та недостатню силу зчеплення з основним матеріалом [2], перспективною є технологія їх шліфування з використанням акустичної енергії ультразвукових коливань заготовки. Проте шліфування з використанням примусово введених ультразвукових коливань досі не має ґрунтовної теоретичної бази і використовується часто на рівні емпіричних залежностей, що вимагає додаткового кінематичного аналізу процесу різання.

**Постановка завдань.** Метою роботи є кінематична оцінка різних видів коливальних рухів заготовки для підвищення ефективності чорнових і чистових операцій шліфування поверхонь із газотермічними покриттями.

**Викладення основного матеріалу.** Кінематика процесів абразивного вібромеханічного різання (шліфування) ГТП має деякі (суттєві) відмінності від кінематики лезового вібромеханічного різання за рахунок впливу форми абразивних зерен, їх розмірів і розташування на робочій поверхні. На рис. 1. представлена загальна схема моделі плоского шліфування з напрямками можливих вимушених коливань деталі.

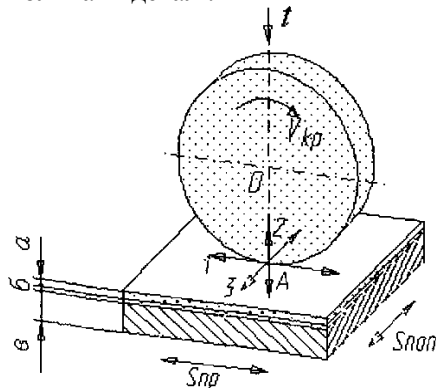


Рис. 1. Схема плоского шліфування з гармонійним коливанням деталі

Проте, схематизація процесу шліфування має враховувати, що корисну роботу стружкоутворення здійснюють тільки робочі абразивні зерна, тому доцільно окремо розглянути стружкоутворення на робочому абразивному зерні ідеальної форми у зазначених напрямках

коливань (рис. 2). Процес мікрорізання одиничним зерном має специфічні особливості у порівнянні з різанням лезовим інструментом (від’ємний передній кут, невизначеність форми зерна і розташування різальних лез, короткочасний контакт з поверхнею деталі і т. ін.).

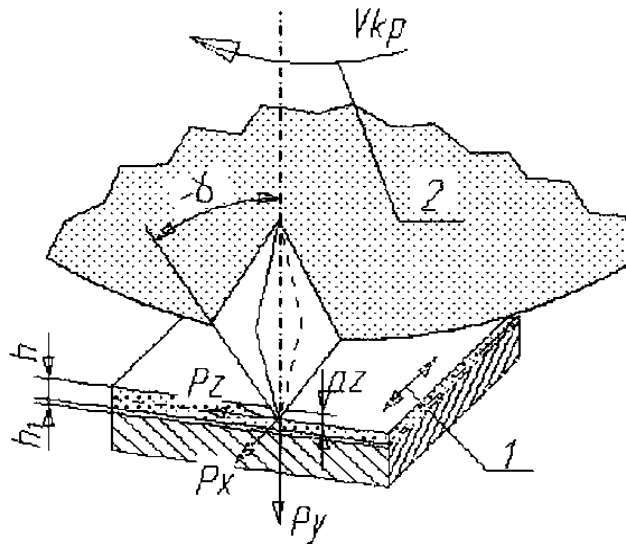


Рис. 2. Схема мікрорізання одиничним зерном

Розглянемо шліфування з вібраціями у поперечному напрямку (рис. 3).

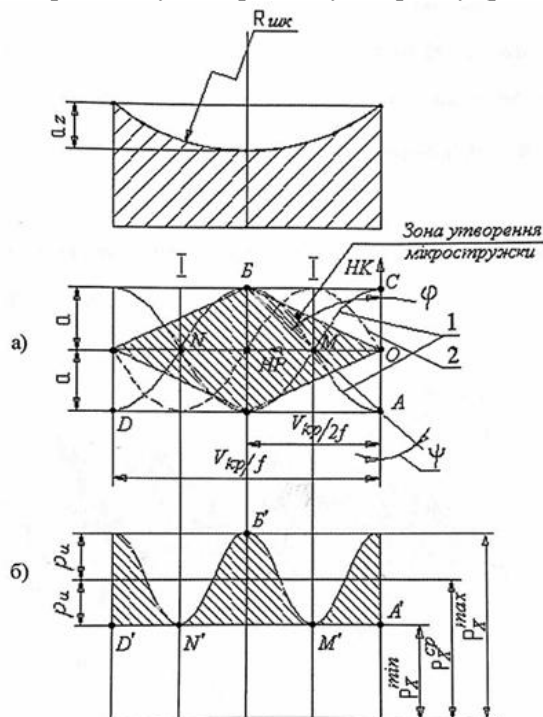


Рис. 3. Схема руху зерна у випадку осьової вібрації (а) і зміни складової сили різання  $P_z$  (б)

Кількість циклів осьових коливань залежить від швидкості шліфувального круга  $V_{кр}$ , амплітуди  $A$  та частоти коливань  $f$ . Величина переміщення зерна за половину циклу коливання визначатиметься за формулою:

$$BC = \frac{V_{кр}}{2f} \quad (1)$$

де  $V_{кр}$  – мінімальна швидкість круга. Вектор напрямку руху зерна є сумою двох векторів:  $OC$  – напрямку коливань, і  $OM$  – напрямку різання.

$$\tan \varphi = \frac{AM}{AO} = \frac{V_{кр}}{4fa} \quad (2)$$

Враховуючи, що  $\varphi = f(V_{кр}, a, f)$ , від'ємний передній кут зерна  $\gamma$  буде зменшуватись до значення  $\gamma_B$ . Зі зменшенням  $V_{кр}$  і збільшенням добутку  $Af$ , величина кута  $\gamma_B$  буде зменшуватись. Це покращує різальну здатність абразивного зерна на ділянках траєкторії АБ та БД.

Аналіз рис. 3 показує, що траєкторія руху зерна 1 ефективніша, ніж траєкторія руху зерна 2, оскільки рух зерна поза зоною утворення мікростружки 1-1 не призводить до виконання корисної роботи (зерно тільки дряпає оброблювану поверхню). Тому при забезпеченні нерівності  $V_{кр} < 2\pi Af$  час перебування зерна в заштрихованій зоні можна збільшити при збільшенні  $f$ . Мінімальне значення частоти коливань, за умови здійснення коливання за 1 оборот круга, визначиться за формулою:

$$f_{min} = \frac{30D_{кр}}{A} \quad (3)$$

де  $D_{кр}$  – діаметр шліфувального круга, мм;  $A$  – амплітуда коливань, мм.

Максимальне значення частоти коливань  $f_{max}$  обмежується розмірами зони 1 - 1 і враховує коефіцієнт стружкоутворення  $K_p$  та параметр  $d_u$ . Кореляція максимальної частоти коливань з цими параметрами обумовлює енергоощадливість процесу і в даній роботі не досліджується. Чим більша зернистість і гостріше окреме зерно шліфувального круга, тим більше значення  $f_{max}$ . При цьому продуктивність шліфування збільшується.

Теоретичний аналіз дії складових сили різання при роботі одиничного абразивного зерна показує, що складова  $P_x$  виникає виключно під час осевих коливань деталі. Імпульсне зменшення і збільшення  $P_x$  на ділянці  $A^1 - D^1$  (рис. 3. б) в діапазоні  $P_x^{min} - P_x^{max}$  регламентується зменшенням і збільшенням переднього кута у та вступом у роботу нових лез зерна, причому корисна дія складової сили  $P_x$  проявляється тільки на ділянці  $M^1N^1$  і носить імпульсний характер. Мінімальне значення  $P_x$  в точках  $N^1$  і  $M^1$  відповідає передньому куту зерна  $\gamma_B$ , а максимальне значення  $P_x$  – в точці  $B^1$  переднього кута  $\gamma$ .

Розглянемо випадок збігу напрямку примусових коливань із напрямком радіальної складової сили різання (рис. 4).

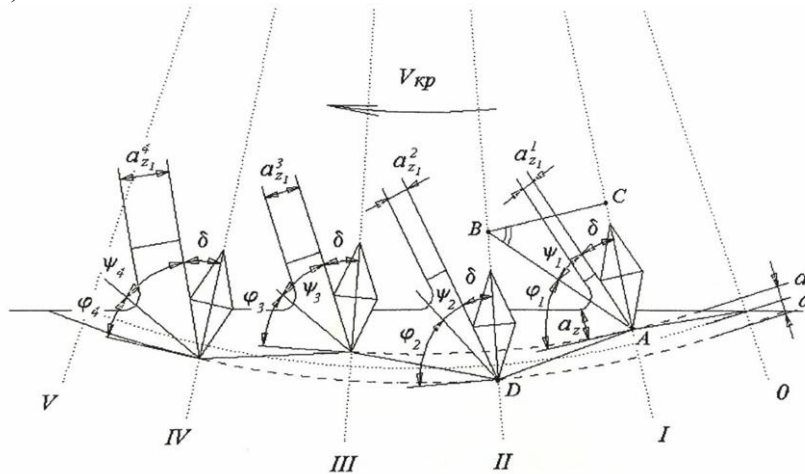


Рис. 4. Схема стружкоутворення при радіальному вібромеханічному шліфуванні:  
I - IV – положення абразивного зерна на дузі 0 - V.

Рухом абразивного зерна є траєкторія у вигляді ламаної пилкоподібної лінії на відносно невеликій відстані 0 - V. Так, при зовнішньому діаметрі шліфувального круга 200 мм та швидкості обертання 28 м/с час одного обороту становить 1/47 секунди. Залежно від глибини різання, пружних властивостей матеріалу покриття, його зернистості та структури ( $K_p$ ,  $\Pi$ ) довжина дуги контакту абразивного зерна дорівнює 0,8 - 1,7 мм [3]. Із загальної кількості абразивних зерен, що розташовані на робочій поверхні, частка різальних становить 8 - 12% [4]. Потенційним резервом різальних зерен є зерна, що тільки дряпають поверхню деталі, погіршуючи її шорсткість і не виконуючи корисної роботи (їх кількість становить 33 - 35%) [4]. Третя група зерен теж не виконує корисної роботи по зняттю припуску, тільки третється по поверхні деталі, підвищуючи температуру в зоні різання. Кількість таких зерен становить 40 - 42% [5].

Радіальне вібромеханічне шліфування передбачає можливість коливання різального зерна з амплітудою  $A$  і частотою  $f$  відносно центральної траєкторії, що характеризується глибиною різання  $t$ . За половину циклу коливання деталі в радіальному напрямку різальне зерно пройде



шлях  $AD \approx BC = \frac{V_{KP}}{2f}$ . Із положень I і III (рис. 4) абразивне зерно «рухається вниз», що збільшує глибину різання, і поверхня деталі отримує імпульс сили стискання. Із положень II і IV абразивне зерно «рухається вгору», і під дією передньої поверхні зерна виникають деформації зсуву. Таким чином, при проходженні абразивного зерна по дузі контакту під дією імпульсних сил стискання і зсуву утворюється елементарна мікростружка, яка, перетворюючись на металевий пил, легко видаляється із зони різання і робочої поверхні шліфувального круга. Механізм радіальної вібрації підвищує ефективність шліфування за рахунок переходу частини абразивних «дряпаючих» зерен другої групи в першу групу різальних. Але для тонкостінних покриттів (плазмово-дугових і детонаційно-газових) з'являється небезпека пошкодження суцільності перехідної зони на межі розподілу [6]. У процесі руху абразивного зерна спостерігається зміна кута зсуву  $\varphi$ , та товщини мікростружки  $a_z$ .

Для розрахунку кута зсуву і товщини мікростружки є можливість використати такі залежності – з трикутника ABC визначається кут зсуву мікростружки у позиціях I і III:

$$\tan \varphi_1 = \tan \varphi_3 = \frac{2df}{V_{KP}}, \quad (4)$$

де  $d$  – характерний геометричний параметр зерна.

Кут зсуву мікростружки в позиціях II і IV визначається за формулою:

$$\tan \varphi_2 = \tan \varphi_4 = \frac{2(d + 2A)f}{V_{KP}}, \quad (5)$$

Розрахунок товщини мікростружки для верхнього положення зерна можна визначити за формулою:

$$a_{z1}^1 = a_{z1}^3 = \frac{a_z \cdot \sin \psi_1}{\sin \varphi_1} \quad (6)$$

Товщина мікростружки для нижнього положення зерна визначається за формулою:

$$a_{z1}^2 = a_{z1}^4 = (a_z + 2a) \frac{\sin \psi_2}{\sin \varphi_2} \quad (7)$$

де  $a_z$  – миттєва глибина мікро різання;  $\psi_1, \psi_2$  стружкоутворення.

Розглянемо кінетичну модель вібротехнічного шліфування покриттів, коли напрямок вимушених коливань збігається з напрямком тангенційної складової сили різання для випадку, що абразивне зерно (A3) є тілом ромбічної форми з ідеальними різальними лезами. Напрямок вібрацій заготовки може збігатися з напрямком різання шліфувального круга або бути протилежним йому за умови, що  $V_{KP} < 2\pi Af$  (рис. 5).

У випадку співпадіння напрямків вібрації і різання, шліфування буде здійснюватися за звичайною схемою. Якщо ж напрямок вібрації протилежний напрямку різання, то спостерігається порушення контакту A3 з мікростружкою і створюється ефект вібротехнічного різання. Для повного забезпечення цього ефекту за час контакту A3 з оброблюваною поверхнею заготовки має відбутись не менше двох коливань. Якщо контакт умовно починається з точки A, то на ділянках BCD і EFK мікростружка розділиться на два елементи. На ділянці траєкторії DE контакт буде перерваний. Посилує ефект стружкорозподілення зростання поруватості покриття і її нерівномірність. Примусові коливання A3 є гармонійними і енергія руху постійно відновлюється. Тому рух A3 може бути описаний формулою:  $y = a \cdot \sin \omega t$ , де  $t$  – поточне значення часу кругового коливання.

**Висновки.** Аналіз кінематичних схем шліфування з використанням примусових коливань показує, що залежно від координації напрямку вібрації і напрямку різання проявляються нові, притаманні тільки одному із варіантів координації, позитивні властивості процесу. Поліпшення умов стружкоутворення, збільшення кількості робочих зерен, використання більшої кількості різальних лез на зерні, покращення мікрогеометричних параметрів зерна – це ті позитивні якості віброшліфування, які характерні при застосуванні осьового, радіального та тангенціального напрямків вектору швидкості коливань. Вибір і реалізація того чи іншого варіанта здійснюється залежно від характеру операції (чорнова або чистова), типу покриттів та його матеріалу, характеристики шліфувального круга.

Осьове вібротехнічне шліфування більш придатне для чорнкової, попередньої обробки кругами високої твердості і поруватості з карбїду кремнію зеленого або титаністого електрокорунду.



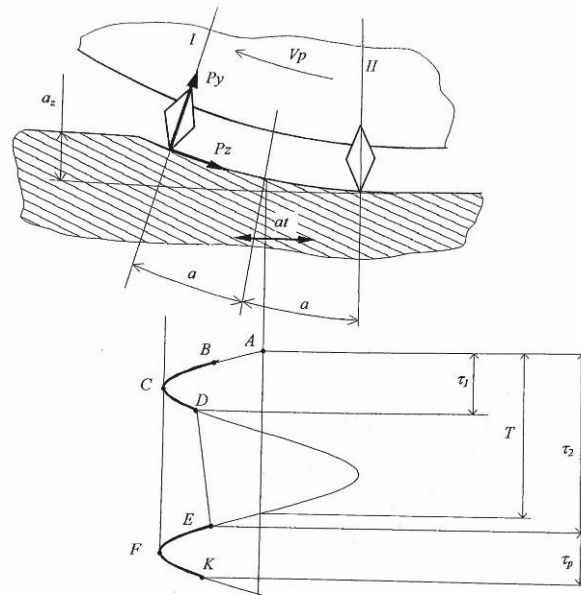


Рис. 5. Схема переривчастого контакту абразивного зерна

Радіальне вібромеханічне шліфування краще використовувати для обробки покриттів із зернистістю напилюваних частинок 150 мкм і більше, оскільки при цьому найкраще реалізується ефект «когезійного руйнування» покриття. Тангенціальне віброшліфування доцільніше використовувати при чистовій, остаточній обробці покриттів, коли необхідно звести до мінімуму негативний вплив силового і температурного факторів.

#### Список використаних джерел:

1. Підгайчук С.Я., Дробот О.С., Яворська Н.М., Машовець Н.С. Відновлення деталей машин комбінованими методами обробки. Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні, 2020. 109-110 с.
2. Сокур, Т.Д., Попіль Ю.С., Корж В. М. Огляд сучасного стану і перспектив розвитку газотермічних способів нанесення покриття. Journal of Mechanical Engineering NTUU" Kyiv Polytechnic Institute", 2011 – 2(61), 168-171 с.
3. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н. В. Новикова. – Киев: ИСМ НАНУ, 2001. – 528 с.: ил.
4. Шепелєв А.О. Інтенсифікація процесів шліфування інструментальних матеріалів кругами із синтетичних алмазів і кубічного нітриду бора : Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.03.01. – Х., 2002. – 36 с.
5. Pilipenko A.M. Treatment of coatings by the combined method. Welding International, 2002 – 16 (11), p. 903-908.
6. Тонконогий В.М, Рибак О.В. Вибір параметрів шліфування плазмових покриттів при багатокритеріальній оптимізації технологічного процесу. Резание и инструменты в технологических системах, 2018 – 89, 190-197 с.

**В.С. Волкотруб, Л.О. Гуменюк**

*Луцький національний технічний університет*

## **АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ВИЯВЛЕННЯ ТРІЩИН НА ОСНОВІ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ**

*Запропоновано алгоритм виявлення тріщин на зображеннях, який використовує різні методи для досягнення високої точності та ефективності. Алгоритм включає етапи попередньої обробки, такі як регулювання яскравості, підвищення контрастності та віднімання фону для зменшення шуму та підвищення контрастності зображення. Алгоритм застосовує фільтри Габора для виділення деталей на зображенні, а потім застосовує бінаризацію і виявлення країв для вилучення тріщин із зображення. Виконано його програмну реалізацію.*

*Ключові слова: аналіз тріщин, комп'ютерний зір, класифікація елементів зображень, фільтр Габора, оброблення зображень, покращення зображень, Python.*

**V. Volkotrub, L. Gumeniuk**

## **AUTOMATION OF THE CRACK DETECTION PROCESS BASED ON IMAGE PROCESSING**

*An algorithm for detecting cracks in images is proposed that uses various methods to achieve high accuracy and efficiency. The algorithm includes preprocessing steps such as brightness adjustment, contrast enhancement, and background subtraction to reduce noise and enhance image contrast. The algorithm applies Gabor filters to extract details in the image, and then applies binarization and edge detection to extract cracks from the image. Its software implementation has been performed.*

*Keywords: crack analysis, computer vision, image feature classification, Gabor filter, image processing, image enhancement, Python.*

**Постановка проблеми.** В сучасних умовах, де автоматизація процесів стає все більш актуальною, проблема виявлення тріщин у різних конструкціях і матеріалах є досить важливою. З одного боку, це дозволяє забезпечити безпеку та ефективність роботи різних машин, з іншого - знижує витрати на планове обслуговування та ремонт об'єктів.

Виявлення тріщин конструкцій є важливим у багатьох галузях, таких як цивільне будівництво, аерокосмічна промисловість, автомобілебудування та виробництво. У цивільному будівництві, наприклад, виявлення тріщин у мостах, будівлях та інших спорудах має вирішальне значення для забезпечення їхньої безпеки та довговічності. Автоматизація процесу виявлення тріщин за допомогою методів обробки зображень може підвищити швидкість і точність процесу, що призведе до раннього виявлення потенційних загроз безпеці.

В аерокосмічній та автомобільній промисловості виявлення тріщин в деталях літаків і автомобілів має важливе значення для забезпечення безпеки пасажирів і надійності транспортних засобів. Автоматизоване виявлення тріщин може допомогти виявити потенційні проблеми на ранніх стадіях, знизити ризик аварій і заощадити час і гроші.

На виробництві виявлення тріщин у виробках може допомогти покращити процес контролю якості та зменшити витрати на доопрацювання та ремонт. Автоматизоване виявлення тріщин може допомогти виявити дефекти в процесі виробництва і підвищити загальну ефективність і продуктивність виробничого процесу.

Використання обробки зображень для виявлення тріщин має кілька переваг.

По-перше, її можна використовувати для виявлення тріщин у важкодоступних або небезпечних для людини місцях. Наприклад, у випадку трубопроводів, які прокладені під землею або у важкодоступних місцях, може знадобитися використання роботів або дронів для зйомки зображень для аналізу.

По-друге, обробка зображень може бути використана для виявлення тріщин на ранній стадії, до того, як вони стануть більш серйозними і потенційно спричинять катастрофічні аварії. Це може допомогти запобігти дорогому ремонту або навіть катастрофам, які можуть виникнути через невиявлені тріщини.

По-третє, обробка зображень може забезпечити більш об'єктивний і послідовний підхід до виявлення тріщин. Навчені моделі машинного навчання можна використовувати для аналізу зображень з різних джерел і за різних умов, що може зменшити ризик людської помилки і варіативність результатів.

Актуальність автоматизації процесу виявлення тріщин полягає у тому, що пошук дефектів є важливим етапом в процесі діагностики машин і обладнання, а також забезпечує безпеку їх експлуатації. Неруйнівний контроль, яким є обробка зображень, є перспективною технологією, яка дозволяє збільшити точність виявлення тріщин, а також покращити швидкість і ефективність процесу.

Неавтоматизовані (ручні, візуальні) та автоматизовані методи виявлення тріщин на основі обробки зображень - це два різних підходи до виявлення та аналізу тріщин на зображеннях.

Неавтоматизовані методи передбачають, що людина-оператор вручну оглядає зображення і виявляє тріщини на основі їх візуального вигляду. Це може включати вимірювання розміру, форми і розташування тріщин, а також оцінку їхньої серйозності. Ручні методи схильні до людських помилок і можуть бути трудомісткими, особливо при роботі з великою кількістю зображень або складними зображеннями. Ці методи не передбачають використання будь-яких комп'ютеризованих алгоритмів обробки зображень.

Автоматизовані методи, з іншого боку, використовують алгоритми обробки зображень для автоматичного виявлення та аналізу тріщин на зображеннях. Ці методи можуть включати такі техніки, як виявлення країв, встановлення порогових значень і виділення ознак для виявлення і локалізації тріщин на зображенні. Автоматизовані методи також можуть включати алгоритми машинного навчання і глибокого навчання, які навчені розпізнавати і класифікувати тріщини на зображеннях. Автоматизовані методи, як правило, швидші, точніші і послідовніші, ніж ручні методи, і можуть обробляти велику кількість зображень без втручання людини.

Автоматизовані методи виявлення тріщин на основі обробки зображень мають великий потенціал порівняно з неавтоматизованими методами, оскільки вони забезпечують точнішу та швидшу ідентифікацію тріщин на зображеннях. Також важливим фактором є те, що автоматизовані методи виявлення тріщин можуть бути використані для обробки великої кількості зображень в автоматичному режимі.

Загалом, автоматизовані методи виявлення тріщин, засновані на обробці зображень, є більш ефективними, точними і надійними, ніж неавтоматизовані методи, але ступінь їх використання також залежить від складності зображення і типу тріщин.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розробка методів дослідження та алгоритмів для автоматизації виявлення тріщин на зображеннях була постійним процесом, який розвивався протягом тривалого часу. Ранні методи передбачали ручний огляд і вимірювання тріщин, що займало багато часу і було схильне до людської помилки. З появою технології цифрових зображень почали з'являтися автоматизовані методи виявлення тріщин.

У 1990-х роках дослідники почали використовувати методи обробки зображень, такі як виявлення країв і встановлення порогових значень, для виявлення і локалізації тріщин на зображеннях [1-3]. Ці методи, хоч і були ефективними, але обмежувалися якістю зображень та умовами освітлення, за яких вони були зроблені.

У 2000-х роках для виявлення тріщин на зображеннях почали застосовувати алгоритми машинного навчання, такі як нейронні мережі та машини опорних векторів [4-6]. Ці методи показали підвищену точність порівняно з традиційними методами обробки зображень, але все ще мали обмеження в роботі з реальними зображеннями з варіаціями освітлення і текстур поверхні.

Останні дослідження були зосереджені на розробці алгоритмів глибокого навчання, таких як згорткові нейронні мережі (CNN), для виявлення тріщин на зображеннях [7-8]. Ці методи показали багатообіцяючі результати, з високою точністю і стійкістю до змін в освітленні і текстурі поверхні. Крім того, дослідники також використовували генеративні змагальні мережі (GAN) для створення синтетичних зображень тріщин для навчання ШНМ.

Загалом, розробка методів дослідження та алгоритмів для автоматизації виявлення тріщин на зображеннях була поступовим процесом, який включав інтеграцію різних методів з обробки зображень, машинного навчання та глибокого навчання.

В даний час розробка методів дослідження та алгоритмів для автоматизації виявлення тріщин на зображеннях зосереджена на підвищенні точності, надійності та ефективності процесу виявлення.

Одним з напрямків сучасних досліджень є використання алгоритмів глибокого навчання, таких як згорткові нейронні мережі (CNN), для виявлення тріщин на зображеннях [7-8]. Ці методи показали високу точність і стійкість до змін освітлення і текстури поверхні, і дослідники

продовжують покращувати їхню ефективність за допомогою таких методів, як навчання з перенесенням і ансамблеве навчання.

Іншою сферою сучасних досліджень є використання методів комп'ютерного зору для покращення виявлення тріщин на зображеннях [4, 6]. Ці методи включають використання 3D-зображень, стереозображень і структурованого світла для отримання більш детальних і точних зображень тріщин.

Дослідники також вивчають використання методів машинного навчання, таких як навчання з глибоким підкріпленням і активне навчання, щоб підвищити ефективність і швидкість процесу виявлення.

Крім того, існують методи, що базуються на техніці покращення зображень, такі як денойзинг зображень, надвисока роздільна здатність зображень та відновлення зображень, які використовуються для покращення якості зображень перед процесом виявлення тріщин, таким чином, тріщини можуть бути виявлені більш точно.

Таким чином, сучасні дослідження в галузі автоматизації виявлення тріщин на зображеннях зосереджені на підвищенні точності, надійності та ефективності процесу виявлення за рахунок використання методів глибокого навчання, комп'ютерного зору, машинного навчання та покращення якості зображень.

Загалом, сфера автоматизації виявлення тріщин на зображеннях є активною галуззю досліджень з багатьма потенційними напрямками для подальшого розвитку. З постійним розвитком технологій цілком ймовірно, що в майбутньому будуть розроблені нові та більш ефективні методи виявлення тріщин на зображеннях.

**Постановка завдань.** Метою роботи є розробка системи автоматизованого виявлення тріщин на основі обробки зображень.

**Викладення основного матеріалу.** Автоматизація виявлення тріщин на зображеннях може бути досягнута за допомогою методів обробки зображень, таких як встановлення порогових значень, виявлення країв і виділення ознак. Процес зазвичай включає попередню обробку зображення для покращення видимості тріщин, наприклад, видалення шуму і регулювання контрастності. Потім застосовується алгоритм для виявлення країв або особливостей, які відповідають тріщинам. Вони можуть бути передані в модель машинного навчання для класифікації. Використання моделей глибокого навчання, таких як згорткові нейронні мережі (CNN), показало свою ефективність у подібних задачах.

Ці методи можуть використовуватися в різних областях, таких як медична візуалізація, комп'ютерний зір, стиснення зображень і відео, робототехніка, біометрія та будівництво. Вони можуть поєднуватися з іншими технологіями, щоб зробити результати більш ефективними і точними.

Процес виявлення тріщин на основі обробки зображень включає в себе отримання зображень поверхні, що підлягає перевірці та їх аналіз за допомогою комп'ютерних алгоритмів.

Алгоритми шукають характерні ознаки, такі, як зміни текстури, кольору чи форми, які вказують на наявність тріщин. Результатом аналізу, як правило, є карта тріщин, виявлених на зображенні, яку можна використовувати для подальшої оцінки та ремонту.

Методи обробки зображень можуть використовуватися як для виявлення поверхневих, так і підповерхневих тріщин і можуть виконуватися за допомогою різних програмних засобів.

У обробці зображень для виявлення тріщин використовується кілька методів, зокрема:

– бінеаризація зображення - це процес перетворення зображення у відтінках сірого у бінарне зображення, де кожен піксель є або чорним, або білим [9].

– виявлення країв - цей метод передбачає ідентифікацію країв або меж на зображенні, які відповідають тріщинам. Краї можна виявити за допомогою різних алгоритмів, таких як детектор країв Канні, оператор Собеля або перетворення Хафа [10].

– сегментація зображення - цей метод передбачає поділ зображення на різні регіони та аналіз кожного регіону окремо. Зазвичай сегменти створюються на основі змін кольору або текстури зображення [1].

– зіставлення шаблону - цей метод передбачає порівняння зображення з шаблоном відомих шаблонів тріщин. Потім зображення обробляється для пошуку областей, які відповідають шаблону, які потім позначаються як потенційні місця тріщин

Розроблений алгоритм виконує обробку заданого зображення, використовуючи комбінацію наступних методів:

1. Корекція яскравості.
2. Адаптивне вирівнювання гістограми з обмеженим контрастом (CLANE).
3. Віднімання фону за допомогою алгоритму кульки, що котиться.
4. Фільтр Габора.
5. Порогова корекція зображення.

Метою цих методів є покращення зображення та виділення тріщин на зображенні. Кінцевий результат обробки зображення отримується шляхом додавання декількох відфільтрованих зображень, створених шляхом застосування фільтра Габора до зображення з різними параметрами. Результат потім порогоується для створення бінарного зображення.

Додатково є можливість отримати контур об'єктів на зображенні, для чого до напівтонового зображення застосовується фільтр Габора і віднімається від кінцевого результату. Скрипт також виводить на екран проміжний і кінцевий результати і зберігає їх у вигляді графічних файлів.

**Корекція яскравості** - це процес регулювання рівня яскравості зображення. Зазвичай це робиться для того, щоб покращити видимість зображення і зробити його візуально привабливішим. Корекцію яскравості зазвичай виконують за допомогою бібліотеки обробки зображень, наприклад, OpenCV, де такі функції, як `cv2.addWeighted`, можна використовувати для збільшення або зменшення загальної яскравості зображення шляхом коригування ваг оригінального зображення і нульового масиву з постійним скалярним значенням.

**Адаптивне вирівнювання гістограми з обмеженим контрастом (CLANE)** - це метод комп'ютерного зору, який використовується для покращення локальної контрастності зображення. Він працює шляхом поділу зображення на невеликі плиточки, обчислення гістограми значень інтенсивності в кожній плитці, а потім регулювання яскравості і контрастності в кожній плитці так, щоб гістограма була більш рівномірною. Це допомагає виявити особливості зображень, які важко побачити через варіації освітлення або тіні.

Частина назви "з обмеженням контрастності" означає, що алгоритм обмежує кількість підсилення контрастності, яку можна застосувати до кожної плиточки, щоб запобігти надмірному посиленню шуму або інших дрібних деталей на зображенні.

**Віднімання фону за допомогою алгоритму кульки, що котиться** - це метод віднімання фону при обробці зображень. Він працює шляхом віднімання локально оціненого фону від зображення, де фон оцінюється за допомогою морфологічної операції (наприклад, розширення) зі структуроутворюючим елементом у формі кулі.

Радіус кулі визначає розмір ділянки фону, яка буде врахована для оцінки. Віднімання оціненого фону зазвичай виконується попіксельно і призначене для видалення великомасштабних варіацій інтенсивності із зображення та покращення дрібномасштабних особливостей.

Алгоритм широко використовується в різних додатках, таких як мікроскопія та комп'ютерний зір.

**Фільтр Габора** - це тип лінійного фільтра, який використовується для аналізу текстури в обробці зображень. Він може витягувати як просторову, так і частотну інформацію із зображення і може бути використаний для ідентифікації текстурних візерунків і країв.

Зазвичай фільтр являє собою гауссову функцію, модульовану синусоїдальною хвилею, і може бути налаштований для виявлення особливостей у певних масштабах і орієнтаціях.

Фільтри Габора широко використовуються в комп'ютерному зорі, розпізнаванні зображень і шаблонів, а також для вилучення ознак.

**Порогова корекція зображення** - це процес перетворення напівтонового або кольорового зображення у двійкове шляхом присвоєння кожному пікселю двійкового значення 0 або 1 на основі порогового значення. Це порогове значення використовується для розділення зображення на дві області, передній і задній план, де пікселі нижче порогового значення отримують значення 0 (чорний колір), а пікселі вище порогового значення отримують значення 1 (білий колір).

Цей метод широко використовується в обробці зображень для розпізнавання об'єктів, виявлення країв та інших застосувань.

Алгоритм покроково - код реалізує конвеєр для обробки зображення та виявлення шаблонів або структур на зображенні. Ось високорівневий опис кроків:

Попередня обробка вхідного зображення:

- перетворення зображення з BGR у відтінки сірого;
- збільшення яскравості зображення за допомогою функції `cv2.addWeighted`;

- застосування до зображення адаптивного гістограмного вирівнювання з обмеженим контрастом (CLAHE);
- віднімання фону за допомогою функції "subtract\_background\_rolling\_ball" бібліотеки cv2\_rolling\_ball;
- повторне застосування CLAHE до зображення після віднімання фону.

Застосування банку фільтрів Габора до попередньо обробленого зображення:

- побудова фільтрів Габора із заданими параметрами за допомогою функції cv2.getGaborKernel;
- фільтрація попередньо обробленого зображення кожним з фільтрів Габора за допомогою функції cv2.filter2D;
- збереження максимального відгуку відфільтрованого зображення.

Обробка відфільтрованого зображення для створення бінарного зображення:

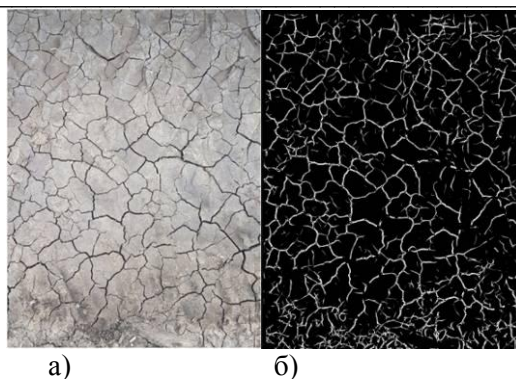
- використання cv2.threshold з аргументом "cv2.THRESH\_BINARY + cv2.THRESH\_OTSU" для перетворення відфільтрованого зображення у бінарне зображення.

Виявлення контурів на бінарному зображенні:

- якщо змінна contour має значення True, то до вихідного зображення застосовується медіанне розмиття і фільтрація Габора, а бінарний результат відкидається;
- потім, беручи побітовий результат кроку 2 і від'ємний результат кроку 4, отримуємо кінцевий результат з контурами.

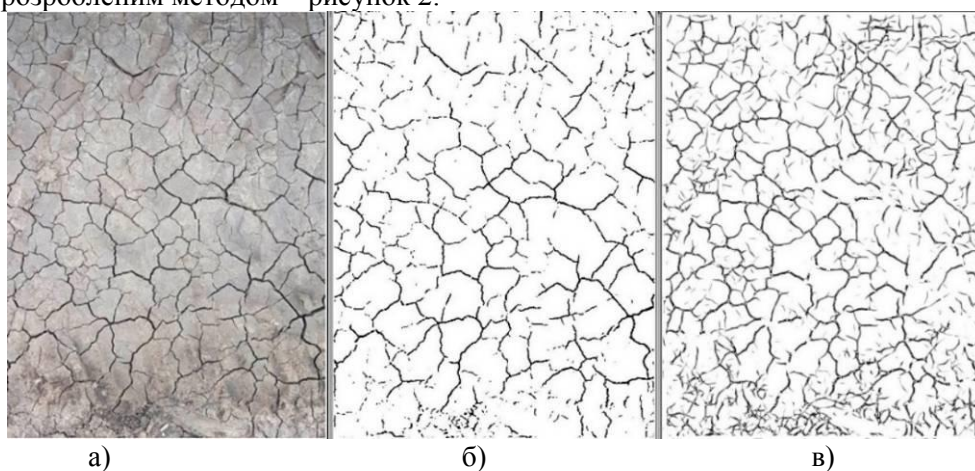
Програмна реалізація виділення тріщин на зображенні:

1. Імпортуємо необхідні бібліотеки: numpy, cv2, cv2\_rolling\_ball.
  2. Скористаємось функцію build\_filters для створення фільтрів за допомогою GaborKernel із заданими параметрами: розмір ядра (ksize), стандартне відхилення (sigma), орієнтація (thet), довжина хвилі (lamb), співвідношення сторін (gam) та фазовий зсув (psi).
  3. Застосовуємо функцію change\_brightness для регулювання яскравості зображення за допомогою cv2.addWeighted.
  4. Скористаємось функцією predv для виконання попередньої обробки зображення, яка включає наступні кроки:
    - перетворення зображення у відтінки сірого;
    - регулювання яскравість за допомогою функції change\_brightness;
    - застосування адаптивного вирівнювання гістограми з обмеженим контрастом (CLAHE) для підвищення контрастності зображення;
    - віднімання фону за допомогою функції cv2\_rolling\_ball.subtract\_background\_rolling\_ball;
    - повторне застосування CLAHE для підвищення контрастності зображення.
  5. Визначаємо процес функції для застосування фільтрів до зображення за допомогою cv2.filter2D і повертаємо результат.
  6. Скористаємось функцією result для застосування фільтрів до вхідного зображення за допомогою функцій build\_filters та process і виведемо результат на екран, а також збережемо його у файл.
  7. Викликаємо функцію result1 для застосування фільтрів до попередньо обробленого зображення за допомогою функції process, а потім застосуємо порогове значення для отримання бінарного зображення. Підсумовуємо бінарні зображення для різних орієнтацій і застосовуємо побітові операції. Якщо параметр contour має значення True, застосовуємо той самий процес до вихідного зображення і віднімаємо результат від суми бінарних зображень.
  8. Нарешті, викликаємо функцію result1 з відповідними параметрами на вхідному зображенні.
  9. Виведемо на екран кінцевий результат і зберігаємо його у файл.
  10. Повторюємо кроки 7-9 для різних значень thet, lamb, gam і psi, щоб отримати оптимальний результат.
- Результати роботи програми виділення тріщин на зображенні наведені на рисунку 1.



**Рис. 1. Результати роботи програми виділення тріщин на зображенні: а) оригінальне зображення; б) виділені тріщини.**

Для порівняння результатів приведемо зображення виділення тріщин методом фільтр Габо́ра та розробленим методом – рисунок 2.



**Рис. 2. Порівняння результатів: а) оригінальне зображення; б) виділення тріщин методом фільтра Габо́ра; в) виділення тріщин розробленим алгоритмом.**

Як видно з рисунка 2, запропонований метод виявлення тріщин дає кращі результати. Виявлено не тільки базові (великі) тріщини, але і сітку малих тріщин.

Для цифрової оцінки ефективності запропонованого алгоритму, зображення, отримані методом Габо́ра та запропонованим методом, перетворені в бінарні і пораховано процент чорних пікселів. Для зображення, отриманого методом Габо́ра, цей процент склав 8.6% від загальної кількості пікселів на зображенні, для запропонованого - 11.7%. Таким чином, запропонований метод виявляє на 36% тріщин більше, ніж метод фільтра Габо́ра.

**Висновки.** Таким чином, розроблений алгоритм є ефективним для виявлення тріщин на зображеннях завдяки використанню відповідних ядер Габо́ра, кроків попередньої обробки, а також порогових і побітових операцій. Програмна реалізація дозволяє точно налаштувати процес виявлення, повторюючи певні кроки з різними значеннями параметрів. Загалом, цей метод забезпечує комплексний підхід до виявлення тріщин.

#### Список використаних джерел:

8. Rafael C. Gonzalez. Richard E. Woods. Digital Image. Processing. Pearson Education Limited 2018. 1019 pages.
9. Pitas, Ioannis. Digital Image Processing Algorithms and Applications. (2000). Published by Springer. 611 pages.
10. Milan Sonka, Vaclav Hlavac, Roger Boyle. Image Processing, Analysis, and Machine Vision. 3rd edition. CL Engineering, 2007. 872 pages.
11. Richard Szeliski. Computer Vision: Algorithms and Applications (Texts in Computer Science) 2nd ed. Springer. 2022. 947 pages.
12. Tom Mitchell. Machine Learning. McGraw-Hill Science/Engineering/Math. 1997. 432 pages.



- 
13. Luo, Huafen & Xu, Jing & Binh, Nguyen & Liu, Shuntao & Zhang, Chi & Chen, Ken. (2014). A simple calibration procedure for structured light system. *Optics and Lasers in Engineering*. vol. 57. pp. 6–12. 10.1016/j.optlaseng.2014.01.010.
  14. [Ian Goodfellow](#), [Yoshua Bengio](#), [Aaron Courville](#). Deep Learning (Adaptive Computation and Machine Learning series) Illustrated Edition. The MIT Press. 2016. 800 pages.
  15. Ali Sharif Razavian. Convolutional Network Representation for Visual Recognition. Doctoral Thesis Stockholm, Sweden, 2017. 675 pages.
  16. Seelaboyina, R., Vishwakarma, R. (2023). Different Thresholding Techniques in Image Processing : A Review. In: Kumar, A., Senatore, S., Gunjan, V.K. (eds) ICDSMLA 2021. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol 947. Springer, Singapore.
  17. "Algorithm and Technique on Various Edge Detection : A Survey" by Rashmi, Mukesh Kumar, Rohini Saxena. *Signal & Image Processing : An International Journal (SIPIJ)* Vol.4, No.3, June 2013. P. 65-75.



S.V. Luniov<sup>1</sup>, P.F. Nazarchuk<sup>1</sup>, O.V. Burban<sup>2</sup><sup>1</sup>Lutsk National Technical University,<sup>2</sup>Volyn Professional College of the National University of Food Technologies

## PECULIARITIES OF THE TENSORESISTANCE OF N-GE SINGLE CRYSTALS AT THE STRONG UNIAXIAL PRESSURES

*The tensorresistive effect in n-Ge single crystals was studied at room temperature and liquid nitrogen temperature under the uniaxial pressure along the crystallographic directions [100], [110], and [111]. The increasing tensorresistance of the investigated n-Ge single crystals is explained by the decrease in electron mobility under the uniaxial pressure, which becomes a tensor when deformed along the [110] and [111] crystallographic directions. A significant increasing tensorresistance at the uniaxial pressures  $P//[100]$  is associated with  $(L_1-A_1)$  - inversion of the absolute minimum type in germanium. The obtained dependences tensorresistance of n-Ge can be used in the design of pressure sensors with a wide range of tensorsensitivity.*

**Keywords:** tensorresistance, tensorsensitivity coefficient, germanium single crystals,  $(L_1-A_1)$  – inversion, uniaxial pressure.

С.В. Луньов, П.Ф. Назарчук, О.В. Бурбан

## ОСОБЛИВОСТІ ТЕНЗОПОРУ МОНОКРИСТАЛІВ N-GE ПРИ СИЛЬНИХ ОДНОВІСНИХ ТИСКАХ

*Досліджено тензорезистивний ефект в монокристалах n-Ge при кімнатній температурі та температурі рідкого азоту в умовах, коли одновісний тиск прикладався вздовж кристалографічних напрямків [100], [110] та [111]. Зростання тензоопору досліджувальних монокристалів n-Ge пояснюється зменшенням рухливості електронів при одновісному тискові, яка при деформації вздовж кристалографічних напрямків [110] та [111] стає тензором. При одновісних тисках  $P//[100]$  значне зростання тензоопору пов'язане з  $(L_1-A_1)$  – інверсією типу абсолютного мінімуму в германії. Одержані залежності тензоопору n-Ge можуть бути використані при конструюванні тензодатчиків з широким діапазоном тензочутливості.*

**Ключові слова:** тензоопір, коефіцієнт тензочутливості, монокристали германію,  $(L_1-A_1)$  – інверсія, одновісний тиск.

**Statement of the problem.** Pressure sensors are widely used in experimental studies of the stressed state of structures, as well as strain transducers in various measuring devices. Semiconductor pressure sensors, compared to wire and foil gauges, have much smaller dimensions and 50-60 times higher sensitivity. Germanium is one of the promising materials for semiconductor pressure sensors and is widely used in microelectronics for the production of diodes, triodes, crystalline detectors, and power rectifiers [1-4]. The influence of high uniaxial pressures leads to a radical deformational reconstruction of the conduction and valence bands of germanium, as well as the energy structure of defects. [5-7]. Such changes in the band structure will consequently affect the tensorresistance of germanium, which is not thoroughly studied at the high uniaxial pressures.

**Setting tasks.** Obtaining the dependences of the tensorresistance and the tensorsensitivity coefficient on the uniaxial pressure along different crystallographic directions for n-Ge single crystals at liquid nitrogen and room temperature.

**Presentation of the main material.** Tensorresistive effect in single-crystal n-type germanium doped with antimony impurities was investigated in this study. The uniaxial pressure was applied along the crystallographic directions [100], [110], and [111] in the experiments. Measurements were performed at room temperature and liquid nitrogen temperature. Investigated samples were fabricated in a dumbbell-shaped form. Such a specific shape of the samples increases their mechanical robustness compared to samples with a parallelepiped shape. For cases of uniaxial pressure along the crystallographic directions [110] and [111], the tensorresistive effect will be absent for pressures above 1.6 GPa, both at liquid nitrogen temperature and room temperature (Fig. 1 and Fig. 2). In these cases, there will be a deformational redistribution of electrons between the  $L_1$  minima of the germanium conduction band with different mobility, which becomes a tensor under the deformation [6]. Such a redistribution leads to a decrease in effective mobility and, accordingly, an increase in the n-Ge resistivity at the pressures  $P < 1.6$  GPa. A significant tensorresistive effect was revealed at the uniaxial pressure  $P > 1.5$  GPa along the crystallographic direction [100], at the temperature of liquid nitrogen (Fig. 1, curve 2). The resistivity of n-Ge single crystals begins to increase monotonically at uniaxial pressures  $P > 1$  GPa and does not reach saturation at a room temperature under these conditions (Fig. 2, curve 2). In this case, there will be no deformational redistribution of electrons between  $L_1$  minima, and the growth of the tensorresistance is

associated with the deformational redistribution of electrons between non-equivalent L1 minima and  $\Delta_1$ , which have different mobilities. [5]. There will be an (L1- $\Delta_1$ ) type inversion of the absolute minimum in germanium for the pressures  $P > 2.1$  GPa.

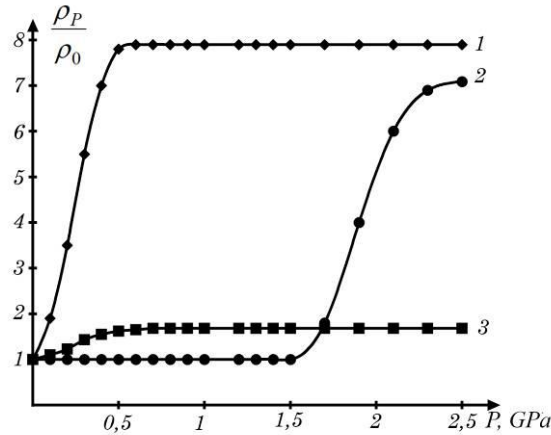


Fig. 1. Tensoresistive effect in n-Ge at the temperature of liquid nitrogen for different crystallographic directions: 1 – uniaxial pressure along the crystallographic direction [111]; 2 – uniaxial pressure along the crystallographic direction [100]; 3 – uniaxial pressure along the crystallographic direction [110].

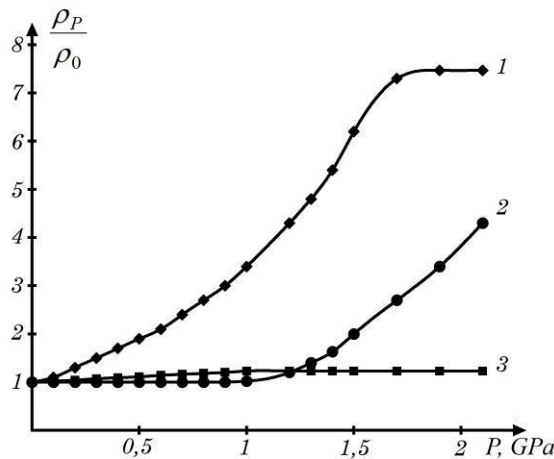


Fig. 2. Tensoresistive effect in n-Ge at room temperature for different crystallographic directions: 1 – uniaxial pressure along the crystallographic direction [111]; 2 – uniaxial pressure along the crystallographic direction [100]; 3 – uniaxial pressure along the crystallographic direction [110].

The coefficient of tensosensitivity under conditions of uniaxial deformation will be determined by the expression [8]:

$$S = \frac{E \left( \frac{\rho_P}{\rho_0} - 1 \right)}{P}, \tag{1}$$

where  $\frac{\rho_P}{\rho_0}$  – the ratio of the resistivity of the deformed n-Ge single crystal to the undeformed one

(magnitude of the tensoresistive effect),  $E$  – Young's modulus, which is determined from the expression

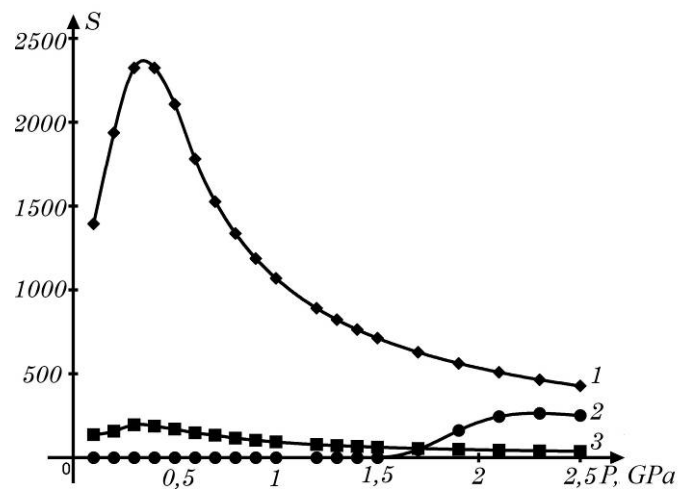
$$\frac{1}{E} = \frac{C_{11} + C_{12}}{(C_{11} + 2C_{12})(C_{11} - C_{12})} + \left( \frac{1}{C_{44}} - \frac{2}{C_{11} - C_{12}} \right) (n_1^2 n_2^2 + n_1^2 n_3^2 + n_2^2 n_3^2). \tag{2}$$

In expression (2)  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{44}$  – the elastic constants for the crystal lattice of germanium;  $n_1, n_2, n_3$  – components of the unit vector normal to the deformation area of the sample. In the coordinate system associated with the crystallographic axes [100], [110] and [111], the components of this vector depending on the direction of uniaxial pressure are as follows: with uniaxial pressure

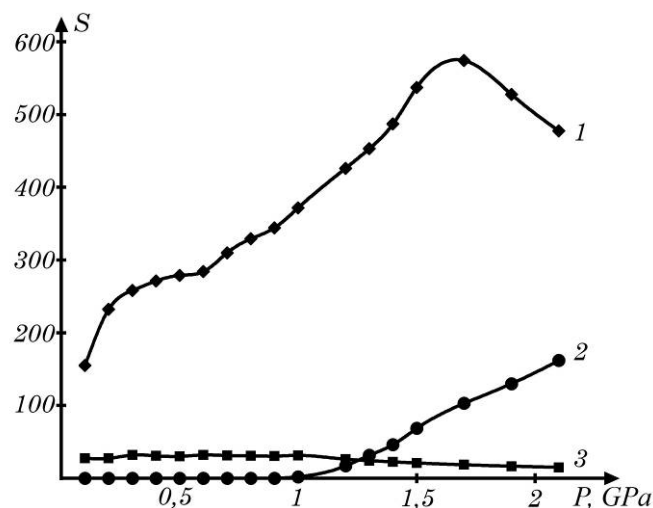
$P//[100]$   $n_1 = 1, n_2 = 0, n_3 = 0$ ; for uniaxial pressure  $P//[110]$   $n_1 = 1, n_2 = 1, n_3 = 0$  and for uniaxial pressure  $P//[111]$   $n_1 = 1, n_2 = 1, n_3 = 1$ . Elastic constants are known parameters:  $C_{11} = 1,292 \times 10^{11}$  Pa,  $C_{12} = 0,479 \times 10^{11}$  Pa,  $C_{44} = 0,67 \times 10^{11}$  Pa.

Then, according to (2), we obtain the following values of Young's modulus:  $E = 1,55 \cdot 10^{11}$  Pa,  $E = 1,37 \cdot 10^{11}$  Pa,  $E = 1,03 \cdot 10^{11}$  Pa for uniaxial deformation along the crystallographic directions [111], [110] and [100], respectively.

Taking into account expressions (1), (2) and experimental results of the tensorresistive effect of n-Ge single crystals, it is possible to obtain the dependences of the tensorsensitivity coefficient on uniaxial pressure for different crystallographic directions at the temperature of liquid nitrogen and the room temperature (Fig. 3 and Fig. 4).



**Fig. 3. Dependence of the tensorsensitivity coefficient in n-Ge on uniaxial pressure at the temperature of liquid nitrogen ( $T=77$  K) for different crystallographic directions: 1 – uniaxial pressure along the crystallographic direction [111]; 2 – uniaxial pressure along the crystallographic direction [100]; 3 – uniaxial pressure along the crystallographic direction [110].**



**Fig. 4. Dependence of the tensorsensitivity coefficient in n-Ge on uniaxial pressure at room temperature for different crystallographic directions: 1 – uniaxial pressure along the crystallographic direction [111]; 2 – uniaxial pressure along the crystallographic direction [100]; 3 – uniaxial pressure along the crystallographic direction [110].**

Tensorsensitivity coefficient for n-Ge at the uniaxial pressure along the crystallographic directions [100], [110] and [111] were calculated based on the obtained experimental results of tensorresistance. It

was shown that the maximum value of the tensosensitivity coefficient ( $S=2325$ ) can be reached under the uniaxial deformation  $P \sim 0.4$  GPa of n-Ge single crystals along the crystallographic direction [111].

**Conclusions.** The presence of the tensorial effect in n-Ge is associated with a decrease in electron mobility under the deformation. Electron mobility becomes anisotropic under the uniaxial pressure along the [110] and [111] crystallographic directions, which is the reason increasing resistivity in n-Ge. For the case of uniaxial pressure along the crystallographic direction [100], a deformational redistribution of electrons will occur between the  $L_1$  and  $\Delta_1$  minima of the conduction band of germanium with different mobilities, as a result of which a significant effect of tensorial resistance is observed for n-Ge. From the analysis of the obtained results, it follows that it is advisable to make strain gauges from n-Ge for measuring uniaxial pressures  $P < 1$  GPa, when this pressure is directed along the crystallographic directions [111] or [110]. The obtained significant tensorial effect at  $P > 1.5$  GPa and a sharp increase in the coefficient of strain sensitivity for the crystallographic direction [100] can be used to design pressure sensors based on n-Ge single crystals, which will be able to work in significant deformation fields.

### References:

1. The Influence of Pressure on the Parameters of Semiconductor Structures / V.S. Osadchuk, O.V. Osadchuk, N.L. Bilokon, A.O. Krivosheya // Scientific Works of Vinnitsa National Technical University. Automation and Information-Measuring Technology. 2009. No. 1. pp. 1-5.
2. Microengineering pressure sensor active layers for improved performance / S. R. A. Ruth, V. R. Feig, H. Tran, Z. Bao // Advanced Functional Materials. 2020. Vol. 30(39). P. 2003491.
3. Chen, W., & Yan, X. Progress in achieving high-performance tensorial and capacitive flexible pressure sensors: A review // Journal of Materials Science & Technology. 2020. Vol. 43. P. 175-188.
4. Fraden, J., & Fraden, J. Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications // New York: Springer. 2010. 678 p.
5. Luniov, S. V., Burban, O. V., & Nazarchuk, P. F. (2015). AI Zimych Influence of electron-phonon interaction on tensorial resistance of single crystals n-Ge. Journal of Advances in Physics, 7(3), 1931-1938.
6. Luniov, S. V., Zimych, A. I., Nazarchuk, P. F., Maslyuk, V. T., & Megela, I. G. (2016). Specific features of electron scattering in uniaxially deformed n-Ge single crystals in the presence of radiation defects. Radiation Effects and Defects in Solids, 171(11-12), 855-868.
7. S. A. Fedosov, S. V. Lunev, D. A. Zakharchuk, L. I. Panasyuk, Yu. V. Koval', Naukovyi Visnyk Volyns'koho Universytetu im. Lesi Ukrainki, Fizychni Nauky (16), 39 (2011), in Ukrainian.
8. Luniov S.V. Tensosensitivity in  $\Delta_1$  – model of the conduction band in germanium crystals // Sensor Electronics and Microsystems Technologies. 2013. Vol 10(3). P. 76-81.

О. М. Рощенко

## ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ 3D ДРУКУ У ПРОМИСЛОВОСТІ: ЗАГАЛЬНИЙ АСПЕКТ

старший науковий співробітник Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, м. Київ, Україна, [lx.toto@gmail.com](mailto:lx.toto@gmail.com),  
<https://orcid.org/0000-0002-3562-5428>, AAN-7001-2021

У статті досліджено інноваційні технології 3D друку у промисловості. Розкрито принципи адитивного виробництва в умовах сучасності. Проаналізовано основні проблеми впровадження 3D друку, розкрито його сутність, а також виділено основні переваги та недоліки. Наголошується, що під 3D друком розуміють процес створення 3D об'єктів за допомогою спеціального принтера, тобто це комп'ютерне моделювання чи альтернативне конструювання, яке передбачає процес відтворення реального об'єкта на зразок 3D моделі. Детально охарактеризовано всі наявні методи 3D друку та здійснено їх порівняльну характеристику щодо принципу дії, використовуваних матеріалів, переваг та певних обмежень. Підкреслено, що цифрове моделювання ескізів для 3D друку, має певні проблеми зумовлені потребою у захисті даних, збереженні їхньої цілісності розробки та подальшої передачі до місця виробництва деталей. Зазначається, що надзвичайно важливо здійснювати контроль деталей, що формуються з використанням адитивних технологій, на наявність дефектів. В силу особливостей фізичних процесів, що відбуваються при формуванні таких виробів, у них можуть виникати не тільки дефекти, які зазвичай властиві застосовуваним матеріалам, а й поля механічних напруг. Наголошено, що, на сьогодні, адитивні технології мають величезний потенціал щодо зниження енергетичних витрат на створення найрізноманітніших видів продукції, від галузі будівництва, транспорту та цифрових технологій, до медицини, продуктів харчування, одягу, тощо. Незважаючи на багато позитивних особливостей 3D-друку, впровадження даної технології в Україні ще не досягло значного рівня. У роботі наголошується на низці проблем, таких як проектування та розробка українських аналогів інструментарію 3D-друку і фізичні особливості самої технології виробництва. Зазначається, що на сьогодні існує потреба у створенні моделей українських пристроїв 3D-друку, у розробці методів контролю та загальній системі національних стандартів.

Ключові слова: 3d друк, інновації, методи, адитивна технологія, промисловість, структура, інструмент, матеріал.

O. Roschenko

## INNOVATIVE 3D PRINTING TECHNOLOGIES IN INDUSTRY: GENERAL ASPECT

Senior Researcher Ukrainian Scientific Research Institute of Special Equipment and Forensic Expertise of the Security Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine, [lx.toto@gmail.com](mailto:lx.toto@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-3562-5428>, AAN-7001-2021

The article examines innovative 3D printing technologies in industry. The principles of additive manufacturing in modern conditions are revealed. The main problems of the implementation of 3D printing were analyzed, its essence was revealed, and the main advantages and disadvantages were highlighted. It is emphasized that 3D printing is understood as the process of creating 3D objects using a special printer, that is, it is computer modeling or alternative construction, which involves the process of reproducing a real object like a 3D model. All available 3D printing methods have been characterized in detail and their comparative characteristics have been carried out regarding the principle of action, materials used, advantages and certain limitations. It is emphasized that the digital modeling of sketches for 3D printing has certain problems caused by the need to protect data, preserve their development integrity and further transfer to the place of production of parts. It is noted that it is extremely important to control the parts formed using additive technologies for the presence of defects. Due to the peculiarities of the physical processes that occur during the formation of such products, they can have not only defects that are usually characteristic of the materials used, but also mechanical stress fields. It was emphasized that, today, additive technologies have a huge potential for reducing energy costs for the creation of a wide variety of products, from the field of construction, transport and digital technologies, to medicine, food, clothing, etc. Despite the many positive features of 3D printing, the implementation of this technology in Ukraine has not yet reached a significant level. The work emphasizes a number of problems, such as the design and development of Ukrainian analogues of 3D printing tools and the physical features of the production technology itself. It is noted that today there is a need to create models of Ukrainian 3D printing devices, to develop control methods and a general system of national standards.

Key words: 3d printing, innovation, methods, additive technology, industry, structure, tool, material.

**Вступ та постановка проблеми.** Останні досягнення в області 3D-друку дозволяють промисловцям і дослідникам створити абсолютно нову основу для майбутнього виробництва. Яка сформує багатоматеріальне підґрунття для 3D-друку та забезпечить підтримку різних властивостей матеріалів, які можна надрукувати, як наслідок, це може призвести до підвищення продуктивності, розширення областей застосування, таких як аерокосмічна промисловість, біододатки, матеріали для космічних кораблів, електронні компоненти, тощо. Багатоматеріальна основа складається з низки компонентів, таких як полімери, кераміка, метали та біоматеріали, які

використовуються в кількох техніках адитивного виробництва для створення багатоматеріальних структур. У цьому матеріалі в межах одного компонента є можливість досягти таких властивостей, як твердість, стійкість до корозії, підвищені властивості розтягування та стиску, а також усунути потребу у складному виробництві та дорогому інструменті. Новітні процеси сучасного 3D-друку з урахуванням застосування кількох матеріалів можна об'єднати в одну деталь, усуваючи потребу в моделюванні з кількох частин. Друк на базі низки матеріалів може забезпечити покращені характеристики, включаючи контрольовану анізотропію матеріалу, що може бути важливим для функціональних систем, таких як ті, що потребують вирівнювання поверхні, але мають високу навантажувальну здатність. Саме тому, необхідним є структуризація сучасних методів друку, їх глибоке розуміння враховуючи труднощі зв'язування та використання методів 3D-друку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Підхід наукової спільноти до розгляду питань застосування технології 3d друку в усіх сферах сучасного життя формувався на протязі багатьох років.

Викладений у [1] матеріал надає практичні рекомендації, щодо використання адитивних технологій в процесах реставрації та відтворенні елементів архітектурного декору для розробки точних цифрових моделей та виготовлення майстер-форм для лиття копій втрачених чи пошкоджених архітектурних раритетів.

О. В. Муравйов, Ю. М. Гижник, В. Ф. Петрик, А. Г. Протасов, К. М. Серий [2] здійснили порівняльний аналіз існуючих технологій 3D-друку із зазначенням областей застосування, основних можливостей і короткого опису принципів роботи. Виявлено найбільш перспективні в найближчому майбутньому області застосування адитивних технологій та основні тенденції їх удосконалення.

У роботі [3] Г. О. Андрощук визначив адитивні технології, перспективи і проблеми 3D-друку. Автором наведено економічний аналіз щодо використання АМ-технологій у провідних країнах світу.

У [4] наведено короткі характеристики найбільш популярних видів пластика, що застосовуються у FDM-технології 3D друку та докладно наведені особливості налаштування програми-слайсера для практичного використання.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Pal Rahul, Pandey Prachi, Chanana Arsh, Singh Ravindra, Waheed Saman, Katiyar Aparna [5], Harasym Joanna [6], Nofar M.Reza, Utz Julia, Geis Nico, Altstädt Volker, Ruckdäschel Holger [7], Bao Yinyin, Paunović Nevena, Leroux Jean-Christophe [8], Zoabi Adeeb, Redenski Idan, Oren Daniel, Kasem Adi, Zigron Asaf, Daoud Shadi, Moskovich Liad, Kablan Fares, Srouji Samer [9], Pezzana Lorenzo, Wolff Raffael, Melilli Giuseppe, Guigo Nathanaël, Sbirrazzuoli Nicolas, Stampfl Jurgen, Liska Robert, Sangermano Marco [10], Luo Cihui, Liu Lingxiao, Huang Yu, Lou Xiaoding, Xia Fan, Song Yanlin [11], Morales María, Maranon Alejandro, Hernandez Camilo, Michaud Véronique, Porrás Alicia [12], Li Yun, Li Bo [13], Sardelli Lorenzo, Tunesi Marta, Briatico Vangosa Francesco, Petrini Paola [14] та інші.

Однак, незважаючи на масштабність наукових досліджень за окресленою тематикою, питання розкриття інноваційних технологій 3d друку залишається відкритим та потребує детального опрацювання відносно новітніх стандартів технічного регулювання.

**Постановка завдання.** Дослідити інноваційні технології 3d друку у промисловості.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Враховуючи останні досягнення для конкретних функціональних потреб промисловості, орієнтованих на застосування, зростає потреба в інноваційних техніках, інструментах і технологіях виробництва, які використовуються для конкретних цілей. Сучасна техніка 3D-друку представила широкий вибір матеріалів або технік обробки, які можна застосовувати за різними напрямками.

У найближчому майбутньому потенціал складного багатоматеріального 3D-друку стане революційним моментом у швидкому виробництві, індивідуальному дизайні та структурних застосуваннях. Багатоматеріальний 3D-друк сумісний із функціонально сортованими матеріалами, які мають єдину структурну форму, а також має потенціал для використання в конструкційних додатках, щоб отримати переваги від гібридних/комбінованих характеристик матеріалів.

Вибір матеріалів для кінцевого використання у процесі реалізації операцій 3D-друку базується на доступності матеріалів та їх оброблюваності, властивостях матеріалу, техніці, яка використовується для друку, часу обробки та швидкості втрат матеріалу, модернізації та ремонтпридатності матеріалу, вартості, фізичних та хімічних властивостях кінцевого продукту, впливу зовнішніх умов, тощо.

Доступність матеріалів для широкого спектру застосувань є потенційною річчю при виборі кількох матеріалів. Це матеріали, які легко доступні та використовуються для загального застосування, які можна друкувати навіть на всіх типах принтерів, таких як PET – поліетилентерефталат, PA – поліамід, TPU – термопластичний поліуретан, PC – полікарбонат, HIPS – ударостійкий полістирол та багато інших. Останнім часом дослідження деталей/компонентів із багатьох матеріалів, виготовлених за допомогою 3D-друку, значно збільшилися. Використовуючи сучасний 3D-друк, можна створювати високоякісні компоненти шляхом підгонки різних шарів різних матеріалів до бажаної товщини. Завдяки цій унікальності окреслений процес виділяється порівняно зі звичайними методами виробництва. Отже, матеріали, які використовуються для 3D-друку, мають бути визначені на етапі проектування, на основі параметрів та властивостей. Різноманітні полімери, кераміка, метали та біоматеріали доступні для проектування та виготовлення компонентів із багатьох матеріалів за допомогою сучасного 3D-друку.

Полімерні композити, наповнені вуглецевими або скляними волокнами, деревні частинки (PLA матриця), пісковик (співполіефірна матриця), магнітні (PLA матриця з частинками заліза), електропровідні (PLA матриця з вуглецевими наповнювачами). Широко доступний фотополімер на основі гнучкого, жорсткого опорного матеріалу, який можна легко обробити на струменевих принтерах за допомогою методів моделювання осадження плавленням, які використовуються для виготовлення шарнірів.

3D-друк силіконових еластомерів у поєднанні з нанокремнеземом (NS) є одним із типів вдосконаленої структури наступного покоління, що має покращену продуктивність і низьку вартість виготовлення. Такі багатоматеріальні компоненти виготовляються за допомогою процесу Direct Ink Writing (DIW) і знаходять своє застосування в медичних пристроях, гнучкій електроніці та м'якій робототехніці. Силікони – це матеріали з низькою в'язкістю, які вимагають тривалого затвердіння під час процесів 3D-друку, але їхня приваблива еластичність робить їх придатними для вищезазначених областей. Щоб подолати ці проблеми з придатністю до друку, нанокремнезем додається в даний час до еластомерів у якості модифікатора реології, і це додавання не знижує еластичність еластомерів.

Поліетиленгліколь (ПЕГ) є гідрогелем з хорошою сумісністю з хімічними модифікаціями і використовується в основному в каркасах тканинної інженерії [15]. PEGX – желатинові багатоматеріальні компоненти, синтезовані за допомогою методів біочорнила, мають підвищену якість пошарового друку та надійність.

Останні досягнення в галузі людських імплантатів, особливо заміни кісток, зосереджені на розробці нового мультиматеріалу, який має хорошу міцність на стиск. Пропіленфумарат диметакрилат (PFDMA) є макромером, який має низьку в'язкість і володіє необхідними властивостями для утворення емульсії з високою внутрішньою фазою. PFDMA має хороші властивості, такі як біологічне розкладання та цитосумісність.

Механічні характеристики компонентів, виготовлених із використанням добавок із кількох матеріалів, часто перевищують характеристики друку з одного матеріалу. Утворення порожнеч у наступних шарах друкованих компонентів може вплинути на їхні механічні характеристики через зменшення міжфазної адгезії в друкованих шарах. Іншою типовою проблемою адитивного виробництва із застосуванням 3D-друку є різниця в механічній поведінці між горизонтальним натягом або стисненням і вертикальним натягом або стисненням. Надійні методи 3D-друку, такі як укладання мікродобавок, необхідні для забезпечення узгодженості шарів і підвищення якості поверхні відповідно до специфікацій.

Функціональні градієнтні цифрові композити також можуть бути створені та виготовлені з використанням 3D-друку з кількох матеріалів, що може підвищити ефективність виготовленого структурного дизайну, наприклад, метод оптимізації цифрового ламінатного композиту. Запропонований цифровий потік проектування може одночасно оновлювати як макромасштабну форму створеної конфігурації ламінату, так і вирівнювання коротких армованих волокон у топографії.

На початкових стадіях друк матеріалу обмежувався властивостями екструзії та технікою друку вирощування, тому його було розширено до мультиматеріалу з дуже хорошою оброблюваною структурою. PVA – полівініловий спирт, ABS – акрилонітрилбутадієнстирол і PLA – полімолочна кислота були основними альтернативами на ранніх етапах, кожна з яких мала свій набір застосувань і функціональних властивостей. У той час як ABS відомий своїми механічними

якостями, PLA відомий своєю легкістю друку та відсутністю сильного запаху пластику або випарів. З іншого боку, PVA здебільшого використовувався для друку опорних структур, коли виріб містить підвісні частини. Порошкове сплавлення, екструзія та рідка полімеризація ґрунтуються на переходах порошок, рідина-тверде тіло або тверде тіло-рідина-тверде тіло [16]. У кожному секторі можна використовувати різні методи. Порошкове плавлення використовується в таких процесах, як селективне лазерне плавлення (SLM), селективне лазерне спікання (SLS) і плавлення електронним променем (EBM). Екструзія матеріалу є основою для моделювання плавного осадження (FDM) (плавлення, а потім затвердіння матеріалу).

Трьома основними методами кубової полімеризації є цифровий синтез світла (DLS), цифрова обробка світла (DLP) і стереолітографія (SL). Незважаючи на те, що метод фотополімеризації в кубі не завжди дозволяє застосовувати багато матеріалів, завдяки його численним перевагам, таким як якість поверхні, точність розмірів і можливість друку на широкому діапазоні матеріалів, фотополімеризація в кубі була модифікована, щоб забезпечити можливість використання кількох матеріалів у друці [17].

Стереолітографія у ванній фотополімеризації використовує фотополімерну рідину як вихідний матеріал. Опускаючи будівельну платформу в чан і полімеризуючи її УФ-лазером, рідкий пластик шар за шаром перетворюється на 3D-об'єкт. Перевага цієї стереолітографії дозволяє створювати великі деталі з дуже високою точністю та обробкою поверхні.

Технологія цифрової обробки світлом (DLP) дуже схожа на стереолітографію, але використовує інше джерело світла та рідкокристалічний дисплей. У цьому випадку два чи більше цифрових пристроїв мікровіддзеркалення використовуються для доставки матеріалів із кількома чорнилами для додатків із кількома матеріалами.

Екструзію можна розділити на дві основні підгрупи залежно від температури, необхідної або відповідної для екструзії: виготовлення плавлених ниток (FFF) або моделювання плавного осадження (FDM) для екструзії розплавлених термопластичних полімерів і пряме написання чорнилом (DIW) для екструзії без плавлення.

Технологія багатоструменевого моделювання (MJ) реалізується наступним чином: струменева друкуюча головка подає розплавлений віск на друкарський стіл. Цей метод дає перевагу отримати дуже високу точність і якість поверхні, але він працює лише з воскоподібними матеріалами.

На відміну від багатоструменевого моделювання поліструменевого працює по-іншому: друкуюча головка подає рідкі фотополімери на друкарський стіл. Матеріал швидко твердіє та цементується під дією УФ-світла, що дозволяє накладати шари один на інший.

Плавлення порошкового шару (PBF) – це техніка, яка ґрунтується на тій самій фундаментальній концепції, що й фрезерування, оскільки компоненти виготовляються шляхом додавання матеріалу, а не його видалення за допомогою традиційних процесів формування. Метод починається з розробки 3D-моделі CAD, яка чисельно розділена на багато різних шарів. Оскільки джерелом тепла зазвичай є промінь енергії, траєкторія сканування джерела тепла генерується для кожного шару, який визначає як граничний контур, так і певну послідовність заповнення, як правило, растровий шаблон.

Лазерне спікання (LS) та вибіркоче лазерне спікання (SLS) мають певні спільні риси. Лазер використовується для вибіркового розплавлення крихітного шару пластикового порошку. Компоненти шар за шаром накопичуються в шарі порошку.

Вибіркове лазерне спікання (SLS) – це метод адитивного виробництва, який використовує лазер як джерело енергії для спікання порошкоподібного матеріалу, автоматично направляючи лазер у точки простору, описаного 3D-моделлю, зв'язуючи матеріал разом, що створює тверду структуру.

Метод електронно-променевого плавлення використовує потужний електронний промінь для виробництва енергії, необхідної для високої потужності плавлення та продуктивності. Гарячий процес виробляє компоненти з мінімальною залишковою напругою, тоді як вакуум гарантує чисту та регульовану атмосферу. Скануючи концентрований електронний промінь для вибіркового розплавлення певних областей порошку, система EBM створює структури знизу вгору. Він бере дані з 3D-моделі CAD і наносить послідовні шари порошкоподібного матеріалу. Техніка повторюється до тих пір, поки не буде створено останній шар компонента. Це відбувається у вакуумі, що робить його придатним для виготовлення конструкцій з реактивних матеріалів, які не можуть викидатися в атмосферу. У системах екструзії матеріалів для одночасного друку



компонентів із кількох матеріалів зазвичай використовуються друкувальні головки з подвійним або кількома екструдерами.

Щодо переробки та повторного використання багатокомпонентних матеріалів на сьогодні проведено дуже мало досліджень. Армовані волокнами термопластичні композити є популярним мультиматеріалом, який можна переробляти та повністю відновлювати. Схема переробки матеріалів із замкнутим циклом для вуглецевого волокна та матриці була використана для безперервних FRTP, довгих FRTP, коротких FRTP і, зрештою, армованих порошком пластмас.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз методів 3D-друку

№	Техніка	Принцип дії	Матеріал	Переваги	Обмеження
1	Моделювання осадження плавленням (FDM)	На основі екструзії	Термопластики (ABS, PLA, PC, PA тощо); скло (нове); евтектичний метал; кераміка; їстівний матеріал тощо.	Просте використання та обслуговування; легкодоступний; багатоматеріальні конструкції; низька вартість	Шорстка поверхня; низька роздільна здатність; висока вартість (для скла та металу)
2	Пряме написання чорнилом (DIW)	На основі екструзії	Пластмаси, кераміка, харчові продукти, живі клітини, композити	Універсальність	Низька роздільна здатність; вимагає постобробки
3	Стереолітографічний апарат (SLA) і (цифровий світловий процес) DLP	Фотополімерія	Фотополімери	Висока точність; простий	Одиничний матеріал; небіологічно сумісний
4	Виробництво ламінованих предметів (LOM)	Ламінування	Листовий матеріал (папір, пластикова плівка, металеві листи, целюлоза тощо)	Універсальний; низька вартість; легко виготовляти великі деталі	Займе багато часу; обмежені механічні властивості; низька матеріаломісткість; конструктивні обмеження
5	Вибіркове лазерне спікання (SLS) і вибіркове лазерне плавлення (SLM)	Лазерне затвердіння на основі порошку	Порошковий пластик, метал, кераміка, ПК, ПВХ, ABS-віск, акриловий стирол тощо.	Висока точність; широка адаптація матеріалів; висока міцність	Обмежені механічні властивості; висока вартість
6	Струменевий фотополімер (Ployjet)	Струменевий	Рідкі фотополімери	Висока точність	Висока вартість
7	3D струмене з'єднання порошку (3DP)	Струменевий	Будь-який матеріал у формі частинок, гіпс, кераміка, цукор тощо.	Немає необхідності в допоміжних матеріалах; різнобічний; менша вартість; барвистий друк	Низька міцність; додаткова обробка поверхні; обмежені механічні властивості

Розробка нових і вдосконалених композитних матеріалів, які можна переробляти, а також виробничих процесів, які необхідні для майбутнього розвитку, щоб одночасно відповідати

характеристикам кінцевого використання та придатності до переробки є актуальним в умовах сьогодення.

**Висновки.** У роботі досліджено інноваційні технології 3d друку у промисловості. Адитивне виробництво із застосуванням низки різних матеріалів надає різні властивості матеріалу в одному компоненті, а також дозволяє об'єднувати кілька компонентів в один компонент. Багатофункціональні 3D-компоненти мають глобальний потенціал для впровадження в кількох галузях, включаючи біомедичну інженерію, програмну робототехніку, електроніку, просторові та аерокосмічні програми. Незважаючи на значні вдосконалення технологій 3d друку, за останні кілька років, існує багато невирішених проблем, таких як низька продуктивність, погана масштабованість і обробка поверхні, обмежений вибір матеріалів, високе перехресне забруднення та низький міжфазний зв'язок між різними матеріалами. На додаток до цього також необхідні фундаментальні наукові знання матеріалознавства, кінетики та механіки, які необхідні для сприяння та вдосконалення досліджень адитивного виробництва. Оскільки складність обробки швидко зростає через різноманітність використовуваних матеріалів, необхідно звернути увагу на створення нових виробничих продуктів і нових досягнень у передовому виробництві. Вплив на виробничий сектор промисловості за допомогою нових проривів у розробці технологій 3D-друку, ґрунтується на знаннях про розуміння різноманітних матеріалів і зв'язувальних сил, а також інструментального вдосконалення технології.

Перспективами подальшого дослідження є розробка універсального методу 3D-друку із застосуванням перехресної технології багато матеріального впливу.

### Література

1. Лебедева, О. О. Адитивні технології в реставрації та відтворенні елементів архітектурних об'єктів / О. О. Лебедева, О. М. Гумен // Збірник доповідей VI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Прикладна геометрія, дизайн, об'єкти інтелектуальної власності та інноваційна діяльність студентів та молодих вчених», м. Київ, Київ, 2017. С. 269-274.
2. Муравйов, О. В. Сучасний стан та перспективи розвитку адитивних технологій / О. В. Муравйов, Ю. М. Нижник, В. Ф. Петрик, А. Г. Протасов, К. М. Серий // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2021. Том 32 (71), №5. С. 114-119.
3. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (І частина) / Г. О. Андрощук // *Наука, технології, інновації*. 2017. № 1. С. 68-77. – Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/STI\\_2017\\_1\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/STI_2017_1_12).
4. Манжілевський О. Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування : навчальний посібник / О. Д. Манжілевський, Р. Д. Іскович-Лотоцький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. 105 с.
5. Pal Rahul, Pandey Prachi, Chanana Arsh, Singh Ravindra, Waheed Saman, Katiyar Aparna. (2023). Recent Approaches on 3D Printing (3DP) in Pharmaceuticals as Dominance Role in Traditional Formulation. № 8. P. 989.
6. Harasym Joanna. (2023). 3D Printers for Food Printing -Advantages and Drawbacks of Market Ready Technical Solutions. № 38. P. 41-59.
7. Nofar M.Reza, Utz Julia, Geis Nico, Altstädt Volker, Ruckdäschel Holger. (2022). Foam 3D Printing of Thermoplastics: A Symbiosis of Additive Manufacturing and Foaming Technology. *Advanced Science*. № 9. DOI: 10.1002/advs.202105701.
8. Bao Yinyin, Paunović Nevena, Leroux Jean-Christophe. (2022). Challenges and Opportunities in 3D Printing of Biodegradable Medical Devices by Emerging Photopolymerization Techniques. *Advanced Functional Materials*. № 32. P.210-264. DOI: 10.1002/adfm.202109864.
9. Zoabi Adeeb, Redenski Idan, Oren Daniel, Kasem Adi, Zigran Asaf, Daoud Shadi, Moskovich Liad, Kablan Fares, Srouji Samer. (2022). 3D Printing and Virtual Surgical Planning in Oral and Maxillofacial Surgery. *Journal of Clinical Medicine*. №11. P. 23-85. DOI: 10.3390/jcm11092385.
10. Pezzana Lorenzo, Wolff Raffael, Melilli Giuseppe, Guigo Nathanaël, Sbirrazzuoli Nicolas, Stampfl Jurgen, Liska Robert, Sangermano Marco. (2022). Hot-lithography 3D printing of biobased epoxy resins. *Polymer*. № 254. P. 125-197. DOI: 10.1016/j.polymer.2022.125097.
11. Luo Cihui, Liu Lingxiao, Huang Yu, Lou Xiaoding, Xia Fan, Song Yanlin. (2022). Recent Advances in Printable Flexible Optical Devices: From Printing Technology and Optimization

Strategies to Perspectives. The Journal of Physical Chemistry Letters. № 13. P. 12061-12075. DOI: 10.1021/acs.jpcclett.2c03153.

12. Morales María, Maranon Alejandro, Hernandez Camilo, Michaud Véronique, Porras Alicia. (2023). Colombian Sustainability Perspective on Fused Deposition Modeling Technology: Opportunity to Develop Recycled and Biobased 3D Printing Filaments. *Polymers*. № 15. P. 528. DOI: 10.3390/polym15030528.

13. Li Yun, Li Bo. (2022). Direct ink writing 3D printing of polydimethylsiloxane-based soft and composite materials: A mini review. *Oxford Open Materials Science*. № 2. DOI: 10.1093/oxfmat/itac008.

14. Sardelli Lorenzo, Tunesi Marta, Briatico Vangosa Francesco, Petrini Paola. (2021). 3D- Reactive printing of engineered alginate inks. *Soft Matter*. № 17. DOI: 10.1039/D1SM00604E.

15. Берладір Х. В. Біомедичні матеріали: від історії до сьогодення : навчальний посібник / Х. В. Берладір, Т. П. Говорун, О. М. Олешко. – Суми : Сумський державний університет, 2022. 223 с.

16. Пупань Л. І. Постпроцеси адитивних технологій: навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання / Л. І. Пупань. – Харків: НТУ «ХПІ», 2023. 91 с.

17. Poudel Laxmi, Marques Lucas, Williams Robert, Hyden Zachary, Guerra Pablo, Fowler Oliver, Sha Zhenghui, Zhou Wenchao. (2022). Toward Swarm Manufacturing: Architecting a Cooperative 3D Printing System. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. № 144. P. 1-11. DOI: 10.1115/1.4053681.

**А.В. Кузьмов**<sup>1,2</sup>

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

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

**ДИЛАТАНСІЙНО ЧУТЛИВА МОДЕЛЬ ПЛАСТИЧНОСТІ ПОРИСТИХ МАТЕРІАЛІВ  
ОТРИМАНА АНАЛІТИЧНИМИ МЕТОДАМИ МІКРОМЕХАНІКИ**

*Шляхом мікромеханічного осереднення на циліндричній представницькій комірці вдалося послідовними аналітичними методами побудувати криву текучості для ізотропного пористого матеріалу. Отримана реологічна модель пластичності пористого матеріалу описує явища різноопірності розтягу-стиску та дилатансії. Вищезгадані ефекти зокрема характерні для пошкоджених або синучих матеріалів. Також ця крива текучості відображає деякі інші, підтверджені експериментом, специфічні особливості пластичної реакції порошків та порошкових заготовок з металів і кераміки. Зокрема такі особливості пластичної реакції, які неможливо на деяких ділянках кривої текучості узгодити з асоційованим законом пластичної течії.*

*Ключові слова:* мікромеханіка, дилатансія, пластичність пористих матеріалів, порошкові матеріали, мікромеханіка, крива текучості.

**A. Kuzmov****MICROMECHANICS BASED DILATANCY-SENSITIVE PLASTICITY MODEL OF POROUS  
MATERIALS IN CLOSED-FORM ANALYTICAL SOLUTIONS**

*By means of micromechanical averaging on a cylindrical unit cell, it was possible to construct a yield curve for an isotropic porous material using consistent analytical methods. At the same time, the velocity field at the meso-level, i.e., in the volume of the cell, in addition to satisfying the corresponding boundary conditions, is also stress-balanced. That is, the stress field generated by this velocity field satisfies the stress equilibrium equation. Expressions for the specific dissipation (which in the case of plasticity is the same as the dissipative potential) and for the yield curve of the porous material were found in an analytical form. The resulting rheological model of the plasticity of the porous material describes the phenomena of tension-compression asymmetry and dilatancy, i.e., an increase in the von Mises ultimate stress with the growth of the hydrostatic stress component during plastic flow. The above-mentioned effects are particularly characteristic of damaged or powdered materials. Also, this flow curve describes some other, experimentally confirmed, specific features of the plastic reaction of powders and powder billets made of metals and ceramics. In particular, such features of plastic response, which in some sections of the yield curve are incompatible with the associative flow rule.*

*Keywords:* micromechanics, dilatancy, plasticity of porous materials, powder materials, micromechanics, yield curve.

**1. Вступ.** В останні десятиліття серед реологічних моделей пластичності поряд з класичними теоріями нестисливо-пластичного деформування Мізеса або Треска, що стосуються в першу чергу незворотного деформування компактних металів, все більшого розповсюдження набувають різноманітні теорії незворотно-стисливої пластичності. Це пов'язано як з потребами багатьох галузей практичної діяльності у моделюванні процесів незворотно-стисливого пластичного деформування певних матеріалів, так і з розвитком засобів комп'ютерного моделювання, в які вбудовуються відповідні моделі стисливої пластичності. Серед таких галузей застосування та відповідних моделей незворотно-стисливої пластичності слід назвати – теорію пресування порошків для потреб порошкової металургії (моделі Штерна [1,2] і Shima–Oyane [3]), фармацевтики [4], керамічного виробництва [5] (Drucker–Prager Cap [6]), механіку ґрунтів (Cam-clay [7]), руйнування піноматеріалів (Deshpande–Fleck [8]), в'язкого руйнування та вичерпання ресурсу пластичності металів (GTN модель Gurson–Tvergaard–Needleman [9]). Щодо пакетів скінченно-елементного моделювання можна згадати в першу чергу загальнонауковий мультидисциплінарний Abaqus, де є вбудовані моделі GTN, Cam-clay, Deshpande–Fleck, Drucker–Prager Cap, а також присутні широкі можливості користувачу програмувати власну реологію матеріалу, в тому числі незворотно-стисливої пластичності. В більш вузько спрямованому на задачі обробки тиском пакеті Deform є вбудована модель пластичності пористих матеріалів Shima–Oyane і також є можливість програмувати користувацькі моделі незворотно-стисливої пластичності.

Слід зазначити, що відповідно до фундаментальних засад континуальної механіки, в класичних моделях нестисливої пластичності Мізеса або Треска пластична поведінка матеріалу при будь-яких схемах деформування може бути описана однією величиною границі текучості. В моделях же стисливої пластичності, навіть у випадку ізотропного Мізесівського матеріалу (тобто коли визначальні співвідношення не залежать від параметра Лоде-Надаї) множина точок текучості

вже, взагалі кажучи, не описується одним параметром, а є певною кривою в  $(p, \tau)$  площині. Де інваріанти  $(p, \tau)$  наступним чином виражаються через напруження:

$$p = 1/3 \sum_{i=1}^3 \sigma_{ii}; \quad \tau^2 = \sum_{ij=1}^3 (\sigma_{ij} - p\delta_{ij})^2; \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases} \quad (1)$$

Також, оскільки матеріал стисливий, вигляд цієї кривої текучості в  $(p, \tau)$  площині буде різним для різної величини густини. Тому побудова моделі стислої пластичності на базі лише обробки результатів експериментів з визначення границь текучості матеріалу  $\epsilon$ , в більшості випадків, занадто витратною та непрактичною. Як правило приймаються деякі теоретичні припущення щодо вигляду кривої текучості в  $(p, \tau)$  площині з метою зменшення обсягу експериментів для верифікації поведінки конкретного матеріалу. Одними з найрозповсюдженіших моделей стислої пластичності є моделі пористих матеріалів. В цьому випадку в структурі матеріалу можна виділити каркас з нестислої твердої фази та пористоту або пори між елементами каркасу. При цьому, як правило, приймається спрощене припущення, що пластична поведінка пористого матеріалу з певним конкретним матеріалом твердої фази, описується лише відносною густиною або пористістю. До таких моделей відносяться криві текучості Штерна, GTN, Shima–Oyane.

У випадку пористого матеріалу одним зі шляхів побудови моделі пластичності є використання мікроемеханічного осереднення на представницькій комірці (осередку). Геометрія представницького осередку відображає при цьому структуру пористого матеріалу. Втім послідовно побудувати теорію пластичності пористого матеріалу засобами мікроемеханіки в аналітичному вигляді вдається дуже рідко, – чи не єдиним таким випадком є модель Герсона [10] для циліндричних пор. При виведенні деяких інших аналітичних теорій пористої пластичності використовувались певні елементи мікроемеханічного аналізу, проте з такими суттєвими спрощувачами припущеннями, що при цьому важко говорити про послідовне мікроемеханічне осереднення. Наприклад в моделі Штерна [1], постулюється певна аналогія між пружними та пластичними потенціалами і відповідно використовуються вирази для модулів пружності пористого тіла. А в чутливій до параметра Лоде-Надаї моделі Штерна та Кокса [11] не розв'язуються рівняння рівноваги сил на мезорівні, а використовується лише кінематично допустиме поле швидкостей. Тому при дослідженні пластичності пористих матеріалів різноманітної структури набуло широкого розповсюдження використання суто обчислювального мікроемеханічного осереднення.

**Метою** даної роботи є саме побудова послідовними аналітичними методами мікроемеханіки моделі пластичності Мізесівських пористих матеріалів

## 2. Представницький осередок пористого матеріалу та поле швидкостей на мезорівні.

Елементарна комірка, на основі якої надалі бути здійснюватись аналіз реології пластичності пористого тіла, може бути подана у вигляді полого циліндра. Тут положення кожної точки визначається трьома циліндричними координатами  $r, \phi, z$ , де  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $\phi = \arctg \frac{y}{x}$ . Матеріал матриці розташований в області  $R_0 < r < R_1$ ,  $0 < z < h$ . Внутрішня область вільна від матеріалу матриці, що передбачається нестисливим. Вважається, що матеріал матриці є ідеально-пластичним за моделлю Мізеса з границею текучості  $\tau = \tau_0$ . Надалі компоненти тензорів напружень і швидкостей деформацій та їх інваріанти, віднесені до елементарної комірки, позначаються малими літерами  $\sigma_{ij}, e_{ij}, p, \tau, e, \gamma$  відповідно. Аналогічні ж величини що описують макроскопічну поведінку мікронеоднорідного пористого матеріалу, позначаються великими літерами  $\Sigma_{ij}, E_{ij}, P, T, E, G$  відповідно. В подальшому припускається, що відбувається двовісне деформування пористого композиту, тобто макроскопічний тензор швидкостей деформацій має вигляд.

$$E_{ij} = \begin{pmatrix} E_{zz} & 0 & 0 \\ 0 & E_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & E_{rr} \end{pmatrix} \quad (2)$$

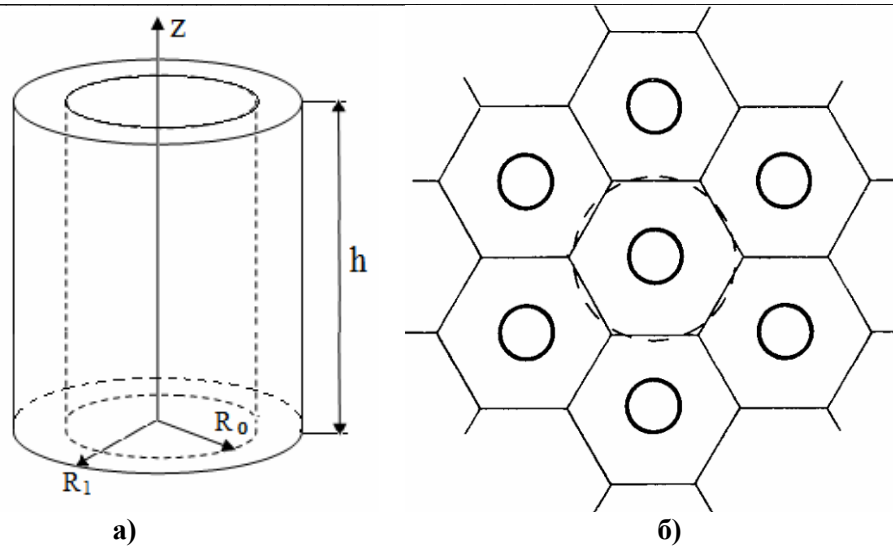


Рис. 1. Геометрія елементарної комірки а) та «масштабу довжини осереднення» б)

В цьому випадку, поле швидкостей  $\vec{V} = \{V_z, V_r, V_f\}$  на мезорівні, відповідно до принципу еквівалентної гомогенності [12], повинно задовольняти «мікромеханічні» граничні умови [13] вигляду  $V_i = \sum_{j=1}^3 E_{ij} x_j$ , що в циліндричній системі координат набудуть форми:

$$\vec{V}|_{r=R_1} = \{E_{zz}z, E_{rr}R_1, 0\}; \quad \vec{V}|_{z=0} = \{0, E_{rr}r, 0\}; \quad \vec{V}|_{z=h} = \{E_{zz}h, E_{rr}r, 0\}; \quad (3)$$

Принцип еквівалентної гомогенності [12] стверджує що якщо розмір області композиту перевищує певну величину «масштабу довжини осереднення» (але все ще менший всього розміру тіла), деформація границі області повинна бути близькою до однорідної  $V_i = \sum_{j=1}^3 E_{ij} x_j$ . Якщо ж

застосувати цей принцип не до елементарної комірки з рис. 1 а), а до гексагональної упаковки таких комірок рис. 1 б), умовно ототожнивши коло та правильний шестикутник [9] Рис. 1 б), не треба буде вимагати умови  $V_r = E_{rr}r$  на всій поверхні верхньої та нижньої границі комірки. Достатньо буде лише щоб на бічній грані  $V_r|_{r=R_1} = E_{rr}R_1$  для того, щоб деформація границі упаковки великої кількості елементарних комірок рис. б) наближалась до однорідної зі збільшенням розміру упаковки. Іншими словами виходячи з того, що при двовісній деформації площина XY буде деформуватись всебічно (а отже гексагональна упаковка не порушиться при деформуванні), доцільно здійснити мікромеханічне осереднення не в межах всього «масштабу довжини осереднення», а лише в межах «масштабу неоднорідності». З врахуванням цих міркувань, а також оскільки відповідно до симетрії  $V_f(z,r,f) \neq 0$ , для мікромеханічного осереднення достатньо задовольнити лише наступні граничні умови на циліндричній комірни:

$$V_r|_{r=R_1} = E_{rr}R_1; \quad V_z|_{r=R_1} = E_{zz}z; \quad V_z|_{z=0} = 0; \quad V_z|_{z=h} = E_{zz}h \quad (4)$$

Зауважимо, що ефективна поведінка композиту з таким представницьким осередком буде, взагалі кажучи, анізотропною. Але для того, щоб на базі представницької комірки анізотропного композиту, отримати ефективні властивості ізотропного пористого матеріалу, було виражено компоненти  $E_{rr}$  та  $E_{zz}$  макроскопічного тензора швидкостей деформацій при двовісній деформації (2) через перші два його інваріанти (E, Γ).

$$E = \sum_{i=1}^3 E_{ii} = E_{zz} + 2E_{rr}; \quad \Gamma = \sqrt{\sum_{i=1}^3 (E_{ij} - 1/3E\delta_{ij})^2} = \sqrt{2/3} |E_{zz} - E_{rr}| \quad (5)$$

У випадку двовісних деформацій, відповідно до (5), така залежність виявляється лінійною:

$$E_{zz} = \frac{E}{3} \pm \sqrt{\frac{2}{3}} \Gamma; \quad E_{rr} = \frac{E}{3} m \frac{\Gamma}{\sqrt{6}} \quad (6)$$

Відповідно граничні умови (4) набудуть вигляду:

$$V_r|_{r=R_1} = \left(\frac{E}{3}m\frac{\Gamma}{\sqrt{6}}\right)R_1; \quad V_z|_{r=R_1} = \left(\frac{E}{3}m\frac{\Gamma}{\sqrt{6}}\right)z; \quad V_z|_{z=0} = 0; \quad V_z|_{z=h} = \left(\frac{E}{3}m\frac{\Gamma}{\sqrt{6}}\right)h \quad (7)$$

В подальшому вважатимемо напружено-деформований стан в комірці параметрично залежним саме від двох інваріантів  $(E, \Gamma)$ , і здійснивши подальше мікромеханічне осереднення знайдемо залежність інваріантів  $(P, T)$  ефективного тензора напружень від  $(E, \Gamma)$ . Завдяки лінійності залежності (6) крива текучості в  $(P, T)$  площині буде опуклою.

Виявляється, що поле швидкостей нестисливого матеріалу твердої фази, що задовольняє граничні умови (7) та рівняння рівноваги сил має доволі простий вигляд

$$V_r = \frac{ER_1^2}{2r} - \left(\frac{E}{6} \pm \frac{\Gamma}{\sqrt{6}}\right)r; \quad V_z = \left(\frac{E}{3} \pm \sqrt{\frac{2}{3}}\Gamma\right)z; \quad V_\varphi = 0 \quad (8)$$

Легко переконатись що поле швидкостей (8) задовольняє умову нестисливості

$$\frac{V_z}{z} + \frac{V_r}{r} + \frac{V_\varphi}{r} = 0 \quad (9)$$

У свою чергу статична врівноваженість поля напружень, що породжене полем швидкостей (8) пов'язана з тим, що по-перше тензорні поля напружень та швидкостей деформацій матимуть нульові недіагональні компоненти та залежатимуть тільки від координати  $r$ , тому рівняння рівноваги по осям  $\varphi$  та  $z$  виконуватимуться тотожно. По-друге в реологічні визначальні співвідношення для нестисливого матеріалу комірки  $\sigma_{ij} = p\delta_{ij} + \tau_0(e_{ij}/\gamma)$ ;  $\gamma^2 = \sum_{k,n=1}^3 e_{kn}^2$  адитивно входить також невідомий гідростатичний тиск  $p$ , тому рівняння рівноваги по осі  $r$  у випадку поля (8) зведеться до лінійного звичайного диференціального рівняння щодо  $p(r)$  вигляду  $p'(r) = F(r, E, \Gamma)$  з початковою умовою в точці  $r = R_0$ , рівності нулю напружень  $\sigma_{rr}$  на поверхні пори  $p(R_0) = -\tau_0(e_{rr}(R_0)/\gamma(R_0))$ . Тому  $p(r)$  однозначно знаходиться та врівноважує поле швидкостей (8). Втім для подальшого аналізу можна обійтися без конкретизації залежності  $p(r)$ .

**3. Знаходження ефективно пластичної реології пористого матеріалу шляхом мікромеханічного осереднення.** Поле швидкостей деформацій породжене полем швидкостей (8) матиме тільки діагональні ненульові компоненти та залежить тільки від координати  $r$

$$e_{zz} = \frac{V_z}{z} = \pm \sqrt{\frac{2}{3}}\Gamma + \frac{E}{3}; \quad e_{rr} = \frac{V_r}{r} = m\frac{\Gamma}{\sqrt{6}} - \frac{E}{6} - \frac{ER_1^2}{2r^2}; \quad e_{\varphi\varphi} = \frac{V_\varphi}{r} = m\frac{\Gamma}{\sqrt{6}} - \frac{E}{6} + \frac{ER_1^2}{2r^2} \quad (10)$$

Тому питома дисипація енергії (вона ж дисипативний потенціал) нестисливого матеріалу комірки набуде вигляду

$$D_{meso}(r, E, \Gamma) = \tau_0\gamma = \tau_0\sqrt{e_{zz}^2 + e_{rr}^2 + e_{\varphi\varphi}^2} = \tau_0\sqrt{\frac{R_1^4 E^2}{2r^4} + \left(\frac{E}{\sqrt{6}} \pm \Gamma\right)^2} \quad (11)$$

Відповідно до принципів мікромеханіки питома дисипація гетерогенного пористого матеріалу  $D(E, \Gamma)$  буде середнім значенням дисипації енергії по всьому об'єму  $V_0 = \pi R_1^2 h$  елементарної комірки, хоча фізично дисипація на мезорівні відбувається тільки в області  $V_1$ :  $R_0 < r < R_1$

$$D(E, \Gamma) = \frac{1}{V_0} \int_{V_1} D_{meso} dV = \frac{2\pi h}{\pi R_1^2 h} \int_{R_0}^{R_1} D_{meso}(r, E, \Gamma) r dr = \frac{2\tau_0}{R_1^2} \int_{R_0}^{R_1} \sqrt{\frac{R_1^4 E^2}{2r^4} + \left(\frac{E}{\sqrt{6}} \pm \Gamma\right)^2} r dr \quad (12)$$

Інтеграл в правій частині (12) допускає вираження в елементарних функціях, тому після низки перетворень  $D(E, \Gamma)$  можна виразити в явному вигляді:

$$D(E, \Gamma) = \frac{\tau_0}{\sqrt{6}} \left( \sqrt{A^2 + B^2} - \sqrt{\Theta^2 A^2 + B^2} + B \ln \left( \frac{\sqrt{\Theta^2 A^2 + B^2} + B}{\Theta (\sqrt{A^2 + B^2} + B)} \right) \right); \quad (13)$$

$$A = E \pm \sqrt{6}\Gamma; \quad B = \sqrt{3}E; \quad \Theta = \frac{R_0^2}{R_1^2}$$



Як і слід було очікувати геометричні параметри комірки  $R_0, R_1, h$  входять у визначальні співвідношення тільки через пористість  $\Theta$ , тобто об'ємну частку порот в пористому матеріалі. З врахуванням того, що для нестисливого матеріалу матриці існує дисипативний потенціал та виконується асоційований закон пластичної течії, питома дисипація гетерогенного пористого матеріалу  $D(E, \Gamma)$  також буде дисипативним потенціалом [13], тобто інваріанти  $(P, T)$  макроскопічного тензора напружень є градієнтом  $D(E, \Gamma)$  [1]:

$$T(E, \Gamma) = \frac{D(E, \Gamma)}{\Gamma} = \frac{\tau_0 \left( \sqrt{(E \pm \sqrt{6}\Gamma)^2 + 3E^2} - \sqrt{\Theta^2 (E \pm \sqrt{6}\Gamma)^2 + 3E^2} \right)}{|E \pm \sqrt{6}\Gamma|} \quad (14)$$

$$P(E, \Gamma) = \frac{D(E, \Gamma)}{E} = \pm \frac{T(E, \Gamma)}{\sqrt{6}} + \frac{\tau_0}{\sqrt{2}} \ln \left( \frac{\sqrt{\Theta^2 (E \pm \sqrt{6}\Gamma)^2 + 3E^2} + \sqrt{3}E}{\Theta \left( \sqrt{(E \pm \sqrt{6}\Gamma)^2 + 3E^2} + \sqrt{3}E \right)} \right) \quad (15)$$

Вирази для  $P(E, \Gamma)$  та  $T(E, \Gamma)$  є однорідними (нульового порядку) функціями від  $(E, \Gamma)$ , тобто їх можна подати як функції від частки  $E/\Gamma$ :

$$P(E, \Gamma) = F_1(E/\Gamma); \quad T(E, \Gamma) = F_2(E/\Gamma); \quad (16)$$

Таким чином рівняння (16) можна розглядати як параметричне задання кривої текучості пористого матеріалу в  $(P, T)$  площині. Втім криву текучості можна виразити також більш традиційно, в неявному вигляді, через функцію текучості,  $\Phi(P, T) = 0$

$$\Phi(P, T) = \left( \frac{T}{\tau_0} \right)^2 + 2\Theta \cosh \left( \frac{\sqrt{2} P m l / \sqrt{3} T}{\tau_0} \right) - 1 - \Theta^2 = 0 \quad (17)$$

Поверхня текучості (17) виявилася, вельми подібною до поверхні текучості Герсона або її модифікації GTN. Що власне й не дивно, адже розв'язувалась задача подібна до роботи [10], різниця полягає тільки в параметризації мікроемеханічних граничних умов. Тобто дану роботу можна, в певному сенсі, розглядати як «ізотропізацію» строго обґрунтованої анізотропної моделі пластичності для двовісного напружено-деформованого стану отриманої в [10]. Варто зауважити, що ізотропна модель пластичності Герсона для сферичних пор [10], яка після феноменологічного доповнення [9] була покладена в основу моделі GTN, та набула широкого розповсюдження, вже не є настільки мікроемеханічно строго обґрунтованою, як для циліндричних пор. Тому, що для осереднення на сферичній комірці [14] використовувалось статично незрівноважене (лише кінематично допустиме) поле швидкостей.

**4. Крива текучості та особливості реології пористого матеріалу.** В подальшому розглянемо випадок знаку  $+$  у виразі  $(\sqrt{2} P m l / \sqrt{3} T)$  з рівняння (17) як фізично більш обґрунтований для пористих або сипучих матеріалів. Як видно з (17) границя текучості на всебічний розтяг та всебічний стиск співпадають. Величина граничного тиску текучості при всебічному навантаженні  $P_{max} = (\tau_0 / \sqrt{2}) \ln(\Theta)$  Проте крива текучості не є симетричною відносно осі  $T$ , тобто для схем навантаження відмінних від гідростатичного абсолютна величина напружень текучості змінюється при зміні знака навантаження, *рис. 2*.

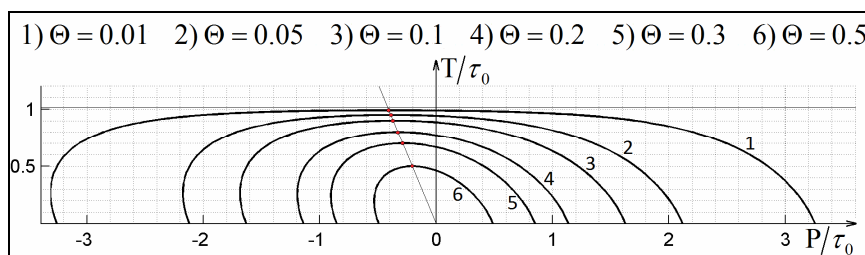


Рис. 2. Криві текучості в  $(P, T)$  площині для різних значень пористості

Тобто має місце різноопірність розтягу та стиску. Крім того найбільше значення інтенсивності дотичних напружень  $T_{max} = \tau_0(1-\Theta)$  досягається при певній ненульовій величині середнього тиску, тобто має також місце явище дилатансії. При цьому вершини кривих текучості в яких  $T = T_{max}$  лежать на прямій  $T = -\sqrt{6} P$ , рис.2. Явище дилатансії при дотичних напруженнях характерно зокрема для пластичності сипучих матеріалів – зокрема пресовок з суміші порошоків металів та кераміки [15], рис.3 а). За умови асоційованого закону пластичної течії матиме місце певна зміна відносної густини, тобто «розпушення» матеріалу при чисто дотичних напруженнях, причому більш суттєвим цей ефект буде при великих пористостях. Проте асоційований закон пластичної течії не може бути коректним на певних невеличких ділянках кривої текучості де нормаль направлена вниз по осі  $T$ . Цей недолік, або обмеження, побудованої моделі викликаний протиріччям між анізотропним представницьким осередком та постульованою ізотропністю моделі. Хоча крива текучості в  $(P, T)$  площині є опуклою, – поверхня навантаження в просторі головних напружень, що є тілом обертання кривої текучості щодо осі  $P$ , вже не буде опуклою.

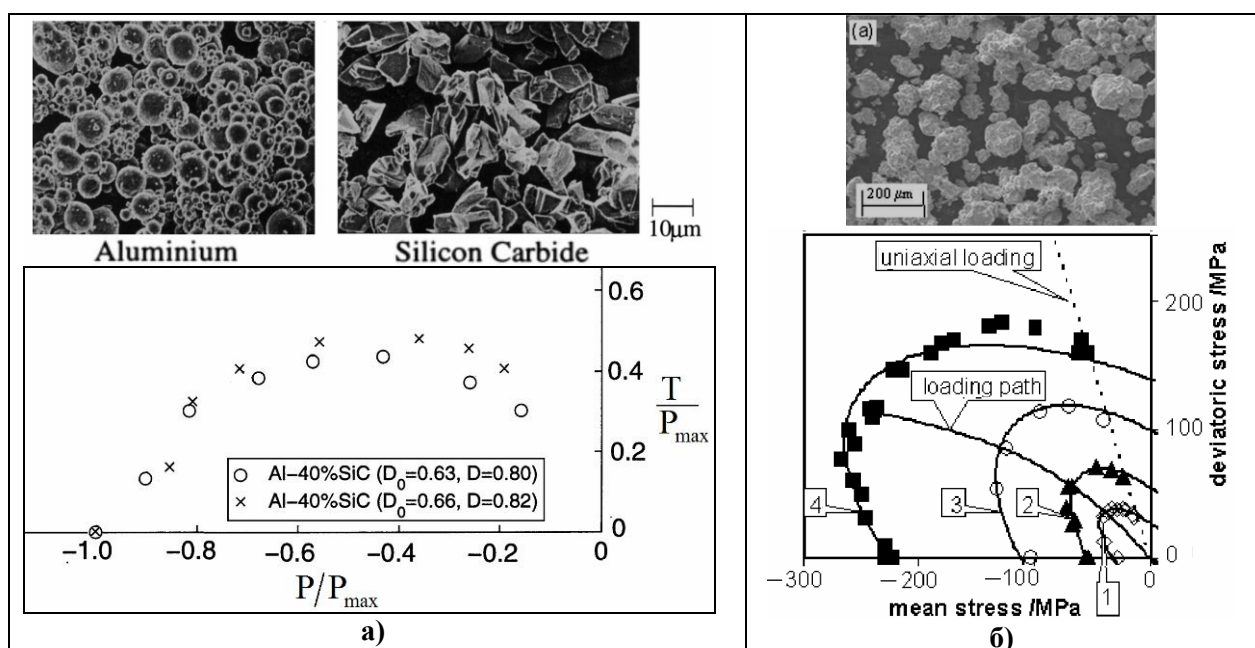


Рис. 3. Дані експериментів з визначення межі текучості для порошкових пресовок: а) з суміші алюмінію та карбїду кремнію [15], б) зі сталі [16]

З іншого боку таке зайве «загинання» контуру текучості в  $(P, T)$  площині, що суперечить асоційованому закону, спостерігалось в низці експериментів [16] з текучості пористих матеріалів порошкового походження, рис.3 б). Відповідно результати даної роботи з теоретичних мікромеханічних засад можуть пояснити такі результати експериментів анізотропією порової структури в досліджуваних матеріалах. Також варто зауважити, що крива текучості перетинає додатній напрямок вісі  $P$  під фіксованим, проте не прямим, кутом  $\arctg(\sqrt{6})$ . Подібний гострий кут контуру текучості з віссю  $P$  також прогнозується, як суто обчислювальним мікромеханічним осередненням для довільних видів деформування пористого матеріалу з ідеально-пластичним каркасом та циліндричними порами [17], так і феноменологічною «краплеподібною» кривою текучості Dimaggio – Sandler [18].

**4. Висновки.** Шляхом мікромеханічного осереднення на циліндричній представницькій комірці вдалося послідовними аналітичними методами побудувати криву текучості для ізотропного пористого матеріалу. Отримана крива текучості описує явища різноопірності розтягу-стиску та дилатансії, що зокрема характерні для пошкоджених або сипучих матеріалів. Також ця крива текучості відображає деякі інші, підтверджені експериментом, специфічні особливості пластичної реакції порошоків та порошкових заготовок з металів і кераміки. Зокрема такі особливості пластичної реакції, які неможливо узгодити на деяких ділянках кривої текучості з асоційованим законом пластичної течії. В подальших дослідженнях планується зробити

феноменологічне доповнення цієї теоретично отриманої моделі з метою точнішого узгодження з результатами експерименту для конкретних матеріалів.

**Список використаних джерел.**

1. Штерн М.Б., Сердюк Г.Г., Максименко Л.А. и др. Феноменологические теории прессования порошков. Киев: Наук. думка, 1982. 140 с
2. Штерн М.Б., Рудь В.Д. Механічні та комп'ютерні моделі консолідації гранульованих середовищ. Київ–Луцьк: Ред.-вид. відділ Луцького нац. техн. ун-ту, 2010. – 232 с.
3. Shima S., Oyane M. Plasticity theory for porous metal. *International Journal of Mech. Sciences*. 1976. Vol. 18. No. 6. P. 285–291. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(76\)90030-8](https://doi.org/10.1016/0020-7403(76)90030-8).
4. Han, L.H., Elliot, J.A., Bentham, A.C., Mills, A., Amidon, G.E., and Hancock, B.C, A modified Drucker–Prager Cap model for die compaction simulation of pharmaceutical powders, *Int. J. Solids Struct.*, 2008, vol. 45, no. 10, pp. 3088–3106
5. Coube O., Riedel H. Numerical Simulation of Metal Powder Die Compaction with Special Consideration of Cracking, *Powder Metall*, 43, 2000. pp. 123-131
6. Drucker D.C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis or limit design, *Q. Appl. Math.*, 10, 1952, pp.157– 165.
7. Borja R.I., Lee S.R. Cam-clay plasticity, part 1: implicit integration of elasto-plastic constitutive relations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1990. 78(1). P. 49-72. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(90\)90152-C](https://doi.org/10.1016/0045-7825(90)90152-C).
8. Deshpande V.S., Fleck N.A. Isotropic Constitutive Model for Metallic Foams. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2000. No. 48. P. 1253-1283. [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(99\)00082-4](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(99)00082-4)
9. Tvergaard V. On localization in ductile materials containing spherical voids. *Int J Fract.* 1982. V. 4. No. 18. P. 237–252. <https://doi.org/10.1007/BF00015686>.
10. Gurson A. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth. Part I – yield criteria and flow rules for porous ductile media. *Journal for Engineering Materials and Technolog.* 1977. Vol. 99. P. 2–15. <https://doi.org/10.2172/7351470>.
11. Shtern M., Cocks A.C.F. The structure of constitutive laws for the compaction of metal powders. *Recent developments in computer modeling of powder metallurgy processes*. IOS Press. 2001. P. 71 – 81.
12. Christensen R.M. *Mechanics of composite materials*. New York: Wiley-Interscience, 1979. 348 pp. <https://doi.org/10.1002/pol.1980.130181009>
13. Победря Б.Е. *Механика композиционных материалов*. Москва: Изд-во Моск. ун-та., 1984. 336 с.
14. Gurson, A. L. *Plastic Flow and Fracture Behavior of Ductile Materials Incorporating Void Nucleation, Growth, and Interaction*. PhD thesis, Division of Engineering, Brown University, Providence, R. I., 1975
15. Sridhar I and Fleck NA. Yield behaviour of cold compacted composite powders; *Acta Mater.* 2000, 48, p3341–3352. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00151-8](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00151-8).
16. Schneider L. C. R. & Cocks A. C. F. Experimental investigation of yield behaviour of metal powder compacts; *Powder Metallurgy*, 2002, 45, p237–245.
17. P. Francescato, J. Pastor, T.-H. Thai, Étude du critère de plasticité des matériaux poreux, *C. R. Acad. Sci. Paris, Série IIb* 329 (2001) 753–760.
18. DiMaggio F.L., Sandler I.S. Material model for granular soils, *J. Eng. Mech. Div., ASCE* 97, 1971, pp. 935–950.

С.П. Шимчук<sup>1</sup>, Н.П. Зайчук<sup>1</sup>, М.С. Півницький<sup>1</sup>, І.В. Орловський<sup>1</sup>,  
Яцек Щот<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Луцький національний технічний університет

<sup>2</sup> Вища школа управління та менеджменту (м. Конін, Польща)

## ПРОБЛЕМА ІМПОРТОЗАМІЩЕННЯ МАТЕРІАЛІВ КОНСТРУКЦІЙНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ МАШИНОБУДІВНИМИ ПІДПРИЄМСТВАМИ УКРАЇНИ

*В даній науковій статті піднімається проблема імпортозаміщення конструкційних матеріалів. Її вирішення пропонується шляхом розробки наукових принципів та довідниково-методичного забезпечення, що дозволить коректне заміщення матеріалів конструкційного призначення машинобудівними підприємствами України. Разом з тим отримані знання доцільно використовувати при підготовці здобувачів вищої освіти та кадрів вищої кваліфікації за галузю знань 13 Механічна інженерія.*

*Ключові слова:* імпортозаміщення, конструкційні матеріали, фізико-хімічні та механічні властивості.

S.P. Shymchuk, N.P. Zaichuk, M.S. Pivnytskyi, I.V. Orlovskiy,  
Jacek Shchot

## THE PROBLEM OF IMPORT SUBSTITUTION OF MATERIALS FOR CONSTRUCTION PURPOSES BY MACHINE-BUILDING ENTERPRISES OF UKRAINE

*This scientific article raises the problem of import substitution of construction materials. Its solution is proposed through the development of scientific principles and reference-methodological support, which will allow the correct replacement of structural materials by machine-building enterprises of Ukraine. At the same time, it is advisable to use the acquired knowledge in the training of higher education applicants and highly qualified personnel in the field of knowledge 13 Mechanical engineering.*

*Keywords:* import substitution, construction materials, physico-chemical and mechanical properties

**Постановка проблеми.** Піднята в дослідженні проблема майже не висвітлена в спеціальній науковій літературі, проте дуже гостро стоїть на вітчизняних машинобудівних підприємствах та відчувається при підготовці здобувачів вищої освіти за галузю знань 13 Механічна інженерія, що підкреслює її актуальність. Розробку принципів класифікації та формування відповідної довідникової літератури для вибору конструкційних матеріалів різних виробників, з необхідними властивостями для конкретного виробництва необхідно здійснювати з урахуванням положень проекту «Стратегії імпортозаміщення в стратегічних галузях промисловості» від 29.10.2021 року.

Для вирішення цієї проблеми необхідно дослідити, порівняти і систематизувати основні фізико-хімічні та механічні властивості однотипних конструкційних матеріалів за вітчизняною класифікацією і класифікацією інших світових виробників, що виготовляють матеріали з подібними чи аналогічними властивостями, та привести результати цих досліджень до вигляду довідника, що дозволить вибрати аналоги матеріалів, з необхідними властивостями, за відповідними класифікаціями.

В основу таких класифікацій доцільно покласти вимоги до матеріалів за призначенням, за основними експлуатаційними властивостями та вмістом легуючих елементів.

Враховуючи, що різні закордонні виробники конструкційних матеріалів дуже часто виготовляють сталі та сплави подібні за вмістом легуючих елементів до тих, що традиційно використовуються на вітчизняних підприємствах, але не ідентичні, то й властивості таких матеріалів можуть суттєво відрізнятись від тих, які необхідні для виготовлення відповідної продукції такими підприємствами (особливо ця тенденція спостерігається для жароміцних сталей і сплавів).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Імпортозаміщення сприяє активізації розвитку виробництв в межах конкретної галузі [1]. Проте забезпечення необхідної ефективності та

продуктивності розвитку підприємств потребує мінімізації різного роду ризиків пов'язаних з цим процесом [2]. Проблеми, які можуть виникнути при імпортозаміщенні чи просто заміщенні одних конструкційних матеріалів на інші в технологічному процесі виготовлення різного роду виробів, пов'язані з їх фізико-хімічними та механічними властивостями, іншими експлуатаційними властивостями, що неодноразово висвітлювалось у спеціальній науковій літературі [3 – 8].

**Метою дослідження** є розробка принципів класифікації за конкретними ознаками та, в перспективі, формування довідникової літератури, для вибору конструкційних матеріалів різних виробників, з необхідними властивостями для конкретного виробництва з урахуванням положень проєкту «Стратегії імпортозаміщення в стратегічних галузях промисловості».

Виходячи з поставленої мети основними завданнями такого дослідження є:

- дослідити та систематизувати основні фізико-хімічні та механічні властивості традиційних вітчизняних конструкційних матеріалів та однотипних імпортних матеріалів-аналогів, залежно від їх виробників;
- розробити, в перспективі, довідник, щодо взаємозамінності традиційних вітчизняних конструкційних матеріалів імпортними однотипними, що за відповідними експлуатаційними ознаками та властивостями є однаковими між собою (чи дуже подібними) та запропонувати області їх використання у відповідних виробництвах;
- дослідити та запропонувати механізми заміни одних матеріалів іншими, з врахуванням необхідних властивостей, шляхом використання різного роду операцій та режимів термічної обробки, нанесення відповідних захисних покриттів чи інших операцій зміцнення;
- дослідити та показати вплив легуючих елементів, видів та режимів термообробки на властивості досліджуваних конструкційних матеріалів;
- провести уніфікацію традиційних вітчизняних конструкційних матеріалів та однотипних імпортних матеріалів-аналогів різних світових виробників за властивостями та хімічним складом до загального вигляду, що дозволить їх швидкий вибір для використання підприємствами України.

**Викладення основного матеріалу.** Вирішення поставлених завдань, безумовно пов'язано з проблемою відновлення України у воєнний та повоєнний періоди, що, в свою чергу, потребує використання сучасних наукових підходів та залучення до цього процесу наукового потенціалу ЗВО та наукових установ України.

Такий підхід потребує переналаштування машинобудівних підприємств на норми і стандарти виробництв Європейського Союзу та країн членів ОЕСР з подальшою сертифікацією таких виробництв за ISO, що передбачає розробку наукових принципів та передумов для імпортозаміщення конструкційних матеріалів такими підприємствами. При цьому, для виготовлення продукції підприємствами, необхідна наявність високоякісних та постійно доступних на ринку конструкційних матеріалів. Крім вище сказаного, варто зауважити, що й на сьогодні машинобудівна галузь нашої країни, як основні використовує стандарти та класифікацію матеріалів, яким уже понад 50 років. Це не дозволяє повною мірою використовувати можливості та пропозиції світового ринку конструкційних матеріалів. Систематизація цієї інформації, крім вирішення виробничих та наукових задач, дозволить покращити здобувачами вищої освіти, що навчаються за відповідними спеціальностями, зокрема галузі знань 13 Механічна інженерія, фахові компетентності, які необхідні на вітчизняному, європейському та світовому ринках праці.

Особливо гостро ця проблема стосується машинобудівних підприємств, оскільки виробництво, для виготовлення відповідних виробів, постійно потребує якісних, з необхідними властивостями, конструкційних матеріалів за доступними цінами. Дуже часто такі матеріали, імпортного виробництва, не відповідають повною мірою як за складом так і фізико-хімічними та механічними властивостями характеристикам тих матеріалів, які традиційно використовувались на підприємствах України.

Тому, доцільно проаналізувати конструкційні матеріали, які виготовляються різними світовими виробниками та провести аналогію з вітчизняними матеріалами та класифікаціями, які використовуються машинобудівними підприємствами України для виготовлення продукції, і даються як базові знання при вивченні курсу Матеріалознавство і ТКМ. Для цього необхідно запропонувати ключові принципи та правила уніфікації конструкційних матеріалів за відповідними класифікаційними ознаками. На основі таких досліджень можна розробити та запропонувати до використання довідник конструкційних матеріалів. Правила класифікації конструкційних матеріалів викладені в такому довіднику необхідно стандартизувати.

В основу такої класифікації доцільно використати класифікацію за призначенням, областю використання та вмістом основних легуючих елементів.

Особливу увагу доцільно приділяти щодо забезпечення необхідних властивостей конструкційних матеріалів для конкретного виробництва, шляхом термообробки, використання інших видів зміцнювальних операцій чи необхідних захисних покриттів. Для сталей та сплавів з особливими властивостями різні режими та технології термообробки дозволять набувати тих експлуатаційних властивостей, що необхідні для конкретного виду виробів.

Враховуючи, що різні закордонні виробники конструкційних матеріалів дуже часто виготовляють сталі та сплави подібні за вмістом легуючих елементів до тих, що традиційно використовуються на вітчизняних підприємствах, але не ідентичні, то й властивості таких матеріалів можуть суттєво відрізнятися від тих, які необхідні для виготовлення відповідної продукції такими підприємствами (особливо ця тенденція спостерігається для жароміцних сталей і сплавів).

#### **Висновки.**

1. Піднята проблема дуже гостро відчувається на вітчизняних машинобудівних підприємствах, особливо при імпортозаміщенні жароміцних сталей і сплавів.

2. Однотипні жароміцні сталі та сплави вітчизняного та закордонного виробництва дуже часто несуттєво відрізняються між собою за вмістом легуючих елементів, проте критично можуть відрізнятися за фізико-хімічними та механічними властивостями. Тому використовувати такі матеріали-замінники при виробництві різного роду виробів можна з урахуванням подальшої термічної обробки, інших зміцнювальних операцій чи нанесення на відповідальні поверхні деталей різного роду захисних покриттів.

#### **Список використаних джерел.**

1. Ринки реального сектора економіки України: структурно-інституціональний аналіз / Точилін В.О., Осташко Т.О., Пустовойт О.В. та ін.; за ред. В.О. Точиліна. – К., 2009. – 640 с.

2. Цап М.В. Сутнісні характеристики процесу імпортозаміщення та його соціально-економічна роль / Цап М.В. // Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. 2014. № 4, Т. 1. С. 206–210.

3. Improvement of Operating Properties of Heat-Resistant Alloys by the Structure Optimization. Zaichuk, N., Shymchuk, S., Tkachuk, A., Shymchuk, Y., Badir, K.K. [Lecture Notes in Mechanical Engineeringthis link is disabled](#), 2022, pp. 383–392

4. Kinetics of structure transformation in pulsed plasma high-Cr coatings under post-heat treatment. Efremenko, B.V., Chabak, Y.G., Efremenko, V.G., ...Azarkhov, A.Y., Vlasovets, V.M. [Functional Materialsthis link is disabled](#), 2020, 27(1), pp. 117–124

5. Rolling Friction of Hybrid Ceramic–Steel Pairs under Different Lubrication Conditions. Stelmakh, A.U., Kostunik, R.E., Radzievskiy, V.A., ...Sokhan, S.V., Kulich, V.G.

6. Технологія конструкційних матеріалів: Підручник / М.А.Сологуб, І.О.Рожнецький, О.І.Некоз та ін. – К.: Вища школа, 2002. – 374 с.

7. Металознавство: Підручник /О.М.Бялік, В.С.Черненко та ін. – К.: Політехніка, 2002. – 384 с.

8. Гарнець В. М. Конструкційне матеріалознавство / В. М. Гарнець, В. М. Коваленко. – К.: Либідь, 2007. – 384 с.

**В.І. Шваб'юк<sup>1</sup>, Т.В. Фурс<sup>1</sup>, Н.В. Коменда<sup>2</sup>, С.Б. Мікуліч<sup>1</sup>**

*Луцький національний технічний університет,*

*<sup>1</sup>кафедра прикладної математики та механіки, <sup>2</sup>кафедра електроінженерії*

## **ІНТЕГРАЛЬНІ РІВНЯННЯ ЗАДАЧІ ДИФРАКЦІЇ ХВИЛЬ У ПРУЖНИХ СЕРЕДОВИЩАХ З ВКЛЮЧЕННЯМИ ЗА ДІЇ НЕСТАЦІОНАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

*У роботі розроблено алгоритм реалізації непрямого підходу методу граничних елементів до дослідження напружено-деформованого стану для тіл з включеннями за дії нестационарних навантажень. Використання методу інтегральних перетворень у випадку дії змінних у часі навантажень дозволило звести розв'язання нестационарної задачі до скінченної системи задач у частотній області. У роботі отримано потенціальні представлення фундаментальних функцій для плоскої динамічної задачі теорії пружності. Використовуючи основні підходи методу граничних елементів, у роботі отримано інтегральні рівняння другої основної задачі для тіл з включеннями. Встановлено, що ядра отриманих інтегральних рівнянь містять сингулярну та гіперсингулярну особливості.*

*Ключові слова: нестационарна плоска задача, включення, інтегральні рівняння.*

**V.I. Shvabyuk, T.V. Furs, N.V. Komenda, S.B. Mikulich**

## **INTEGRAL EQUATIONS OF WAVE DIFFRACTION PROBLEM IN ELASTIC MEDIA WITH INCLUSIONS UNDER THE ACTION OF NON-STATIONARY LOAD**

*The work developed an algorithm for implementing the indirect approach of the boundary element method to the study of the stress-strain state for bodies with inclusions under the action of non-stationary loading. Using the method of integral transformations in the case of time-varying loads made it possible to reduce the solution of the non-stationary problem to a finite system of problems in the frequency domain. In the paper, potential representations of the fundamental functions for the flat dynamic problem of the theory of elasticity are obtained. Using the basic approaches of the boundary element method, the integral equations of the second main problem for bodies with inclusions were obtained in the work. It was established that the kernels of the obtained integral equations contain singular and hypersingular features.*

*Keywords: non-stationary plane problem, inclusion, integral equations.*

**Постановка проблеми та аналіз публікацій.** Наявність включень та жорстких впадок у елементах конструкцій викликає істотну концентрацію напружень не тільки у зоні самих включень, а й у їх околі, особливо при дії змінних у часі навантажень. Неточність у розрахунках на міцність і жорсткість цих елементів конструкцій призводить до появи тріщин та інших дефектів, а також до їх подальшого руйнування у процесі експлуатації.

Для більш точного розрахунку деталей та елементів конструкцій у машинобудуванні необхідно використовувати комплексні дослідження, що поєднують у собі теоретичні розрахунки та експериментальні випробування. Тому актуальним постає питання розробки методик аналізу напружено-деформованого стану елементів конструкцій, що мають жорсткі включення різної форми, за дії динамічного навантаження.

Вивчення процесів поширення та дифракції пружних хвиль у тілах з дефектами за дії змінного у часі навантаження ґрунтується на використанні громіздких математичних підходів. Тому ці задачі відносяться до одних з найбільш складних питань динаміки деформівного твердого тіла. Крім того, використовуючи аналітичні підходи, можна отримати розв'язки лише для випадку включень та отворів кругової та сферичної форми [1]. Для дослідження напружено-деформованого стану елементів конструкцій з дефектами іншої форми потрібно поряд з аналітичними методами використовувати і числові підходи, що також істотно ускладнює розв'язання задачі [2].

Застосування сіткових числових методів [3] при дослідженні механічної поведінки тіл з включеннями дає можливість отримати хороші результати лише у випадку статичного навантаження. За дії динамічних силових впливів напружено-деформований стан відповідних елементів конструкцій описується швидкозмінними функціями, що при числовому диференціюванні вимагають істотного зростання числових потужностей у зв'язку з необхідністю згущення сітки, та спричиняють втрату точності розрахунків.

**Метою дослідження** є реалізація непрямого підходу методу граничних елементів, який виявився ефективним у випадку дефектів типу порожнин та отворів [4], до дослідження напружено-деформованого стану елементів конструкцій, що містять жорсткі включення, за дії нестационарного навантаження.

**Постановка задачі.** Розглянемо пружне ізотропне середовище, в яке жорстко без можливих



поворотів та переміщень вміщено жорстке включення, границя перерізу якого обмежена контуром  $L$ . У центрі ваги включення пружного тіла розмістимо початок декартової системи координат  $Ox_1x_2$  (рис. 1).

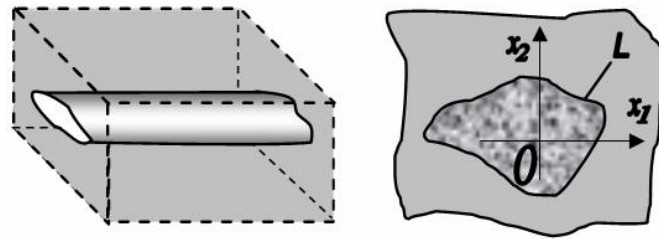


Рис. 1. 3D та 2D модель задачі

Дослідимо динамічний напружений стан у середовищі і на границі порожнини та включення у випадку дії динамічного (імпульсного, ударного та ін.) навантажень. Граничні умови у випадку другої основної задачі записуються у вигляді:

$$u_1|_L = 0, \quad u_2|_L = 0. \quad (1)$$

**Викладення основного матеріалу.** Використання методу інтегральних перетворень:

$$\mathfrak{F}f(\omega) = \hat{f}(\omega) = \int_0^T K(\omega, t)f(t)dt, \quad (2)$$

де  $K(\omega, t)$  є ядром перетворення, дозволяє звести нестационарну задачу до системи хвильових задач у частотній області. Після застосування такого підходу рівняння руху пружного ізотропного тіла запишеться у вигляді:

$$\partial_m \hat{\sigma}_{mj} + \hat{X}_j + \omega^2 \rho \hat{u}_j = 0, \quad (3)$$

де  $\hat{\sigma}_{mj}$ ,  $\hat{u}_j$ ,  $\hat{X}_j$  — трансформанти напружень, переміщень та масових сил, що отримуються при застосуванні формули (2),  $\omega$  — частота.

У випадку другої основної задачі за відсутності масових сил зображення для переміщень записується у вигляді [5]:

$$\hat{u}_k = - \int_L \hat{u}_j \cdot P_{kj}^* dL, \quad (4)$$

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

Відповідно до [6], використовуючи вектор Буссинеска, фундаментальний тензор функцій впливу рівняння (3), записаного у переміщеннях:

$$(c_1^2 - c_2^2) \partial_j \hat{\theta} + c_2^2 \Delta \hat{u}_j + \frac{\hat{X}_j}{\rho} = -\omega^2 \hat{u}_j,$$

можна отримати у вигляді для представлень (4):

$$P_{kj}^* = \sigma_{ij}^{(k)} n_j, \quad (5)$$

де

$$\sigma_{ij}^{(k)} = \rho \left( (c_1^2 - 2c_2^2) \frac{\partial U_{mk}^*}{\partial x_m} \delta_{ij} + c_2^2 \left( \frac{\partial U_{ik}^*}{\partial x_j} + \frac{\partial U_{jk}^*}{\partial x_i} \right) \right),$$

$$U_{ij}^* = \frac{1}{2\pi\rho c_2^2} \left( \psi \delta_{ij} - \chi \frac{\partial r}{\partial x_i} \frac{\partial r}{\partial x_j} \right),$$

при цьому відстань між точками  $r = \sqrt{(x_1 - x_1^0)^2 + (x_2 - x_2^0)^2}$ ,  $c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$  — швидкість хвилі розширення у середовищі,  $c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$  — швидкість хвилі зсуву,  $\rho$  — густина,  $\lambda, \mu$  — сталі Ляме для випадку плоскої деформації.

У випадку нестационарних навантажень для плоскої динамічної задачі класичної теорії пружності у [7] подано наступні представлення для функцій  $\psi$  та  $\chi$ :

$$\psi = K_0\left(\frac{kr}{c_2}\right) + \frac{c_2}{kr}\left(K_1\left(\frac{kr}{c_2}\right) - K_1\left(\frac{kr}{c_1}\right)\right),$$

$$\chi = K_2\left(\frac{kr}{c_2}\right) - \frac{c_2^2}{c_1^2}K_2\left(\frac{kr}{c_1}\right),$$

де  $K_0(r)$ ,  $K_1(r)$ ,  $K_2(r)$  — модифіковані функції Бесселя третього роду нульового, першого та другого порядку [8],  $k = \pm i\omega$ , де знак «+» вибирається для розв'язків, що прямують та затухають на нескінченності (у випадку необмежених областей), а знак «-» — для розв'язків, що «прямують» з нескінченності.

**Результати досліджень.** Для задоволення трансформант граничних умов (1) та побудови інтегральних рівнянь задачі необхідно дослідити фундаментальні функції  $P_{ij}^*$  та встановити чи мають вони нерегулярні складові. Використовуючи представлення (5) для двовимірного випадку фундаментальні функції  $P_{ij}^*$  можна записати у вигляді:

$$P_{11}^* = \frac{1}{2\pi}\left(F_1 n_1 \frac{\partial r}{\partial x_1} + F_2 \frac{\partial r}{\partial n} + 2F_3 \left(\frac{\partial r}{\partial x_1}\right)^2 \frac{\partial r}{\partial n}\right),$$

$$P_{12}^* = \frac{1}{2\pi}\left(F_4 n_2 \frac{\partial r}{\partial x_1} + F_2 n_1 \frac{\partial r}{\partial x_2} + 2F_3 \frac{\partial r}{\partial x_1} \frac{\partial r}{\partial x_2} \frac{\partial r}{\partial n}\right),$$

$$P_{21}^* = \frac{1}{2\pi}\left(F_4 n_1 \frac{\partial r}{\partial x_2} + F_2 n_2 \frac{\partial r}{\partial x_1} + 2F_3 \frac{\partial r}{\partial x_1} \frac{\partial r}{\partial x_2} \frac{\partial r}{\partial n}\right),$$

$$P_{22}^* = \frac{1}{2\pi}\left(F_1 n_2 \frac{\partial r}{\partial x_2} + F_2 \frac{\partial r}{\partial n} + 2F_3 \left(\frac{\partial r}{\partial x_2}\right)^2 \frac{\partial r}{\partial n}\right),$$
(6)

де  $n$  — вектор нормалі до границі, а функції  $F_1, F_2, F_3, F_4$  виражаються через функції  $\chi$  та  $\psi$ , а також їх похідні по  $r$  у вигляді:

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

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

Для побудови інтегральних рівнянь задачі у області зображень дослідимо функції  $P_{ij}^*$  на основі отриманих залежностей (6) та їх складові  $F_1, F_2, F_3, F_4$  на наявність нерегулярності у околі  $r=0$ :

$$F_1 \sim -\frac{1}{2r}\left(1 - \frac{c_2^2}{c_1^2}\right)\left(\frac{2c_1^2}{c_2^2} + \frac{c_1}{c_2} + 1\right); \quad F_2 \sim -\frac{1}{2r}\frac{(c_1 + c_2)c_2}{c_1^2},$$

$$F_3 \sim -\frac{1}{r}\frac{c_1^2 - c_2^2}{c_1^2}, \quad F_4 \sim -\frac{1}{2r}\left(\frac{2c_1^2}{c_2^2} + \frac{c_1}{c_2} - 3 - \frac{2c_2}{c_1}\right).$$

Аналіз останніх залежностей показує, що функції  $F_1, F_2, F_3, F_4$  мають особливість порядку  $\sim 1/r$ .

Використовуючи останні залежності, інтегральні рівняння другої основної задачі у області трансформант можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} c_1 \hat{u}_1 + c_2 \hat{u}_2 + c'_1 \hat{u}'_1 + c'_2 \hat{u}'_2 + \int_L \hat{u}_1 \cdot f_1 + \hat{u}_2 \cdot f_2 dL &= 0, \\ c_3 \hat{u}_1 + c_4 \hat{u}_2 + c'_3 \hat{u}'_1 + c'_4 \hat{u}'_2 + \int_L \hat{u}_1 \cdot f_3 + \hat{u}_2 \cdot f_4 dL &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

де позаінтегральні члени отримуються при використанні формул Племеля-Сохоцького при граничному переході [лінков], коефіцієнти  $c_i, i=1..4$  відповідають сингулярним складовим підінтегральних функцій  $f_i, i=1..4$ , а  $c'_i, i=1..4$  — гіперсингулярним складовим функцій  $F_3$ ,

$$f_1 = P_{11}^* \Big|_{\substack{(x_1, x_2) \in L \\ (x'_1, x'_2) \in L}}; \quad f_2 = P_{21}^* \Big|_{\substack{(x_1, x_2) \in L \\ (x'_1, x'_2) \in L}}; \quad f_3 = P_{12}^* \Big|_{\substack{(x_1, x_2) \in L \\ (x'_1, x'_2) \in L}}; \quad f_4 = P_{22}^* \Big|_{\substack{(x_1, x_2) \in L \\ (x'_1, x'_2) \in L}}.$$

**Висновки.** Аналіз отриманих рівнянь (7) показує, що побудовані за використання непрямого підходу методу граничних елементів, інтегральні рівняння містять не тільки вихідні змінні переміщень, а й їх похідні, тому перетворюються на інтегрально-диференціальні рівняння. Для числового розв'язання цих рівнянь у випадку, коли форма включення відрізняється від кругового, циліндричного чи сферичного, слід використовувати модифіковані числові підходи, які даватимуть можливість не тільки точно описувати криволінійні границі включень, а й дозволяти враховувати похідні від переміщень, що входять до рівнянь (7).

#### Список використаних джерел:

1. Гузь О.М., Кубенко В.Д., Черевко М.А. Дифракція пружних хвиль. К.: Наук. думка, 1978. 308 с.
2. Becker, A.A.: The Boundary Element Method in Engineering. A complete course. McGRAW-HILL BOOK, Cambridge, 1992, 338 p.
3. Motamedy, D., Mohammadi S.: Dynamic analysis of fixed cracks in composites by extended finite element method. *Engineering Fracture Mechanics*. 77, 3373–3393 (2010).
4. Mikulich, O., Shvabyuk, V., Sulym, H. Dynamic Stress Concentration at the Boundary of an Incision at the Plate under the Action of Weak Shock Waves. *Acta Mechanica et Automatica*. 2017. 11(3). PP. 217-221.
5. Bonnet M.: Integral equations and boundary elements. Mechanical application of solids and fluids. (Équations intégrales et éléments de frontière. Application en mécanique des solides et des fluids), CNRS Éditions / Éditions EYROLLES, Paris, 1995. 316 p.
6. Brebbia, C., Telles, J., Wrobel, L.: Boundary element techniques. Springer, New York, 1984.
7. Banerjee P.: Boundary Element Method in Engineering Science. McGraw Hill, New York, London, 1994.
8. Brychkov Yu. A. Handbook of Special Functions Derivatives, Integrals, Series and Other Formulas, Chapman & Hall, 2008, 700 p.

**Рецензент:** Делявський Михайло Володимирович, доктор технічних наук, професор

V.I. Lavrinenko, H.D. Ilnytska, V.V. Smokvyna, I.M. Zaitseva, H.A. Petasiuk,  
L.Yo. Kotynska, D.H. Mindich

*V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine*

## IMPURITIES AND INCLUSIONS IN DIAMOND GRAINS AS A FACTOR TO BE CONSIDERED WHEN USING DIAMOND GRINDING POWDERS IN DIAMOND TOOL

*The article presents the results of the influence of the content of impurities and inclusions in diamond grinding powders synthesized in the Ni-Mn-C and Fe-Si-C systems. As a result of their separation in a magnetic field, powders of magnetic and non-magnetic fractions are obtained, the magnetic susceptibility of which differs by an order of magnitude. It is shown that diamonds obtained in the Fe-Si-C system have well-defined magnetic properties; ferromagnetic elements of solvent alloys in inclusions (Ni+Mn for the Ni-Mn-C system and Fe for the Fe-Si-C system) predominate and make up 77.9–84.0% of the total number of inclusions present in diamond powders of the non-magnetic fraction, and in the magnetic fraction it is slightly higher and amounts to 94.5–93.1% for diamonds of both growth systems. The strength of diamonds of the magnetic fraction of both systems is higher in comparison with the strength of diamonds of the non-magnetic fraction, the heat resistance of diamonds of the non-magnetic fraction of both systems is higher in comparison with the heat resistance of diamonds of magnetic fractions. After the separation of diamond powders in a magnetic field into a number of fractions with different specific magnetic susceptibility, the homogeneity of the powders increases in strength compared to the homogeneity of the original powders before their separation. The performance of grinding wheels, with processing productivity (200 mm<sup>3</sup>/min), is more effective when using diamond powders of the magnetic fraction with a higher content of impurities and with greater strength. At a higher processing productivity (400 mm<sup>3</sup>/min), the wear resistance of wheels equipped with diamonds of the magnetic fraction decreases due to a decrease in their heat resistance. The wear resistance of diamonds of the magnetic fraction compared to the wear resistance of diamonds of the non-magnetic fraction for the Ni-Mn-C system will increase by a small amount, and for the Fe-Si-C system - by approximately 1.7 times.*

*Key words: synthetic diamond grinding powders, physical and mechanical characteristics, separation in a magnetic field, magnetic susceptibility, heat resistance.*

В.І. Лавріненко, Г.Д. Ільницька, В.В. Смоквина, І.М. Зайцева, Г.А. Петасюк,  
Л.Й. Котинська, Д.Г. Міндіч

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України*

## ДОМІШКИ ТА ВКЛЮЧЕННЯ В АЛМАЗНИХ ЗЕРНАХ, ЯК ФАКТОР, ЯКИЙ НЕОБХІДНО ВРАХОВУВАТИ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ АЛМАЗНИХ ШЛІФПОРОШКІВ В АЛМАЗНОМУ ІНСТРУМЕНТІ

*У статті приведені результати впливу вмісту домішок та включень в алмазних шліфпорошках, синтезованих в системах Ni-Mn-C і Fe-Si-C. В результаті розділення їх у магнітному полі отриманні порошки магнітних та немагнітних фракцій, магнітна сприйнятливості яких відрізняються між собою на порядок. Показано, що алмази, отримані в системі Fe-Si-C, мають добре виражені магнітні властивості; ферромагнітні елементи сплавів-розчинників у включеннях (Ni+Mn для системи Ni-Mn-C та Fe для системи Fe-Si-C) переважають і складають 77,9–84,0 % від загальної кількості наявних включень в порошках алмазу немагнітної фракції, а в магнітній фракції трохи вище і складають 94,5–93,1 % для алмазів обох ростових систем. Міцність алмазів магнітної фракції обох систем вище в порівнянні з міцністю алмазів немагнітної фракції, термостійкість алмазів немагнітних фракцій обох систем вище в порівнянні з термостійкістю алмазів магнітних фракцій. Після розділення порошків алмазу в магнітному полі на ряд фракцій з різною питомою магнітною сприйнятливостю збільшується однорідність порошків за міцністю в порівнянні з однорідністю вихідних порошків до їх розділення. Працездатність шліфувальних кругів, при продуктивності обробки (200 мм<sup>3</sup>/хв) більш ефективна при використанні порошків алмазу магнітної фракції з більшим вмістом домішок і з більшою міцністю. При більшій продуктивності обробки (400 мм<sup>3</sup>/хв) зносостійкість кругів, оснащених алмазами магнітної фракції, знижується внаслідок зменшення їх термостійкості. Зносостійкість алмазів магнітної фракції у порівнянні із зносостійкістю алмазів немагнітної фракції для системи Ni-Mn-C зростає на малу величину, а для системи Fe-Si-C – приблизно в 1,7 разів.*

*Ключові слова: шліфпорошки синтетичного алмазу, фізико-механічні характеристики, розділення у магнітному полі, магнітна сприйнятливості, термостійкість.*

**Introduction and statement of the problem.** At the present stage of production development, the main factor of technical progress is the improvement of production process technology. For the development of mechanical engineering, the use of effective abrasive grinding tools based on synthetic diamonds is an important area. In industrial conditions, diamond abrasive processing is one of the most common methods of surface treatment of workpieces [1]. During diamond abrasive processing, the wear resistance and performance of a grinding tool are influenced by the properties of diamond powders, which

© В.І. Лавріненко, Г.Д. Ільницька, В.В. Смоквина, І.М. Зайцева, Г.А. Петасюк,  
Л.Й. Котинська, Д.Г. Міндіч

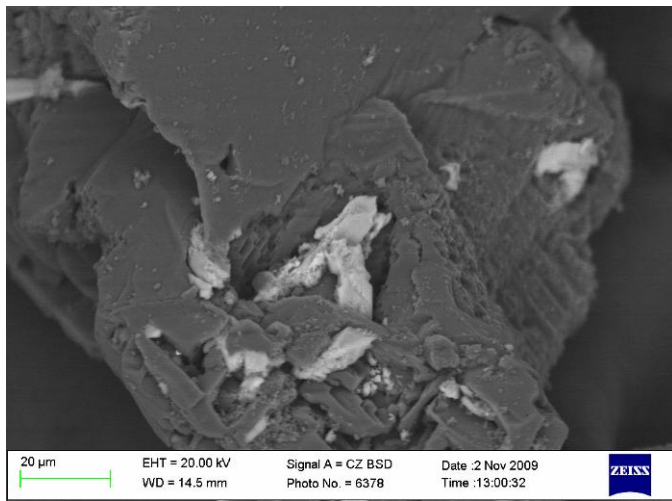
are formed during the synthesis of diamond, its extraction from the synthesis product, as well as during classification and sorting. As a rule, diamond powders after synthesis are heterogeneous in their main characteristics and properties.

When processing products made of hard alloy, ceramics, glass and other brittle materials, synthetic diamond powders of low-strength grades AC6 - AC32 are widely used. The synthesis of diamond powders of these grades, as a rule, is short-term and occurs at high growth rates, which facilitates the capture of all side phases present in the reaction chamber by the growing diamond crystal, which have a significant impact on the physical, mechanical and operational properties of diamonds. Therefore, the goal was to study the influence of the content of impurities and inclusions in diamond grinding powders of the AC6 and AC20 grades, synthesized in various growth systems, on the wear resistance of diamond grinding tools.

**Analysis of the latest research and publications.** For diamond abrasive machining processes, diamonds from the low strength range of grades are preferably used in grinding tools. From previous studies it is known that the properties of synthetic diamonds mainly depend on the amount of impurities and inclusions in them, as well as on their magnetic properties [1, 2].

Due to the peculiarities of the diamond crystal structure, in which all 4 valence electrons of carbon atoms are tightly bound, an ideal diamond crystal (without impurities and lattice defects) should be a dielectric transparent to visible light. In real crystals there is always a certain amount of impurities and lattice defects. Even in the purest jewelry diamonds, the impurity content reaches 10<sup>18</sup> atoms per 1 cm<sup>3</sup>. The distribution of impurities in a diamond may be uneven; for example, there are more impurities at the periphery than at the center. The strong bonds between carbon atoms in the diamond structure mean that any imperfection in the diamond crystal lattice affects its physical properties.

For synthetic diamonds (especially low-strength grades AC4–AC32), attention was drawn to the fact that the grains of diamond powders contain impurities and inclusions both on the surface and in defects (pores) of this surface, and porosity is a distinctive feature of such diamonds (see Fig.1).



**Fig.1. An example of the presence of inclusions on the surface and pores of AC6 125/100 diamonds in original condition**

Diamond, when synthesized in the metal (Me)-carbon (C) system, is obtained in special apparatus under high p, T conditions. To reduce the desired high synthesis characteristics, a catalyst in the form of a solvent alloy is used. The process of synthesizing diamonds of the above-mentioned low-strength grades occurs at high rates of crystal growth, which, during their growth, capture all the secondary phases present in the reaction chamber. These phases (inclusions) are of different sizes: from atomic to macroscopic sizes. Inclusions that are completely preserved in a diamond crystal are volumetric defects that affect the thermal stability of the crystals, which directly affects the performance characteristics of the diamond tool.

Domestic and foreign researchers A.A. Shulzhenko, M.V. Novikov, S. Evans, G.P. Bogatyreva, G.F. Nevstruev, Yu.I. Nikitin et

al. made a great contribution to the study of the properties of synthetic diamond powders and convincingly demonstrated the significant influence on the strength characteristics of diamond grinding powders from the content of impurities and metal inclusions of the carbon solvent alloy [2, 3].

The studies on diamond synthesis known from the literature were mainly carried out using the Ni-Mn-C system. Currently, diamond synthesis is carried out in the presence of metal melts of different compositions. Ni, Fe, Mn, Co are most often used. The use of alloys helps to increase the degree of conversion of graphite into diamond. Industrial production of synthetic diamond powders is most often carried out in the presence of nickel or cobalt, the cost of which is an order of magnitude higher than the nominal cost of iron. At the same time, there is some interest in the use of a cheaper solvent alloy - Fe-Si. It has been revealed that the effect of silicon on Fe-Si alloys is similar to the effect of nickel, which makes it possible to reduce the thermodynamic parameters of diamond production [4].

Therefore, it is of great interest to study the possibility of using iron alloys and, in particular, the Fe-Si alloy as carbon solvents.

**Materials and methods of research.** The study of the influence of impurities and inclusions in the grains of diamond grinding powders was carried out on diamonds of the AC6-AC20 grade, grain size 160/125, obtained in the Ni-Mn-C and Fe-Si-C systems. In this work, AC6 diamond grinding powders were subjected to mechanical crushing in a planetary mill, as well as ultrasonic treatment, to improve their quality. Mechanical and ultrasonic selective crushing ensures the destruction of crushed stones, intergrowths and grains that have shells and inclusions, resulting in an increase in the isometry of the powders. Diamond grinding powders of the AC6 grade with a grain size of 160/125, synthesized in the Ni-Mn-C and Fe-Si-C systems, after physical and mechanical treatment were separated in a magnetic field with amperage of 5 to 20 A to obtain magnetic and non-magnetic diamond powders . fractions differing in magnetic susceptibility.

The physical and mechanical characteristics of the powders were determined: strength in the form of breaking load under static compression at room temperature (P, N) and after heat treatment at 1100 C, heat resistance was calculated in the form of the thermal stability coefficient ( $K_{TS}$ ), strength uniformity coefficient (Kunif.p); We measured the specific magnetic susceptibility ( $\chi$ ) using methods developed at the Institute of Superhard Materials of the Academy of Sciences of Ukraine.

In diamond grinding powders with a grain size of 160/125, synthesized in the Ni-Mn-C and Fe-Si-C systems, the initial and after their separation in a magnetic field, the elemental and general composition of intracrystalline impurities and inclusions was determined by X-ray fluorescence integral analysis using scanning electron micro BS -340" and an energy-dispersive X-ray spectrum line analyzer "Link-860". To determine the elemental composition of inclusions and impurities ( $\beta$ , % (by mass), a modified ZAF-4FLS quantitative analysis program developed by Link (England) was used.

In this case, inclusions and impurities have different sizes, ranging from an atom to macroscopic sizes. Depending on the size of elements captured by the diamond lattice or the internal structure of the crystal, the name "impurities and inclusions" is accepted. There is no clear dividing line between these concepts. It is practically impossible to separate them based on the results of modern methods of studying the elemental composition of the side phases present in diamond, therefore the total content of atoms of the element being studied is determined.

**Presentation of the main research material.** The results of the distribution in a magnetic field of the initial diamond grinding powders of grain size 160/125, synthesized in the Ni-Mn-C and Fe-Si-C systems, after physical and mechanical treatment are presented in Fig. 2 (a and b).

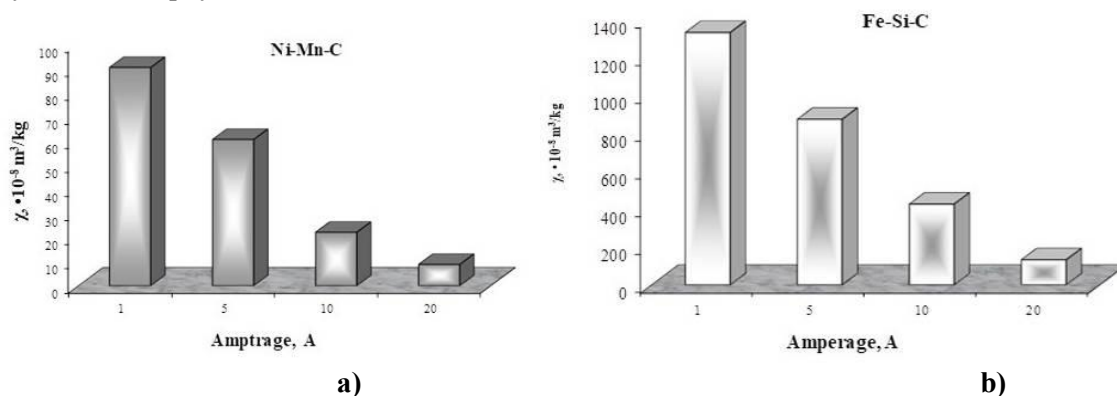


Fig.2. Separation of grinding powders of AS6 grade 160/125 diamond synthesized in the Ni-Mn-C (a) and Fe-Si-C (b) systems.

As can be seen from fig. 2 diamond grinding powders of both systems are divided into four separation fractions that differ among themselves in terms of specific magnetic susceptibility. Magnetic susceptibility of diamonds of both systems of extreme fractions of magnetic and non-magnetic fractions differ by an order of magnitude. For diamonds synthesized in the Ni-Mn-C system (Fig. 2a),  $\chi$  is from 90.3 to 8.8  $\times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , and for diamonds synthesized in the Fe-Si-C system (Fig. 2b)  $\chi$  from 1327 to 132.0  $\times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ .

The total and elemental composition of impurities and inclusions was determined in diamond grinding powders synthesized in the Ni-Mn-C and Fe-Si-C systems, initial and obtained after distribution in a magnetic field. The elemental composition was estimated as the sum of elements of metals of carbon-solvent alloys.



Magnetic methods were used to obtain more extensive information when studying impurities and inclusions. As a rule, pure unadulterated diamond is a dielectric with an almost constant specific magnetic susceptibility ( $\chi = -0.62 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ), and the carbon solvent alloys used in the synthesis have strong magnetic properties, so all the variety of magnetic properties of crystals diamond is related to the amount and magnetic state of the metal or alloy of metals present in the diamond in the form of impurities and inclusions.

The sum of all detected elements corresponds to the total content of inclusions and impurities in the diamond, and the sum of the elements of the solvent alloy makes it possible to estimate their content in the diamond powder. The measurements and determination of the elemental composition of impurities and inclusions make it possible to calculate the specific magnetic susceptibility of inclusions  $\chi_{\text{incl}}$ , [5].

The obtained results of measurements and calculations are presented in table. 1.

Table 1.

**Characteristics of the properties of diamond grinding powders with a grain size of 160/125 and after distribution in the magnetic field, synthesized in the Ni-Mn-C and Fe-Si-C systems**

Separation fraction	Ni-Mn-C				Fe-Si-C			
	$\beta$ , % (by mass)		$\chi$ , $\text{m}^3/\text{kg}$		$\beta$ , % (by mass)		$\chi$ , $\text{m}^3/\text{kg}$	
	General	Ni+Mn	$\chi_{\text{init}}$ , $\times 10^{-8}$	$\chi_{\text{incl}}$ , $\times 10^{-8}$	General	Fe	$\chi_{\text{init}}$ , $\times 10^{-8}$	$\chi_{\text{incl}}$ , $\times 10^{-8}$
magnetic	3,631	3,337	90,3	2503	7,360	6,828	1327	18038
non-magnetic	2,014	1,569	8,8	467	2,129	1,733	132	6229
initial	3,413	2,901	16,8	630	4,557	3,965	342	7518

From the table data it follows those ferromagnetic elements of solvent alloys in inclusions (Ni+Mn for the Ni-Mn-C system and Fe for the Fe-Si-C system) predominate and account for 77.9–84.0% of the total number of inclusions present in diamond powders of the non-magnetic fraction, and in the magnetic fraction it is slightly higher and amount to 94.5–93.1% for diamonds of both growth systems.

Thus, diamonds obtained in the Fe-Si-C system have well-defined magnetic properties, therefore the specific magnetic susceptibility of diamonds and their inclusions of the magnetic fraction is  $\chi_{\text{a}} = 1327 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  and  $\chi_{\text{incl}} = 18038 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , according.

In grinding powders in the magnetic and non-magnetic fractions of both systems, the physical and mechanical characteristics were determined: strength (P, N) and after heat treatment at 1100 °C, thermal resistance was calculated in the form of the thermal stability coefficient ( $K_{\text{TS}}$ ), the results are added in table 2.

Table 2.

**Physical and mechanical characteristics of AC6 diamonds, grain size 160/125**

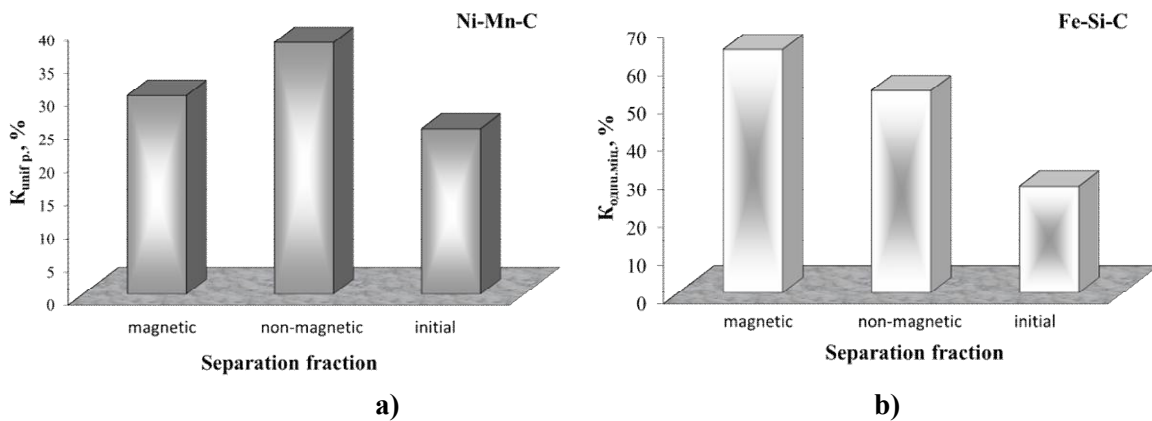
Separation fraction	Ni-Mn-C		Fe-Si-C	
	P, H	$K_{\text{TS}}$ , %	P, H	$K_{\text{TS}}$ , %
magnetic	7,4	44	12,7	35
non-magnetic	6,0	78	4,1	57
initial	7,2	61	11,7	55

Analysis of data in table. 2 shows that the strength of diamonds of the magnetic fraction of both systems is higher compared to the strength of diamonds of the non-magnetic fraction. Yes, the strength of diamonds obtained in the Ni-Mn-C system, the magnetic fraction is 1.2 times higher compared to the strength of diamonds of the non-magnetic fraction. The strength of magnetic fraction diamonds synthesized in the Fe-Si-C system increases by 3.1 times compared to the strength of non-magnetic fraction diamonds. The heat resistance of diamonds of non-magnetic fractions of both systems is higher compared to the heat resistance of diamonds of magnetic fractions: for diamonds of the Ni-Mn-C system it is 1.8 times, and for diamonds of the Fe-Si-C system it is 1.6 times.

Moreover, after dividing diamond powders in a magnetic field into a number of fractions with different specific magnetic susceptibility, the uniformity of the powders in strength increases compared to the homogeneity of the original powders before their separation. For diamonds synthesized in the Ni-Mn-



C system, homogeneity increases by 1.2–1.5 times, and for diamonds synthesized in the Fe-Si-C system – by 1.9–2.3 times (Fig. 3).



**Fig. 3. Changes in the homogeneity coefficient in terms of the strength of diamond grinding powders of grain size 160/125, synthesized in the Ni-Mn-C (a) and Fe-Si-C (b) systems, obtained after distribution in a magnetic field: magnetic and non-magnetic fractions.**

AC6 grade diamond powders with a grain size of 160/125, synthesized in both systems, magnetic and non-magnetic fractions, were used for the manufacture of experimental grinding wheels on the B2-01 polymer bond when grinding hard alloy samples of the VK8 grade. Processing productivity was 200 and 400 mm<sup>3</sup>/min. The wear resistance of the tool was determined by the relative consumption of diamonds qp [1]. The test results are presented in Table 3.

Table 3.

**Physico-mechanical and operational characteristics of AS6 diamonds of grain size 160/125 synthesized in the Ni-Mn-C and Fe-Si-C**

Separation fraction	Ni-Mn-C			Fe-Si-C		
	K <sub>TS</sub> , %	q <sub>p</sub> , mg/g at processing productivity, mm/min		K <sub>TS</sub> , %	q <sub>p</sub> , mg/g at processing productivity, mm <sup>3</sup> /min	
		200	400		200	400
magnetic	44	3,25	4,15	35	2,31	4,65
non-magnetic	78	3,33	3,70	57	1,64	2,75
initial	61	-	-	55	-	-

It was found that the performance of grinding wheels equipped with AS6 diamonds of 160/125 grain size, synthesized in both systems, at processing productivity (200 mm<sup>3</sup>/min) is more effective when using diamond powders of the magnetic fraction with a higher content of impurities and with greater strength. The wear resistance of diamonds of the magnetic fraction compared to the wear resistance of diamonds of the non-magnetic fraction is higher for the Fe-Si-C system - approximately 1.4 times, and slightly higher for the Ni-Mn-C system.

At a higher processing productivity (400 mm<sup>3</sup>/min), the wear resistance of wheels equipped with diamonds of the magnetic fraction decreases due to a decrease in their heat resistance. The wear resistance of diamonds of the magnetic fraction compared to the wear resistance of diamonds of the non-magnetic fraction for the Ni-Mn-C system will increase by a small amount, and for the Fe-Si-C system - by 1.7 times.

Thus, it was established that in order to increase the efficiency of the grinding tool, it is necessary to separate grinding powders of synthetic diamond in a magnetic field with an intensity of 5 to 20 A/m, which makes it possible to obtain powders that differ significantly in terms of the content of metal intracrystalline inclusions and impurities, the specific magnetic susceptibility, indicators of the strength of grinding powders under static compression of diamond grains, uniformity in strength, which contributes to the impact on the wear resistance of the grinding tool.

### Conclusions.

1. It is shown that as a result of separation in a magnetic field of different voltages from 5 to 20 A/m of diamond grinding powders of grain size 160/125 synthesized in the Ni-Mn-C and Fe-Si-C systems, the obtained powders of magnetic and non-magnetic fractions, magnetic the receptivity of which differ by an order of magnitude. It was established that the diamonds obtained in the Fe-Si-C system have well-defined magnetic properties, therefore the specific magnetic susceptibility of diamonds and their inclusions of the magnetic fraction is  $\chi_a=1327 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$  and  $\chi_{\text{вкл}}=18038 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ , respectively.

2. It was established that ferromagnetic elements of solvent alloys in the inclusions (Ni+Mn for the Ni-Mn-C system and Fe for the Fe-Si-C system) predominate and make up 77.9–84.0% of the total number of inclusions present in diamond powders of the non-magnetic fraction, and in the magnetic fraction it is slightly higher and amounts to 94.5–93.1% for diamonds of both growth systems.

3. It is shown that the strength of diamonds of the magnetic fraction of both systems is higher compared to the strength of diamonds of the non-magnetic fraction. Thus, the strength of diamonds obtained in the Ni-Mn-C system, the magnetic fraction is 1.2 times higher compared to the strength of diamonds of the non-magnetic fraction. The strength of diamonds of the magnetic fraction synthesized in the Fe-Si-C system increases by 3.1 times compared to the strength of diamonds of the non-magnetic fraction.

4. It was established that the heat resistance of diamonds of non-magnetic fractions of both systems is higher compared to the heat resistance of diamonds of magnetic fractions: for diamonds of the Ni-Mn-C system by 1.8 times, and for diamonds of the Fe-Si-C system by 1.6 times.

5. It is shown that after the separation of diamond powders in a magnetic field into a number of fractions with different specific magnetic susceptibility, the homogeneity of the powders in terms of strength increases compared to the homogeneity of the original powders before their separation. For diamonds synthesized in the Ni-Mn-C system, the homogeneity increases by 1.2–1.5 times, and for diamonds synthesized in the Fe-Si-C system – 1.9–2.3 times.

6. It was found that the performance of grinding wheels equipped with AS6 diamonds of 160/125 grain size, synthesized in both systems, at processing productivity (200 mm<sup>3</sup>/min) is more effective when using diamond powders of the magnetic fraction with a higher content of impurities and with greater strength. The wear resistance of diamonds of the magnetic fraction compared to the wear resistance of diamonds of the non-magnetic fraction is higher for the Fe-Si-C system - approximately 1.4 times, and slightly higher for the Ni-Mn-C system. At higher processing productivity (400 mm<sup>3</sup>/min), the wear resistance of wheels equipped with magnetic fraction diamonds decreases due to a decrease in their heat resistance. The wear resistance of diamonds of the magnetic fraction compared to the wear resistance of diamonds of the non-magnetic fraction for the Ni-Mn-C system will increase by a small amount, and for the Fe-Si-C system – by 1.7 times.

### List of sources used:

1. Lavrinenko V.I. Superhard abrasive materials in machining: an encyclopedic reference book / V.I. Lavrinenko, M.V. Novikov - K.: INM im. V.M. Bakulya NAS of Ukraine, 2013. – 456 p.

2. Superhard materials. Receipt and application. Monograph in 6 volumes / Under the general editorship. N.V. Novikov. – M.: SM im. V.N. Bakulya, Research and Production Center "ALKON" NANU, 2007. T. 6: Diamond-abrasive tools in machining technologies / Ed. A.A. Shepelevo. – M.: ISM im. V.N. Bakulya, IPC "ALKON" NASU, 2007. – 340 p.

3. Ilnitska G.D., Lavrinenko V.I., Smokvina V.V. Monograph: "Diamonds for grinding tools obtained in different systems" - a modern scientific manual for specialists in the diamond business // Kiev, "Publishing house "Scientific Dumka" NAS of Ukraine", 2021. – 168 p.

4. Borimsky A.I., Delevyev V.G., Nagorny P.A. Kinetics of formation and growth of diamonds in the Fe-Si-C system // Superhard materials. – 1999. – No. 3. – P. 9–14.

5. Physical characteristics of diamond. Directory. – K.: Scientific thought, 1987. – P. 85-89.

### Reviewer:

Petrusha Igor Andreevich, leading researcher at the Institute of Superhard Materials named after V.M. Bakulya NAS of Ukraine, Doctor of Technical Sciences

О.В. Іванюк

«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

## УТИЛІЗАЦІЯ ЧЕРВОНОГО ШЛАМУ В ТЕХНОЛОГІЇ НЕОРГАНІЧНИХ ПІГМЕНТІВ: ТЕРМОДИНАМІЧНІ АСПЕКТИ

*Встановлено, що промисловий відхід виробництва глинозему: високозалістий червоний шлам, що має високий вміст оксиду Алюмінію можна використати як вихідну сировину для синтезу неорганічних пігментів коричнево-вохристої гами з еквівалентною заміною чистих оксидів кольороутворюючих металів Феруму та Алюмінію на відхід. Проведено термодинамічний аналіз з використанням поняття ентальпії, ентропії та енергії Гібса переходу іонів із тетраедричних позицій оксигеного каркасу шпінелі в октаедричні та принципу послідовно-паралельних реакцій. Визначення коефіцієнтів розподілення і переходу іонів в складних шпінелях в процесі утворення шпінельних структур оберненого та змішаного типу довело можливість використання червоного шламу в процесах створення безперевних рядів твердих розчинів та утворення стійкого коричневого та вохристого кольору.*

*Ключові слова:* Червоний шлам, полютанти навколишнього середовища, неорганічні пігменти, модифікатори кольору, обернені шпінельні структури, ентальпія переходу, ентропія переходу, енергія Гібса переходу, коефіцієнти розподілення, ІК-спектри.

E.V. Ivanyuk

## UTILIZATION OF RED SLUDGE IN TECHNOLOGY OF INORGANIC PIGMENTS: THERMODYNAMIC ASPECTS

*It has been established that the industrial waste of alumina production: high-iron, high-aluminum-containing red sludge can be used as a raw material for the synthesis of inorganic pigments of the brown-ocher range with an equivalent replacement of pure oxides of the color-forming metals Ferrum and Aluminum for the waste. A thermodynamic analysis was carried out using the concepts of enthalpy, entropy and Gibbs energy of the transition of ions from the tetrahedral positions of the spinel oxygen framework to the octahedral positions and the principle of series-parallel reactions. Determination of the coefficients of distribution and transition of ions in complex spinels in the process of formation of spinel structures of inverted and mixed type proved the possibility of using red sludge in the processes of creating continuous series of solid solutions and formation of stable brown and ocher color.*

*Keywords:* Red sludge, environmental pollutants, inorganic pigments, color modifiers, inverted spinel structures, transition enthalpy, transition entropy, transition Gibbs energy, distribution coefficients, IR-spectra.

**Постановка проблеми.** Червоний шлам виробництва глинозему є полютантом четвертого рівня небезпеки, що містить оксиди Феруму, Алюмінію та Титану, тому його утилізація несе поліпшення екології промислових регіонів.

Проведені попередні експериментальні дослідження процесів взаємодії сполук які входять до складу червоного шламу і шихтувальної сировини пігментів свідчить про те, що формування сполук-хромофорів коричневих та вохристих кольорів в промислових пігментах та моделях пігментів на основі червоного шламу відбувається за механізмом шпінелеутворення. Цей факт безперечно вказує на можливість та технологічну доцільність переробки червоного шламу на неорганічні пігменти, які знаходять застосування не тільки при декорванні керамічних виробів, а і для декорування тротуарної плитки завдяки своїй світло- і атмосферостійкості, значній укривистості та можуть бути використані як кольорова основа при виготовленні невивгораючих водоемульсійних фарб.

В той же час, для виявлення умов формування кольору пігментів, що синтезовані з відповідним еквівалентним заміщенням оксидів в складі шихт на червоний шлам є актуальною задачею і проведення термодинамічного аналізу, з використанням принципу послідовно-паралельних реакцій, утворення сполук-хромофорів шпінельного типу в системі:  $Al_2O_3$ -  $Fe_2O_3$  -  $Cr_2O_3$ - $ZnO$ - $TiO_2$  дозволить теоретично обґрунтувати реакції, що відбуваються в твердих розчинах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Огляд науково-технічної літератури та його аналіз показав, що дослідження по утилізації червоного шламу проводяться в основному в області використання його у якості присадки у будівельних матеріалах [1-5], при цьому не використовуються специфічні колороутворюючі властивості складових, які є цінними вторинними «родовищами» оксидів кольорових металів та шпінелеутворюючих оксидів. Окрім того не достатньо інформації про теоретичне обґрунтування процесів, що відбуваються при утилізації, зокрема термодинамічного аналізу шпінелеутворення.

Таким чином, не дивлячись на актуальність проблеми утилізації червоного шламу, в

літературі опубліковано не достатньо даних, на основі яких було б можливо розробити раціональний спосіб переробки червоного шламу у цільові продукти. Тому пошук економічно доцільних та вигідних методів утилізації є важливою науковою прикладною проблемою, яка потребує вирішення.

**Постановка завдань.** Технологія синтезу неорганічних пігментів з використанням промислових відходів різних виробництв, в тому числі червоного шламу відповідає нормативним документам України (ДСТУ 2999-95, ДСТУ 2419-94).

Відповідно основним завданням даної роботи є термодинамічне обґрунтування процесів утворення кольороутворюючих шпінельних структур при синтезі пігментів коричнево-вохристої гами, в шихтах яких проведена еквівалентна заміна компонентів на червоний шлам – відхід виробництва глинозему, що містить у своєму складі оксиди заліза, алюмінію, титану, цинку. Розраховані значення енергії Гібса та коефіцієнтів розупорядкування в обернених шпінелях, що є основою утворення стійкого кольору, доводить принципову можливість повної або часткової заміни чистих оксидів металів в шихтах вохристо-коричневих пігментів на червоний шлам з частковим вирішенням екологічних проблем промислових регіонів та здешевленням цільового продукту.

**Викладання основного матеріалу.** Колір синтезованих пігментів формується під впливом багатьох факторів. Основними з цих факторів є: склад утвореної шпінелі, співвідношення металів-хромофорів в кристалічній ґратці шпінелей за рахунок утворення твердих розчинів, розподілення катіонів металів-хромофорів між тетра- та октаедричними комітками оксигенного каркасу кристалічної ґратки шпінелі.

Особливо цінними, з точки зору регулювання кольору синтезованих пігментів, є експериментально встановлена спроможність утворення для шпінелей безперервного ряду твердих розчинів [6]. Це пояснюється тим, що основна кладка атомів Оксигену в кристалічній ґратці шпінелей мало змінюється в залежності від металічних катіонів, які займають порожнини оксигенного каркасу. В результаті, окрім нормальних шпінелей, можуть утворюватися змішані (обернені) шпінелі, які формують перехідний колір – відтінки пігментів.

Формування кольору пігментів може також залежати від катіонного розподілення (розупорядкування) в структурі шпінелі, яке може регулюватись температурою синтезу. Катіони металів володіють вираженою перевагою до певного координаційного оточення в оксигенному каркасі, тому при розупорядкуванні структури утворених шпінелей катіони стоять в більш характерних для них позиціях. Так, катіони трьохвалентних металів  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Cr^{3+}$ ,  $Ti^{4+}$  мають перевагу до октаедричних – позицій оксигенного каркасу, двохвалентні катіони  $Zn^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  - до тетраедричних позицій [7].

В роботі використано представницькі зразки зі шламосховища, червоного шламу наступного складу, мас.%,  $Fe_2O_3$ - 55;  $Al_2O_3$ -18;  $TiO_2$ -6;  $SiO_2$ -8;  $Na_2O$ -4;  $CaO$ -5; в.п.п.- 4. Виходячи із того, що промислові неорганічні пігменти коричневої гами синтезують у оксидній системі:  $Fe_2O_3$ - $Cr_2O_3$ - $Al_2O_3$ - $ZnO$ - $MgO$ , то найефективніше червоний шлам використати для заміни чистих оксидів саме в коричневих пігментах. Виходячи з шихтового складу пігментів та складу червоного шламу, можуть формуватись наступні прості та змішані шпінелі: коричневі -  $Mg[Fe_2]O_4$ ,  $Zn[Fe_2]O_4$ ,  $Zn[Cr]_2O_4$ ,  $Zn[Al]_2O_4$ ,  $[Zn,]Fe_2O_4$ ,  $Zn[Fe,Al]_2O_4$ ,  $Zn[Fe,Cr]_2O_4$ .

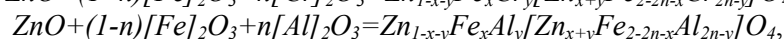
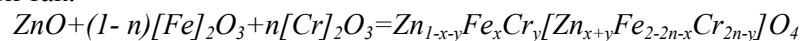
Процес утворення змішаної проміжної шпінелі з одноіменним катіоном двохвалентного металу та різноіменними катіонами трьохвалентного металу визначається нами [8] як процес, що протікає за двома паралельними реакціями:



або



Відношення  $Fe/Cr$  або  $Fe/Al$  у реакційній суміші задається молярною часткою ( $n$ ) до одного з катіонів трьохвалентного металу. Загальний вигляд реакцій утворення змішаної шпінелі такого типу можна записати так:



де  $x$ ,  $y$  – коефіцієнти розподілення протікання реакцій (1<sup>I</sup>), (1<sup>II</sup>) та (2<sup>I</sup>), (2<sup>II</sup>) відповідно.

Використовуючи принцип незалежного протікання паралельних реакцій, можна обчислити значення енергій Гіббса кожної із реакцій, використовуючи рівняння  $\delta G = \delta E - T\delta S$ , із співвідношень:

$$\delta G^I = \delta E^I - T\delta S^I, \tag{3}$$

$$\delta G^{II} = \delta E^{II} - T\delta S^{II}, \tag{4}$$

де  $\delta E^I$  - зміна енергії переходу за реакцією (1' або 2'), яке розраховується за формулою  $\delta E^I = E_{Zn} - E_{Fe}$  або  $\delta E^I = E_{Zn} - E_{Cr}$ , кДж/моль;  $\delta S^I$  - змінення ентропії переходу в октаедричний стан за реакцією (1' або 2'), яке розраховується за формулою  $\delta S^I = S_{Zn} - S_{Fe}$  або  $\delta S^I = S_{Zn} - S_{Cr}$ , Дж/(моль·К);  $\delta E^{II}$  - зміна енергії переходу в октаедричний стан за реакцією (1'' або 2''), яке розраховується за формулою  $\delta E^{II} = E_{Zn} - E_{Fe}$  або  $\delta E^{II} = E_{Zn} - E_{Al}$ , кДж/моль;  $\delta S^{II}$  - зміна ентропії переходу в октаедричний стан реакції (1'' або 2''), яке розраховується за формулою  $\delta S^{II} = S_{Zn} - S_{Fe}$  або  $\delta S^{II} = S_{Zn} - S_{Al}$ , Дж/(моль·К).

Із загальної формули змішаних шпінелей  $Zn_{1-x-y}Fe_xCr_y[Zn_{x+y}Fe_{2-2n-x}Cr_{2n-y}]O_4$  або  $Zn_{1-x-y}Fe_xAl_y[Zn_{x+y}Fe_{2-2n-x}Al_{2n-y}]O_4$  та рівнянь (1' або 2') (1'' або 2''), виходить, що вирази величини  $Zn_{1-x-y}$ ,  $Fe_{2-2n-x}$ ,  $Cr_{2n-y}$  – вихідні, а вирази величин  $Zn_{x+y}$ ,  $Fe_x$ ,  $Cr_y$  – кінцеві продукти реакції або  $Zn_{1-x-y}$ ,  $Fe_{2-2n-x}$ ,  $Al_{2n-y}$  – вихідні, а  $Zn_{x+y}$ ,  $Fe_x$ ,  $Al_y$  – кінцеві продукти реакції. Використовуючи зв'язок константи рівноваги та енергії Гіббса  $\ln K = -\delta G/(RT)$ , системи рівнянь ізотерм паралельних реакцій (1' або 2') та (1'' або 2'') приймають наступний вигляд:

$$\begin{cases} \frac{[x(x+y)]}{[(1-x-y)(2-2n-x)]} - \exp \frac{S_{Zn}-S_{Fe}}{R} \frac{E_{Zn}-E_{Fe}}{RT} = 0 \\ \frac{[y(x+y)]}{[(1-x-y)(2-2n-y)]} - \exp \frac{S_{Zn}-S_{Cr}}{R} \frac{E_{Zn}-E_{Cr}}{RT} = 0 \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases} \frac{[x(x+y)]}{[(1-x-y)(2-2n-x)]} - \exp \frac{S_{Zn}-S_{Fe}}{R} \frac{E_{Zn}-E_{Fe}}{RT} = 0 \\ \frac{[y(x+y)]}{[(1-x-y)(2-2n-y)]} - \exp \frac{S_{Zn}-S_{Al}}{R} \frac{E_{Zn}-E_{Al}}{RT} = 0 \end{cases} \tag{6}$$

Рішення систем рівнянь ізотерми хімічної реакції (5) та (6) виконано з використанням стандартних програм. В результаті отримано значення коефіцієнтів  $x$ ,  $y$ , розподілення катіонів Zn(II), Fe(III) Cr(III) між тетраедричними та октаедричними положеннями оксигенного каркасу кристалічної ґратки (табл.1 та 2).

Таблиця 1

**Значення коефіцієнтів розподілення катіонів в тетра- та октаедричних позиціях оксигенного каркасу шпінелі. Шпінель:  $Zn_{(1-x-y)}Fe_xCr_y[Zn_{(x+y)}Fe_{(2-2n-x)}Cr_{(2n-y)}]O_4$**

Коефіцієнти розподілення	Молярна частка шпінелі $Zn[Fe_2]O_4$ , $n$								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
T=1623K									
$x$	0.075	0.071	0.066	0.061	0.056	0.050	0.043	0.035	0.024
$y$	$1.1 \cdot 10^{-5}$	$2.3 \cdot 10^{-5}$	$3.78 \cdot 10^{-5}$	$5.48 \cdot 10^{-5}$	$7.54 \cdot 10^{-5}$	$0.02 \cdot 10^{-5}$	$1.38 \cdot 10^{-4}$	$1.95 \cdot 10^{-4}$	$3.18 \cdot 10^{-4}$
T=1500K									
$x$	0.062	0.058	0.054	0.05	0.046	0.041	0.036	0.029	0.02
$y$	$5.1 \cdot 10^{-6}$	$1.08 \cdot 10^{-5}$	$1.75 \cdot 10^{-5}$	$2.53 \cdot 10^{-5}$	$3.47 \cdot 10^{-5}$	$4.69 \cdot 10^{-5}$	$6.36 \cdot 10^{-5}$	$8.99 \cdot 10^{-5}$	$1.45 \cdot 10^{-4}$
T=1400K									
$x$	0.051	0.048	0.045	0.042	0.038	0.034	0.029	0.024	0.017
$y$	$2.47 \cdot 10^{-6}$	$5.25 \cdot 10^{-6}$	$8.45 \cdot 10^{-6}$	$1.22 \cdot 10^{-5}$	$1.67 \cdot 10^{-5}$	$2.26 \cdot 10^{-5}$	$3.06 \cdot 10^{-5}$	$4.32 \cdot 10^{-5}$	$6.98 \cdot 10^{-5}$
T=1300K									

$x$	0.041	0.038	0.036	0.033	0.03	0.027	0.024	0.019	0.013
$y$	$1.06 \cdot 10^{-6}$	$2.27 \cdot 10^{-6}$	$3.64 \cdot 10^{-6}$	$5.26 \cdot 10^{-6}$	$7.23 \cdot 10^{-6}$	$9.7 \cdot 10^{-6}$	$1.31 \cdot 10^{-5}$	$1.85 \cdot 10^{-5}$	$2.99 \cdot 10^{-5}$
T=1200K									
$x$	0.031	0.03	0.028	0.026	0.023	0.021	0.018	0.015	0.01
$y$	$4.01 \cdot 10^{-7}$	$8.51 \cdot 10^{-7}$	$1.36 \cdot 10^{-6}$	$1.97 \cdot 10^{-6}$	$2.7 \cdot 10^{-6}$	$3.65 \cdot 10^{-6}$	$4.92 \cdot 10^{-6}$	$6.93 \cdot 10^{-6}$	$1.11 \cdot 10^{-5}$
T=1100K									
$x$	0.023	0.022	0.02	0.019	0.017	0.015	0.013	0.011	0.008
$y$	$1.25 \cdot 10^{-7}$	$2.67 \cdot 10^{-7}$	$4.29 \cdot 10^{-7}$	$6.19 \cdot 10^{-7}$	$8.49 \cdot 10^{-7}$	$1.14 \cdot 10^{-6}$	$1.54 \cdot 10^{-6}$	$2.17 \cdot 10^{-6}$	$3.47 \cdot 10^{-6}$
T=1000K									
$x$	0.016	0.015	0.014	0.013	0.012	0.011	0.009	0.007	0.005
$y$	$3.13 \cdot 10^{-8}$	$6.65 \cdot 10^{-8}$	$1.07 \cdot 10^{-7}$	$1.54 \cdot 10^{-7}$	$2.11 \cdot 10^{-7}$	$2.83 \cdot 10^{-7}$	$3.82 \cdot 10^{-7}$	$5.36 \cdot 10^{-7}$	$8.58 \cdot 10^{-7}$

Таблиця 2

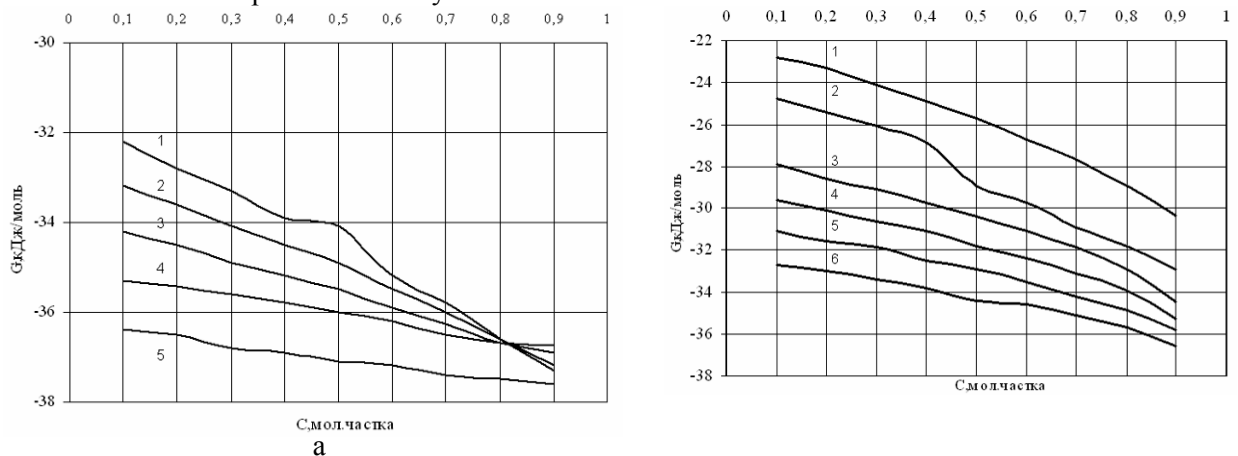
Значення коефіцієнтів розподілення катіонів в тетра- та октаедричних позиціях оксигеного каркасу шпінелі. Шпінель:  $Zn_{(1-x-y)}Fe_xAl_y[Zn_{(x+y)}Fe_{(2-2n-x)}Al_{(2n-y)}]O_4$

Коефіцієнти розподілення	Молярна частка шпінелі $Zn[Fe_2]O_4, n$								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
T=1623K									
$x$	0.254	0.239	0.222	0.204	0.184	0.160	0.132	0.096	0.036
$y$	0.002	0.005	0.008	0.011	0.015	0.02	0.027	0.036	0.058
T=1500K									
$x$	0.228	0.215	0.20	0.184	0.167	0.147	0.123	0.093	0.046
$y$	0.001	0.003	0.005	0.007	0.01	0.013	0.018	0.024	0.038
T=1400K									
$x$	0.206	0.194	0.181	0.167	0.152	0.134	0.114	0.088	0.05
$y$	$9.95 \cdot 10^{-4}$	0.001	0.002	0.003	0.004	0.006	0.008	0.01	0.016
T=1300K									
$x$	0.182	0.172	0.161	0.149	0.135	0.12	0.103	0.081	0.050
$y$	$6.29 \cdot 10^{-4}$	0.001	0.002	0.003	0.004	0.006	0.008	0.01	0.016
T=1200K									
$x$	0.158	0.149	0.14	0.129	0.118	0.105	0.09	0.072	0.047
$y$	$3.65 \cdot 10^{-4}$	$7.73 \cdot 10^{-4}$	0.001	0.002	0.002	0.003	0.004	0.006	0.01
T=1100K									
$x$	0.134	0.126	0.118	0.109	0.1	0.089	0.077	0.062	0.042
$y$	$1.9 \cdot 10^{-4}$	$4.07 \cdot 10^{-4}$	$6.25 \cdot 10^{-4}$	$9.41 \cdot 10^{-4}$	0.001	0.002	0.002	0.003	0.005
T=1000K									
$x$	0.109	0.103	0.096	0.089	0.081	0.073	0.063	0.051	0.035
$y$	$8.82 \cdot 10^{-5}$	$1.87 \cdot 10^{-4}$	$3.01 \cdot 10^{-4}$	$4.34 \cdot 10^{-4}$	$5.94 \cdot 10^{-4}$	$7.97 \cdot 10^{-4}$	0.001	0.002	0.003

Для реальних складів змішаних розупорядкованих шпінелей, коефіцієнти розподілення в яких наведено в табл. 1 та 2, дозволило обчислити температурну та концентраційну залежність значення ентальпії, ентропії та енергії Гібса процесу утворення змішаних шпінелей [8]. Результати розрахунку енергії Гібса, яка є критерієм ймовірності утворення та стійкості синтезованого продукту (пігменту), представлено на рис 1.

Як видно із табл.1 та 2 та рис.1 значення енергії Гібса для всіх наведених шпінелей змішаного типу, що можуть утворюватися за рівняннями (1'), (1''), (2') та (2'') набуває суттєво від'ємного значення. Це говорить про те, що прості шпінелі  $Zn[Al]_2O_4$ ,  $Zn[Cr]_2O_4$ ,  $Mg[Al]_2O_4$ ,  $Zn[Fe]_2O_4$  можуть змішуватись у різних пропорціях, утворюючи безперервні ряди твердих розчинів, що сприяє утворенню відтінків кольору при синтезі коричневих та вохристих пігментів.

При синтезі коричневих пігментів зі структурою цинк-залізо-хромової (рис.1(б)) шпінелі при температурі 1623 K більш стабільнішим є пігмент з термодинамічними параметрами  $\Delta G = -32.8$  кДж,  $n(Zn[Fe]_2O_4) = 0.2$  та катіонним розподіленням:  $Zn_{0.927}Fe_{0.071}Cr_{0.0023}[Zn_{0.073}Fe_{1.529}Cr_{0.397}]O_4$ . Мале значення коефіцієнта розподілення  $y = 0.005$  говорить про те, що цинк-хромово шпінель добре змішується з  $Zn[Fe]_2O_4$  і при зростанні концентрації  $Zn[Fe]_2O_4$  у шпінельній структурі пігменту підвищується його стабільність з утворенням шпінелі з катіонним розподіленням  $Zn_{0.97}Fe_{0.024}Cr_{0.0032}[Zn_{0.024}Fe_{0.76}Cr_{1.76}]O_4$  та значенням енергії Гібса  $-38.8$  кДж. При цьому зберігається тенденція зменшення  $\Delta G$  при зростанні температури від 1100 K до 1623 K. Тобто, при формуванні стабільного коричневого кольору пігменту основною хромофорною кристалічною фазою може бути залізо-хромово шпінель з домішками  $Zn[Fe]_2O_4$ , що надає пігменту більш насиченого темно-коричневого тону.



1 – 1100 K, 2 – 1200 K, 3 – 1300 K, 4 – 1400 K, 5 – 1500 K, 6 – 1623 K

а - цинк-залізо-алюмінієва шпінель, б - цинк-залізо-хромово шпінель

Рис. 1. Залежність енергії Гібса від концентрації шпінелі та температури синтезу

Аналіз рис.1 (а) показує, що змішаної шпінелі  $Zn[Fe,Al]_2O_4$  при температурі 1623 K значення енергії Гібса змінюється від мінус 36.5 кДж до мінус 37.5 кДж при зміні концентрації  $Zn[Fe]_2O_4$  від 0.1 до 0.9 молярних часток. Це свідчить про те, що формування коричневих відтінків є результатом не тільки простого фізичного змішування кольорів, а й утворення змішаної цинк-залізо-алюмінієвої шпінелі. Так, при 1623 K енергетичний стан у пігмента змінюється. Відбувається зменшення значення енергії Гібса для з катіонним розподіленням  $Zn_{0.744}Fe_{0.254}Al_{0.002}[Zn_{0.256}Fe_{1.546}Al_{0.198}]O_4$  від мінус 36.5 кДж до  $\Delta G = -37.5$  кДж,  $n(Zn[Fe]_2O_4) = 0.8$  та катіонним розподіленням  $Zn_{0.868}Fe_{0.096}Al_{0.036}[Zn_{0.132}Fe_{0.304}Al_{1.56}]O_4$ . При збільшенні температури синтезу від 1100 K до 1623 K та сталому значенні  $n = 0.8$  значення  $\Delta G$  зменшується від мінус 36.8 кДж до мінус 37.5 кДж, що відповідає стабілізації змішаної шпінельної структури пігментів зі збільшенням температури синтезу. Тенденцію зменшення значення  $\Delta G$  при збільшенні температури синтезу можна простежити для всього концентраційного поля змішаної шпінелі.

Відповідно термодинамічний аналіз дозволив стверджувати, що утворення кольору пігментів коричневої гама у системі  $Fe_2O_3-Cr_2O_3-Al_2O_3-ZnO-MgO$  відбувається за рахунок утворення змішаних обернених шпінелей і синтез моделей пігментів, зашихтованих з відповідною заміною чистих оксидів на червоний шлам теоретично можливий. Тому наступним етапом



досліджень було створення моделей-пігментів с еквівалентною заміною чистих оксидів на червоний шлам. Досліди по заміні оксидів заліза(III), алюмінію(III) та цинку(II) в промисловому пігменті на червоний шлам планувались таким чином, щоб рецептури шихтових композицій охоплювали більш широкий концентраційний інтервал. В табл.3 представлено досліджувані моделі пігментів, які придатні для синтезу промислових пігментів:

Таблиця 3

**Колористичні характеристики пігментів оптимальних складів, синтезованих з використанням червоного шламу**

Індекс пігменту	Спів-відношення $\text{Cr}_2\text{O}_3:\text{Fe}_2\text{O}_3$	Компоненти шихти модельних пігментів, мас.%							Колір пігменту
		ЧШ	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	ZnO	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	
Пром [9]		-	15,0	9,0	16,0	57,0	-	3	Коричневий
K1	0.83	55.0	-	-	25.0	20.0	-	-	Коричнево-зелений
K2	0.62	53.0	-	-	18.0	23.0	-	-	Коричнево-зелений
K3	0.67	56.0	-	-	21.0	23.0	-	-	Коричнево-зелений
K4	0.12	75.0	-	-	5.0	20.0	-	-	Каво-коричневий
K5	0.15	72.0	-	-	7.0	21.0	-	-	Вохра темна
K6	0.23	70.0	-	-	9.0	21.0	-	-	Каво-коричневий
K7	0.29	68.0	-	-	11.0	21.0	-	-	Коричневий світлий
K10	0.36	64.0	-	-	13.0	23.0	-	-	Світло-коричневий брудний
K11	0.48	61.0	-	-	16.0	23.0	-	-	Шоколадно-коричневий
K12	0.42	65.0	-	-	15.0	20.0	-	-	Коричневий темний
K13	0.52	63.0	-	-	18.0	19.0	-	-	Коричневий темний
K14	0.60	60.0	-	-	20.0	20.0	-	-	Коричневий темний

Аналізуючи запропоновані шихтові композиції можна констатувати, що при використанні червоного шламу відбулася повна заміна оксиду Феруму(III), оксиду Алюмінію. Значно зменшилася (до 50%) дошихтовка чистими оксидами Хрому(III) та Цинку. Варіюванням співвідношення оксидів Феруму(III) та Хрому(III) досягалась можливість отримання більш темних відтінків коричневого та вохри та світлих каво-коричневих пігментів.

Оксиди Цинку та Алюмінію – є шпінелеутворювачами та особливого впливу на формування яскравості пігменту не мають, але завдяки зміні їх концентрацій у шихтовому складі за рахунок червоного шламу понад стехіометрією утворюються відтінки пігментів від каво-коричневого до шоколадно-коричневого при зміні насиченості кольору пігменту.

Окрім того, присутність оксиду Титану(IV) у відході виробництва глинозему може спричинити утворення шпінелеподібної структури за реакцією:  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + [\text{Ti}]\text{O}_2 = \text{TiO}_2\text{-}[\text{Fe},\text{Ti}]\text{O}_4\text{-}\text{Fe}_2\text{O}_3$  [10]. Це призводить до створення більш світлих відтінків та реалізації більшого спектру коричневої гама при варіюванні кількості шламу у шихтовому складі.

Оксиди Натрію та Кальцію є плавнями, тому невелика кількість їх у червоному шламі полегшує процеси спікання при високотемпературному синтезі, а відповідно утворення шпінелей відбувається з більш низької температури. На що вказують отримані ІЧ-спектри оптимальних складів пігментів (рис.1), синтезованих за температури 1000 К та 1273 К (що нижче за температуру синтезу вохристих та коричневих промислових пігментів). Для ІЧ-дослідження

відібрали оптимальні пігменти за кольором та структурою порошка наступного складу: К-12: ЧШ-55.0,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – 15.0,  $\text{ZnO}$  – 20.0; К-6: ЧШ-70.0,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  – 9.0,  $\text{ZnO}$  – 21.0.

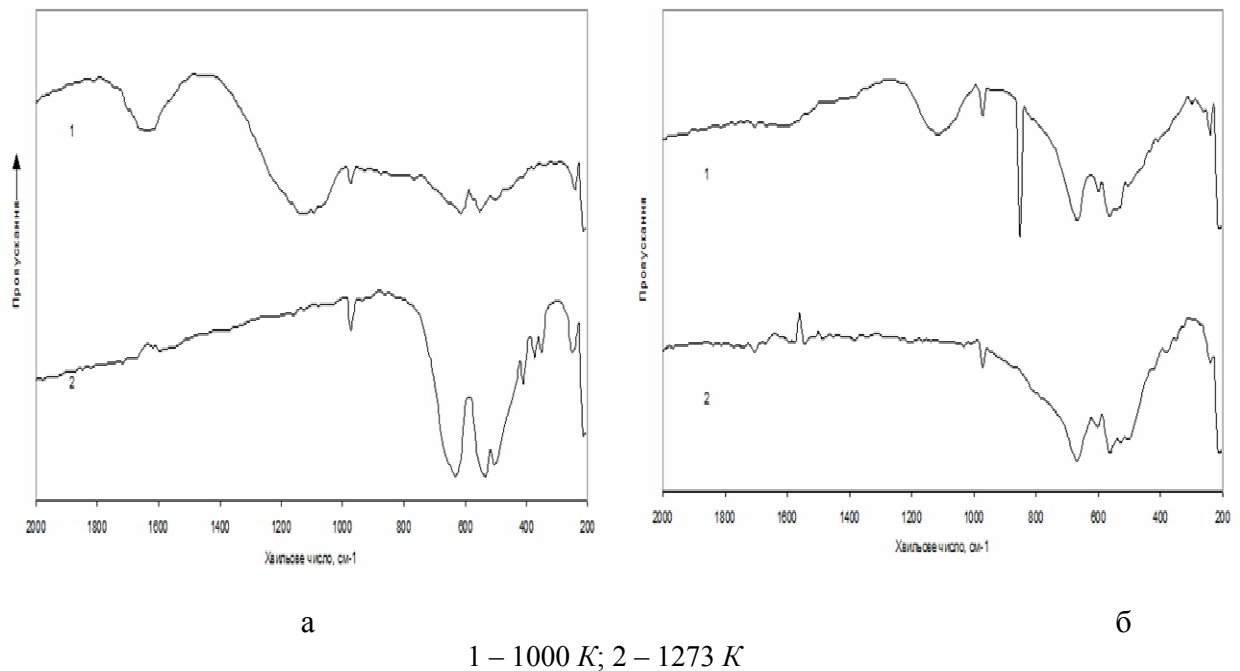


Рис. 2. ІЧ-спектри пігментів коричневого кольору синтезованих з використанням червоного шламу (а-склад К-12, б- склад К-6)

Аналізуючи рис.2 спектри 1а та 1б можна стверджувати, що при температурі синтезу 1000 К на ІЧ-спектрі пігментів К-12 та К-6, найбільшу інтенсивність мають смуги поглинання з хвильовими числами  $1140\text{ см}^{-1}$ ,  $1056\text{ см}^{-1}$  та  $972\text{ см}^{-1}$ . Такі максимальні поглинання ( $1140\text{ см}^{-1}$ ,  $1056\text{ см}^{-1}$  та  $972\text{ см}^{-1}$ ) можна віднести до області групових частот поглинання деформаційних коливань  $\text{Fe-O}$  продукту неповної дегідратації гідроксиду заліза(III) [11].

В області з низькою частотою коливань відображаються 111 смуги малої інтенсивності зі значенням  $552\text{ см}^{-1}$  та  $612\text{ см}^{-1}$ . Смуга поглинання з екстремумом в точці  $\nu = 612\text{ см}^{-1}$  можна віднести до області антисиметричних коливань зв'язку  $\text{Fe-O}$  [11]. Смуга поглинання з екстремумом та хвильовим числом  $\nu = 552\text{ см}^{-1}$  вірогідніше відноситься до антисиметричних коливань кристалічної ґратки  $\text{Fe-O}$  або  $\text{Zn-O}$ , що вказує на появу у твердому розчині оксидів Феруму(III) та Цинку, що є наслідком втрати води із їх гідроксидів.

На ІЧ-спектрах продуктів, обпалених при 1273 К (рис.2 спектри 2а та 2б), не зафіксовані смуги поглинання при  $1620\text{ см}^{-1}$ ,  $1140\text{ см}^{-1}$  та  $1056\text{ см}^{-1}$ ; це пояснюється тим, що відбулася повна дегідратація гідроксидів Феруму(III) червоного шламу при цій температурі. Слід відмітити також ускладнення смуг поглинання ІЧ-спектрів продуктів обпалу шихт цинк-залістистої в порівнянні з цинк-хромовою шпінеллю. Цей процес проявляється в тому, що смуга поглинання при  $396\text{ см}^{-1}$ , яка відноситься до антисиметричного деформаційного коливання оксигенного каркасу октаедричної порожнини шпінельної ґратки [12], розділяється на декілька коливань, які при накладанні спотворюють симетрію смуги поглинання. Це може бути пояснено, виходячи із припущення утворення розупорядкованої змішаної оберненої цинк-залізо-алюмінієвої та цинк-хромової шпінелі.

**Висновки.** Методом термодинамічного аналізу оксидних систем та методом пробних синтезів пігментів виявлено, що червоний шлам придатний для використання в якості вихідної сировини для синтезу коричневих пігментів різних відтінків.

Так при температурі 1273К (температура нижча температури синтезу промислових пігментів) найбільш вірогідними є утворення змішаних обернених шпінелей з іонним розподіленням між тетра- та октаедричними порожнинами оксигенного каркасу кристалічної ґратки шпінелі: коричневого кольору  $\text{Zn}_{0.97}\text{Fe}_{0.024}\text{Cr}_{0.0032}[\text{Zn}_{0.024}\text{Fe}_{0.76}\text{Cr}_{1.76}]\text{O}_4$  та каво-коричневого кольору -  $\text{Zn}_{0.744}\text{Fe}_{0.254}\text{Al}_{0.002}[\text{Zn}_{0.256}\text{Fe}_{1.546}\text{Al}_{0.198}]\text{O}_4$ .

**Список використаних джерел:**

1. Г.В. Губін, Г.Г. Губін, Т.П. Ярош До питання про переробку червоних шламів як комплексної залізовмісної техногенної сировини. :Гірничий вісник, вип. 99, 2015, стор.115-119
- 2., Ribeiro Daniel Vérias. Potential use of natural red mud as pozzolan for Portland cement / Daniel Vérias Ribeiro, João António Labrincha, Marcio Raymundo Morelli // Mat. Res., 2011.- vol.14.- no.1. 1
3. Liu XM, Zhang N. Utilization of red mud in cement production: A review. – Waste Management & Research, 2011. – V.29. -pp. 1053–1063
4. Зальгіна О. С. Утилизация гальванического шлама в производстве стройматериалов / О. С. Зальгіна, С. Е. Баранцева // Стекло и керамика. – 2002. – № 4. – С. 3-6
5. Глуховський І.В., Шумейко В.М., Овруцький В.М., Сучасні технології знешкодження та утилізації небезпечних відходів виробництв.-К.:ДПК Мінекобезпеки України, 1998.-42с.
6. Резницький Л.А. Кристаллоенергетика оксидов. -М.: Изд-во МГУ, 1998.-187с.
7. Резницький Л.А. Кристаллоенергетика оксидов( 2-е узд.).-М.: ДИАЛОГ-МГУ, 2001.-171с.-ISBN 5-89209-549-5
8. Іванюк О.В. Розробка теоретичних та технологічних основ синтезу неорганічних пігментів з використанням як базової сировини гальванічних шламів: Автореф. дис. канд.техн.наук.-Київ, 2001.-21с
9. А.С. 1370123 СССР, МКИ СОЗ С1/04. Керамический пигмент вишнево-коричневого цвета. / Иркилевская О.Т., Демидовская А.Н., Кукушкина Г.Н. и др.; Заявл.05.05.86; Опубл. 30.01.88, Бюл. № 4.
10. Шабельская Н.П., Зеленская Б.А. и др. Синтез композиционного материала  $TiO_2-(Fe,Ti)O_4-Fe_2O_3$  и его каталитические свойства. Фундаментальные исследования. 2015, №9(часть3)-С.532-535. ISSN 1812-7339.
11. Накамото К. Инфракрасные спектры неорганических и координационных соединений. -М.: Мир, 1991.-504с
12. Лоусон К. Инфракрасные спектры поглощения неорганических веществ. -М.: Мир, 1964.-296с.

**Рецензент:** Супрунчук В.І., доц., к.х.н., доц. кафедри технології неорганічних речовин, водоочищення та загальної хімічної технології, ХТФ, «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

**Р.В. Пузік, В.Ю. Кондусь, І.В. Павленко, А.С. Твердохліб**  
Сумський державний університет

## **АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ЗМЕНШЕННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ВІЛЬНОВИХРОВИХ НАСОСІВ ДЛЯ ПЕРЕКАЧУВАННЯ РІДИН З ВКЛЮЧЕННЯМИ**

*Ріст ефективності роботи насосного обладнання і, зокрема, вільновихрових насосів є перспективним напрямком розвитку промисловості, так як зростання ціни на енергоресурси та підвищення вимог до якості промислового обладнання являються суттєвими факторами роботи підприємств.*

*Через це метою даної роботи є пошук та порівняння шляхів підвищення ефективності роботи вільновихрового насосу за допомогою модернізації конструкції елементів проточної частини.*

*Проведення літературного огляду дозволило визначити оптимальних спосіб вдосконалення проточної частини, котрим є модернізація робочого колеса за допомогою зміни ширини лопатей.*

*Заміна лише одного конструктивного елементу насосу мінімізує інвестиційні витрати підприємств та позитивно впливає загальну вартість життєвого циклу насосної установки.*

*Модернізована конструкція вільновихрового насосу дає можливість регулювання робочих параметрів в широких межах, зокрема напору на 20% та ККД на 3-4% від номінального значення.*

*Ключові слова:* вільновихровий насос, робоче колесо, лопать, проточна частина, торіодальний вихор, напір, ККД.

**R. Puzik, V. Kondus, I. Pavlenko, A. Tverdokhlib**

## **ANALYSIS OF THE PROSPECTS FOR REDUCING ENERGY CONSUMPTION OF TORQUE FLOW PUMPS FOR PUMPING LIQUIDS WITH INCLUSIONS**

*The increase in the efficiency of pumping equipment and, in particular, torque flow pumps is a promising direction for the development of industry. Since the increase in the price of energy resources and the increase in quality requirements for industrial equipment are significant factors in the work of enterprises.*

*Therefore, the purpose of this work is to find and compare ways to improve the efficiency of torque flow pumps by modernizing the design of the elements of the flow path.*

*Conducting a literature review made it possible to determine the optimal way to improve the flow path. This method is a modernization of the impeller by changing the width of the blades.*

*Replacing only one structural element of the pump minimizes the investment costs of enterprises and positively affects the total life cycle cost of the pumping unit.*

*The upgraded design of torque flow pumps makes it possible to control operating parameters over a wide range. In particular, head by 20% and efficiency by 3-4% of the nominal value.*

*Key words:* torque flow pump, impeller, blade, flow part, toroidal vortex, head, efficiency.

Вступ. При перекачуванні води або іншої чистої рідини широке розповсюдження отримали відцентрові насоси. Тим не менше часто виникає потреба в транспортуванні рідини, котра містить тверді або газоподібні включення, суспензії високої в'язкості, суміші з піском, волокнистими включеннями та іншими забрудненими рідинами [6].

Галузі промисловості, котрі часто стикаються з необхідністю перекачування забруднених рідин, зокрема гірничодобувна та днопоглиблювальна, стикаються з рядом серйозних проблем. Окрім швидкого зносу елементів проточної частини абразивними речовинами, великі тверді включення постійно забивали звичайні насоси для транспортування шламу. Вони вимагали постійного обслуговування, щоб їх розблокувати, а також частого обслуговування та заміни деталей. Час простою та витрати були надмірними.

**Постановка задачі.** Одним з шляхів вирішення даного завдання є модифікація конструкції відцентрових насосів, зокрема, використання одно- або двоканальних робочих коліс (рис. 1) [12, 18]. Даний тип насосів здебільшого використовуються для перекачування рідин невисокого ступеня забруднення з дрібними твердими частинками. Вони мають великі показники напору в порівнянні з іншими робочими колесами та високий показник ККД. Даний тип насосів часто використовується для перекачування відфільтрованих і не відфільтрованих біологічних рідин, але погано підходить для перекачування рідин з високим ступенем абразиву (пісок, дрібний гравій і ін.) [19].

Тим не менше даний підхід не може повністю вирішити питання перекачування рідин з включеннями, так як ККД використовуваних відцентрових насосів починає знижуватися при концентрації домішок близько 7% [2]. Транспортуванні стічних вод та рідин з волокнистими включеннями є ускладненим через можливість забивання насоса. Ще одною проблемою є те, що транспортування рідин з абразивними включеннями та в'язких рідин супроводжується швидким

зношуванням проточної частини насоса, а при перекачуванні газорідних сумішей можливий зрив подачі.

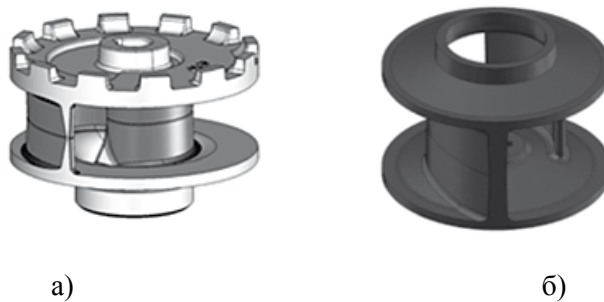


Рис. 1. Одноканальне а) та двоканальне б) відцентрові робочі колеса [19]

Через це постає необхідність використання насосів з принципово іншим принципом роботи, котрими є вільновихрові насоси. Конструкція вільновихрових насосів дозволяє транспортувати рідини, що містять значні концентрації твердих або газоподібних включень, при зниженій ймовірності засмічення проточної частини. Однак їх гідравлічна ефективність дещо нижча, у порівнянні зі звичайними відцентровими насосами (ККД насосів коливається в межах  $\eta=0,38-0,58$ ).

Таким чином метою даної роботи є пошук шляхів підвищення роботи вільновихрових насосів шляхом удосконалення його проточної частини.

#### Огляд літературних джерел.

**Конструктивні схеми вільновихрових насосів.** Перші дослідження в даній області розпочалися в середині ХХ століття, що дозволило компанії «Western Machinery Co» 1954 року виготовити перший вільновихровий насос типу «Wemco».

Унікальними особливостями насоса даного типу є:

- повністю заглиблене робоче колесо напіввідкритого чашового типу, котре дає можливість перекачування твердих тіл з розміром близьким до діаметра трубопроводу.
- робоче колесо було спроектоване надзвичайно товстим для забезпечення міцності та економічності. Корпус був виготовлений із двох частин із вхідним патрубком, який можна було швидко, легко та економічно замінити.

Тим не менше, одним з головних недоліків насосів даного типу є досить низький ККД, котрий, зазвичай, не перевищує 35%. Згідно досліджень Еггера [2], дане значення може досягатися при величині колової швидкості насоса близько 25м/с. В цьому випадку величина напору насосу типу «Wemco» може складати близько 32 м.

Наступним типом вільновихрових насосів став «Seka», вперше розроблений австрійською машинобудівною фірмою «VOGEL» [20]. Основною конструктивною відзнакою насосів даного типу є висунення робочого колеса із розточки корпусу безпосередньо у вільну камеру. Це забезпечує зменшення частки вихрового та підвищення частки лопатевого робочого процесу, що дозволяє отримати підвищення напору та ККД насоса, але в той же час супроводжується руйнуванням легкоушкоджуваного продукту та інтенсивним зносом робочого колеса при транспорті рідин з абразивними домішками [21].

В результаті досліджень, проведених Емілем Еггером в середині ХХ століття, була розроблена нова конструктивна схема вільновихрових насосів «Turo». Основною характерною рисою даних насосів є розташування робочого колеса у циліндричній розточці корпусу. Завдяки своїй конструкції насосів типу «Turo» (рис. 2) основна частина (близько 85%) перекачуваної рідини, транспортується безпосередньо від первинного вихору до напірного патрубку. Лише 15% перекачуваної рідини, контактує з робочим колесом через вторинний вихор.

Порівняльний аналіз характеристик різних конструктивних схем вільновихрових насосів (рис. 3) показав, що насоси типу «Seka» мають найвищі показники ККД та коефіцієнт напору. При цьому під час зміни конструкції насоса з типу «Wemco» до насоса типу «Seka» оптимальні показники роботи насосів спостерігаються при більших значеннях коефіцієнта напору відповідає конструктивній схемі «Wemco». Вільновихрові насоси типу «Turo» займають проміжне положення [1, 7].

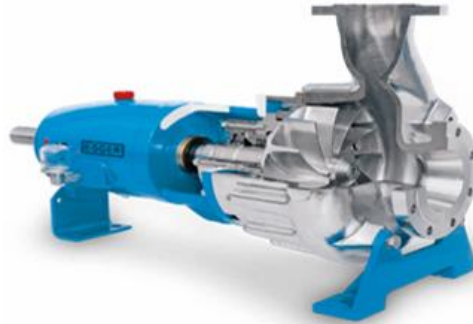
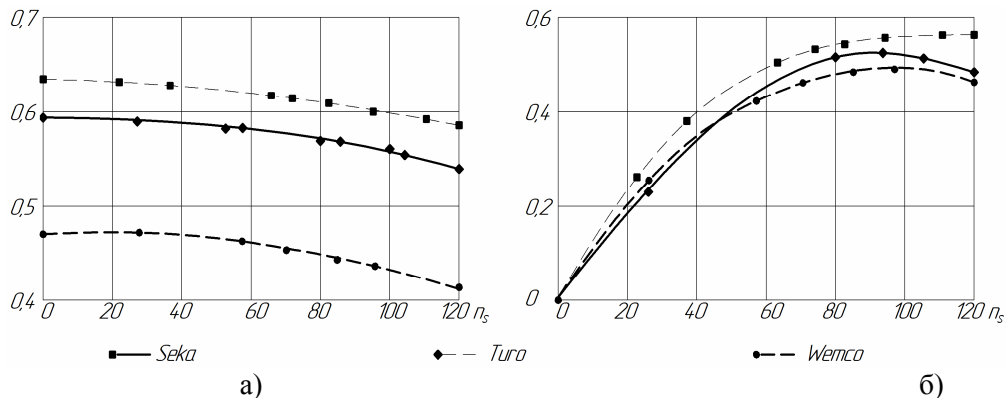


Рис. 2. Вільновихровий насос типу «Туро» [22]

Рис. 3. Порівняння характеристик вільновихрових насосів:  
а) коефіцієнт напору, б) ККД насоса

**Вплив конструкції вільновихрових насосів на їх характеристики.** При виборі конструкції насосів, а також методів їх модернізації необхідно враховувати не лише показники ефективності роботи, а також інвестиційні витрати, необхідні для проведення даної модернізації. Це дозволить мінімізувати загальну вартість життєвого циклу насосної установки [17].

Через це доцільним є удосконалення конструкції робочого органу насосу при збереженні старих корпусних елементів, адже даний метод не потребує значних матеріальних витрат на виготовлення та заміну елементів насосної установки і дозволяє підвищувати ефективність роботи вже існуючих агрегатів. Дана модернізація може відбуватися за рахунок підрізки лопатей робочого колеса, їх профілювання тощо [5, 14].

Підрізка робочого колеса вільновихрового насоса є одним з дієвих методів зміни параметрів насоса, адже не тільки впливає на характеристики власне колеса, а і призводить до зміни величини вільної камери (зазору між лопатями РК та стінкою корпусу).

Для вільновихрових насосів типу «Seka» підрізка РК по ширині лопаток  $b_2$  супроводжується постійним зменшенням величини напору та ККД (при максимальній підрізці приблизно на 10%). При цьому при невеликих величинах підрізки ( $b_2/b_2 \leq 0,8$ ) спостерігається збільшення оптимальної подачі. При подальшому збільшенні величини підрізки відбувається її зниження.

Підрізка лопатей робочого колеса через одну, тобто перехід до аналога двоярусного колеса у відцентровому насосі, призводить до зростання напору та ККД насоса і досягає максимуму при довжині коротких лопатей приблизно вдвічі менше від довжини довгих лопатей (приріст ККД складає 2-3% [16]). Це пояснюється формуванням поперечних вихорів з оптимальними для здійснення робочого процесу геометричними співвідношеннями на більшій довжині міжлопатевого каналу колеса [13], що є причиною підвищення ефективності роботи насоса. Розширення експериментів у цьому напрямі може дати додатковий інструмент варіювання параметрів вільновихрових насосів типу «Туро».

Регулювання характеристики вільновихрових насосів може бути проведене за допомогою підрізки робочого колеса по зовнішньому діаметру  $D_2$ . Найбільш широко даний метод застосовується у випадку, коли двигун насоса не має регулювання частоти обертання (наприклад, асинхронний двигун із короткозамкненим ротором) [15]. При зменшенні зовнішнього діаметра

робочого колеса  $D_2$  колова швидкість на виході з колеса зменшується, що призводить до зменшення тиску. В результаті цього крива напірної характеристики насоса знижується і при деякому значенні  $D_2$  пройде через задану режимну точку, у випадку, якщо дана точка лежить нижче характеристики насоса.

При підрізці робочого колеса напір спочатку дещо зростає, після чого стабілізуються. При подальшій підрізці напір знову зменшується. Через це було вирішено вивести окремі залежності параметрів вільновихрових насосів для різних величин підрізки. Так для насосу типу «Туго» при  $D_2'/D_2 = 1 - 0,95$  :

$$\frac{Q'}{Q} = \left(\frac{D_2'}{D_2}\right)^{1,25} ; \frac{H'}{H} = \left(\frac{D_2'}{D_2}\right)^{1,5} \quad (1)$$

для  $D_2'/D_2 = 0,95 - 0,80$  :

$$\frac{Q'}{Q} = \left(\frac{D_2'}{D_2}\right)^{1,5} ; \frac{H'}{H} = \left(\frac{D_2'}{D_2}\right)^2 \quad (2)$$

Максимальне значення підрізки робочого колеса по зовнішньому діаметру не повинно перевищувати 20%.

Конструкція вільновихрового робочого колеса дозволяє проводити пряму або ж похилу підрізку по внутрішньому діаметру. У випадку прямої підрізки лопатей по внутрішньому діаметру  $D_1$  відбувається лише незначна зміна параметрів насоса при величині підрізки  $D_1'/D_1 < 0,5$ . Подальше збільшення величини підрізки зазвичай являється недоцільним, адже супроводжується зміною структури потоку на вході в робоче колесо, що призводить до стрімкого падіння параметрів насоса на всіх режимах роботи.

Похила підрізка по внутрішньому діаметру дозволяє створити необхідну форму вхідних кромek лопатей робочого колеса. Розміщення кромek під кутом до осі насоса дозволяє уникнути забивання робочого колеса, що є вкрай важливим при перекачуванні рідин з волокнистими включеннями. Зміну параметрів роботи вільновихрового насоса можна умовно поділити на два відрізки. При  $D_1'/D_1 \leq 0,45$  відбувається незначне зростання всіх параметрів. При  $D_1'/D_1 > 0,45$  подача насоса продовжує зростати, але ККД та напір зменшуються.

Конструкція вільновихрових насосів типу «Seka» дозволяє проводити підрізку кута лопаті робочого колеса на виході [11]. В даному випадку підрізка проводилася від радіусу центру циркуляції до зовнішнього радіусу РК. Було досліджено зміну параметрів вільновихрового насоса при поступовому збільшенні величини зрізаної ділянки  $b_2'$ . На відрізку  $b_2'/b_2 \leq 0,8$  величина ККД залишається практично незмінною. При цьому відбувається поступове зменшення відносних величин напору та подачі. Подальше збільшення підрізки не рекомендується, так як воно супроводжується різким спадом параметрів насоса.

Як один з методів доводки вільновихрових насосів часто використовують підрізку робочого колеса по передньому торцю лопатей, тобто по ширині лопатей  $b_2'$ . Для визначення параметрів вільновихрового насоса типу «Туго» використовують наступні залежності:

$$\frac{Q'}{Q} = \left(\frac{b_2'}{b_2}\right)^{1/6} ; \frac{H'}{H} = \left(\frac{b_2'}{b_2}\right)^{1/3} \quad (3)$$

При цьому характер зміни параметрів є схожим з підрізкою по зовнішньому діаметру РК.

Рекомендована величина підрізки на перевищує  $b_2'/b_2 \leq 0,6$ . При даному значенні падіння ККД складає близько 5%. Подальша підрізка являється недоцільною.

При підрізці робочого колеса вільновихрового насоса типу «Seka» по ширині лопатей спостерігається безперервне зниження величини напору та ККД ( $\approx 10\%$  при максимальній підрізці). Через це не рекомендується проводити підрізку РК на величину  $b_2'/b_2 \leq 0,6 \dots 0,65$ . При цьому відбувається зростання подачі насоса в діапазоні  $b_2'/b_2 = 1 \dots 0,8$ .



Ще одним з методів регулювання отримуваних параметрів вільновихрових насосів може стати висув робочого колеса у вільну камеру. Даний метод може бути використаний для вільновихрових насосів типу «Туго». При цьому максимальний приріст напору ( $\bar{H} = 1,15$ ) та ККД ( $\eta = 0,535$ ) спостерігається при повному висуві робочого колеса, тобто при переході до конструктивної схеми «Сека».

При висуві робочого колеса відбувається підвищення ККД, що може бути обґрунтоване зростанням інтенсивності потоку протікання та зменшенням гідравлічних втрат при обертанні рідини у вільній камері насоса. При цьому оптимальний режим роботи насоса зміщується у бік вищих подач.

Одним з основних недоліків даного методу є підвищення ймовірності закупорювання проточної частини при перекачуванні рідин з волокнистими та великогабаритними включеннями.

З метою підвищення параметрів було розроблено конструкцію вільновихрового робочого колеса з однією подовженою лопаттю [3]. Виступаюча частина лопаті змушує поверхню середовища розриватися та закручуватися, навіть якщо перекачувана суміш має високу консистенцію. Тому це дає можливість транспортувати суміші високої консистенції, такі як цементні суспензії та текучий розчин з високим вмістом піску, який практично неможливо транспортувати за допомогою звичайних вільновихрових насосів. Тим не менш, неможливість балансування робочого колеса є причиною шумових, вібраційних характеристик агрегату.

Конструкція робочого колеса вільновихрового колеса з двома подовженими лопатями, має позбутися вищезгаданих недоліків. В даній конструкції лопаті робочого колеса розділені на дві групи, одна з лопатей кожної групи виступає у вільну камеру насоса. Через їх симетричне розташування відносно осі колеса вдалося позбутися дисбалансу, що призвело до покращення шумових та вібраційних характеристик і, як наслідок, збільшення ресурсу роботи насосу [9].

Застосування робочих коліс з подовженими лопатями у вільновихровому насосі забезпечує зростання параметрів (напору приблизно на 20% та ККД на 3–4%). Основною причиною є збільшення ролі лопатевого робочого процесу у загальному процесі передачі енергії в насосі.

В роботі [10] описана конструкція вільновихрового насоса типу «Туго» з робочим колесом, на лопатях котрого побудовані виступи у формі трапеції. Конструкція даного вільновихрового насоса передбачає робоче колесо з лопатками, що мають на периферії виступи, розміщені у вільній камері, котрі утворюють з корпусом осьовий зазор. Дані виступи виконані у вигляді прямокутної трапеції, менша основа якої направлена в сторону вільної камери, а похила грань – до осі насоса. Довжину меншої основи рекомендується виконувати в діапазоні **0,2 – 0,25** зовнішнього радіуса  $R$  робочого колеса, а довжина більшої основи **0,3 – 0,35** відповідно.

Виконання виступу по периферії лопаті робочого колеса дає можливість компенсувати падіння колової складової абсолютної швидкості потоку в місці злиття циркуляційного і основного потоків рідини. Форма виступу у вигляді прямокутної трапеції з похилою гранню, спрямованої в бік осі робочого колеса, дозволяє забезпечити плавне зростання колової швидкості та підтримання її постійного значення по всьому радіусу виходу з робочого. Так як колова складова швидкості потоку рідини на виході з робочого колеса, визначає ККД та напір насоса, то її зростання забезпечує підвищує ККД (на 5,5%) і напір (на 11%) насоса.

**Методи досліджень.** Задля отримання оптимальних результатів було вирішено провести дослідження в три основні етапи:

– інформаційно-аналітичний огляд літературних джерел, котрий дозволяє узагальнити результати, отримані попередніми дослідженнями, а також виявити основні проблеми, з котрими вони стикнулися.

– розрахунково-аналітичне дослідження дозволяє побудувати теоретичну модель удосконаленою конструкції вільновихрового насоса, визначення залежності робочих параметрів насоса від елементів конструкції його робочого органа.

– для дослідження структури потоку рідини застосовується числовий експеримент, котрий базується на фундаментальних законах гідромеханіки та розв'язані системи рівнянь нерозривності потоку та рівнянь руху в'язкої рідини.

#### **Результати дослідження.**

В результаті проведення дослідження було визначено, що процес перекачування рідини вільновихровим насосом включає в себе дві основні складові. Це відбувається через те, що загальний потік після входу в проточну частину насоса розділяється на дві компоненти, котрі, тим не менше, знаходяться в тісній взаємодії між собою [5]. Перша складова направляється

безпосередньо до напірного патрубку і таким чином утворює потік протікання, котрих не взаємодіє з лопатями робочого колеса насоса. Друга складова потрапляє у міжлопатеві канали робочого колеса. Після цього відбувається передача енергії від лопатей робочого колеса рідині. Даний потік рідини продовжує циркулювати у проточній частині і утворює тороподібний вихор, котрий являється так званою «рідкою лопаттю». Саме ця «рідка лопать» і відповідає за передачу енергії потоку протікання [8].

При цьому необхідно зазначити, що передача енергії від робочого колеса тороподібному вихору відбувається за допомогою лопатевого робочого процесу, максимальний теоретично досяжний ККД котрого рівний 1. А від тороподібного вихору потоку протікання за допомогою вихрового робочого процесу, максимальний ККД котрого дорівнює 0,5. Саме це і є основною причиною відносно низьких значень ККД вільновихрових насосів.

Таким чином змінюючи співвідношення між лопатевим та вихровим робочими процесами можна досягти отримання оптимального значення ефективності роботи вільновихрового насосу при збереженні можливостей перекачування забруднених рідин [4]. Одним зі шляхів подібної регуляції є зміна ширина лопатей робочого колеса.

При збільшенні лопаті до величини, що перевищує ширину вільної камери насоса центр тороподібного вихору потрапляє до міжлопатевих каналів робочого колеса. Це дозволяє підвищити складову лопатевого робочого процесу, що позитивно впливає на ККД вільновихрового насоса, його напір та питому енергію рідини.

Також збільшується частка потоку протікання, так як рідина може перетікати безпосередньо до відводу з робочого колеса.

Іншим наслідком подібної модифікації робочого колеса є деформація тороподібного вихору, так як в просторі між краєм лопаті робочого колеса та центром тороподібного вихору відбувається додаткова силова взаємодія з потоком рідини, що призводить викривлення тороподібного вихору. Це в свою чергу є причиною виникнення додаткових гідравлічних втрат в проточній частині вільновихрового насоса [5].

При максимальній величині нарощування лопаті конструкція вільновихрового насоса фактично змінюється на конструкцію відцентрового насоса з напіввідкритим робочим колесом. Як було зазначено вище, насоси даного типу мають відносно високі показники ККД та напору, але погано пристосовані для перекачування рідин з домішками, тому можуть бути застосовані для перекачування виключно чистих рідин.

При підрізці лопатей робочого колеса спостерігаються зворотні явища: відбувається додаткове зменшення ролі лопатевого робочого процесу при зростанні частки вихрового робочого процесу. Також обернений характер має і деформація тороподібного вихору, котра спричинена розташування центру вихору у вільній камері насоса далеко від кромки лопатей робочого колеса. Як наслідок спостерігається зниження показників напору та ККД вільновихрового насоса. Тим не менш, через зростання вільного простору в проточній частині насоса підвищується його здатність до перекачування рідин з великими включеннями, що вкрай важливо для вільновихрових насосів.

#### **Висновки.**

Дослідження літературних джерел інформації дало можливість визначитися з основними напрямками вдосконалення конструкції вільновихрових насосів.

Було досліджено вплив ширини лопаті робочого колеса на характеристики вільновихрового насоса.

При збільшенні ширини лопатей робочого колеса вільновихрового насоса було досягнуто підвищення величини його напору та ККД. Основними причинами цього можна вважати зменшення ролі вихрового та збільшення ролі лопатевого робочого процесу, а також направлення частини рідини з робочого колеса безпосередньо до відводу насоса, що зменшує кількість циклів її обертання у вільній камері вільновихрового насоса.

#### **Список використаних джерел**

1. ВАК Е. Ekonomiczne przesłanki stosowania pomp o swobodnym przepływie do podnoszenia mieszaniny wody i ciał stałych // PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPLYWOWYCH. 1975. С. 235–241.
2. Egger E. Einsatz Von Turo-Pumpen in der Industrie mit spezieller Berücksichtigung des Einsatzes für stark schlibende Fordergüter // Pumpen und Verdichterinformattionen. 1967. (2). С. 11.
3. Heimgartner H., Wirz K. Laufrad für eine Freistrompumpe // 1984. 2 с.
4. Kondus V.Y. [и др.]. Improving the efficiency of the operating process of high specific speed torque-flow pumps by upgrading the flowing part design // Journal of Physics: Conference Series. 2021. № 1 (1741). С. 12023.

5. Kondus V.Y., Kalinichenko P.M., Gusak O.G. A method of designing of torque--flow pump impeller with curvilinear blade profile // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. № 8 (93) (3). С. 29–35.
6. Kotenko A.I., Herman V.F., Kotenko A.A. Rationalisation of Ukrainian industrial enterprises in a context of using torque flow pumps on the basis of valuation of the life cycle of pumping equipment // Nauka i Studia. 2014. № 126 (16). С. 89–91.
7. Krishtop I.V., Kalinichenko P.M., Gusak O.G. Calculation and designing of volutes of rotodynamic pumps // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. (233).
8. Quan H. [и др.]. Research stage and development tendency of vortex pump // Fluid Machinery. 2016. № 9 (44). С. 36–40.
9. Toguchi S., Kobayashi M. Пат. 4592700 США, МПК F04D 29/24; F04D 29/40. Vortex pump // 1986. № 19.
10. Вертячих А.В., Герман В.Ф., Ковальов І.А. А. с. 1236175 СССР, МКИ F 04 D 7/04. Свободновихревой насос № 3780994/25–06 ; заявл. 15.08.84 ; опубл. 07.06.8 с.
11. Гусак А.Г. [и др.]. Расширение области применения свободновихревых насосов // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. 2013. № 1. С. 7–14.
12. Евтушенко А.А., Колисниченко Е.В. Влияние пазух одно- и двухлопастных рабочих колес на характеристики центробежного насоса работающего на газожидкостной смеси // Всеукраїнський науково-технічний журнал: Промислова гідравліка і пневматика. 2006. (3). С. 77–81.
13. Евтушенко А.А., Неня В.Г., Соляник В.А. Структура течения в межлопастном канале рабочего колеса свободновихревого насоса типа «TURO» // Вестник НТУУ «КПИ». 1999. (35). С. 295–301.
14. Котенко О.І., Кондусь В.Ю. Проектування робочого колеса вільновихревого насоса з криволінійним профілем лопаті з використанням методу чисельного дослідження // Journal of Engineering Sciences. 2016. № 1 (3). С. 9–16.
15. Михайлов А.К., Малюшенко В.В. Конструкция и расчет центробежных насосов высокого давления / А.К. Михайлов, В.В. Малюшенко, МОСКВА.: Машиностроение, 1971. 304 с.
16. Сапожников С.В., Соляник В.А., Яхненко С.М. О целесообразности применения двухъярусных рабочих колес в СВН типа «Туго» // Материалы научн.-техн. конф. преподавателей сотрудников, аспирантов и студентов - Сумы: СумГУ. 2000. (1). С. 127–128.
17. Ткачук Ю.Я., Лобан С.А., Шатрюк Е.В. Использование принципов Ісс при выборе насоса для перекачки абразивных суспензий // Вісник Сумського державного університету. 2012. (4). С. 28–34.
18. Яхненко С.М. Влияние вида и свойств перекачиваемой среды на выбор конструкции рабочего колеса динамического насоса // Міжнародна науково-технічна конференція «Гідромеханіка в інженерній практиці». 1998. С. 55–62.
19. Типы рабочих колёс погружных дренажных насосов и области их применения [Электронный ресурс]. URL: <https://promnasos.com/news/typy-rabochikh-kolyes-pogruzhnykh-drenazhnykh-nasosov-i-oblasti-ikh-primeneniya/>.
20. VOGEL PUMPEN [Электронный ресурс]. URL: <https://vogelpumpen.eu/>.
21. Centrifugal Pumps [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gardnerdenver.com/en-hu/knowledge-hub/articles/centrifugal-pump-technology-explained>.
22. Каталог насосного обладнання компанії Egger [Электронный ресурс]. URL: [https://www.eggerpumps.com/Portals/0/pdfs/Egger\\_Pumpes\\_and\\_Valves\\_Overview.pdf](https://www.eggerpumps.com/Portals/0/pdfs/Egger_Pumpes_and_Valves_Overview.pdf).

Н.Ю. Імбірович<sup>1</sup>, О.І. Звірко<sup>2</sup>, О.Ю. Повстяной<sup>1</sup>, А. Дубіцкі<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

<sup>2</sup>Фізико-механічний інститут ім.Г.В.Карпенка НАН України, Львів, Україна

<sup>3</sup>Білостоцький технічний університет, Білосток, Республіка Польща

## ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ТА МОРФОЛОГІЇ ПОВЕРХНІ БІО-ПОКРИТТІВ, НАСИЧЕНИХ ПРИРОДНИМИ КРЕМНИСТИМИ СПОЛУКАМИ

*В роботі досліджено стадійність процесу синтезу біо-покривів, які формувались в плазмі іскрових розрядів методом ПЕО. Дослідження електрофізичних параметрів процесу синтезу покриттів, сформованих без діатоміту та з додаванням його в електроліт показали, що введення в електроліт діатоміту призводить до стабілізації процесу синтезу, а підвищення концентрації компонентів електроліту призводить до підвищення напруги, за якої відбувається ПЕО. Проведені експерименти встановлення відкритої пористості дали можливість визначити, що найвищий показник пористості (0,75%) має покриття сформоване в електроліті без діатоміту, але більше водопоглинання властиве для покриттів, синтезованих в електроліті 20 г/л КОН+20 г/л р.с.+20 г/л  $Na_6P_6O_{18}+20$  г/л  $Na_4P_2O_7$  + 20 г/л діатоміту. Встановлено, що при додаванні в електроліт гідроксиапатиту утворюються покриття з більшою кількістю кратерів на поверхні, проте вони менші за розмірами.*

*Ключові слова:* плазмоелектролітне оксидування, біо-покривтя, титановий сплав, діатоміт, склад електроліту електроліту, пористість.

N.Yu. Imbirovych, O.I. Zvirko, O.Yu. Povstianoi, A.Dubicki

## FEATURES OF THE FORMATION AND SURFACE MORPHOLOGY OF BIOCOATINGS SATURATED WITH NATURAL SILICON COMPOUNDS

*The paper examines the stages of the process of synthesis of bio-coatings, which were formed in the plasma of spark discharges by the PEO method. Findings of the electrophysical parameters of the synthesis process of coatings formed without diatomite and with its addition to the electrolyte showed that the introduction of diatomite into the electrolyte leads to stabilization of the synthesis process, and an increase in the concentration of electrolyte components leads to an increase in the voltage at which PEO occurs. Conducted experiments to establish open porosity made it possible to determine that the highest porosity indicator (0.75%) has a coating formed in an electrolyte without diatomite, but more water absorption is characteristic of coatings synthesized in an electrolyte of 20 g/l KOH + 20 g/l r.s. +20 g/l  $Na_6P_6O_{18}+20$  g/l  $Na_4P_2O_7$  + 20 g/l diatomite. It was established that when hydroxyapatite is added to the electrolyte, coatings with a larger number of craters on the surface are formed, but they are smaller in size.*

*Key words:* plasma-electrolytic oxidation, bio-coating, titanium alloy, diatomite, composition of the electrolyte of the electrolyte, porosity.

**Постановка проблеми.** Використання багатьох металів часто обмежується їх низькою зносостійкістю, корозійною стійкістю та відносно невеликою поверхневою твердістю, що вимагає їх частої заміни. Тому актуальним рішенням на сьогодні є створення на поверхні захисних покриттів, які підвищували б експлуатаційні характеристики деталей. Сучасний науковий прогрес дозволяє підвищити значення показників поверхонь деталей шляхом використання синтезованих оксидних керамічних покриттів. В даний час розроблено багато методів поверхневого зміцнення матеріалів. Однак вони характеризуються такими недоліками: висока вартість або велика тривалість процесу, мала товщина формованого шару і недостатня адгезія, викривлення поверхні та ін. Плазмоелектролітичне оксидування (ПЕО) є відносно новим видом обробки поверхні. Такий метод обробки поверхні дозволяє отримати багатофункціональні металокерамічні покриття з унікальним набором властивостей.

Високі фізико-механічні властивості титанових сплавів поєднуються з їх біологічною інертністю. Особливістю титанових сплавів є те, що вони не схильні до корозійного розтріскування під навантаженням, навіть за наявності гострих концентраторів напруження. Титанові сплави відносяться до групи вентильних, тобто мають здатність утворювати міцну окисну плівку (переважно діоксин титану  $TiO_2$ ,  $TiO$ ,  $Ti_2O_3$ ), ріст якої за декілька хвилин досягає 2...10 нм, яка захищає метал від корозії однак має низькі механічні властивості.

У зв'язку з тим, що титан та його сплави є біоінертними і не можуть індукувати ріст кісток, однією з актуальних проблем сучасної імплантології є створення нового покоління імплантатів зі зміненим складом і топологією поверхні та відповідно з підвищеною біосумісністю, що

забезпечує зниження ймовірності відторгнення. Тому актуальним є формування на поверхні титанових сплавів покриттів, які б мали мінеральне походження з підвищеними антисептичними властивостями.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Титан і його сплави широко використовуються як матеріали для біомедичних застосувань, таких як зубні та ортопедичні імплантати, через їх нетоксичність, високу питому міцність і хорошу біосумісність [1], [2]. Проте титан і його сплави є біоінертними і не можуть індукувати ріст кісток [3], [4]. Щоб подолати цей недолік, дослідники намагалися змінити склад і топографію поверхонь імплантатів [5], [6], [7], [8].

Такі вчені, як Carayon M.T., Lacout J.L. провели аналіз актуальності імплантування кісткових сегментів в світі. В своїй праці [2] вони зазначають, що у світі здійснюють близько 2 мільйонів кісткових пересаджень, із яких 0,5 мільйона провадять у США. В Світовий продаж заміників кісткової тканини у 2010 році сягав 1,3 млрд. доларів США із прогнозом 10 % щорічного збільшення та об'ємом 2,7 млрд. доларів [3]. Xiaopeng Lu, Carsten Blawert, Mikhail L. Zheludkevich, Karl Ulrich Kainer пропонують введення в електроліт реакційноздатних частинок у плазмоелектролітні покриття (ПЕО-покриття) з метою модифікації поверхні покриття, а саме ущільнення пористості, що призводить до можливості забезпечення більш широкого спектру композицій для покриття [7]. Автори досліджують введення в електроліт різної концентрації КОН та наночастинок  $\text{SiO}_2$ . S. Mann в своїй книзі активно досліджує синтез і м'яких твердих матеріалів нового покоління. В своїй книзі автор доводить актуальність використання біо-матеріалів функціонального призначення на основі природних компонентів [3]. С. Л. Актуг, С. Дурду, І. Кудбай та М. Уста досліджували фазову структуру, морфологію, твердість, адгезійну міцність, шорсткість поверхні та зносостійкість ПЕО-покриттів у розчині гідроксиду калію (КОН) та різної концентрації пентагідрату метасилікату натрію. ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) електроліти. Було видно, що при збільшенні концентрації електроліту  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  збільшується швидкість зношування, твердість і шорсткість поверхні покриттів [9]. Чудові властивості та інтригуюча складність більшості мінералізованих структур насправді є результатом взаємодії між органічними молекулами/матриці та самого мінералу [4]. Знайдено численні приклади біомінералів в природі та детально описані Левенстамом та Вайнера [5]. Найпоширенішими є препарати на основі карбонату кальцію біомінерали, такі як арагоніт (перламутр) і кальцит (мідії, екзоскелеттонні раків тощо), CaPs (у кістках і зубах хребетних) і силікати (рослини, морські губки), але такі матеріали не містяться в природі в таких кількостях, які вимагає промислове виробництво. Тому велика кількість досліджень присвячена синтезу мінералів в біологічно відповідних умовах з метою пояснення механізмів, що стоять за біологічним мінералом.

Активність роботи науковців в напрямку формування біо-покриттів на титанових сплавах дають розуміння великої затребуваності біоматеріалів в світі. Отже, проблеми сучасності вимагають пошуку нових ідей для винаходу новітніх технологій створення інноваційних біоматеріалів, які б характеризувалися біосумісністю, біоактивністю, остеоіндуктивністю, біорезорбцією. Сформувався два основних підходи вирішення цього питання: пошук біосередовищ [6, 7, 8, 10] та технологій для створення біоматеріалів [11, 12, 13, 14, 15].

**Постановка завдань.** Мета роботи полягає у розробленні робочих режимів синтезу біо-покриттів на титанових сплавах з підвищеною антисептичною дією, які б задовольняли вимоги високої пористості та шорсткості поверхні.

**Виклад основного матеріалу.** Процес формування покриття методом ПЕО проходить в електричному полі, яке є джерелом енергії для плазмохімічних реакцій на робочому електроді, який служить анодом. Збільшення анодного потенціалу поза фарадеївську ділянку призводить до пробою діелектричної або напівпровідникової плівки анода, яка формується при проходженні фарадеївської ділянки. Пробій здійснюється внаслідок інжекції електронів із валентної зони в зону провідності. У пробійному каналі сильно зростає температура, проходить дисоціація та іонізація електроліту і формується плазмовий згусток, в якому реалізуються плазмохімічні реакції синтезу оксиду.

З метою модифікації поверхні та підвищення її біосумісності електроліт насичували фосфатами натрію та кальцію, а задля підвищеної антибактеріальності використали діатоміт.

Зміна напруги від часу синтезу характеризує стадійність процесу. Проведені дослідження в різних електролітах та за різного співвідношення густин струмів показують, що в електроліті з концентрацією компонентів 0,5 г/л за  $\text{Ia/Ic } 20/20 \text{ A/dm}^2$  пробій відбувається за напруги вище 300 В, тоді як підвищення концентрації складових електроліту за такої ж густини зменшує напруженість електричного поля до 132 В. В електроліті складу 3 КОН+2 г/л р.с.+3 г/л  $\text{Ca(OH)}_2$  процес за співвідношень густин струму  $30/20 \text{ A/dm}^2$  проходить не рівномірно і покриття, синтезовані за

таким режимом мають не якісну поверхню. Додавання в електроліт діатоміту понижує напругу синтезу і стабілізує процес ПЕО. В даному випадку покриття синтезуються за напруги 90...125 В. Процес синтезу покриттів в електроліті з гідроксиапатитом проходить за напруги від 150 до 260 В, яка в процесі ПЕО майже не змінюється з часом (рис. 1.)

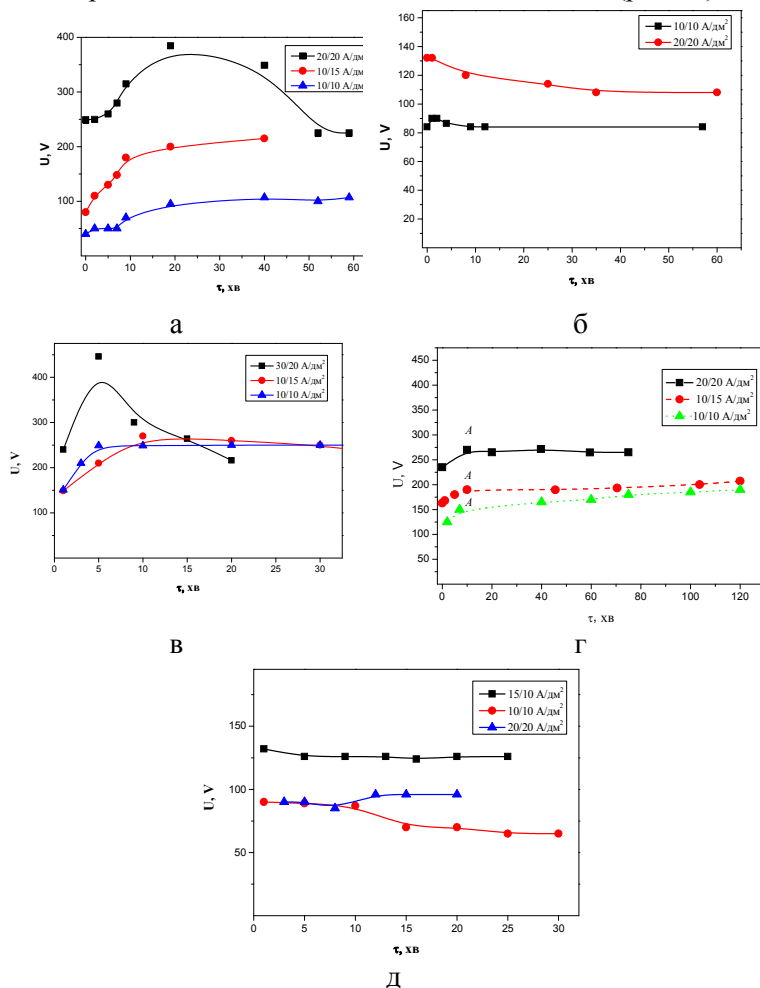


Рис. 1. Зміна напруги в часі залежно від співвідношення густини струмів титанових сплавів під час ПЕО в різних електролітах:

0,5 г/л КОН+0,5 г/л р.с.+0,5Ca(OH)<sub>2</sub>+0,5 г/л Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>+0,5 г/л Na<sub>6</sub>P<sub>6</sub>O<sub>18</sub> (а);  
1 г/л КОН+1 г/л р.с.+1 г/л Ca(OH)<sub>2</sub>+1 г/л Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>+1 г/л Na<sub>6</sub>P<sub>6</sub>O<sub>18</sub> (б);  
3 г/л КОН+2 г/л р.с.+3 г/л Ca(OH)<sub>2</sub> (в);  
20 г/л КОН+20 г/л р.с.+1 г/л Ca(OH)<sub>2</sub>+ 20 г/л Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>+20 г/л Na<sub>6</sub>P<sub>6</sub>O<sub>18</sub>+1 г/л НРА (г);  
20 г/л КОН+20 г/л р.с.+1 г/л Ca(OH)<sub>2</sub>+ 20 г/л Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>+20 г/л Na<sub>6</sub>P<sub>6</sub>O<sub>18</sub> + 20 г/л діатоміт (д).

Слід зауважити, що додавання діатоміту стабілізує процес синтезу: напруга практично не змінюється, що очевидно пов'язано з більшим вмістом силікатів в розчині, які підвищують провідність електроліту. Зростання електропровідності технологічного електроліту приводить до зменшення напруги синтезу та зсуває точки А (момент пробою оксидної плівки) вправо та змінює кут. З проведених досліджень встановлено, що зменшення густини струмів призводить до зменшення напруги синтезу.

Відомо три основних методи для визначення пористості покриттів, які характеризуються закритою пористістю, це гідростатичного зважування, ртутної порометрії і металографії.



Рис. 2. Гідростатичне зважування



Рис. 3. Зважування пікнометра з рідиною та зразком

В даній роботі пористість покриттів досліджували для титанових сплавів, які синтезовані в наступних електролітах: складу 0,5 г/л КОН+0,5 г/л р.с.+0,5 г/л Ca(OH)<sub>2</sub>+0,5 г/л Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>+0,5 г/л

$\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$  (електроліт 1), 20 г/л  $\text{KOH}+20$  г/л р.с.+1 г/л  $\text{Ca}(\text{OH})_2+20$  г/л  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7+20$  г/л  $\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}+20$  г/л діатоміт (електроліт 2) та 3 г/л  $\text{KOH}+2$  г/л р.с.+3 г/л  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (електроліт 3) методом гідростатичного зважування (рис. 2). Густина покриття визначали пікнометричним методом (рис. 3).

Значення істинної густини визначали за формулою:

$$\rho = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1 - m_4 + m_3} \rho_p, \quad (1)$$

де  $m_1$  – маса сухого пікнометра,  $m_2$  – маса пікнометра з рідиною,  $m_3$  – маса сухого пікнометра із зразком,  $m_4$  – маса пікнометра з рідиною та зразком,  $\rho_p$  – густина рідини якою заповнюється пікнометр.

Істинна густина для покриття, яке синтезоване в електроліті 1, визначена за формулою (1) становила  $1,875$  г/см<sup>3</sup>, для покриття в електроліті 2 становить  $1,979$  г/см<sup>3</sup>, а для покриття, синтезованого в електроліті 3 дорівнює  $1,947$  г/см<sup>3</sup>.

Пористість синтезованих покриттів досліджували методом гідростатичного зважування. Для цього знаходили середню густина за формулою:

$$\rho_0 = \frac{m}{\frac{m_1 - m_2}{\rho_e} - \frac{m_1 - m}{\rho_n}}, \quad (2)$$

де  $m_1$  – маса зразка покритого парафіном,  $m_2$  – маса зразка покритого парафіном та зваженого у воді,  $m$  – маса зразка зваженого на повітрі,  $\rho_e$  – густина води,  $\rho_n$  – густина парафіну на поверхні зразка.

Отже, в результаті проведених досліджень було виявлено, що середня густина покриття, синтезованого в електроліті 1 становить  $\rho_0=1,939$  г/м<sup>3</sup>. Покриття, синтезоване в електроліті з додаванням діатоміту (електроліт 2) характеризується дещо вищою густиною, а саме  $2,087$  г/м<sup>3</sup>. Середня густина  $\rho_0$  для покриття, синтезованого в найменш легovanому електроліті складає  $2,027$  г/м<sup>3</sup>.

Пористість оксидокерамічних покриттів визначали за формулою:

$$\Pi_e = \frac{V_{nop}}{V_0}, \quad (3)$$

, де  $V_{nop}$  – об'єм пор в матеріалі,  $V_0$  – об'єм матеріалу(зразка).

$$V_{nop} = V_0 - V_{II}, \quad (4)$$

, де:  $V_{II}$  – об'єм парафіну,  $V_0$  – об'єм матеріалу (зразка).

$$V_0 = \frac{m_1 - m_2}{\rho_e} - \frac{m_1 - m}{\rho_{II}}, \quad (5)$$

, де  $m$  – маса зразка на повітрі,  $m_1$  – маса зразка, покритого парафіном,  $m_2$  – маса зразка з парафіном, зваженого у воді,  $\rho_e$  – густина води,  $\rho_{II}$  – густина парафіну на поверхні зразка.

Отже, підставивши отримані результати виявили, що  $\Pi_e$  для покриття, синтезованого в електроліті 1 становить  $0,75\%$ , в електроліті 2 –  $0,67\%$ , а в електроліті 3 –  $0,68\%$ .

Метою проведених досліджень було дослідити вплив режимів синтезу на водопоглинання синтезованого покриття. Відомо, що об'ємне водопоглинання розраховується за формулою:

$$W_0 = \frac{W_m \times \rho_0}{\rho_e}, \quad (6)$$

де  $W_m$  – водопоглинання за масою,  $\rho_e$  – густина води,  $\rho_0$  – середня густина матеріалу.

Водопоглинання зразка за масою визначається за формулою:

$$W_m = \frac{m_e - m_c}{m_c} \times 100 \%,$$

де  $m_e$  – маса водонасиченого зразка,  $m_c$  – маса сухого зразка.

Згідно проведених експериментальних досліджень та розрахунків  $W_m$  для покриттів, синтезованих за різного складу електроліту мають наступні значення:  $W_m = 0,33\%$  для покриття, синтезованого в електроліті 1;  $W_m = 0,58\%$  для покриття, синтезованого в електроліті 2 і  $W_m = 0,3\%$  для покриття, синтезованого в електроліті 3.

Підставивши отримані значення водопоглинання за масою в формулу (6) визначимо об'ємне водопоглинання. Отже,  $W_0 = 0,64\%$  для покриття, синтезованого в електроліті 1,  $W_0 = 1,21$



% для покриття, синтезованого в електроліті 2 і  $W_0 = 0,61\%$  для покриття, синтезованого в електроліті 3.

На рис. 4 представлені гістограми показників істинної густини, середньої густини, пористості та об'ємного водопоглинання для досліджуваних зразків.

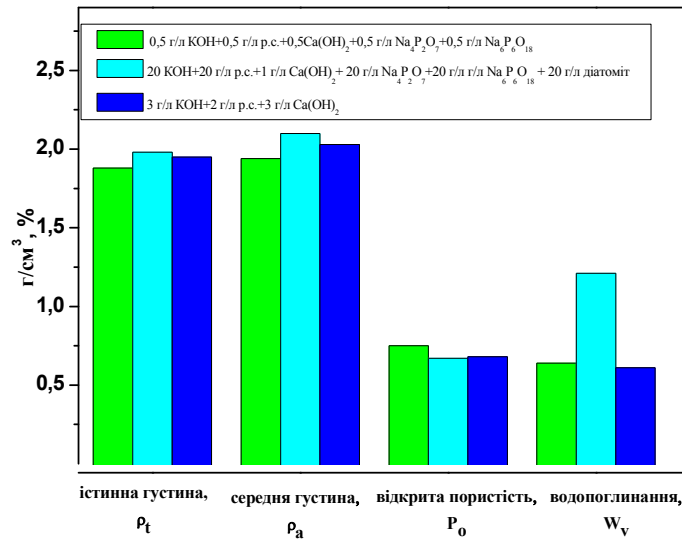


Рис. 4. Результати істинної густини, середньої густини, пористості та водопоглинання

Покриття, синтезовані в електролітах різного складу відрізняються вже за зовнішніми ознаками (рис. 5). Їх поверхня характеризується досить високою шорсткістю. Це пояснюється особливостями процесу ПЕО, який характеризується постійним утворенням пробійних каналів та зниканням їх протягом всього часу синтезу. За більш тривалої обробки поверхнева пористість значно зростає.

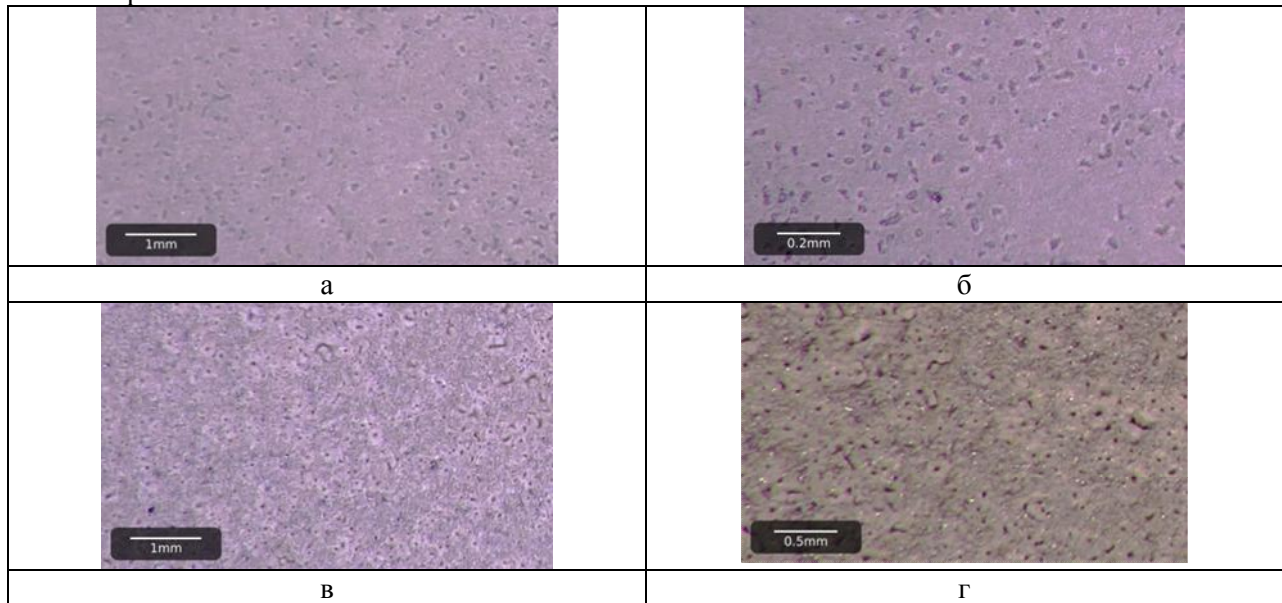


Рис. 5. Поверхня ОКП, синтезованого в електроліті:

5 г/л KOH+5 г/л p.c.+5 г/л Ca(OH)<sub>2</sub>+5 г/л Na<sub>6</sub>P<sub>6</sub>O<sub>18</sub>+5 г/л Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (а)

5 г/л KOH+5 г/л p.c.+5 г/л Ca(OH)<sub>2</sub>+5 г/л Na<sub>6</sub>P<sub>6</sub>O<sub>18</sub>+5 г/л Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>+1 г/л НРА (б)

20 г/л KOH+20 г/л p.c.+20 г/л Na<sub>6</sub>P<sub>6</sub>O<sub>18</sub>+20 г/л Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (в)

20 г/л KOH+20 г/л p.c.+20 г/л Na<sub>6</sub>P<sub>6</sub>O<sub>18</sub>+20 г/л Na<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>+20 г/л діатоміт (г)

Так покриття, які синтезовані в електроліті без додавання гідроксиапатиту характеризуються утворенням на поверхні більшого більш крупніших але меншої кількості кратерів. Покриття, які синтезувались в електроліті, до якого було додано гідроксиапатит утворились з більшою кількістю кратерів, проте розмір їх відкриття є дещо меншим.

Дослідження морфології поверхні та її шорсткості дали можливість встановити, покриття синтезовані в електроліті з діатомітом (електроліт 20 г/л KOH+20 г/л p.c.+20 г/л Na<sub>6</sub>P<sub>6</sub>O<sub>18</sub>+20 г/л

$\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 + 20$  г/л діатоміту) мають більшу шорсткість поверхні (від 40 до 239 мкм), тоді покриття, які синтезувались в електроліті складу 20 г/л КОН+20 г/л р.с.+20 г/л  $\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$ +20 г/л  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$  мають шорсткість в межах 28...100 мкм.

**Висновки.** Експериментально встановлено, що введення в електроліт діатоміту призводить до стабілізації процесу синтезу. Підвищення концентрації компонентів електроліту призводить до підвищення напруги, за якої відбувається ПЕО. Так, підвищення концентрації компонентів електроліту вдвічі понижує напругу синтезу приблизно на 10 В.

Виявлено, що найвище значення відкритої пористості 0,75 % характерно для покриттів, синтезованих в електроліті 0,5 г/л КОН+0,5 г/л р.с.+0,5Ca(OH)<sub>2</sub>+0,5 г/л  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ +0,5 г/л  $\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{18}$ , а найбільше водопоглинання властиве покриттям, які утворились в електроліті з діатомітом.

Досліджено, що покриття, які синтезовані в електроліті без додавання гідроксиапатиту характеризуються утворенням на поверхні більш крупніших але меншої кількості кратерів. Покриття, які синтезувались в електроліті, до якого було додано гідроксилапатит утворились з більшою кількістю кратерів, проте розмір їх відкриття є дещо меншим.

#### Список використаних джерел.

1. Wouter Habraken, Pamela Habibovic, Matthias Eppl, Marc Bohner. Calcium phosphates in biomedical applications: materials for the future? *Materials today*, Vol. 19 (2) P (2016). 69-87. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136970211500317X?via%3Dihub>
2. Carayon M.T., Lacout J.L. Study of the Ca/P atomic ratio of the amorphous phase in plasma-sprayed hydroxyapatite coatings. *J. Solid State Chem.* 2003; 172:339–50.
3. Mann S. *Biom mineralization. Principles and concepts in bioinorganic materials chemistry.* Oxford Univ. Oxford, UK: Press; 2001. 198 pp.
4. P. Fratzl, R. Weinkamer, *Prog. Mater. Sci.* 52 (8) (2007) 1263–1334.
5. H.A. Lowenstam, S. Weiner, *On Biom mineralization*, Oxford University Press, 1989.
6. Hugo R Fernandes, Anuraag Gaddam, Avito Rebelo, Daniela Brazete, George E Stan, José M F Ferreira. *Bioactive Glasses and Glass-Ceramics for Healthcare Applications in Bone Regeneration and Tissue Engineering. Materials* 2018, 11(12), 2530; <https://doi.org/10.3390/ma11122530>
7. Xiaopeng Lu, Carsten Blawert, Mikhail L. Zheludkevich, Karl Ulrich Kainer. Insights into plasma electrolytic oxidation treatment with particle addition. *Corrosion Science.* Vol 101, (2015), P. 201-207.
8. Стан електролітної плазми в процесі синтезу оксидокерамічних покриттів на магнієвій основі [Електронний ресурс] / В. М. Посувайло, Н. Ю. Імбірович, М. Д. Клапків, С. І. Остап'юк, Ю. М. Коваль // Наукові нотатки. - 2013. - Вип. 42. - С. 208-215. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn\\_2013\\_42\\_35](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2013_42_35)
9. S. L. Aktuğ, S. Durdu, I. Kutbay, M. Usta "Effect of  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  concentration on microstructure and mechanical properties of plasma electrolytic oxide coatings on AZ31 Mg alloy produced by twin roll casting", *Ceramics International*, Vol. 42, pp. 1246–1253 (2016).
10. Birampally Kalyani, Navaneetha Pujari, Avula Edukondalu, M. Srinivasa Reddy, C.P. Vardhani. Effect of  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  on AC conductivity and dielectric properties of alkali arsenate bro-bismuthate glasses. *Materials Letters.* Vol. 317, (2022), P. 132128. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132128>
11. F.Z Cui, Z.S Luo. Biomaterials modification by ion-beam processing. *Surface and Coatings Technology.* Vol. 112 (1-3), (1999), P. 278-285. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)00763-4](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00763-4)
12. D. Batory, A. Jedrzejczak, W. Kaczorowski, L. Kolodziejczyk, B. Burnat. The effect of Si incorporation on the corrosion resistance of a-C:H:SiO<sub>x</sub> coatings. *Diamond and Related Materials.* Vol. 67 (2016), P. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2015.12.002>
13. A.S. Gnedenkov, S.L. Sinebryukhov, V.S. Filonina, S.V. Gnedenkov. Hydroxyapatite-containing PEO-coating design for biodegradable Mg-0.8Ca alloy: Formation and corrosion behaviour. *Journal of Magnesium and Alloys*, (2022) <https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.12.002>
14. D.V. Mashtalyar, K.V. Nadaraia, N.G. Plekhova, I.M. Imshinetskiy, M.A. Piatkova, A.I. Pleshkova, S.E. Kislova, S.L. Sinebryukhov, S.V. Gnedenkov. Antibacterial Ca/P-coatings formed on Mg alloy using plasma electrolytic oxidation and antibiotic impregnation. *Materials Letters.* Vol. 317 (2022), P. 132099 <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.132099>
15. Klapktiv M.D., Povstyana N.Yu., Nykyforchyn H.M. Production of conversion oxide-ceramic coatings on zirconium and titanium alloys // *Materials Sciencethis link is disabled*, 2006, 42(2), pp. 277–286.

А.М. Степанчук, С.Ю.Тесля, Сунь Ціхао, Д. Є.Чижська

Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

### ЗАКОНОМІРНОСТІ ОТРИМАННЯ ПОРОШКІВ СПЛАВУ AL-15Fe З ДИСПЕРСНО ЗМІЦНЕНОЮ СТРУКТУРОЮ МЕТОДОМ МЕХАНІЧНОГО ДИСПЕРГУВАННЯ РОЗПЛАВУ

*Проведені теоретичні дослідження умов отримання порошків сплаву Al-15Fe методом механічного диспергування. Показано, що зі зміною розміру частинок, швидкості енергоносія, температури розплаву суттєво змінюється швидкість охолодження. Встановлено, що отримання оптимальної мікроструктури сплаву Al-15Fe з дисперсно-зміцненою структурою можливо за швидкості охолодження більше  $10^7$  °C/c, яка досягається для частинок середнім розміром менше 100 мкм, швидкості енергоносія близько 200 м/с та температури енергоносія вище 1250 °C. Встановлено, що для частинок отриманим механічним диспергуванням із середнім розміром вище 100 мкм інтерметалеві фази мають розмір 10-12 мкм, а менших - 3-5 мкм, що відповідає вимгам до дисперснозміцненим матеріалам.*

*Ключові слова:* дисперсне зміцнення, інтерметаліди, механічне диспергування розплаву, порошки сплавів алюмінію, порошкова металургія

A.N. Stepanchuk, S.Y. Teslia, Qihao Sun, D. Ye. Chyzhska

### THE PROCESS OF OBTAINING AL-15Fe POWDER WITH DISPERSION STRENGTHENED MICROSTRUCTURE BY CENTRIFUGAL ATOMIZATION

*Theoretical studies of the conditions for obtaining powders of the Al-15Fe alloy by the method of mechanical dispersion have been carried out. It is shown that with a change in the particle size, energy carrier velocity, and melt temperature, the cooling rate changes significantly. It has been established that obtaining the optimal microstructure of the Al-15Fe alloy with a dispersion-reinforced structure is possible at a cooling rate of more than  $10^7$  °C/s, which is achieved for an average size of less than 50 μm, an energy carrier velocity of about 200 m/s, and an energy carrier temperature above 1250 °C. It has been established that for particles obtained by mechanical dispersion with an average size above 100 μm, the intermetallic phases have a size of 10-12 μm, and for particles less than 50 μm - 3-5 μm, which is subjected to extrusion to dispersion-strengthened materials.*

*Keywords:* dispersion strengthening, intermetallic compounds, mechanical dispersion of the melt, powders of aluminum alloys, powder metallurgy

**Постановка проблеми.** Одним з напрямків сучасного матеріалознавства є розробка матеріалів з широким комплексом властивостей, для одночасного використання в ряді галузей промисловості. До найперспективніших методів отримання таких матеріалів відноситься порошкова металургія. Застосування сучасних методів порошкових технологій дозволяють створювати матеріали конструкційного, триботехнічного, спеціального призначень [1]. З точки зору створення матеріалів багатофункціонального призначення особливу увагу слід приділити сплавам алюмінію [2, 3], особливо сплавам алюмінію легованого Si, Mn, Mg, Cu, Ti, Fe тощо. Як відомо [4, 5] в таких сплавах алюміній з легувальними елементами утворює інтерметаліди, які за певних умов структуроутворення під час кристалізації сприяють підвищенню механічних і, як наслідок, експлуатаційних характеристик виробів з них. Особливо цей ефект збільшується коли інтерметалева фаза знаходиться у дисперсному стані. З економічної точки зору та фізичних, механічних і експлуатаційних властивостей виробів з них перспективними є сплави алюмінію леговані залізом [5-6]. На відміну від традиційних ливарних сплавів алюмінію вказаних вище, легування залізом дозволяє зберігати стабільність зміцнюючих фаз за підвищених температур експлуатації у зв'язку з його відносно малою розчинністю в алюмінії [7, 8]. Дані параметри особливо важливі під час використання даних матеріалів як триботехнічних.

Однак отримання сплавів Al-Fe методами лиття досить ускладнено, оскільки під час кристалізації інтерметаліди  $Al_xFe_y$ , що утворюються в даній системі згідно діаграми Al-Fe [8] є твердими але крихкими [5] і знаходяться у вигляді крупних кристалів. Останнє може значно знижувати міцність таких сплавів [9].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Отримання виробів зі сплавів Al-Fe з підвищеними характеристиками міцності і, як наслідок, експлуатаційними характеристиками можливо шляхом використання технології порошкової металургії з використанням вихідних порошків з структурою в якій би фазова складова з інтерметалідів з находилась би у дисперсному стані (менше 5 мкм), що забезпечує дисперсне зміцнення матеріалу [7, 9], за умови спадкування такої структури під час спікання пресовок з таких порошків.

Одним з варіантів отримання таких порошків, є механічне легування або розмелювання литих сплавів [3, 7]. Основним недоліком цих методів є високі енергоємність та мала продуктивність. Альтернативним варіантом отримання порошків сплавів Al-Fe може бути отримання їх диспергуванням розплаву сплаву. У цьому випадку відповідно до робіт [7, 8, 10, 11] під час отримання порошків відбувається формування їх мікроструктури з дисперсними включеннями фаз інтерметалідів з розміром меншим за 5 мкм. При цьому такі структури утворюються за швидкостей охолодження продуктів диспергування більшими за  $1 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$ . Але в цих роботах, та інших літературних даних, обмежено висвітлюється фізико-хімічна сутність впливу теплофізичних факторів на формування властивостей порошків і тому числі їх заданої структури. Останнє обмежує можливості визначення умов отримання порошків з наперед заданими властивостями.

**Постановка проблеми дослідження.** Виходячи з викладеного, теоретичне та експериментальне з вивчення умов отримання порошків з сплавів Al-Fe з заданими властивостями та структурою для отримання матеріалів і порошкових виробів з них багатофункціонального призначення є актуальним завданням.

**Мета дослідження.** Метою роботи було теоретичне та експериментальне дослідження впливу теплофізичних характеристик розплавів та технологічних параметрів механічного диспергування розплаву Al-15Fe з метою встановлення оптимальних умов отримання порошків із заданими мікроструктурою та властивостями.

**Викладення основного матеріалу.** В роботі вивчався вплив діаметру вихідних крапель: 100, 150, 200,  $250 \times 10^{-6}$  м, швидкості енергоносія 75, 100, 150, 200 м/с та температури розплаву 1200, 1250, 1300, 1350  $^\circ\text{C}$ .

Механічне диспергування розплаву Al-15Fe здійснювалось відповідно до методики описаної в роботах [12] на установці Полет. Як вихідні матеріали для отримання порошків використовували скрап електротехнічного алюмінію з вмістом алюмінію не менше 99,9 %, та скрап заліза з вмістом домішок не більше 0,15 %. Вихідні компоненти плавилась в індукційній печі за 1300  $^\circ\text{C}$ , з ізотермічною витримкою 30 хв з метою гомогенізації розплаву. Підготований розплав через металопріймач подається в камеру розпилення, де за рахунок ударної дії лопатей (полет) відбувається руйнування струменю розплаву на окремі краплини розплаву з яких формуються частинки порошку. Швидкість обертання лопатей повинна забезпечувати необхідну початкову швидкість краплинам. В зону розпилення подається струмінь води для охолодження лопатей та продуктів диспергування. За рахунок наявності води утворюється парогазова суміш в середовищі якої охолоджуються продукти диспергування. Початкова швидкість частинок в першому наближенні прийнято за лінійну швидкість обертання лопатей.

Дослідження впливу параметрів розпилювання, теплофізичних характеристик розплаву на швидкість охолодження продуктів диспергування і відповідно на формування структури порошків здійснювали відповідно до теоретичних уявлень щодо отримання порошків розпиленням [11]. Вихідні тепло-фізичні параметри для сплаву Al-15Fe та середовища розпилення наведено в таблицях 1 - 2.

Швидкістю охолодження продуктів диспергування розплаву відповідно до роботи [13] розраховували за формулою:

$$V_{\text{ох}} = \frac{dT}{dt} = \frac{6}{\gamma_p c_p d} \alpha_k (t_{\text{п}} - t_c),$$

де  $\gamma_p$  – густина розплаву;  $c_p$  – теплоємність розплаву;  $d$  – приведений діаметр каплі розплаву;  $\alpha_k$  – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією;  $t_p$  – початкова температура розплаву;  $t_c$  – температура середовища.

Табл. 1

## Фізичні властивості розплавів Al, Fe, Al-15Fe

Матеріал	Густина розплаву, кг/м <sup>3</sup>	Теплоємність розплаву, Дж/(кг×К)	Динамічна в'язкість розплаву, мПа×с	Поверхневий натяг, Н/м	Теплота кристалізації, Дж/кг
Al	2400	1176,7	1,3	0,75	390000
Fe	6800	640	0,3	1,65	247000
Al-15 мас. % Fe (адит.)	2650	1045,22	0,8	0,81	358837

Таблиця 2

## Характеристика середовища розпилення

Густина води, кг/м <sup>3</sup>	Теплота пароутворення ккал/кг	Теплоємність, Дж/(кг×К)	Теплопровідність	Кінетична в'язкість, м <sup>2</sup> /с	Поверхневий натяг, Н/м
993	530	4200	0,531	$8,9 \times 10^{-4}$	$7 \times 10^{-4}$

Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією у випадку охолодження продуктів диспергування в присутності паро-газової суміші описується формулою Кутателадзе [14]:

$$\alpha_{\text{кон}} = \xi P^{0,4} q_n^{0,7},$$

де  $\xi$  – коефіцієнт характеру кипіння води (приймають 2,6);  $P$  – тиск газового середовища, атм;  $q_n$  – теплове навантаження.

Прямого вимірювання тиску який створює енергоносії в роботі не визначалось через високу складність даних вимірювань, запропоновано використовувати формулу переходу від швидкості до тиску газу відповідно до формули [15]:

$$P = 0,5 \times \rho V^2$$

де  $\rho$  – густина газу парогазової суміші (993, кг/м<sup>3</sup>);  $V$  – швидкість газу (у нашому випадку відносна швидкість – лінійна швидкість Полети), м/с.

Теплове навантаження яке виникає у випадку охолодження частинок порошоків в парогазовій суміші [14]:

$$q_n = 10^3 K \beta_v \sqrt{\sigma_v \gamma_n^2 (\gamma_v - \gamma_n)}$$

де  $K$  – коефіцієнт для випадку пари = 0,16;  $\beta_v$  – теплота пароутворення;  $\sigma_v$  – поверхневий натяг води;  $\gamma_n$  – густина пару;  $\gamma_m$  – густина розплаву.

Результати теоретичного аналізу наведено на рисунку 1 – 2.

Відповідно до отриманих даних швидкість охолодження збільшується зі збільшенням швидкості частинок та зменшенням середнього розміру крапель. Дані залежності узгоджуються з відомими моделями та теоріями тепло-масообміну та критеріальними рівняннями процесів диспергування розплаву газами і рідинами [10–12]. Також відмічається ріст швидкості охолодження зі збільшенням початкової температури розплаву. Відповідно отримання дисперсних фаз інтерметалідів можливе за високих швидкостей охолодження, які досягаються для порошоків розміром менше 50 мкм, швидкості енергоносія більше 200 м/с та температури розплаву на рівні 1300 °С. Для експериментальної перевірки висновків зроблених унаслідок теоретичних розрахунків в роботі були отримані порошки за викладеною вище методикою за умов, які б забезпечували швидкість охолодження продуктів диспергування розплаву більшу за  $1 \times 10^5$  °С/с. Температура вихідного розплаву складала 2250 °С, швидкість обертання лопатей 2800 об/хв., діаметр струменя розплаву складав 8 мм, що забезпечувало його диспергування на краплини з середнім розміром біля 150 мкм.



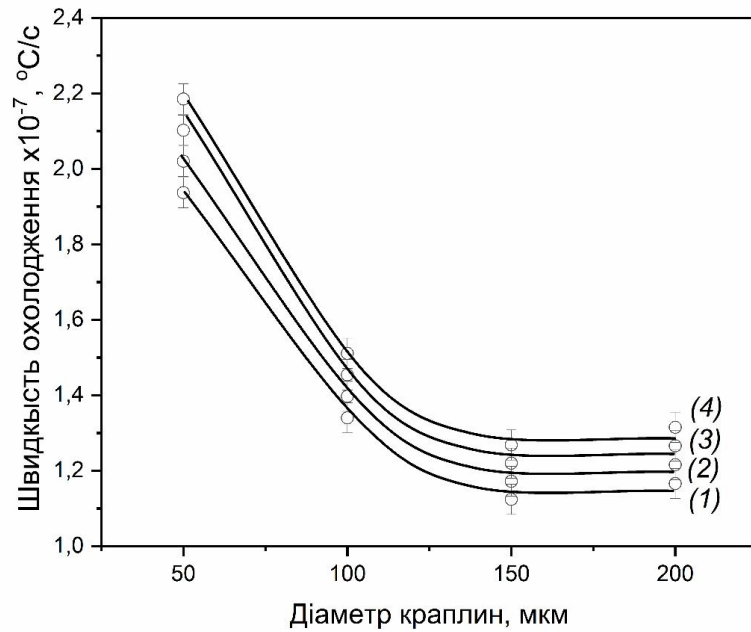


Рис. 1. Зміна швидкості охолодження крапель в залежності від їх розміру за температури розплаву :1 – 1200  $^{\circ}\text{C}$ ; 2– 1250  $^{\circ}\text{C}$ ; 3 – 1300  $^{\circ}\text{C}$ ; 4 – 1350  $^{\circ}\text{C}$

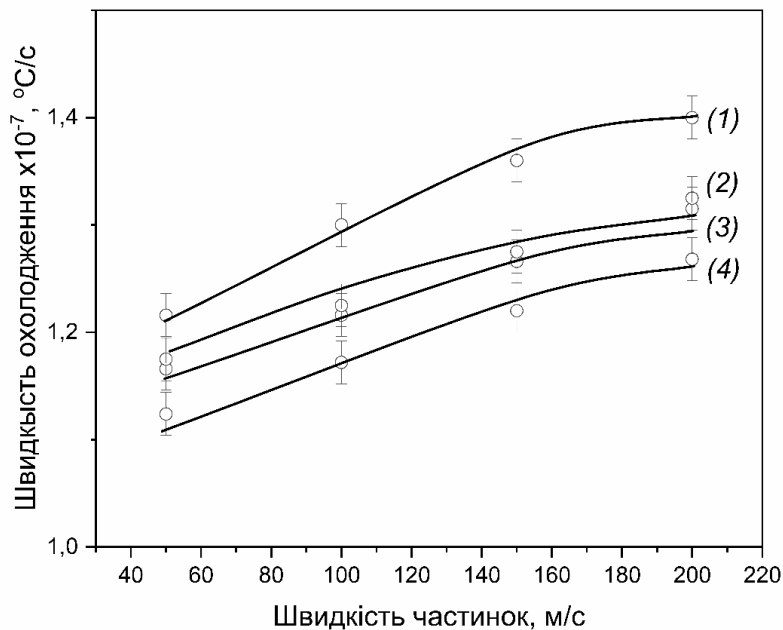
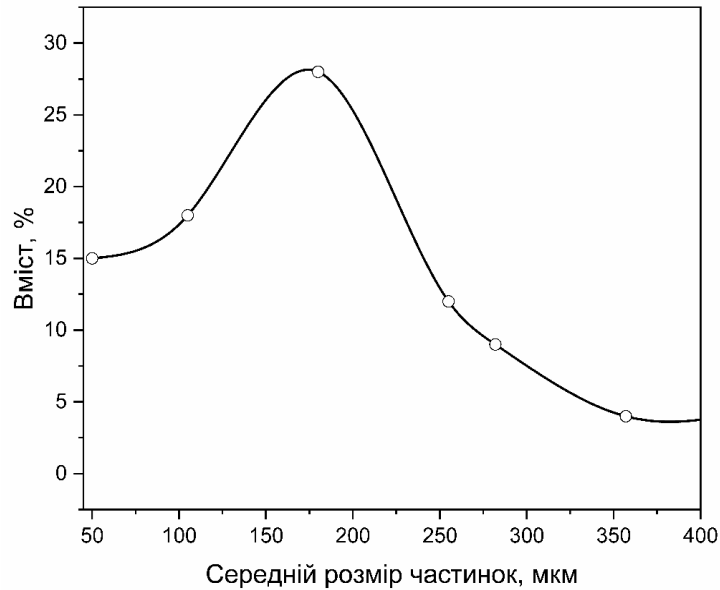


Рис. 2. Залежність швидкості охолодження від швидкості та розміру крапель: 1 – 50  $\mu\text{m}$ ; – 100  $\mu\text{m}$ ; 3 – 150  $\mu\text{m}$ ; 4 – 200  $\mu\text{m}$

Проводилось дослідження властивостей отриманих порошків. Вивчався їх гранулометричний склад, топографія, структура та фазовий склад, мікротвердість. Результати вивчення гранулометричного складу отриманого порошку наведено на рисунку 3. Середній розмір частинок порошків складає близько 150  $\mu\text{m}$ , що повністю відповідає вимогам щодо технологічних параметрів порошків для виготовлення деталей триботехнічного та конструкційного призначення.



**Рис. 3. Гранулометричний склад порошку Al-15Fe отриманого механічним диспергуванням розплаву**

Мікроструктура порошку (рис. 4) гетерофазна та складається зі світлої фази інтерметалідів  $Al_{13}Fe_4$  та  $Al_6Fe$ , та матричної фази на основі твердого розчину  $\alpha-Al$ , що корелює з даними локального хімічного аналізу (рис. 4 з, табл. 3). В залежності від розміру частинок, відповідно до запропонованої модельної гіпотези в умовах реального експерименту зберігається кореляція між розміром частинок та розміром структурних складових. Зі зменшення розміру частинок розмір інтерметалідної фази зменшується від 10-15 мкм для частинок порошків з розміром більше 250 мкм до 1-3 мкм для частинок порошків розміром менше 100 мкм. Останнє узгоджується з уявленнями про вплив швидкості охолодження на формування структури матеріалів. Як показали наші розрахунки зі зменшенням розміру частинок швидкість їх охолодження збільшується (рис. 1) і, як наслідок, відбувається формування більш дрібнозернистої структури.

Швидкість охолодження також впливає на фазовий склад матеріалу порошків за рахунок зміни механізмів, які лежать в основі процесу їх кристалізації фаз з розплаву. За швидкостей охолодження які перевищують  $10^5$  °C/c відбувається зміщення концентраційного поля на діаграмі стану, та утворюються проміжних метастабільних фаз інтерметалідів. Даний ефект виникає за рахунок підвищення розчинності атомів заліза в матриці алюмінію від 0,068 мас. % до 1 мас. % під час швидкого охолодження [6]. На фронті кристалізації інтерметалідних зерен виникає дефіцит атомів заліза, що відповідно призводить до утворення проміжних метастабільних сполук. Наявність в структурі метастабільного інтерметаліду  $Al_6Fe$  з точки зору механічних властивостей є бажаним та необхідним, оскільки за рахунок низької крихкості можливо отримати вищі показники зміцнення на відміну від матеріалу, який вміщує переважно фазу  $Al_{13}Fe_4$  ( $Al_{13}Fe_4$ ) [10].

У нашому випадку (рис. 5) спостерігається утворення як стабільної так і метастабільної фази, що узгоджується з мікроструктурними дослідженнями. Отримані модельні розрахунки швидкості охолодження, вказують на закономірне формування фази  $Al_6Fe$  в об'ємі порошків.

В роботі також була досліджена інтегральна мікротвердість отриманих порошків залежно від їх розміру. Як видно з таблиці 4 зі зменшенням розміру частинок їх мікротвердість збільшується. Останнє може бути зумовлене зменшенням у цьому випадку розміру частинок інтерметалевої фази в структурі порошку і, тим самим, більшим проявом ефекту дисперсного зміцнення матеріалу.

**Висновки.** Проведені модельні дослідження показали, що отримання дрібнодисперсної фази інтерметалідів в структурі матеріалу порошку отриманого диспергуванням розплаву можливе під час швидкості охолодження продуктів диспергування більше  $10^7$  °C/c. Останнє можливе за початкової швидкості частинок розплаву більше 200 м/с та початковій температурі розплаву на рівні 1300 °C.



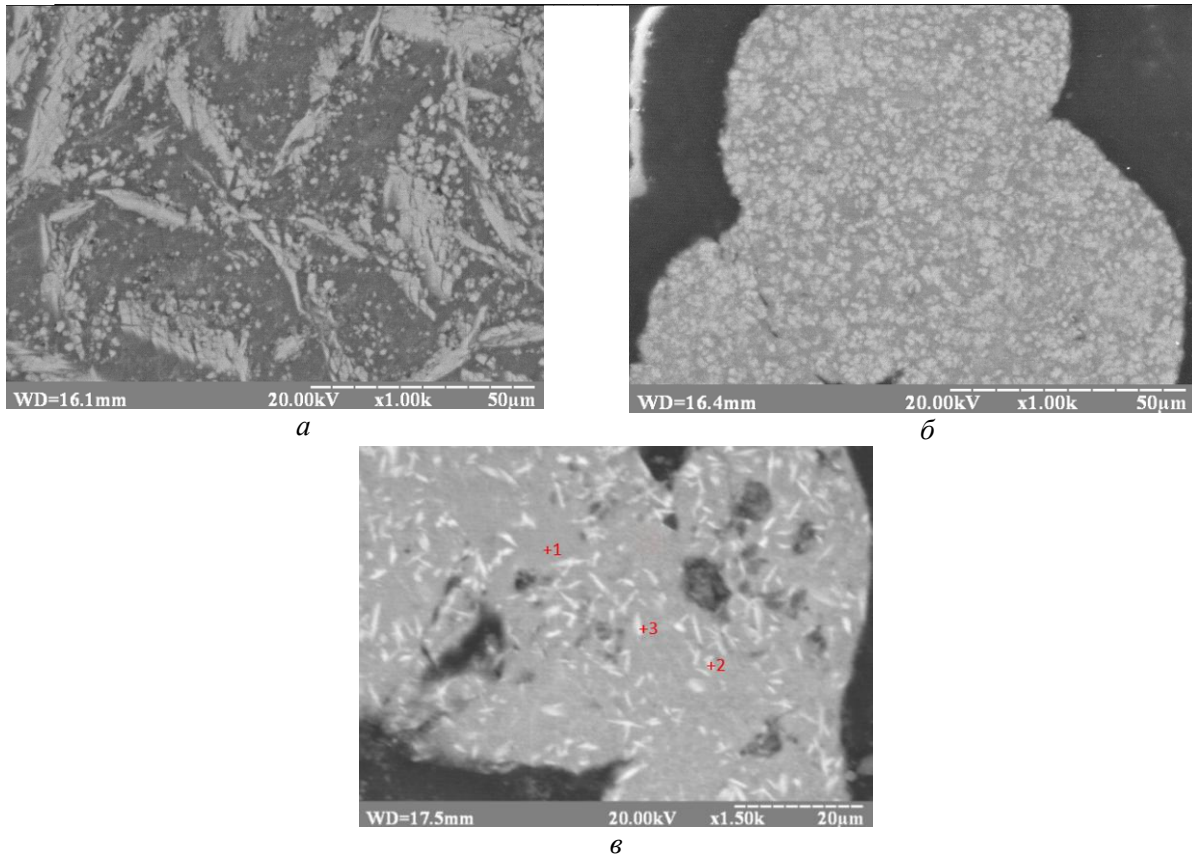


Рис. 4. Мікроструктура порошків сплаву Al-15Fe для різного розміру частинок: (а) 250 мкм; (б) 100 мкм та локальний хімічний аналіз порошку (в)

Таблиця 3

Локальний хімічний аналіз порошків Al-15Fe

Точка	Хімічний склад, мас. %		
	Al	Fe	O
1	97,8	1	1,2
2	74,59	25,21	0,2
3	65,01	34	0,99

Таблиця 4

Результати вимірювання мікротвердості за навантаження  $P=0,098$  Н

Розмір частинок, мкм	189	168	147	139
Мікротвердість, МПа	667	686	774	902

За рахунок зміни технологічних параметрів отримання можливо змінювати фазовий склад та мікроструктуру сплавів, що створює потенційний інженерний інтерес щодо створення матеріалів багатofункціонального призначення.

Встановлено, що під час механічного диспергування розплаву Al-15 мас. % Fe утворюється дрібнодисперсна структура з вмістом дисперсних фаз інтерметалідів  $Al_{13}Fe_4$  та  $Al_6Fe$ . За рахунок високої швидкості охолодження має місце утворення в структурі порошків метастабільної фази  $Al_6Fe$ , яка є додатковим дисперсно зміцнюючим компонентом сплаву.

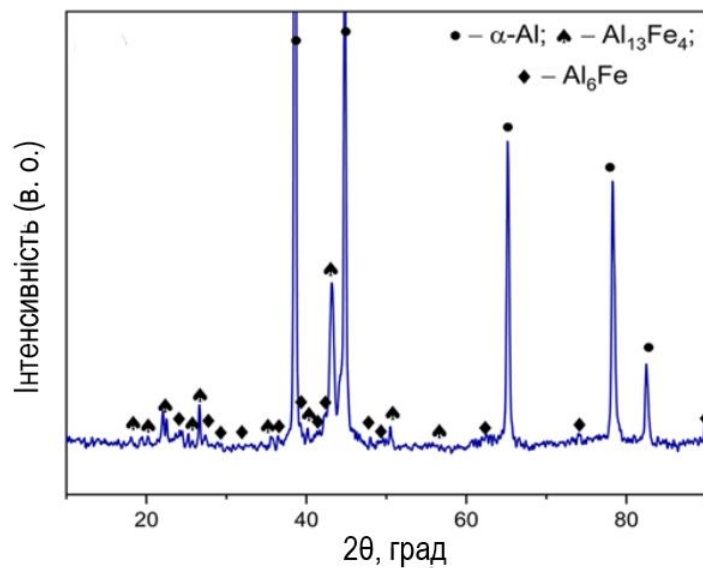


Рис. 5. Дифрактограма порошку сплаву Al-15Fe отриманого механічним диспергуванням розплаву

Розміри інтерметалевих фаз залежить від розміру частинок, та зменшуються зі зменшенням їх розміру від 7-9 мкм до 1-3 мкм. У подальшому доцільним є проведення досліджень по компактуванню отриманих порошків з метою визначення умов, які забезпечують спадковість структури порошків в отриманих виробках.

#### Література

1. Степанчук А.Н. Технология порошковой металлургии / А.Н. Степанчук, И.И. Билык, П.А. Бойко // К. : "Вища школа", 1989. – 415 с.
2. Roik, T., Gavrish, O., Oliynik, V., & Vitsiuk, I. (2018). Analysis of the properties of antifriction composites based on aluminum alloy's grinding waste. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(12 (94)), 16–22. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140984>
3. Вплив температури спікання на формування структури та властивостей порошкового алюмініду заліза Fe<sub>3</sub>Al / О. І.Толочин, О. О.Толочина, Г. А. Баглюк [та ін.] // Порошкова металургія. – 2020. – Вип. 03/04. – с. 42-54.
4. Whang S. H. High Temperature Aluminides and Intermetallics / S. H. Whang, D. P. Pope, C. T. Liu // Proceedings of the Second International ASM Conference on High Temperature Aluminides and Intermetallics, September 16-19, 1991, San Diego, CA, USA. – 746 p.
5. Хэтч Дж. Е. Алюминий: свойства и физическое металловедение / Е. Дж. Хэтч. – М. : Металлургия, 1989. - 425 с.
6. Nayak, S. K., Murty, B., & Pabi, S. K. (2008). Structure of nanocomposites of Al-Fe alloys prepared by mechanical alloying and rapid solidification processing. *Bulletin of Materials Science*, 31(3), 449–454. <https://doi.org/10.1007/s12034-008-0070-9>
7. Teslia, S., & Stepanchuk, A. (2022). Microstructural evolution of Al–15Fe alloy produced by mechanical milling and centrifugal atomization. *Intermetallics*, 149, 107671. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2022.107671>
8. Henein, H., Buchoud, V., Schmidt, R.-R., Watt, C., Malakov, D., Gandin, C.-A., ... Uhlenwinkel, V. (2010). Droplet Solidification of Impulse Atomized Al-0.61Fe and Al-1.9Fe. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 49(3), 275–292. doi:10.1179/cmqr.2010.49.3.275

9. Effect of minor lanthanum on the microstructures, tensile and electrical properties of Al Fe alloys / Jiang, Hongxiang, Li, Shixin, Zheng, Qiuju [et. al] // Materials & design. – 2020. – Vol. 195. – 108991 p.
10. Ничипоренко О. С. Распыленные металлические порошки /О. С. Ничипоренко, Ю. И. Найда, А. Б. Медведовский. – Киев: Наук.думка, 980. –238 с.
11. Степанчук А.М. Теоретичні та технологічні основи отримання порошків металів, сплавів та тугоплавких сполук: Підручник /А.М. Степанчук. – Київ: НТУУ"КПІ", 2006. – С. 226–316
12. Найда Ю. И. Изучение условий охлаждения распыленных металлических порошков и расчет габаритов распылительной камеры.//Найда Ю.И., Медведовский А.Б., Диук Л.М., Митров Э.Г. – Порошковая металлургия, 1974, № 7, с. 6-10
13. Forming mechanism of equilibrium and non-equilibrium metallurgical phases in dissimilar aluminum/steel (Al-Fe) joints / Shun Li Shang, Hui Sun , Bo Pan [et.al] // Scientifics reports. – 2021. – Vol. 11. – 15 p.
14. Кутателадзе С. С. Теплопередача при конденсации и кипении. – М. : Госэнергоиздат,, 1960. – 287 с.
15. Bairstow L. The Measurement of Fluid Velocity and Pressure / L.Bairstow // Nature. – 1925. – Vol. 15. – 152 p.

**Рецензент:** Мініцький Анатолій В'ячеславович, д. т. н., проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського, НН ІМЗ ім. Є. О. Патона, каф. ВТМ та ПМ

Мініцький А.В., Поліщук К.В., Юркова О.І., Мініцька Н.В., Наконечний С.О.

Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського»

## ВПЛИВ СПОСОБУ ВВЕДЕННЯ НІКЕЛЕВОЇ ЗВ'ЯЗКИ НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ВОЛЬФРАМУ

*Досліджено методи введення нікелю до порошкових сплавів на основі вольфраму. Застосовано два способи механічного легування та хімічного осадження нікелю із лужного розчину. Вивчено вплив параметрів процесу осадження нікелю із лужного на основі хлористого нікелю на процес нанесення покриття. Встановлено, що плакування частинок порошку вольфраму хімічним осадженням приводить до зміни їх технологічних властивостей та забезпечує рівномірне нанесення нікелю на поверхні частинок. Досліджено вплив плакування на ущільненість порошку вольфраму. Встановлено, що в умовах статичного пресування, порошок з покриттям нікелю виявляє більшу схильність до формування та ущільнення за низьких тисків, що обумовлено зміною форми та морфології частинок. Покриття нікелю згладжує рельєф поверхні частинок вольфраму, через що зменшується площа міжчастинкових контактів, що покращує структурну деформацію на першому етапі пресування. Високотемпературне спікання пресовок у вакуумі приводить до зменшення пористості в межах 8–11 %, що пов'язано із процесами рідкофазного спікання. Встановлено відмінність структур сплаву, залежно від способу введення нікелю, при введенні нікелю у вигляді порошку із утворенням механічної суміші, спостерігається сегрегація компонентів суміші через значну відмінність густин вольфраму та нікелю, що призводить до нерівномірного розподілу легуючої добавки по об'єму матеріалу і, відповідно, до структурної неоднорідності. Введення легуючої добавки нікелю хімічним методом, долає недоліки нерівномірного розподілу компонентів за об'ємом матеріалу, що визначає однорідність структури після рідкофазного спікання. Результати досліджень можуть бути корисними при розробці важких сплавів для військової та машинобудівної галузі.*

*Ключові слова:* порошок вольфраму, нікель, плакування, хімічне осадження, ущільнення, пористість, спікання.

Minitzkiy A.V., Polyshchuk K.V., G., Yurkova O. I., Minitska N.V. Nakonechniy S.O.

## INFLUENCE OF THE METHOD OF NICKEL BONDING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF TUNGSTEN-BASED ALLOYS

*The methods of introducing nickel into tungsten-based powder alloys have been investigated. Two methods of mechanical alloying and chemical deposition of nickel from an alkaline solution have been used. The influence of the parameters of the process of deposition of nickel from alkaline nickel chloride on the coating process was studied. It was found that the cladding of tungsten powder particles by chemical deposition leads to a change in their technological properties and ensures uniform application of nickel on the surface of the particles. The effect of cladding on the density of tungsten powder was studied. It has been found that under static pressing conditions, nickel-coated powder shows a greater tendency to form and compact at low pressures, which is due to changes in the shape and morphology of the particles. Nickel plating smoothes the surface topography of tungsten particles, which reduces the area of inter-particle contacts and improves structural deformation during the first stage of pressing. High-temperature sintering of the molds in a vacuum leads to a decrease in porosity within 8-11 %, which is associated with liquid-phase sintering processes. The difference in the alloy structures, depending on the method of nickel introduction, has been established; when nickel is introduced in the form of a powder to form a mechanical mixture, segregation of the mixture components is observed due to a significant difference in the densities of tungsten and nickel, which leads to an uneven distribution of the alloying additive over the volume of the material and, accordingly, to structural heterogeneity. The introduction of a nickel alloying additive by chemical means overcomes the disadvantages of uneven distribution of components over the volume of the material, which determines the homogeneity of the structure of post-liquid sintering. The research results can be useful in the development of heavy alloys for the military and machine-building industries.*

*Keywords:* tungsten powder, nickel, cladding, chemical deposition, densification, porosity, sintering.

**Постановка проблеми.** Застосування вольфрамових важких сплавів обумовлено їх високою питомою вагою, доброю оброблюваністю та рядом вигідних фізичних властивостей [1]. Висока питома вага дозволяє застосовувати ці сплави у виробництві махових коліс, при виготовленні противаг, роторів гіроскопів, регуляторів центрифуг і контактів для високовольтних вимикачів [2, 3]. Характеристики вольфрамових сплавів робить їх перспективними для виробництва виробів військового призначення [4, 5]. Вироби із важких сплавів виготовляють з дуже дрібних металевих порошків високої чистоти - як правило, вольфраму, нікелю та заліза [6]. Проте, слід зазначити, що використання вихідних компонентів у вигляді порошків високої чистоти обумовлює суттєве зростання вартості процесу отримання порошкових виробів (майже на 30-40 %), що обмежує широке впровадження таких технологій. Іншим недоліком є проблема рівномірного розподілу легуючих елементів, які відрізняються за густиною в два рази і більше, що вимагає додаткових енергетичних витрат на проведення довготривалих процесів змішування та додаткового введення

пластифікаторів і мастил, що не завжди є припустимим з точки зору чистоти сумішей [7]. Одним із способів введення легуючих добавок є плакування порошку основи шляхом нанесення покриття. Нанесення покриття нікелю на порошок вольфраму проводили методом відновлення хлориду нікелю в процесі хімічного осадження із водного розчину, що забезпечує формування суцільного шару покриття на частинках порошку вольфраму, незалежно від форми та розмірів частинок. Перевагами методу хімічного осадження є можливість застосування в якості вихідних компонентів солей металів, що суттєво знижує вартість отримання порошкових виробів порівняно із використанням механічних сумішей порошків відповідних металів. До іншої переваги методу хімічного осадження, є застосування не дорогого устаткування, що також робить такий процес економічно вигідним. Крім економічних переваг, слід зазначити технологічні переваги методу, який дозволяє в широких межах регулювати товщину покриття та забезпечувати заданий хімічний склад.

**Постановка мети та задач.** Метою роботи є дослідження параметрів процесу хімічного осадження покриття нікелю на частинки порошку вольфраму та порівняння властивостей отриманих матеріалів з механічно легованими сумішами порошків.

**Викладення основного матеріалу.** В роботі використано два способи отримання дослідних зразків, що відрізнялися методом введення нікелю: механічне змішування чистих порошків вольфраму та нікелю та хімічне відновлення хлориду нікелю на поверхні частинок вольфраму. Для підготовки суміші порошків було проведено дослідження гранулометричного складу вихідних порошків вольфраму та нікелю. Розподіл частинок за фракційним складом показав, що основна фракція для обох порошків відповідає розміру 10–15 мкм (рис. 1), тому немає потреби проводити додатковий розмел даних порошків.

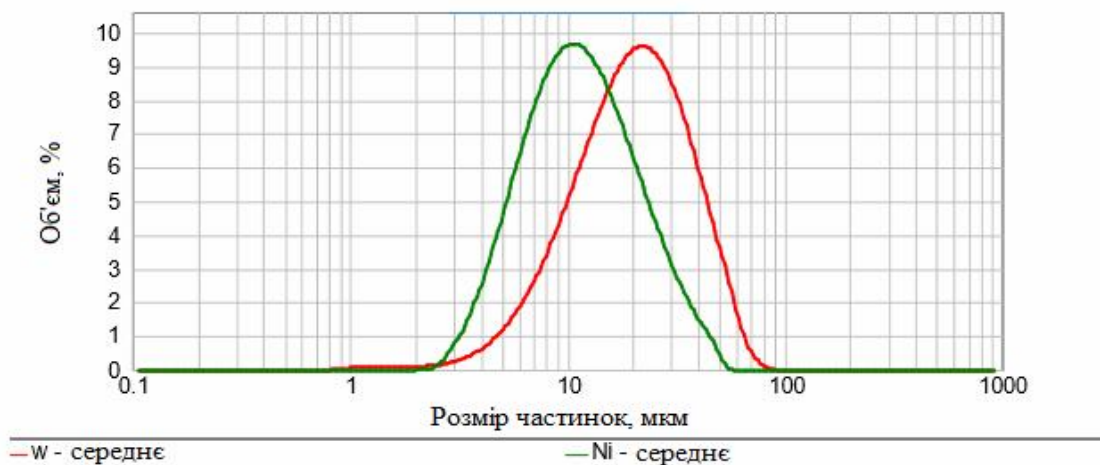


Рис. 1. Гранулометричний склад вихідних порошків вольфраму та нікелю

Нанесення нікелю на частинки порошок вольфраму проводили методом хімічного осадження, шляхом відновлення  $\text{NiCl}_2$  у водному розчині з додаванням комплексоутворювачів у вигляді солей. Принциповою перевагою методу хімічного осадження, є можливість рівномірного розподілу легуючого компоненту в порошок основи. Процес нанесення нікелевого покриття проводили у лужному розчині, що забезпечувалось додаванням 25 % розчину аміаку у робочий розчин, який складається з хлористого нікелю, лимоннокислого натрію, гіпофосфіт натрію та хлористий амоній. Порошок вольфраму розміром 10–12 мкм завантажували у ванну з розчином та рівномірно перемішували при температурі 80–85 °С протягом години. Таким чином було отримано композиційний порошок на основі вольфраму з шаром нікелю товщиною 3–5 мкм.

Як показали результати металографічних досліджень (рис. 2) всі частинки вольфраму покриті тонким шаром нікелю, що підтверджує спектральний хімічний аналіз композиційного порошку (рис. 3).

Враховуючи, що найбільш поширеним способом формування порошкових матеріалів є статичне пресування у закритих сталевих матрицях, визначали здатність до ущільнення порошків вольфраму з нікелем, та встановлювали закономірність процесу пресування (рис. 4). Слід зазначити, що висока твердість вольфраму значно ускладнює деформацію частинок порошку в умовах пресування. Для забезпечення формування вольфрамовий порошок пресують у вигляді штапиків в розбірних прес-формах за невисоких тисків 150–250 МПа, що забезпечує пористість



пресовок біля 50 %. Після цього такі пресовки піддають ротаційному куванню, в результаті чого досягається висока щільність заготовок. Іншим способом, що забезпечує повне ущільнення вольфрамового порошку є метод гарячого пресування у графітових матрицях або газостатах за температур 1500–1700 °С з витримкою до 4–5 годин. Також ефективним методом ущільнення порошків з високою твердістю є технологія гарячого динамічного пресування, що відбувається за температур 800–1640 °С [8].

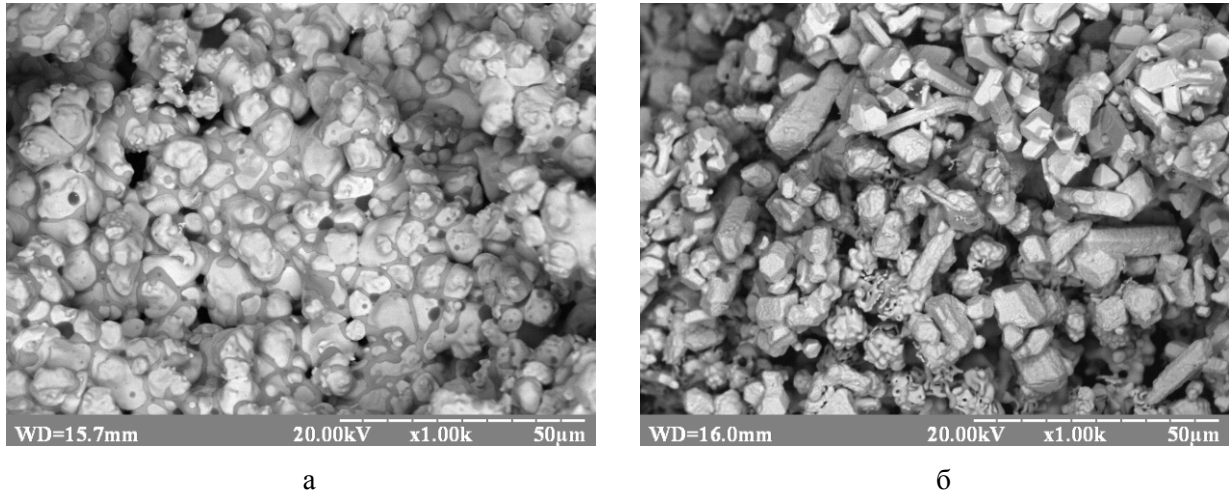
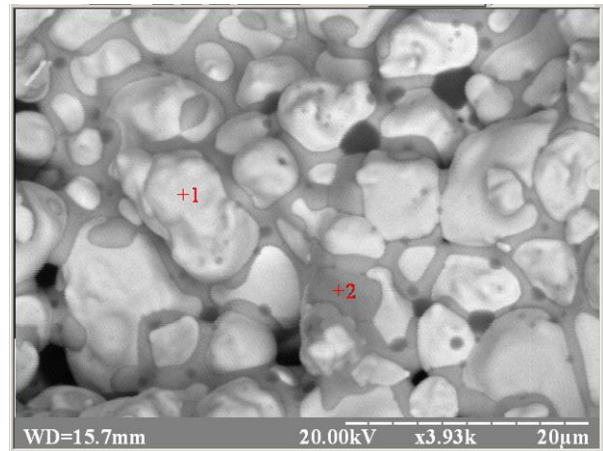


Рис. 2. Зовнішній вид порошків вольфраму плакованого нікелем (а) та механічної суміші порошків вольфрам – нікель (б)

№	W, %	Ni, %
1	99.84	0.16
2	38.38	61.62

Рис. 3. Спектральний хімічний аналіз матеріалу W–Ni



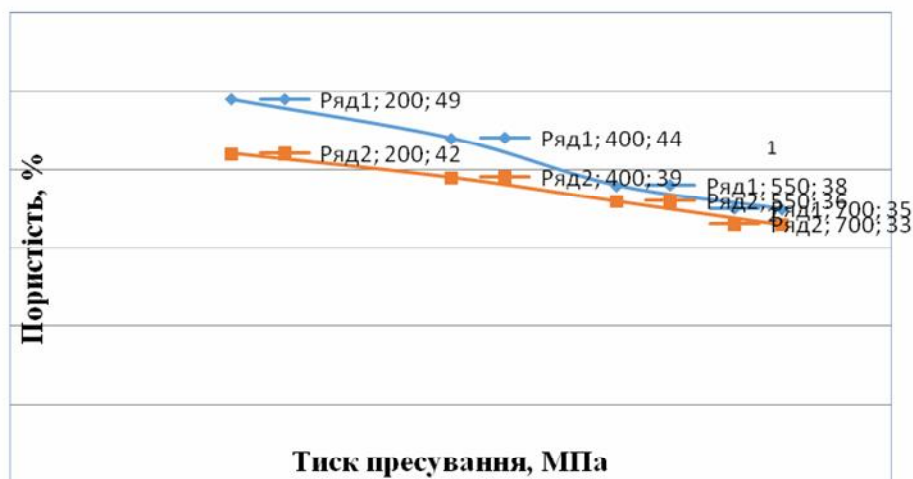
Однак недоліком таких технологій є необхідність застосування спеціального обладнання, що обмежує широке впровадження у виробничу практику. Іншим недоліком цих методів є застосування високих температур з високим часом ізотермічної витримки, що робить такі технології досить енергозатратними. Саме тому необхідно провести дослідження найбільш продуктивного методу формування – статичного пресування в широких діапазонах тисків від 200 до 700 МПа.

Результати досліджень процесу пресування показали, що максимального ущільнення пресовки набувають за тиску 550 МПа, що говорить про недоцільність подальшого збільшення тиску, оскільки пористість залишається практично незмінною в межах 32–38 % (рис. 4). Порівняння ущільнення порошків з різним способом введення нікелю показало, що порошки з покриттям мають меншу пористість при низьких тисках, що обумовлено меншою площею контактів частинок за рахунок покриття яке згладжує рельєф поверхні частинок вольфраму. Відповідно, на стадії структурної деформації за низьких тисків відбувається краще переукладання частинок за рахунок меншого міжчастинкового тертя плакованих порошків.

Наступне збільшення тиску приводить до процесів пластичної деформації частинок порошку, при цьому пористість практично вирівнюється і стає однаковою для обох видів порошків.

Процес вакуумного спікання пресовок приводить до зниження пористості до 8–12 % (табл. 1). Зменшення пористості обумовлено процесами рідкофазного спікання, при якому за температур 1250 – 1280 °С утворюється рідка фаза, в якій розчиняються дисперсні частинки вольфраму, що приводить до перекристалізації частинок вольфраму крізь рідку фазу та наступне припікання зерен.

Результати металографічних досліджень показали, що структура сплаву складається з зерен вольфраму сферичної форми між якими розташовуються прошарки твердого розчину вольфраму в нікелі (рис. 5).



1 – W–Niплак.; 2 – W–Ni мех.

Рис. 4. Залежність пористості пресовок від тиску пресування

Табл. 1.

**Значення пористості та об'ємної усадки спечених зразків W-Ni (5 %) за температури 1350 °С у вакуумі.**

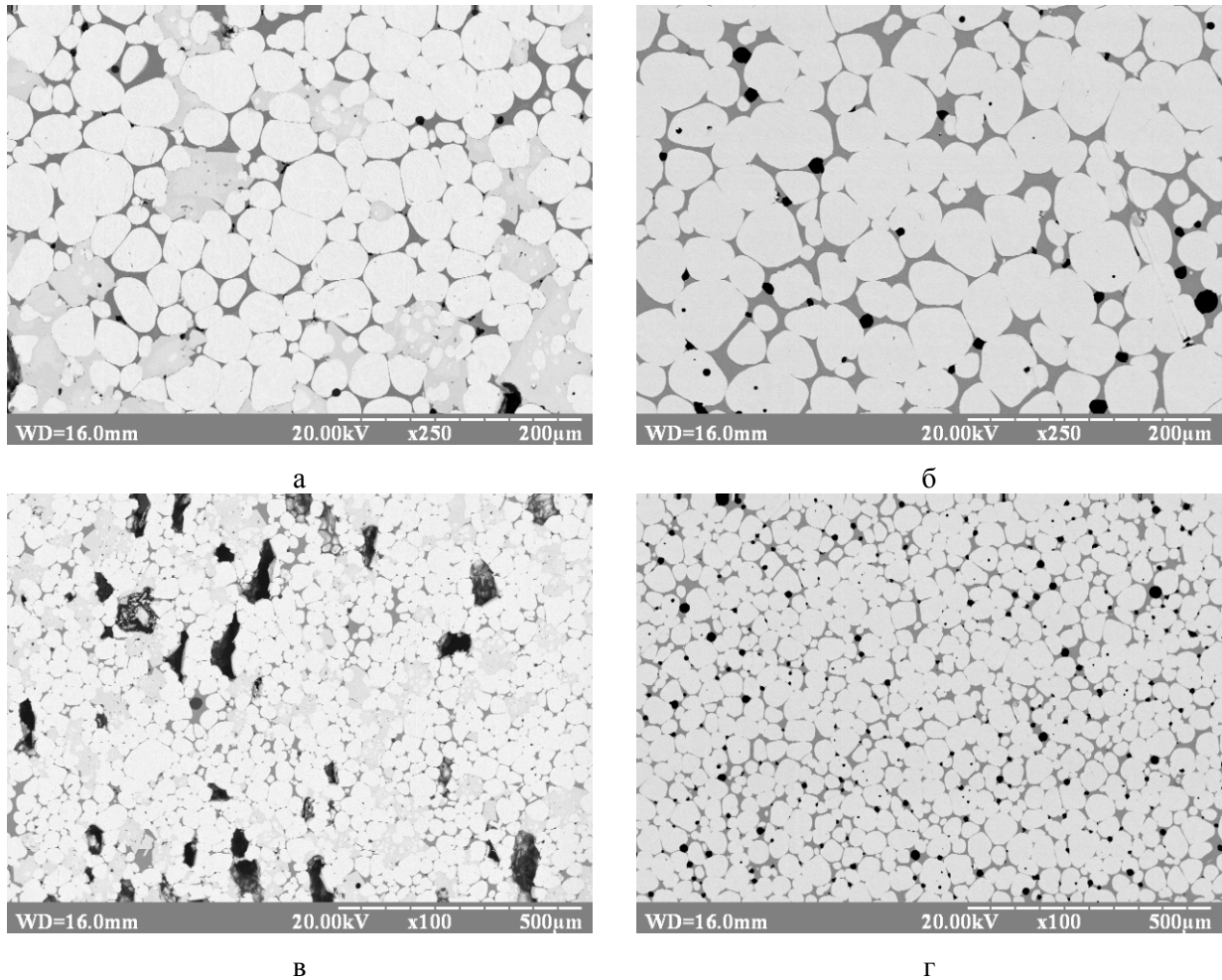
Склад матеріалу	Пористість, %	Об'ємна усадка, %
W-Ni мех. суміш	10–12	23–25
W-Ni плаков.	8–9	26–28

Процес формування структури даних сплавів відбувається в результаті дій двох механізмів: процесу перекристалізації і коалесценції груп зерен вольфраму за рахунок їх припікання. При цьому слід зазначити, що згідно з діаграмою стану системи вольфрам – нікель, евтектика утворюється при температурі 1450 °С. Однак, як видно з металографічних досліджень вже при температурі 1350 °С спостерігається утворення рідкої фази, що можливо пов'язано з ефектом контактного плавлення даної системи металів [4].

Слід зазначити, що спосіб введення нікелю впливає на формування структури матеріалу, що підтверджують результати металографічного аналізу (рис. 5). Додавання нікелю у вигляді порошку не забезпечує рівномірного розподілу нікелю по структурі матеріалу (рис. 5 а). Можна спостерігати локальні зони скупчення нікелю, що негативно впливає на розподілення залишкової пористості матеріалу (рис. 5 в). У випадку нанесення нікелю на частинки порошку вольфраму спостерігається рівномірний розподіл нікелю по структурі матеріалу, що визначає розмір та рівномірність розподілу залишкових пор при спіканні (рис. 5 г).

Дослідження механічних характеристик отриманих матеріалів, показало, що спосіб введення нікелю впливає на зміну властивостей порошкових матеріалів на основі вольфраму, що, в свою чергу, визначається їх відмінністю за структурою. Матеріали, що було отримано легуванням нікелю у вигляді порошку мають меншу твердість на декілька одиниць, а міцність при стисненні на 50–80 МПа порівняно із зразками, що було отримано шляхом нанесення нікелю хімічним осадженням (табл.2).





а, в – W-Nimex. суміш; б, г – W-Niплаков.  
Рис. 5. Структура спечених сплавів на основі вольфрам – нікель (5 %)

Табл. 2

Твердість та міцність на стиснення зразків W-Ni (5 %) спечених при 1350 °С у вакуумі, 1 година

Склад матеріалу	Твердість, HRC	Міцність на стиснення, МПа
W-Ni мех. суміш	17–20	840–860
W-Ni плаков.	25–27	910–930

Результати досліджень показали принципову відмінність структури та характеристик порошкових матеріалів на основі вольфраму залежно від способу введення нікелю. Встановлено, що хімічний метод дозволяє отримати більш гомогенну структуру, меншу пористість та вищі характеристики. Проведені дослідження можуть бути корисними при виробництві порошкових важких сплавів на основі вольфраму, для яких принциповими є рівномірна густина, мінімальна пористість та високі механічні характеристики

#### Висновки.

1. Досліджено вплив методу введення нікелю на характеристики порошків на основі вольфраму. Показано можливість рівномірного розподілу нікелю при хімічному осадженні на порошок вольфраму із водних розчинів.

2. Встановлено, що максимального ущільнення пресовки із порошку вольфраму набувають за тиску 550 МПа, подальше збільшення тиску не впливає на зміну пористості, яка залишається практично незмінною в межах 32–38 %. Нанесення шару покриття нікелю на частинки вольфраму впливає на процес ущільнення пресовок за малих тисків, що обумовлено зменшенням міжчастинкового тертя і площі контактів і кращим переукладанням плакованих частинок.

© А.В. Мініцький, К.В. Поліщук, О.І. Юркова, Н.В. Мініцька, С.О. Наконечний

3. Дослідження процесу спікання пресовок у вакуумі показало, що пористість знижується до 8–12 %, із об'ємною усадкою більше 25 %. Зменшення пористості обумовлено процесами рідкофазного спікання, при якому за температур 1250 – 1280 °С утворюється рідка фаза, в якій розчиняються дисперсні частинки вольфраму, що приводить до перекристалізації частинок вольфраму крізь рідку фазу та наступне припікання зерен. Встановлено, що нанесення нікелю на частинки порошку вольфраму забезпечує рівномірний розподіл нікелю по структурі матеріалу, що визначає розмір та рівномірність розподілу залишкових пор при спіканні.

4. Дослідження механічних характеристик порошкових матеріалів на основі вольфраму, показало, що спосіб введення нікелю визначає властивості таких матеріалів. Встановлено, що зразки, які було отримано легуванням нікелю у вигляді порошку мають меншу твердість на декілька одиниць, а міцність при стисненні на 50–80 МПа порівняно із зразками, що було отримано шляхом нанесення нікелю хімічним осадженням.

5. Показано можливість створення порошкових важких сплавів з рівномірним розподілом нікелю по структурі матеріалу, що забезпечує високу щільність та високі фізико-механічні властивості. Результати досліджень можуть бути використані при розробці нового класу порошкових матеріалів на основі вольфраму для військової та машинобудівної галузі.

#### Список використаних джерел:

1. Zhimin Zhong, Sidney J. Clouser. Nickel–tungsten alloy brush plating for engineering applications // *Surface and Coatings Technology*, Volume 240, 15 February 2014, Pages 380–386 <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2013.12.059>
2. E. Antolini and E. R. Gonzalez. Tungsten-based materials for fuel cell applications, *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 96, no. 3–4, pp. 245–266, 2010.
3. Rabin, B H, and German, R M. *Microstructure effects on tensile properties of tungsten-nickel-iron composites*. United States: N. p., 1988.
4. C. Sauer, A. Heine, K.E. Weber, W. Riedel Stability of tungsten projectiles penetrating adobe masonry – Combined experimental and numerical analysis // *International Journal of Impact Engineering*, Volume 109, November 2017, Pages 67–77 <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.06.001>
5. A. Heine, K.E. Weber, M. Wickert Penetration processes for tungsten-alloy projectiles of different shapes into adobe // *Proceedings of the 27th International Symposium on Ballistics*, Vol. 2, Freiburg, Germany (2013), pp. 1090–1097
6. X. Gong, J. L. Fan, F. Ding, M. Song, and B. Y. Huang. Effect of tungsten content on microstructure and quasi-static tensile fracture characteristics of rapidly hot-extruded W-Ni-Fe alloys, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 30, no. 1, pp. 71–77, 2012.
7. Скороход В.В. Порошковые материалы на основе тугоплавких соединений. К.: Техніка, 1982. – 167 с.
8. Толочин А.И., Лаптев А.В., Окунь И.Ю., Свич Я.И. Ударное уплотнение порошка вольфрама в широком диапазоне температур. II Механические свойства // *Металлофизика и новейшие технологии*, 2014. – т.36, №2. – с. 217–228

**В.О.Лукашук, І.С. Кондіус, Л.Ю. Федік**

*Луцький національний технічний університет*

### **АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕМПЕР-КАМЕРОЮ ПІД ЧАС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ТЕМНОГО ПЛИТКОВОГО ШОКОЛАДУ**

*У статті викладено актуальність контролю і оптимізації темпер-камери під час виробництва темного плиткового шоколаду. Зазначено значення її оптимізації для забезпечення якості продукту, стабільності процесу. Описано принцип роботи темпер-камери. Вказано параметри технологічного процесу темперування в темпер-камері. Розроблено функціональну схему автоматизації темпер-камери.*

*Ключові слова: шоколад, темперування, технологічний процес, температура, нагрів.*

**V.O. Lukashuk, I.S. Kondius, L.Y. Fedik**

### **AUTOMATED CONTROL SYSTEM OF THE TEMPERATURE CHAMBER DURING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF THE PRODUCTION OF DARK BAR CHOCOLATE**

*The article describes the relevance of tempering chamber control and optimization during the production of dark bar chocolate. The importance of its optimization to ensure product quality and process stability is indicated. The principle of operation of the temperature chamber is described. The parameters of the technological process of tempering in the tempering chamber are indicated. A functional scheme for automating the temperature chamber has been developed.*

*Key words: chocolate, tempering, technological process, temperature, heating.*

#### **Постановка проблеми.**

Харчова промисловість Волині відноситься до найбільш інвестиційно привабливих галузей народного господарства нашої країни та для прямих іноземних інвестицій. За цими показниками вона поступається тільки машинобудуванню, обробленню деревини та виробництву виробів із деревини, не враховуючи меблів. Розвиток харчової промисловості та створення її нових неперервних процесів зумовили необхідність автоматизації виробництв цієї галузі[1].

Виробництво шоколаду посідає в цій ніші значне місце. Оскільки протягом багатьох століть цей продукт є одним із найулюбленіших ласощів мільйонів людей. 73 % населення країни є споживачами даного продукту, а середньостатистичний українець споживає в рік приблизно 2,5 кг шоколаду. Його вважають смачними «ліками» від депресії і незамінним засобом від втоми. Навіть відзначають два дні в рік Всесвітні дні шоколаду (11 липня і 13 вересня). А отже попит на нього на вітчизняному ринку досить стабільний і високий [2].

Під час виробництва шоколаду велике значення має забезпечення якості продукту, стабільність процесу, економія ресурсів і дотримання нормативів і стандартів. У нашій країні обов'язкові європейські стандарти у сфері безпеки та якості продуктів харчування з какао та шоколаду почали діяти для всіх виробників із 1 січня 2018 року. Вони регламентуються основним національним стандартом України ДСТУ 3924:2014 «Шоколад. Загальні технічні вимоги». Після введення європейських норм у нашій країні національні стандарти якості стали добровільними для виконання. І виробник має право самостійно вирішувати, як вибудовувати технологічні процеси і визначати критерії якості продукту [3].

Тому актуальним є дослідження і вдосконалення технологічного процесу виробництва шоколаду що забезпечить дотримання зазначених показників його якості.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Дослідженнями процесу виробництва шоколаду займалися такі вчені як: Дорохович А.М. (2005 р.), Сухенко Ю.Г. (2005 р.), Полякова О.І. (2005 р.), Болгова Н.В. (2012 р.), Шматков Д.І. (2015 р.), Єрмілова Н.В. (2020 р.).

#### **Вирішення невирішених раніше частин**

Проте, невирішеним завданням під час виробництва темного плиткового шоколаду є модернізація системи керування темпер-камерою.

#### **Формулювання цілей статті**

© В.О. Лукашук, І.С. Кондіус, Л.Ю. Федік

Здійснити аналіз і розробку функціональної схеми автоматизації керування і контролю темпер-камери під час виробництва темного плиткового шоколаду. Це сприятиме поліпшенню точності вимірювання та регулюванню технологічних параметрів під час виробництва, збільшення надійності функціонування технологічного обладнання в цілому, завдяки дотриманню відхилень параметрів у допустимих межах.

### Виклад основного матеріалу

У процесі виробництва шоколаду можна виділити такі основні етапи: випалювання бобів (очищення і смаження для досягнення властивого для какао смаку і запаху), крекінг і віяння (рафінування, відокремлення від оболонки, дробіння), змішування (різних компонентів), перемелювання і вичавлювання (відповідно до утворення какао-пасти і какао-олії), конширування (видалення всієї залишкової вологи, усунення несумісних смаків, ароматів, грудочок, летючих кислот і надмірної гіркоти), темперування (охолодження маси для кристалізації какао олії та однорідного розподілу суміші).

Плитковий шоколад є одним із найпопулярніших видів шоколаду. Важливою запорукою цього є його упаковка, забезпечуюча захист, переміщення та доставку без втрат якості.

Зазвичай виробництво плиткового шоколаду здійснюється згідно технологічного процесу зображеного на рис. 1 [4].

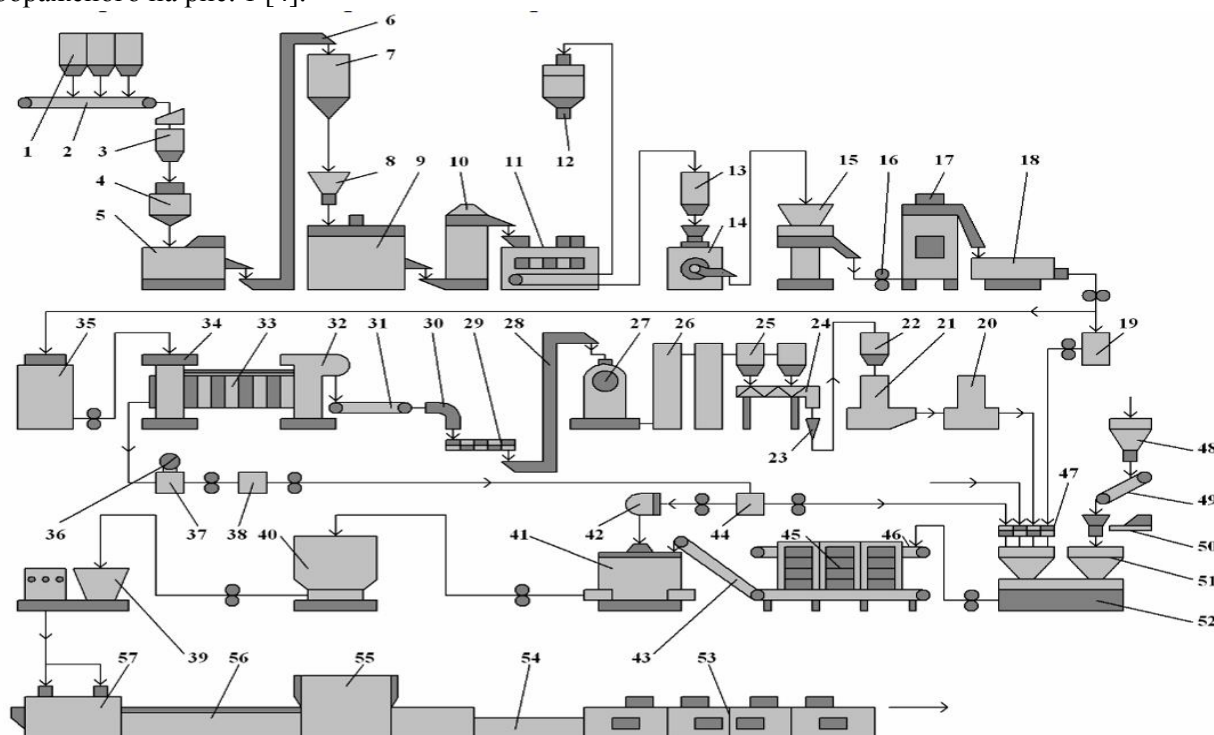


Рис. 1. Схема технологічного процесу виробництва плиткового шоколаду:

1 – бункер; 2 - конвеєр; 3 - автоматичні ваги; 4 - бункер-живильник; 5 - очищувально-сортувальна машина; 6 - елеватор; 7 - проміжний бункер; 8 - живильник; 9 - обжарювальний апарат; 10 - елеватор; 11 - подрібнюючо-очисно-сортувальна машина; 12 - циклон; 13 - бункер; 14 - ударно-шрифтовий млин; 15 - дисковий млин; 16 - помпа; 17 - кульовий млин; 18 - темпер-збірник; 19 – збірник (виготовлення шоколаду); 20 – поліетилен-машина; 21 - машина для фасування; 22 - збірник; 23 - класифікатор; 24 - шнек; 25 - циклон; 26 - теплообмінний апарат; 27 - шрифтовий млин; 28 - елеватор; 29 - шнек; 30 - макуходробарка; 31 - стрічковий конвеєр; 32 - гідравлічний прес; 33 - робочі камери; 34 - дозуюча ємність; 35 – збірник (отримання какаоолії, какаопорошку); 36 - ваги; 37 - ємність; 38 - фільтр; 39 - темпер-камера; 40 – бункер; 41 - ротаційна кош-машина; 42 - дозатор; 43 - конвеєр; 44 - збірник; 45 - п'ятивалкові млини; 46 - конвеєр; 47 - дозатори; 48 - бункер; 49 - конвеєр; 50 - дозатори; 51 - млин; 52 - рецептурно-змішувальна установка; 53 - загорткова машина; 54 - стрічковий живильник; 55 - охолоджувальний апарат; 56 - конвеєр з формами; 57 - відливна машина

Темперування є важливим процесом під час виробництва шоколаду, оскільки забезпечує потрібну кристалізацію жирів у шоколаді, що впливає на текстуру, вигляд і тривалість зберігання продукту.

Найпоширенішим методом темперування є повільне нагрівання та охолодження шоколаду до певних температур. Під час нагрівання відбувається рівномірний розподіл кристалів жирів у шоколаді, а під час охолодження - перетворення нестабільних кристалів жирів у стійкі, що надає блискучої текстури та довготривалої стійкості утвореному шоколаду.

Технологічний процес темперування шоколаду здійснюється в темпер-камері 39, рис. 1. Розглянемо принцип роботи темпер-камери, рис. 2. Шоколадна маса температурою 45–50 °С подається в конусоподібний бункер 4 з перемішуючим пристроєм 3 і водяною сорочкою 5. Завдяки перемішуванню здійснюється рівномірне охолодження і подача маси в отвір завантажувального корпусу машини, що представляє собою горизонтальний циліндр 6. Усередині циліндра обертається п'ятизахідний шнек 10 частотою 30 об/хв. Завдяки незначній висоті витків шнека (2-5 мм), маса переміщується тонким шаром і послідовно проходить зони секції камери (визначені зміною форми камери) в сорочки, де безперервно подається вода і шоколадна маса набуває потрібної температури.

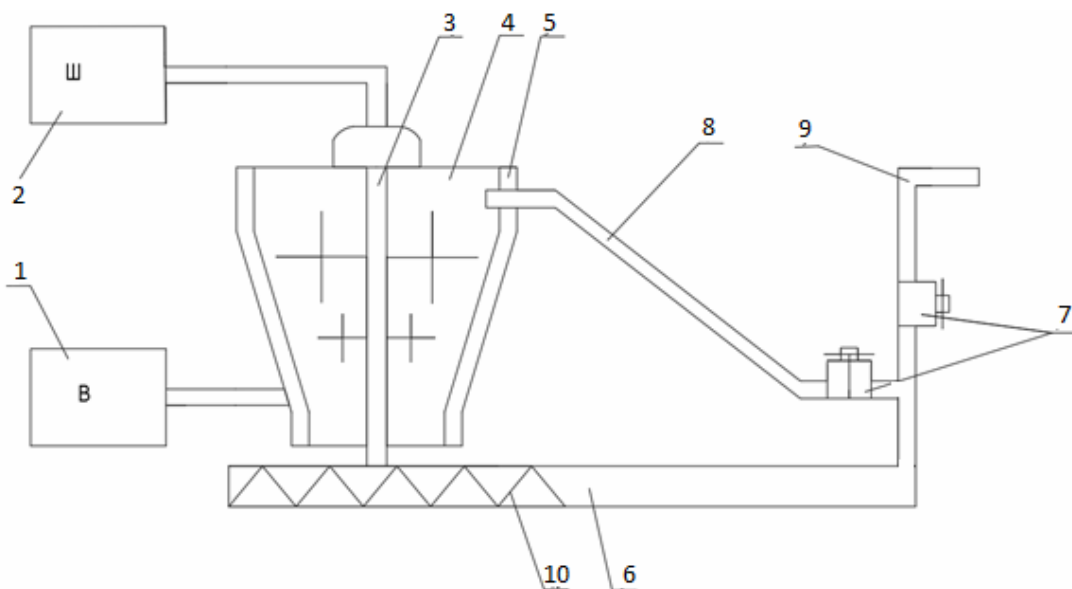


Рис. 2. Схема темпер-камери:

1 – ємність із водою; 2 – ємність із шоколадом; 3 – перемішуючий пристрій; 4 – конусоподібний бункер; 5 – водяна сорочка; 6 – горизонтальний циліндр; 7 – кран-помпа; 8 – похила труба; 9 – вивідна труба; 10 – п'ятизахідний шнек

Температура шоколадної маси під час виходу з першої та другої зон охолодження повинна мати певні параметри, табл. 1. Для підтримання цієї температури в сорочки третьої зони та вивідної труби 9, подають воду температурою 31-32°C від бачка з електропідігрівачем.

Процес темперування здійснюється безперервно, тому в разі необхідності припинення подачі шоколадної маси в камеру, закривають один з кранів 7, що розміщений на вертикальній трубі і відкривають другий кран розміщений на похилій трубі. У результаті цього сировина повертається до темпер-камери [4].

Для досягнення якісної продукції було визначено оптимальні параметри технологічного процесу, які подані в табл. 1.

З метою забезпечення якості шоколаду під час виробництва система керування темпер-камерою має являти собою комплекс технічних засобів і програмного забезпечення автоматизації цього процесу, що повинна складатися з таких елементів:

1. темпер-камери - пристрою для нагрівання та охолодження шоколаду. Який містить внутрішню ємність із шоколадом і зовнішньою оболонкою, що забезпечують рівномірне нагрівання та охолодження;

2. датчиків температури - пристроїв для контролю температури шоколаду, які встановлені в темпер-камері для передавання даних до системи керування;

Табл. 1.

**Параметри технологічного процесу темперування шоколадної маси**

№ з/п	Параметр	Одиниця вимірювання	Значення	Допустиме відхилення
1	Температура шоколадної маси на вході	°С	50-55	±1
2	Температура шоколадної маси на виході з першої зони охолодження	°С	33-34	±1
3	Температура шоколадної маси на виході з другої зони охолодження	°С	31-32	±1
4	Швидкість обертання шнека	об/хв	30	±0,5
5	Час темперування	хв	20-30	±1
6	Температура води	°С	31-32	±1
7	Тиск у трубах	кПа	39,24	±1

3. програмного забезпечення - програми, завдяки якій контролюється температура в темпер-камері та керується процес темперування;

4. комп'ютерного обладнання - пристроїв для обробки даних від датчиків температури. Вони використовуються для моніторингу та керування процесом.

Для визначення рівня автоматизації процесу темперування у камері розроблена функціональна схема її автоматизації, рис. 3.

Під час подання шоколадної маси у темпер-камеру температурою 45-50°С спрацьовує датчик рівня 1-1 і рівнемір безшкальний 1-2. Після заповнення темпер-камери до заданої межі перемикач 1-4 подає сигнал клапану 1-5, і подача сировини припиняється. Це триває, до тих пір поки рівень мас у конусоподібному бункері не стане меншим за заданий рівень. У цьому випадку показник рівня речовини в ємності 1-3 передає сигнал перемикачеві для відкривання клапана.

Після заповнення камери до певної межі, показник рівня речовини 1-3 подає сигнал електродвигуну та перемішувачу 1-7 і п'ятизахідний шнек 1-9 починають працювати. Завдяки процесу перемішування здійснюється рівномірне охолодження і подача маси в отвір завантажувального отвору машини у вигляді горизонтального циліндра.

Процес охолодження відбувається в бункері завдяки нижчій температурі його стінок порівняно з шоколадною масою. На стінці водяної сорочки бункера встановлений вимірювач температури 5-1, що з'єднаний з термометром 5-2, для передачі зчитаних даних приладу показникам вимірювання 5-3 встановленим на щиті.

Для підтримання однакової температури в водяній сорочці вода постійно змішується з водою резервуару через труби.

Автоматизована система керування темпер-камерою працює таким чином. У ємності з водою встановлені датчики вимірювача рівня 2-1 і вимірювача температури 3-1. Перший сповіщає прилад для вимірювання рівня із дистанційною передачею показання 2-2, який передає інформацію приладу показання рівня речовини в ємності 2-3, що розміщений на щиті. Якщо рівень води в ємності відповідає певній величині, то сигнал надходить на датчик 2-4, кран з помпою відкривається і охолоджувальна вода надходить у водяну сорочку темпер-камери.

Для контролю температуру води в ємності, застосований датчик вимірювання температури 3-1, що з'єднаний з приладом для вимірювання температури безшкальним із дистанційною



передачею показань 3-2. Він передає сигнали приладу для показання температури 3-3 і встановлений на щиті.

Для контролю температури шоколадних мас всередині конусоподібної камери передбачений вимірювач температури 4-1. На прилад для вимірювання температури 4-2 виводиться інформація з приладу для показників температури 4-3, що розміщений на щиті.

Сигнал про величину температури приладів передають датчики, встановлені після першої та другої зони охолодження шоколадної маси. Температуру води в сорочці третьої зони та сорочці вивідної труби показує третій термометр. Установчі стрілки трьох термометрів зблоковані з реле та електромагнітними клапанами, для автоматичного регулювання подачі води в сорочку відповідної зони темпер-камери.

Температура шоколадної маси під час виходу з першої зони охолодження повинна становити 33-34°C, а з другої - 31-32°C. З метою підтримання норми температури сировини в сорочки третьої зони та відповідну трубу, подається вода температурою 31-32°C.

А для отримання потрібної температури шоколадної маси сировина проходить через циліндр, п'ятизахідний шнек і відповідні зони темпер-камери, в сорочку яких безперервно подається вода певної температури.

Для потрапляння до другої зони темпер-камери передбачене проходження шоколадної маси через конвеєр. Що містить датчик вимірювання температури 8-1, передаючий сигнал про її величину до приладу встановленого за місцем 8-2, який дистанційно передає отриманий сигнал на щит 8-3. Сигнал надходить до датчика 8-6, якщо температура шоколаду відповідає певній величині, і відкривається кран-помпа 8-7. На цьому завершує процес темперування темного шоколаду в темпер-камері і шоколадна маса йде на наступний етап виготовлення шоколаду. Однак, якщо шоколадна маса не відповідає заданій температурі, то сигнал із 8-3 надходить на датчик 8-4. Завдяки якому активується кран-насос 8-5, що закриває кран і відкриває кран на похилій трубі, якою маса повертається у темпер-камеру.

Для контролю тиску у системі керування темпер-камерою в горизонтальному циліндрі і в похилій трубі передбачені датчики тиску 9-1, 10-1. Розробка даної схеми проведена згідно стандарту [5].

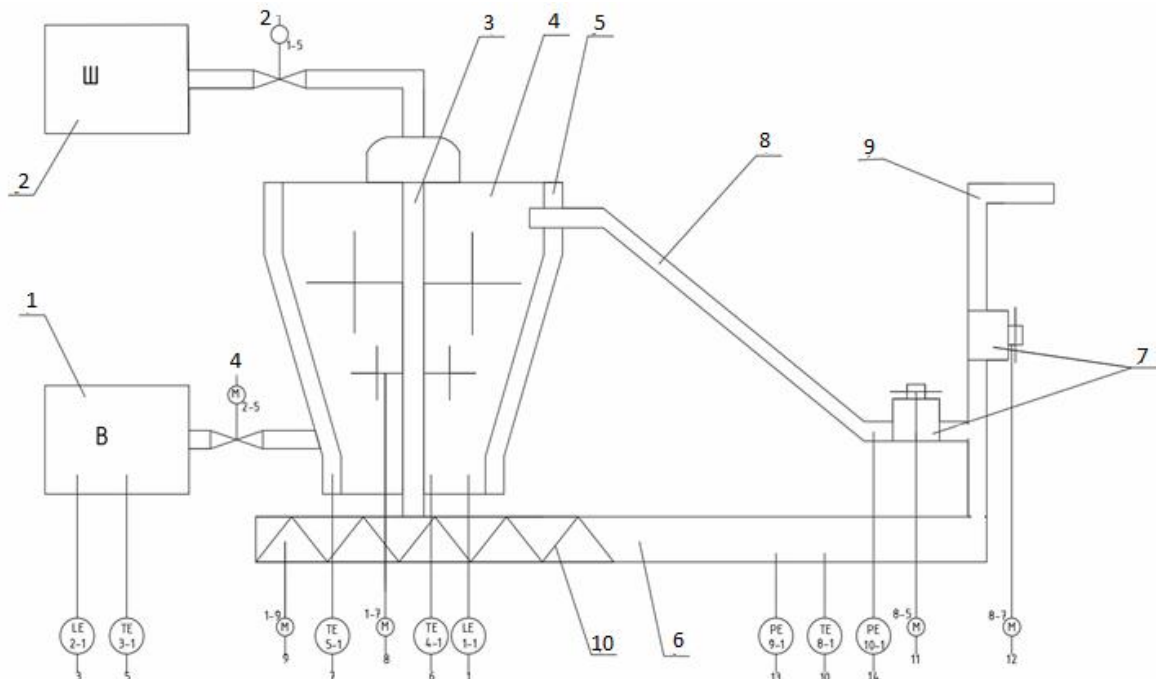


Рис. 3. Функціональна схема автоматизації темпер-камери



**Висновки**

Отже, темперування є важливим етапом під час виробництва темного плиткового шоколаду і ефективність і точність процесу може варіюватися залежно від методів виробництва. А питання автоматизації процесу темперування у темпер-камері є актуальним.

Під час дослідження визначено, що критичним для якості продукції є відхилення параметрів від заданих, що негативно позначиться на якості та зовнішньому вигляді шоколаду. Були підібрані технічні засоби автоматизації (датчики) що дозволять забезпечити дотримання регламенту технологічного процесу темперування темного шоколаду.

**Перспективи подальших досліджень**

Створення програмного забезпечення і підбір комп'ютерного обладнання для моніторингу та керування процесом автоматизованого керування процесом темперування в темпер-камері.

**Інформаційні джерела:**

1. Федік Л.Ю. Особливості організації виробництв харчової промисловості на сучасному етапі розвитку автоматизації // Global Challenges of contemporary issues: Collection of scientific articles. Lardy Publishing House, Paris, France, 2018. С. 64-67
2. Андреева С.М., Павлова М.Б. Стан ринку шоколаду в Україні. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/> (Дата звернення: 19.06.2023 р.)
3. Андреева С.М., Павлова М.Б. Стан ринку шоколаду в Україні. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/> (Дата звернення: 19.06.2023 р.)
4. Характеристика та аналіз технологічного процесу виробництва шоколаду. URL: [https://otherreferats.allbest.ru/cookery/00181918\\_0.html](https://otherreferats.allbest.ru/cookery/00181918_0.html) (Дата звернення: 10.03.2023);
5. ДСТУ Б А.2.4-16:2008. Система проектної документації для будівництва. Автоматизація технологічних процесів. Зображення умовні приладів і засобів автоматизації в схемах. [Чинний від 2010-01-01]. Вид. офіц. Київ. URL: <http://www.tsatu.edu.ua/ettp/wp-content/uploads/sites/25/11-dstu-b-a.2.4-16-2008.pdf> (Дата звернення: 12.03.2023).

**І.В. Красіков, І.Є. Красікова, В.В. Картузов**

*Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАНУ*

## **ВПЛИВ РОЗМИТТЯ ЗОБРАЖЕННЯ СТРУКТУРИ МАТЕРІАЛУ НА ВИЗНАЧЕННЯ ЇЇ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

*В роботі розглянуто вплив якості зображень (наявність гаусового розмиття) структури матеріалу на обчислювані за зображенням фрактальні характеристики та питому поверхню системи границь. Показано, що вплив гаусового розмиття на мультифрактальні характеристики структури суто менший, ніж на мультифрактальні характеристики системи виділених границь та її питому поверхню. Зроблено висновок щодо того, що мультифрактальний аналіз зображень системи виділених границь є важливою характеристикою, що доповнює інші характеристики структури матеріалу, та кількісно характеризує розвиненість системи границь.*

*Ключові слова:* мультифрактальність, електронна мікроскопія, оброблення зображень, гаусове розмиття, питома поверхня, границі зерен

**I.V. Krasikov, I.E. Krasikova, V.V. Kartuzov**

## **THE EFFECT OF IMAGE BLURRING ON THE DETERMINATION OF ITS MULTIFRACTAL CHARACTERISTICS IN MATERIAL STRUCTURES**

*The paper examines the influence of image quality (presence of Gaussian blurring) on the computed fractal characteristics and specific surface area of the material structure. It is demonstrated that the impact of Gaussian blurring on the multifractal characteristics of the structure is relatively smaller compared to its impact on the multifractal characteristics of the extracted boundaries system and its specific surface area. A conclusion is drawn that the multifractal analysis of the extracted boundaries system is an important characteristic that complements other characteristics of the material structure and quantitatively characterizes the development of the boundary system.*

*Keywords:* multifractality, electron microscopy, image processing, Gaussian blurring, specific surface area, grain boundaries

### **Постановка проблеми**

При вивченні мультифрактальних характеристик структури нових матеріалів, що розробляються, використовуються зображення зразків, одержані за допомогою різних методів — оптичної або електронної мікроскопії, оцифрування наявних зображень і т.і. Проблеми якості отримуваних зображень, зокрема, сучасними методами електронної мікроскопії, є одним з нагальних питань сучасного матеріалознавства [1]. Методи обробки зображень та фрактальний аналіз стали повсякденними інструментами при роботі з матеріалами самого різного походження та призначення [2,3]. Вочевидь, що в процесі обробки зображень при обчисленні мультифрактальних характеристик якості вихідних зображень значно впливає на значення, які обчислюються. У контексті цієї статті говориться про якість зображення з технічної точки зору — розмиття зображення (наприклад, через розфокусування об'єктиву), неоднорідність таких характеристик, як яскравість чи контрастність, по площі зображення тощо. Наразі розглядаємо єдиний, але, ймовірно, найважливіший аспект якості зображення — його розмиття.

Раніше, в [4], було розглянуто стійкість результатів обчислення мультифрактальних характеристик програмним комплексом Fraculator [5] по відношенню до можливих спотворень і артефактів вихідних зображень структури. Це дослідження було пов'язано з доведеною нами нестійкістю програмного забезпечення, що використовувалося раніше, зокрема, найбільш поширеного програмного комплексу MFRDrom, який було розроблено групою дослідників під керівництвом Г. Встовського [6]. Доведена стійкість програми Fraculator дозволяє перейти до розгляду впливу на мультифрактальні характеристики ступеня розмиття вихідних зображень.

### **Дослідження впливу розмиття зображення на визначення мультифрактальних характеристик**

Для вивчення впливу розмиття вихідного зображення на обчислювані програмою мультифрактальні характеристики були взяті насамперед модельний класичний фрактал — килим Серпінського (рис. 1), а також три різні матеріалознавчі структури, які наведено на рис. 2. Розміри всіх зображень однакові, 660×496 пікселів.

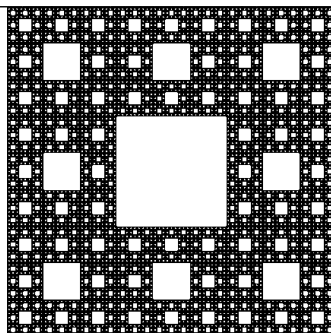


Рис. 1. Модельний фрактал — килим Серпінського

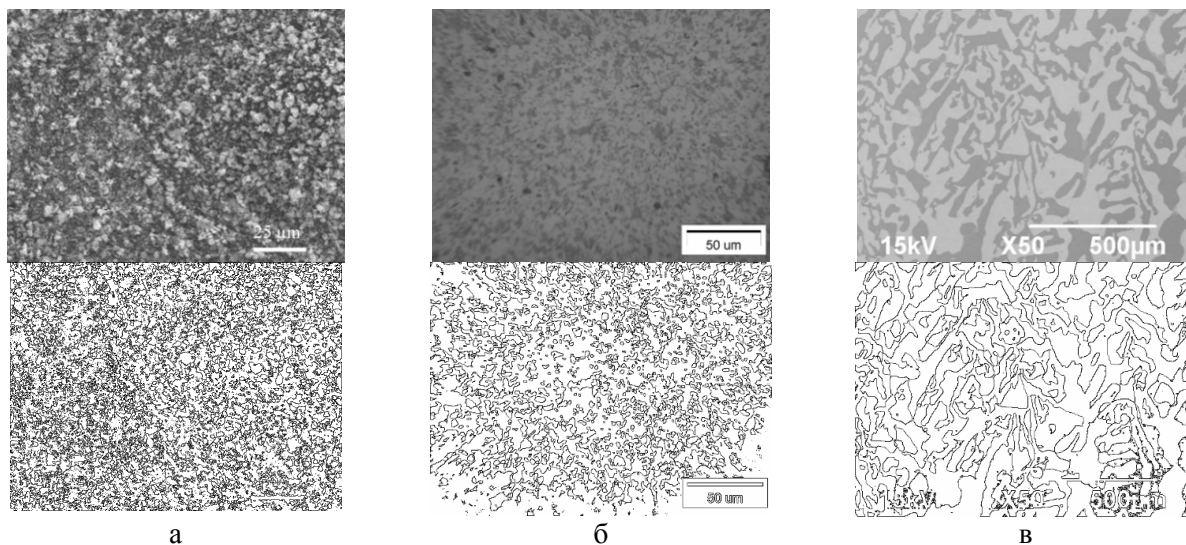


Рис. 2. Вихідні зображення структур та виділених систем границь для вивчення впливу розмиття зображень на мультифрактальні характеристики, що обчислюються

Основна відмінність наведених структур одна від одної полягає в різних характеристичних розмірах їх структурних елементів — від мінімального (дрібнозерниста структура) до максимального (крупнозерниста структура), а також якісно різних систем границь (від дуже розвиненої до невеликої кількості гладких границь).

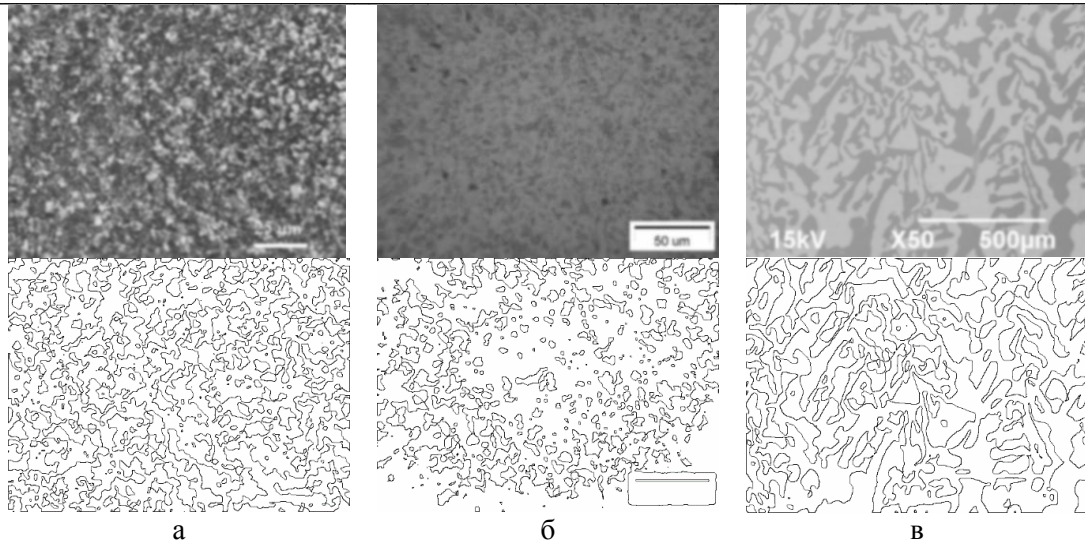
Моделювання розмиття полягало у застосуванні до вихідного зображення гаусового розмиття [7] з контрольованим рівнем (що задається в пікселях), при якому для кожного пікселя зображення його нове RGB-значення обчислювалося як сума зважених RGB-значень сусідніх пікселів в діапазоні відстаней  $3\sigma$ , де  $\sigma$  — вищезгаданий рівень розмиття (усі одиниці відстаней тут і далі виражено в пікселях).

$$I(x, y) = \sum_{d_x=-3\sigma}^{3\sigma} \sum_{d_y=-3\sigma}^{3\sigma} I(x+d_x, y+d_y) e^{-\frac{d_x^2+d_y^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

Приклади вихідних зображень при рівні розмиття 2,5 пікселів показано на рис. 3.

Зазвичай дана процедура використовується в комп'ютерній обробці зображень навмисно, для зниження деталізації (наприклад, в алгоритмах комп'ютерного зору для поліпшення чіткості зображення в різних масштабах). Візуальний ефект цього способу розмиття нагадує ефект відтворення зображення через напівпрозорий екран. Однак саме цей вплив на зображення — зниження його деталізації — відіграє негативну роль при визначенні структурних характеристик матеріалів. У даній роботі застосування гаусового розмиття імітує елементи розфокусування об'єктива при отриманні зображення структури матеріалу.

При згадці “зображення структури матеріалу” для дослідників у сфері матеріалознавства однією з найважливіших властивостей є його масштаб, тобто реальні фізичні розміри структурних елементів зображення. Однак при обробці цифрових зображень та обчисленні структурних характеристик, таких як фрактальна розмірність, абсолютне значення масштабу вступає в гру лише на другому етапі характеристики структури.



**Рис. 3. Зображення структурних елементів вихідних зображень та системи їх границь після застосування гаусового розмиття в 2,5 пікселів**

На першому етапі (оцифрування та комп'ютерної обробки оцифрованого зображення) слід пам'ятати, що з точки зору математики зображення являє собою не що інше, як множину геометричних точок, а з точки зору комп'ютерної програми — множину представлень цих точок у пам'яті комп'ютера як множину пікселів (мінімально виділених елементів зображення). Тому, незважаючи на те, що на зображеннях, які розглядаються у роботі, вказано масштаб, його роль суто ілюстративна; інформативним є лише характеристичний розмір структури в пікселях. Більше того, при розгляді системи виділених границь характеристичний розмір структури і характеристичний розмір її границь можуть відрізнятися на порядки, оскільки основний внесок у фрактальність зображень структури роблять саме дрібні деталі, “нерівності” цих границь.

У загальному випадку при характеризації структури матеріалу слід говорити не лише про звичні геометричні параметри структури — зерна, включення, фази тощо — але й про характеристичні розміри та параметри границь цих структур. Поки що у публікаціях, на жаль, це трапляється не часто — зазвичай виконується якісний аналіз границь структури (гладкі, розвинені та інші визначення), і лише в деяких роботах зустрічається кількісна оцінка значень питомої поверхні розподілу включень [10]. Однак така характеристика границь, як питома поверхня, не дає кількісної характеристикації форми границь. Так, збільшення питомої поверхні може бути пов'язано як зі зменшенням розміру часток з гладкою поверхнею, так і з більш порізними, розвиненими границями. Отже, однієї питомої поверхні замало, щоб характеризувати розвиненість границь, і саме тому *мультифрактальний аналіз зображень системи виділених границь спрямований на отримання більш повної кількісної її оцінки, яку неможливо отримати іншими, більш традиційними методами.*

Після внесення (згідно з прийнятим планом обчислювального експерименту) спотворень програмою Fraculator визначалися значення мультифрактальних розмірностей зображень  $D_0$  і  $D_1$ , як найбільш інформативних [8,9], а також — для системи границь — обчислення її питомої поверхні за Салтиковим [10]. Під питомою поверхнею системи границь мається на увазі питома поверхня розділу фаз, зерен тощо, але оскільки з алгоритмічної точки зору нам невідомо, що саме зображено, то надалі ми будемо казати просто про питому поверхню системи виділених границь. Як уже зазначалося, характерною одиницею розміру при комп'ютерній обробці цифрових зображень є піксель, отож, розмірність питомої поверхні при обчисленні її програмою визначається в зворотних пікселях ( $\text{px}^{-1}$ ). Визначення мультифрактальних розмірностей та питомої поверхні проводилося при однакових стандартних налаштуваннях програми, як для самих структур, так і для систем виділених границь.

Розглянемо спочатку вплив гаусового розмиття на модельний об'єкт — килим Серпінського (рис. 1), результати для якого показані на рис. 4.

Як бачимо, вплив гаусового розмиття на фрактальну розмірність структури килима Серпінського в широкому діапазоні рівнів розмиття відсутній, тоді як вплив на фрактальну розмірність системи границь дуже великий — при рівні розмиття в один піксель спостерігається дуже сильне падіння



фрактальної розмірності (фактично на 45%. Питання про застосування такого показника, як відсоткова зміна фрактальної розмірності, який має обмежений діапазон значень, залишається відкритим, однак оскільки в науці про фрактали немає якогось загальноприйнятого показника відношення значень розмірності, у даній статті використовується цей показник, однак слід пам'ятати про його лише ілюстративний характер). Ще більше розмиття впливає на питому поверхню системи границь — вона знижується на 86%. Це пов'язано з тим, що при такому рівні розмиття границі мінімальних елементів килима Серпінського (що мають розмір в один піксель) фактично зникають. При більшій мірі розмиття фрактальність границь практично зникає, і вони перетворюються на невелику кількість гладких ліній (збільшені фрагменти оригінальної системи границь та системи границь при рівні розмиття 10 пікселів показано на рис. 5).

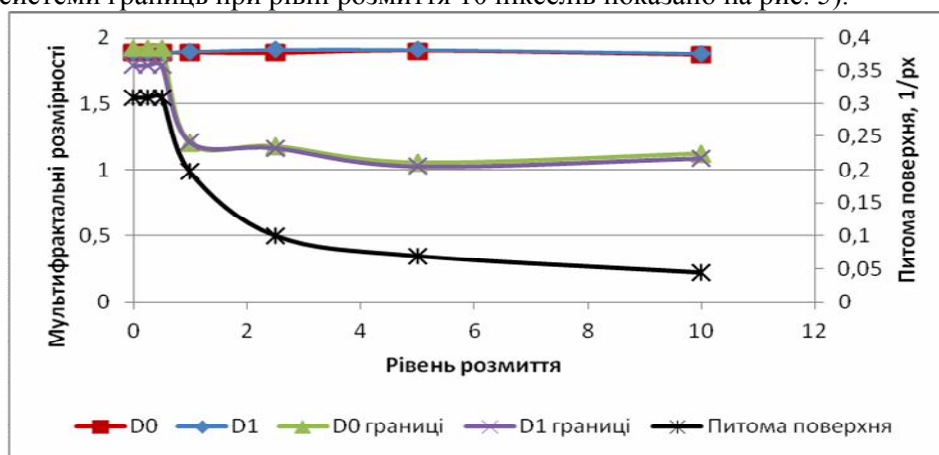


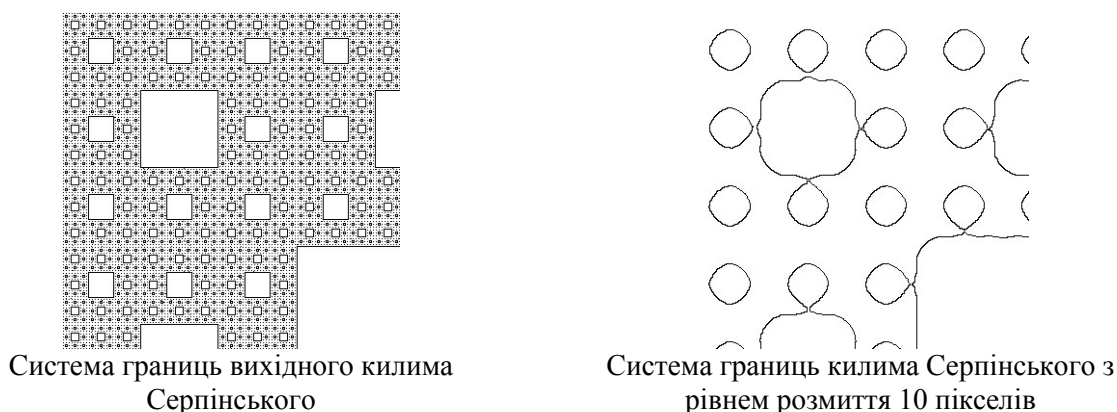
Рис. 4. Вплив гаусового розмиття на мультифрактальні розмірності та питому поверхню системи границь килима Серпінського

Вочевидь, що при сильному розмитті відбувається повна втрата інформації про тонку фрактальну структуру, і система границь по суті перетворюється на систему одновимірних ліній.

Природно, що для реальних об'єктів картина виглядатиме глобально схоже, але конкретні залежності фрактальних характеристик від рівня розмиття будуть різні для різних структур. А ргіогі така залежність буде меншою для крупнозернистої структури з гладкими границями.

Розглянемо конкретні результати обчислень для наведених на рис. 2 структур фрактальних розмірностей (рис. 6) та питомої поверхні системи границь (рис. 7).

З отриманих результатів бачимо, що апіорний висновок повністю виправдався. Вплив розмиття на фрактальні характеристики реальних тестових структур у цілому має місце, але виявляється на рівні, що не перевищує навіть для сильного рівня розмиття (10 пікселів) 8%.



Система границь вихідного килима Серпінського

Система границь килима Серпінського з рівнем розмиття 10 пікселів

Рис. 5. Вплив гаусового розмиття на структуру границь килима Серпінського

Водночас вплив розмиття на фрактальні характеристики системи границь істотно більший, і становить від 25% від вихідної фрактальної розмірності для дрібнозернистої структури з порізаними границями, до 12% для крупнозернистої структури з гладкими границями. Щодо впливу на питому поверхню системи границь, то він підпорядковується тим самим

закономірностям і становить від 87% для дрібнозернистої структури з порізаними границями до 68% для крупнозернистої структури з гладкими границями.

Як згадувалося вище, такий вплив розмитості на обчислювані характеристики пояснюється тим, що розмиття призводить до зниження деталізації зображення, але при цьому загальне співвідношення кількості чорних і білих пікселів виявляється майже незмінним. Зниження деталізації системи границь призводить до їх згладжування, а отже, і до значно меншого рівня фрактальності, а також до меншої питомої поверхні. Згладжування границь робить їх більш схожими зі стандартними одномірними лініями, тобто розмиття зображення структури веде до отримання нижчих значень мультифрактальних розмірностей для системи виділених границь (що ми бачимо на представлених на рис. 4 та 6 графіках).

Слід також відзначити, що при тому самому рівні розмиття вплив останнього виявляється більшим для дрібнозернистих структур, тому що в цьому випадку звивистість границь має менші характерні розміри, отже, при тому самому рівні розмиття втрата інформації про точні границі настає раніше для структур із меншим характерним розміром. Це твердження підтверджують результати, показані на рис. 6, де верхній графік відповідає найбільш дрібнозернистій структурі, а нижній — структурі з найбільшим значенням характеристичного розміру. Крім того, для дрібнозернистих структур, як і для структур з погано вираженою відмінністю яскравості матриці та включень (з низькою контрастністю), може спостерігатися втрата інформації про границі як такі, оскільки сильний ступінь розмиття призводить до зниження відмінності в яскравості пікселів (через їх перемішування відповідно до (1)).

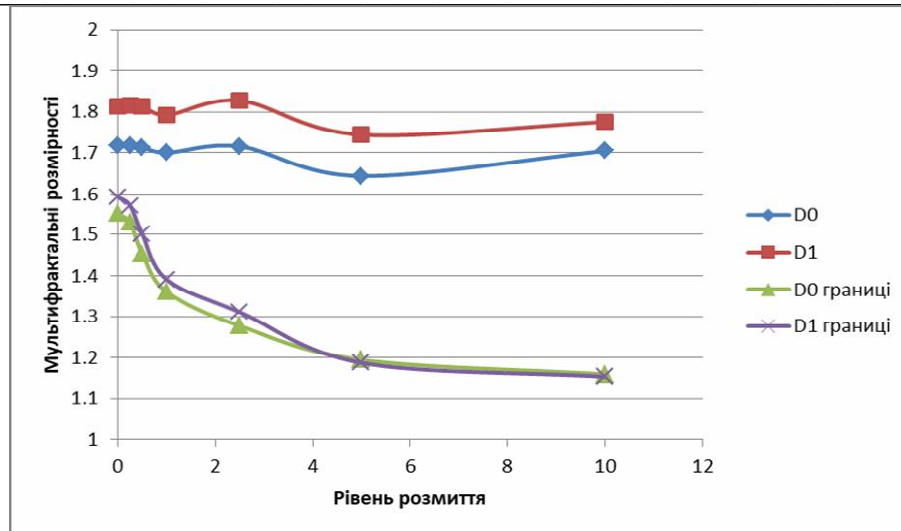
Говорячи про характеристичний розмір і дрібно/крупнозернистість структури, слід розуміти, що в даному випадку, при розгляді зображень структури матеріалу, йдеться не про абсолютні характеристики фізичних структур, а про їх відносний розмір на зображенні. Те, що дослідник-матеріалознавець може назвати дрібнозернистою структурою, на зображенні може виглядати як структура крупнозерниста, якщо характеристичний розмір зерен становитиме значну частину від розміру зображення, а самих зерен на зображенні буде лише декілька. Ми використовуємо терміни “дрібнозернистий” і “крупнозернистий” саме в цьому сенсі. Дати точні кількісні визначення цим термінам неможливо, оскільки вони мають якісний характер.

Зазначене зауваження добре узгоджується з поняттям “самоподібності”, яке, власне, і є визначальним у фрактальній геометрії. Тобто, якщо просто змінити масштаб зображення, то на ньому виявляться нові деталі, яких не було видно раніше, оскільки вони мали мати на зображенні розмір, менший за піксель. Оскільки фізичні об'єкти не є ідеальними геометричними фракталами, завжди, говорячи про ті чи інші значення мультифрактальних розмірностей, слід вказувати діапазон розмірів, для якого вони визначені.

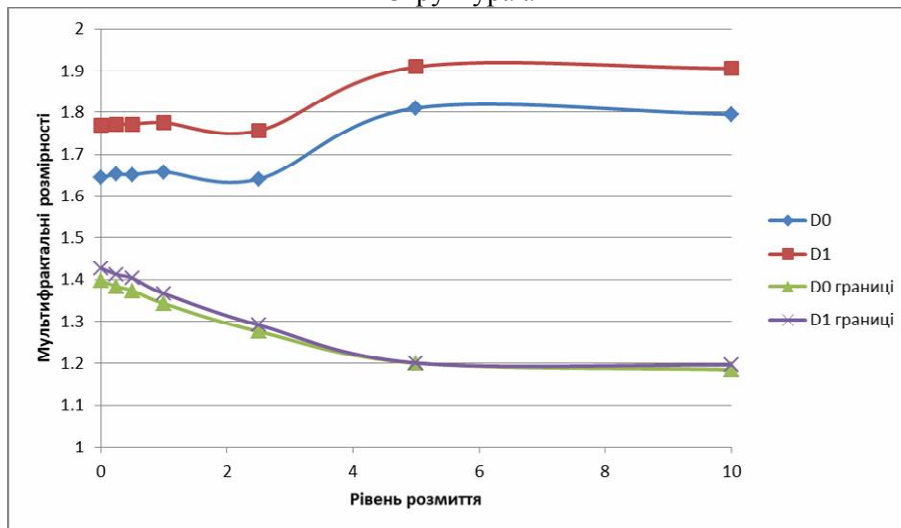
Але хоча на кожному зображенні наведено фізичний масштаб (по суті, фізичний розмір одного пікселя зображення), на даному етапі характеристики структури він не відіграє визначальної ролі, тому що одиницею зображення, що мінімально виділяється, і з якою має справу програма обробки зображення, є піксель.

Саме тому у програмі Fraculator при обчисленні мультифрактальних розмірностей вказуються діапазони фрактальності в пікселях, а не будь-які фізичні розміри. Це принципово важливий момент: адже та сама структура при різному ступені збільшення може мати різні мультифрактальні характеристики, і характер їхньої залежності від ступеня збільшення — питання додаткового дослідження структури та властивостей матеріалу.

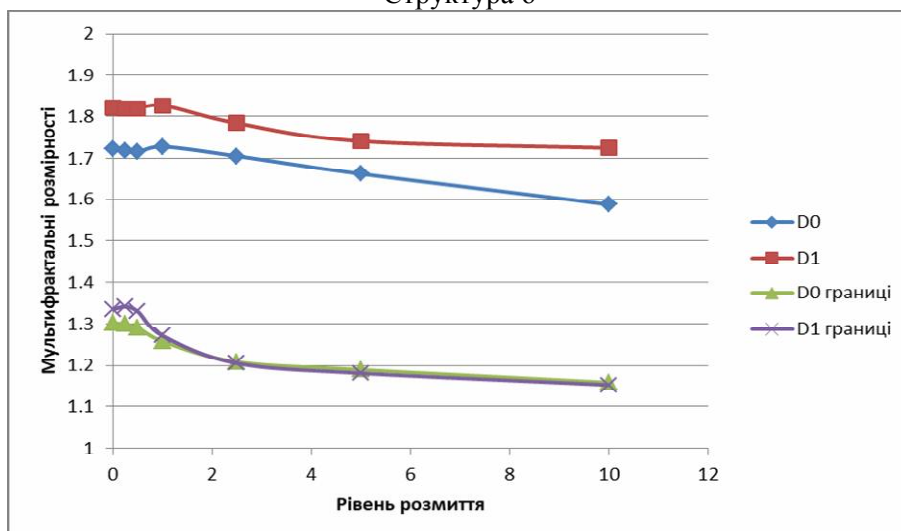
Як приклад, розглянемо деяку структуру матеріалу, який було отримано шляхом спікання чи гарячого пресування композитів із порошків різного складу. При невеликому збільшенні буде чітко видно структуру, в якій у якості зерен виступатимуть частинки різних матеріалів, а система виділених границь відповідатиме границям між зернами різного складу. Однак при збільшенні більшою мірою проявиться внутрішня структура самих зерен, і мультифрактальні характеристики, що обчислюються, будуть відноситися вже до структури цього порядку розмірів. Вочевидь, що при невеликих збільшеннях визначальну роль у фрактальних характеристиках грають зерна як такі, оскільки їхню внутрішню структуру просто не видно, а при великих збільшеннях основну роль відіграє внутрішня структура цих зерен



Структура а



Структура б



Структура в

Рис. 6. Вплив гаусового розмиття на мультифрактальні розмірності зображень структур на рис. 2



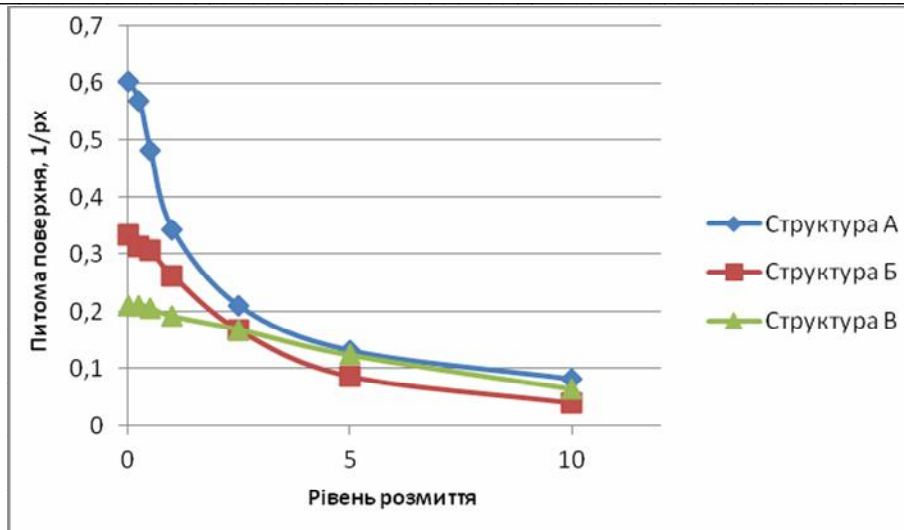


Рис. 7. Вплив гаусового розмиття на питому поверхню границі для зображень структур на рис. 2

Тому за характеристичними розмірами діапазону фрактальності в пікселях, співвідносячи його із зображенням, завжди можна зрозуміти, із фрактальними характеристиками якої структури ми маємо справу. При цьому часто здатність приладів для отримання зображення структур визначає, які саме характеристичні підструктури будуть відігравати основну роль при обчисленні мультифрактальних характеристик структури в цілому.

На жаль, точні, математично вивірені критерії розмитості зображення неможливі у зв'язку з тим, що вони відштовхуються від ідеального, абсолютно чіткого зображення, яке у дослідника відсутнє. Тут застосовні нечіткі критерії оцінювання дослідником, наприклад, у балах або інші, засновані на досвіді, а не на конкретних вимірах. Укупі з уже згаданою величезною роллю дослідника у виборі об'єкта дослідження можна висловити припущення, що застосування нейронних мереж із застосуванням машинного навчання і систем штучного інтелекту в матеріалознавстві має великі перспективи. Ідеї такого застосування нейронних мереж не новинка, їм уже кілька десятиліть [11], але розвиток цієї галузі та революційні досягнення останнього часу призводять до того, що розроблення таких спеціалізованих мереж стає повсякденним науковим (ледь не навчальним) завданням [12-14]. В якості одного з підзавдань такого застосування може бути як оцінка якості (і навіть виправлення) зображень, так і вибір об'єктів дослідження.

### Висновки

1. Розмиття зображення структури матеріалу впливає на обчислювані фрактальні та звичайні геометричні (питома поверхня системи границь) характеристики, причому вплив розмиття на характеристики зображення структури матеріалу виявляється істотно меншим, ніж на характеристики системи виділених на зображенні границь обраних структурних елементів.

2. Розмиття зображення призводить до згладжування систем границь і, як наслідок, втрати деталізації та зменшення обчислюваних значень мультифрактальних розмірностей і питомої поверхні системи границь. Вплив на дрібнозернисті структури та структури з розвиненими границями виявляється більшим, ніж на крупнозернисті структури та структури з гладкими границями.

3. Кількісні оцінки допустимого ступеня розмиття вихідних зображень неможливі, а тому досліджувану структуру має бути чітко видно у всьому діапазоні її розмірів, до окремих пікселів (бажано, щоб мінімальні характеристичні розміри досліджуваної структури на зображенні були не менше 2–3 пікселів).

4. Основну роль при підготовці зображень грає дослідник-матеріалознавець, який обирає зміст структури матеріалу для дослідження (а, відповідно, і масштабування при отриманні зображення) і стежить, щоб одержуване зображення мало максимальну чіткість елементів, які досліджуються.

5.3 розглянутого матеріалу можна зробити попередній висновок, що одним з можливих перспективних підходів до оцінки якості зображень матеріалознавчих структур може бути застосування систем штучного інтелекту з використанням машинного навчання.

**Список використаних джерел:**

1. Pennycook, S.J., Li, C., Li, M. et al. *Material structure, properties, and dynamics through scanning transmission electron microscopy*. *J Anal Sci Technol* 9, 11 (2018). <https://doi.org/10.1186/s40543-018-0142-4>
2. Agnieszka Szczotok. Guidance and advice to image analysis applied in materials science. *Czasopismo Techniczne, 2016, Mechanika Zeszyt 3-M (10) 2016, s. 15-21*. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.16.115.5726>
3. Chanona-Pérez, J. et al. *Image Processing Methods and Fractal Analysis for Quantitative Evaluation of Size, Shape, Structure and Microstructure in Food Materials*. In *Food Engineering: Integrated Approaches*. Food Engineering series. Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-75430-7\\_16](https://doi.org/10.1007/978-0-387-75430-7_16)
4. И.Е. Красикова, В.В. Картузов, И.В. Красиков. *Характеристики компьютерной реализации алгоритма вычисления фрактальной размерности двумерных изображений*. В сб. Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении. К.: ИПМ НАНУ, 2013, вып. 15, с 69–73.
5. Красіков І.В., Красікова І.С., Картузов В.В., Красіков А.І. *Комп'ютерна програма «Fraculator 2»*. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №115438. Україна, 25.10.2022.
6. И.Е. Красикова, И.В. Красиков, В.В. Картузов. *Определение фрактальных характеристик структуры материалов методом мультифрактального анализа изображений*. *Вычислительный эксперимент на модельных объектах*. В сб. Математические модели и вычислительный эксперимент в материаловедении. К.: ИПМ НАНУ, 2007, вып. 9, с.79–84.
7. Linda G. Shapiro, George C. Stockman. *Computer Vision*. Prentice Hall, 2001. 580 p.
8. Волчук В.Н. К вопросу о применении теории мультифракталов для оценки механических свойств металла. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2014. № 3. С. 12–19.
9. Волчук В.Н. Определение чувствительности мультифрактальных характеристик металла *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2015. № 12 (213). С. 10–14.
10. С.А. Салтыков. *Стереометрическая металлография*. (Стереология металлических материалов). — М.: Металлургия, 1976. — 272 с.
11. H.K.D.H. Bhadeshia. *Neural Networks in Materials Science*. ISIJ International, Vol. 39 (1999), No. 10, pp, 966-979
12. Shapovalova, M., Vodka, A. Methods for recognizing the microstructure of a material. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, 23 (1245), 56–61, doi:10.20998/2413-4295.2017.23.09.
13. Применение искусственных нейронных сетей в материаловедении. Под ред. Ю.Н.Колмогорова. — Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2021. — 68 с. — ISBN 978-5-7996-3337-0.
14. Pyzer-Knapp, E.O., Pitera, J.W., Staar, P.W.J. et al. Accelerating materials discovery using artificial intelligence, high performance computing and robotics. *npj Comput Mater* 8, 84 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41524-022-00765-z>

**Рецензент:** Гордієнко Ю.Г., професор кафедри обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» с.н.с., д.ф.-м.н.

N.O. Oliinyk<sup>1</sup>, H.D. Ilnitska<sup>1</sup>, G.A. Petasyuk<sup>1</sup>, O.N. Sizonenko<sup>2</sup>, G.A. Bazaliy<sup>1</sup>, S.D. Zabolotnyi<sup>1</sup>

## INFLUENCE OF IMPULSE PROCESSING WITH HIGH-VOLTAGE ELECTRICAL DISCHARGES AND FLOTATION SEPARATION ON THE PHYSICAL-MECHANICAL AND MORPHOMETRIC CHARACTERISTICS OF AC20 MARK SYNTHETIC DIAMOND POWDER WITH GRANITY 100/80

<sup>1</sup> V.N. Bakul Institute for superhard materials of the National Academy of Sciences of Ukraine

<sup>2</sup> Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine

*Studies of the powder of synthetic diamond grade AC20 with grain size 100/80 have experimentally shown that the use of high-voltage electric discharges in the manufacture of powders makes it possible to obtain powders that are more uniform in morphometric characteristics, powders with a large number of cutting edges and a large angle of their sharpening, which provides a higher abrasive ability. The use of flotation separation of diamond powder makes it possible to obtain diamond powder, which is characterized by an increased strength in static compression by 23.8%, increased uniformity in strength by 25.0%, and a significantly reduced number of inclusions. The results of the performed studies give grounds to assert that the use of powder treatment with high-voltage electric discharges and the use of flotation separation are effective technological methods for influencing the morphometric, physical and mechanical characteristics and technological properties of synthetic diamond powders. The use of these two methods opens up the possibility of selectively influencing the quality of the resulting powders.*

*Key words: synthetic diamond grinding powder, flotation, strength, morphometric characteristics*

Н.О. Олійник, Г.Д. Ільницька, Г.А. Петасюк, О.М. Сизоненко, Г.А. Базалій, С.Д. Заболотний

## ВПЛИВ ІМПУЛЬСНОГО ОБРОБЛЕННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИМИ ЕЛЕКТРИЧНИМИ РОЗРЯДАМИ ТА ФЛОТАЦІЙНОГО РОЗДІЛЕННЯ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ТА МОРФОМЕТРИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРОШКІВ СИНТЕТИЧНОГО АЛМАЗУ МАРКИ АС20 ЗЕРНИСТОСТІ 100/80

*Дослідженнями порошку синтетичного алмазу марки АС20 зернистості 100/80 експериментально показано, що застосування оброблення високовольтними електричними розрядами при виготовленні порошків дозволяє отримувати порошки більш однорідні за морфометричними характеристиками, порошки з більшою кількістю різальних кромки та більшим кутом їх загострення, що забезпечує більш високу абразивну здатність. Застосування флотаційного розділення алмазного порошку дозволяє отримати порошок алмазу, що характеризується підвищеним показником міцності при статичному стиску на 23,8%, збільшеною однорідністю за міцністю на 25,0%, суттєво зниженою кількістю включень. Результати виконаних досліджень дають підставу стверджувати, що застосування оброблення порошку високовольтними електричними розрядами і застосування флотаційного розділення є дієвими технічними засобами впливу на морфометричні, фізико-механічні характеристики та технологічні властивості порошків синтетичного алмазу. Застосування цих двох методів відкриває можливість здійснювати вибірково вплив на якість отримуваних порошків.*

*Ключові слова: порошок синтетичного алмазу, флотація, міцність, морфометричні характеристики*

### Introduction

The production of modern abrasive tools requires high-quality synthetic diamond powders (PSD) that are uniform in their characteristics. Properties (PSD) are formed in the process of synthesis, chemical and physical processing [1]. Our studies have shown that pulsed high-voltage electric discharge (HVED) treatment of grinding powders and micro-powders of diamond makes it possible to obtain powders that are more uniform in terms of morphometric characteristics [2]. To improve the quality of PSA, sorting by various methods is used, including flotation separation [3-5].

A significant scientific and applied interest lies in the expansion of research on the study at a quantitative level of a wider range of characteristics and properties of synthetic diamond powders of the coarseness class used in abrasive tools, which can be adjusted using the methods of flotation separation and HVED processing.

The purpose of the work is to study the influence of HVED processing and flotation separation on the formation of morphometric and physical-mechanical characteristics of PSD produced by such methods.

### Method

Samples of AC20 diamond powder with a grain size of 100/80, which was synthesized in the Ni-Mn-C system, and the products of its HVED treatment and flotation separation (foam and chamber) were

© Н.О. Олійник, Г.Д. Ільницька, Г.А. Петасюк, О.М. Сизоненко, Г.А. Базалій, С.Д. Заболотний

studied. The research was conducted in 2 stages. At the first stage of the PSD, the HVED was treated in distilled water with a pressure discharge channel of 800 MPa and a total treatment energy of 1000 kJ. After the chemical purification of the products of the HVED treatment, PSD of different grain sizes was produced. The next stage of the research was the flotation separation of the powder in one stage, followed by chemical purification of the resulting separation products from flotation reagents. The research used the following methods: chemical, magnetic, gravimetric; sieve analysis; methods of optical and scanning electron microscopy. Strength indicators during static compression were determined according to the index of grades according to the standard [6]. The content of intracrystalline metal inclusions was estimated by the value of the specific magnetic susceptibility. Strength indicators during static compression were determined according to the characteristics of grades according to the standard [6], uniformity in strength (the content of diamond grains in the sample of the fractions corresponding to the nominal grades of powder, which is determined according to the strength test passport of the powder sample). The size distribution of the powder particles was studied, using known methods, the specific magnetic susceptibility of the powder ( $\chi, \cdot 10^{-8}, \text{m}^3/\text{kg}$ ) and the mass fraction of impurities in the form of non-combustible residue (% , by mass) were determined. The strength of grains under static compression was determined using the DA-2 device [7]. Morphometric characteristics (minimum ( $F_{min}$ ,  $\mu\text{m}$ ) and maximum ( $F_{max}$ ,  $\mu\text{m}$ ) Feret diameters, grain height (H), grain projection roughness ( $Rg$ ), Feret elongation  $F_{el}$ , average grain diameter ( $d_m$ ), convex image form factor  $C_r$ , was determined using the DiaInspect.OSM device [8]. The list and geometric interpretation of these characteristics, their conceptual meaning, are given in the descriptive and methodological materials of the manufacturing company for the DiaInspect.OSM device, in the original publications of its developers [8] and in the publications of the authors of this article [4, 9]. The specified characteristics describe the size ( $F_{min}$ ,  $F_{max}$ ,  $d_m$ ) and shape ( $C_r$ ,  $F_{el}$ , of the grains. The indicator of the external specific surface ( $F_{ess}$ ,  $\text{m}^2/\text{kg}$ ) and the number of cutting edges ( $n$ , pcs.) and their sharpening angle ( $\phi$ , degrees) were determined by known indirect analytical methods [9] using DiaInspect data of morphometric characteristics diagnosis. The results of the study were compared with the data of the PSD study obtained by traditional technology.

### Results and their discussion.

From the products of HVED processing, powders of the grade AC20 with a grain size of 100/80 were produced, the amount of which was 52.9 wt. % of the original powder. In addition, powders with grain sizes of 80/63 – 28/14 were produced. In the future, PSD grade AS20 with a grain size of 100/80 was studied. DiaInspect photos of AC20 100/80 powder samples before (a) and after HVED treatment, chemical cleaning and powder production (b) are shown in Fig. 1.



Fig. 1. Samples of AC20 100/80 powder before (a) and after HVED treatment, chemical cleaning and powder production (b)

The results of diagnostics of the morphometric characteristics of the specified samples of AC20 100/80 powder are given in the table 1.

The results of diagnostics of the morphometric characteristics of AC20 100/80 powder before (Fig. 1, a) and after HVED treatment (Fig. 1, b) showed that, in comparison with traditional technology, the use of HVED processing in the manufacture of powders allows obtaining powders that are more uniform in morphometric characteristics, which have a greater number of cutting edges, greater angles of their sharpening. The powder obtained with the use of HVED processing contains fewer impurities, its strength under static compression is in the range of values that are consistent with the requirements of the standard [6].

According to the obtained results (Table 1), the use of HVED processing leads to obtaining powders with a smaller average grain size, a more rounded and isometric grain shape, stability and homogeneity at the level of powder grains, which is made according to traditional technology. This

powder has a greater number of cutting edges and a greater angle of their sharpening. Physico-mechanical characteristics of AC20 powder with a grain size of 100/80, produced according to traditional technology and with the use of HVED processing are given in the table. 2

According to the analysis of the characteristics presented in Table 2, it can be seen that the powder obtained with the use of HVED processing contains fewer impurities, which is confirmed by a decrease in the specific magnetic susceptibility and an increase in the specific electrical resistance. Its strength under static compression is lower than the strength of the powder obtained by traditional technology, but does not exceed the strength interval for AC20 powder according to DSTU 3292-95 [6].

The results of the study (stage 2) of PSD characteristics obtained during the flotation separation of AC20 powder with a grain size of 100/80 into foam and chamber products are most fully described in our previous works [5,10]. It was established that the interval of distribution of diamond particles in size is 30-160  $\mu\text{m}$ ; in the range of 80-125 microns there is the largest number of particles (99.32%) of the original powder, (99.01%) of the foam product, (98.96%) of the chamber product.

Table 1

**Average values, stability, and uniformity of morphometric characteristics of AC20 grade powder with 100/80 grain size, produced according to traditional technology and using HVED processing**

Characteristic	Manufacturing method			
	Application of HVED processing		Traditional technology	
	average	uniformity/stability	average	uniformity/stability
$F_{max}$ , $\mu\text{m}$	131.51	0.6064/0.2077	134.74	0.6824/0.3416
$F_{min}$ , $\mu\text{m}$	102.55	0.6177/0.2130	102.74	0.6624/0.3340
$C_r$	1.2542	0.7817/0.5461	1.2923	0.7474/0.6238
$F_{el}$	1.2926	0.6117/0.4424	1.3185	0.5821/0.5068
$d_m$ , $\mu\text{m}$	117.03	0.6148/0.2257	118.74	0.6989/0.3530
$n$ , pcs	12	—	11	—
$\varphi$ , degrees	112,67	—	108,00	—

Table 2.

**Characteristics of the initial powder of the AC20 grade with a grain size of 100/80 and those made from it using the HVED processing of the AC20 powder with a grain size of 100/80**

Characteristics	AC20 grade powder with a grain size of 100/80	
	Traditional technology	Application of HVED processing
Mass fraction of impurities, by mass %	0,98	0,80
Specific magnetic susceptibility, $\cdot 10^{-8}$ , $\text{m}^3/\text{kg}$	0,63	0,29
Specific electrical resistance, $\text{Ohm}\cdot\text{m}$	1,5·109	1,0·1010
Strength under static compression, N	17,9	13,5
Form factor	1,18	1,09

The number of PSD particles (their mass) in the foam product is much smaller than in the chamber product and differs by 6.5 times.

The physico-mechanical and morphometric characteristics of the foam product compared to the chamber product are characterized by a 3.1% reduction in the external specific surface area, a low content of impurities and inclusions by 79.8%, increased static compression strength by 23.8%, and uniformity in strength 25.0%. The morphometric characteristics of the chamber product of flotation separation are close in value to the characteristics of the original powder. The curves of particle distribution according to the strength index during static compression of the original powder and flotation separation products are close in appearance, but the mathematical linear approximation of the curves shows that the tangent of the slope angle of the curves is different. The tangent of the angle of inclination of the distribution of the foam product is 1.86, the chamber product is 1.60, and the initial powder is 1.68. Therefore, the distribution of the powder of the foam product according to the strength of the grains during static compression is the most homogeneous.

### Conclusions

Using the example of AC20 synthetic diamond powder with a grain size of 100/80, it was experimentally shown that the use of high-voltage electric discharge treatment in the manufacture of powders allows obtaining powders that are more homogeneous in terms of morphometric characteristics, which have a greater number of cutting edges and a greater angle of their sharpening, which provides a higher abrasive ability. The use of flotation separation of diamond powder makes it possible to obtain diamond powder characterized by an increased strength index under static compression by 23.8%, increased homogeneity in strength by 25.0%, and a significantly reduced number of inclusions. The results of the conducted research give reasons to assert that the use of high-voltage electric discharge treatment and flotation separation are effective technical means of influencing the morphometric and physical-mechanical characteristics, which affects the technological properties of synthetic diamond powders. The use of these two methods opens up the possibility of selective influence on the quality of the obtained powders.

### References

1. Novikov, N.V., Nevstruev, G.F., Il'nitskaya, G.D., et al. (2006). Quality assessment of superabrasive powders, Part 2. Practical application of the new method for assessment of quality characteristics. *Superhard Materials*, No. 6, pp. 58-67 [in Russian].
2. Syzonenko O.N. (2013). The effect of pulsed processing of synthetic diamond micropowders with high-voltage electric discharges on their quality improvement/ O.N. Syzonenko, G.D. Ilnytskaya, N.A. Oleynyk, G.A. Bazaly, E.I. Taftay, E.V. Lypyan, A.S. Torpakov // *Impulse processes in the mechanics of solid media: materials of the X International Scientific Conference*. - Mykolaiv: KP "Mykolaiv Regional Printing House", August 19-22. 138-141 [in Russian].
3. Bohatyreva, G. P. (1972). Sorting of diamonds by strength by flotation. *Synthetic diamonds*, 3, 23–25 [in Russian].
4. Bohatyreva G. P., Petasyuk G. A., Bazaliy G. A., & Shamraeva, V. S. (2009). On Morphometric Uniformity of Diamond Micron Powders. *Journal of Superhard Materials*, 31(2), 126–134.
5. Oliynyk N.O., Ilnytska G.D., Bazaliy G.A. (2023). Changes in the physical and mechanical characteristics of AC20 diamond grinding powder with a grain size of 100/80 under the influence of flotation separation // *Modern issues of production and repair in industry and transport: Materials of the 23rd International Scientific and Technical Seminar, March 15–16, 2023 – Kyiv: ATM of Ukraine.. – C. 81–83 [in Ukrainian]*.
6. Synthetic Diamond Powders. General Technical Specifications. (DSTU 3292–1995). (1996). UkrNDNTs [in Ukrainian].
7. Loshak M., Aleksandrova L., Kosenchuk T. (2013). Density of diamond crystals for static loading. *Metrology and devices*. N2 (40). 11–15 [in Russian].
8. DiaInspect.OSM. Automated particle analysis for superabrasives and surface analysis 2010. Operation guide Version 1.2.8. Received <https://vdiamant.de/languages/diainspect-osm.html>.
9. Petasyuk G.A., Bogatyreva G.P. (200). Extrapolation Analytical Method for Determination of Outer Specific Surface of Powders of Superhard Materials. *Journal of superhard materials*. 30 (6) 375–383.
10. Oliynyk N.O., Ilnytska G.D., Petasiuk G.A., Bazalii G.A. (2023.). Peculiarities of physical and mechanical characteristics of AC20 diamond powder with a grain size of 100/80 and products of its flotation separation // *Materials and technologies in engineering (MTI-2023): engineering, materials, technologies, transport: collection of scientific reports of the international conference, Lutsk, Ukraine, 16 - May 18, 2023 - Lutsk: Vezha-Druk, 191–194 [in Ukrainian]*.

**Reviewer:** Volodymyr MECHNIK, Doctor of Science, Leading Researcher, V.N. Bakulsky Institute of Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine

Д. М. Квашук, І. Г. Бабічев

Національний авіаційний університет

## ПОХИБКА ДИСКРЕТНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ КУТОВИХ ПРИСКОРЕНЬ ВАЛІВ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

*Стаття присвячена методам вимірювання кутових прискорень та оптимізації похибок вимірювання обертальних параметрів електродвигунів.*

*Основну увагу зосереджено на оптимізації процесу вимірювання кутових прискорень, зменшенні похибок та покращенні точності таких вимірювань. У статті досліджуються фактори, які впливають на методичну похибку, такі як вибір значення фіксованого кута, момент початку виміру, технічні засоби та діапазон кутових прискорень, що вимірюються. Представлено залежність методичної похибки від різних параметрів. Зокрема, розглядаються випадки, коли тривалість постійного кутового прискорення обмежена, а також, коли відбувається зміна похибки протягом часу, що відповідає певній кількості обертів валу, який задає постійне кутове прискорення.*

*Ключові слова:* кутове прискорення, обертальний момент, електродвигун, методична похибка, вимірювання, дискретні методи вимірювання.

D. Kvashuk, I. Babichev

## METHODOLOGICAL ERROR OF DISCRETE METHODS OF MEASURING CONSTANT ANGULAR ACCELERATIONS OF ELECTRIC MOTORS SHAFTS

*The article is devoted to methods of measuring angular accelerations and optimization of measurement errors of rotational parameters of electric motors. The main focus is on optimizing the process of measuring angular accelerations, reducing errors and improving the accuracy of such measurements. The article examines the factors that affect the methodical error, such as the choice of the fixed angle value, the moment of the start of the measurement, the technical means and the range of angular accelerations being measured. The dependence of the methodological error on various parameters is presented. In particular, cases are considered when the duration of constant angular acceleration is limited, as well as when there is a change in error during the time corresponding to a certain number of revolutions of the shaft that sets the constant angular acceleration.*

*Key words:* angular acceleration, torque, electric motor, methodical error, measurement, discrete measurement methods.

### Постановка проблеми

Метрологічне забезпечення засобів вимірювань кутових прискорень валів електродвигунів передбачає точне відтворення зазначеної величини, як постійної, так і змінної в часі, при цьому основною операцією є її вимірювання.

Проведений аналітичний огляд методів та засобів вимірювань кутових прискорень показує, що дискретні методи мають головні переваги — високу точність і можливість автоматизації процесів вимірювання. Ці методи засновані на перетворенні (кодуванні) сигналу вимірювального перетворювача кута повороту валу та подвійному чисельному диференціюванні його за параметрами, що формують таке перетворення.

Якщо один із параметрів (кут повороту, або інтервал часу) зробити постійним (фіксованим), то значення другого змінюватимуться нелінійно. У зв'язку із цим, використання параметру кутового прискорення валу електродвигуна може бути здійснено і під час вимірювання динамічних моментів, розглядаючи їх як добуток моменту прискорення та моменту інерції.

Разом з тим, дискретні методи вимірювання ґрунтуються на тому, що вимірювання проводяться на окремих вибірках даних, на відміну від неперервних методів, які передбачають безперервність даних. Тому, актуальність дослідження похибок дискретних методів вимірювання кутових прискорень, обумовлена, ще й потребами в точності інших, похідних, методів вимірювання обертальних параметрів електродвигунів під час застосування непрямих вимірювань.

### Аналіз літератури

В літературі досить широко описано методи вимірювання кутових прискорень електродвигунів [1], [2], [3], [4]. Проте, не достатньою увагу приділено саме методичним похибкам вимірювань кутових прискорень.

Так, в роботі [5] розглянуто варіант побудови блоку вимірювання датчика кутової швидкості та кутового прискорення на базі гіроскопічного датчика кутової швидкості компенсаційного типу. Розроблено структурну схему блоку, представлено результати моделювання його роботи. Проте за пропонуваній прилад не враховує ряду дестабілізуючих факторів, зокрема впливу вібрації та

© Д. М. Квашук, І. Г. Бабічев



впливу температури на пружність валу. В роботі [6] описано метод вимірювання кутового прискорення тіла, використовуючи прямий спосіб вимірювання, де можна було б представити похибку та її залежність від дестабілізуючих факторів також. В інших працях, зважаючи на детальний опис методів та засобів вимірювання кутового прискорення спостерігається недостатність висвітлення саме дискретних методів вимірювання саме постійних кутових прискорень. Тому, актуальною проблемою можна вважати визначення методичних похибок під час вимірювання постійних кутових прискорень, оскільки саме постійні кутові прискорення більш прогнозовані та можуть бути описані більш точно.

**Метою даної статті є** визначення шляхів покращення точності вимірювання кутових прискорень валів електродвигунів шляхом зменшення методичної похибки та вибору оптимальних параметрів вимірювання.

#### Виклад основного матеріалу

Розглянемо методичну похибку вимірювання постійного кутового прискорення двох вищезгаданих методів нелінійного кодування сигналу кута повороту чи часу. Під методичною похибкою слід розуміти різницю між середнім значенням кутового прискорення на інтервалі кодування та його значенням у час. При цьому інструментальну похибку, яка залежить від точності перетворювачів та реєструючих пристроїв, брати до уваги не будемо.

Розглянемо спочатку методичну похибку  $\Delta_{1M}$  нелінійного кодування кута повороту фіксованим інтервалом часу  $T$ . У цьому випадку, згідно з визначенням,

$$\Delta_{1M} = \frac{\omega(t) - \omega(t-T)}{T} - \omega(t), \quad (1)$$

де  $\omega(t)$  - значення кутового прискорення в момент часу  $t$ . Відповідно до [7] для абсолютної методичної похибки справедлива така формула:

$$\Delta_{1m} = \varepsilon_{measurm}(t) - \varepsilon(t), \quad (2)$$

$$\varepsilon_{measurm}(t) = \frac{\omega(t+T) - \omega(t)}{T} + \frac{1}{2}[\varepsilon(t+T) - \varepsilon(t)] \quad (3)$$

де  $\varepsilon_{measurm}$  - виміряне (обчислене) значення кутового прискорення, при вимірюванні постійного кутового прискорення методом фіксованого інтервалу часу  $T$ , тобто, коли  $\varepsilon(t) = \varepsilon_0$ , маємо такі вирази для кутових швидкостей:

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \varepsilon_0 t; \\ \omega(t+T) &= \varepsilon_0 (t+T). \end{aligned} \quad (4)$$

Після відповідних підстановок у вираз для  $\Delta_{1M}$  алгебраїчних перетворень отримуємо  $\Delta_{1M} = 0$ . Такий самий висновок маємо з [8]. Тут, враховуючи, що диференційований сигнал кутової швидкості на інтервалі кодування  $\left[ t_i - \frac{T}{2}; t_i + \frac{T}{2} \right]$ , для абсолютної методичної похибки в момент часу  $t_i$  отримаємо:

$$\begin{aligned} |\Delta_{1M}(t_i)| &\leq \max |\omega(t)| \frac{T^2}{24} \left[ t_i - \frac{T}{2}; t_i + \frac{T}{2} \right], \\ &\left[ t_i - \frac{T}{2}; t_i + \frac{T}{2} \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

при  $\varepsilon_0 = const$ ,  $\omega(t) = 0$  і, отже  $\Delta_{1M} = 0$ .

Таким чином, на підставі [7] і [8] можна сказати, що при дискретних вимірах постійних кутових прискорень методом нелінійного кодування кута повороту, методична похибка дорівнює нулю.

Перейдемо до розгляду методичної похибки вимірювання кутового прискорення методом нелінійного кодування фіксованим кутом повороту  $\varphi$  (рис.1).

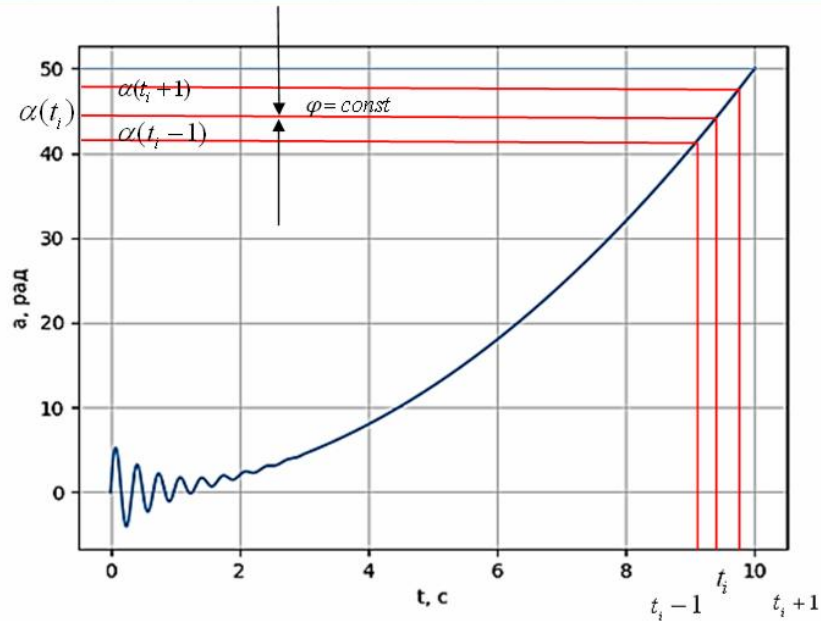


Рис. 1. Кодування інтервалів часу фіксованим кутом

У цьому випадку зручно перейти до зворотних величин і функцій кута повороту. Вважатимемо час  $t$  функцією кута повороту  $\alpha$ . Тоді за аналогією з кутовою швидкістю і кутовим прискоренням, можна отримати вираз для похідних  $\frac{dt}{d\alpha}$ ,  $\frac{d^2t}{d\alpha^2}$  та  $\frac{d^3t}{d\alpha^3}$ , які позначимо  $\omega_t$ ,  $\varepsilon_t$ ,  $\dot{\varepsilon}_t$ .

При рівноприскореному русі, описаному законом:

$$\alpha(t) = \alpha_0 + \dot{\alpha}_0 t + \frac{\varepsilon_0 t^2}{2}, \quad (5.1)$$

де  $\alpha_0, \dot{\alpha}_0$  - Початковий кут повороту і кутова швидкість, будуть справедливі наступні вирази для  $t(\alpha)$  та похідних цієї функції за поточним кутом  $\alpha$ .

$$t(\alpha) = \sqrt{\frac{2\alpha}{\varepsilon_0} + \left(\frac{\dot{\alpha}_0}{\varepsilon_0}\right)^2} - \frac{2\alpha_0}{\varepsilon_0} - \frac{\alpha_0}{\varepsilon_0}; \quad (6)$$

$$\omega_t = \frac{dt}{d\alpha} = + \frac{1}{\varepsilon_0 \sqrt{\frac{2\alpha}{\varepsilon_0} + \left(\frac{\dot{\alpha}_0}{\varepsilon_0}\right)^2 - \frac{2\alpha_0}{\varepsilon_0}}}; \quad (7)$$

$$\varepsilon_t = \frac{d^2t}{d\alpha^2} = - \frac{1}{\varepsilon_0^2 \left[ \frac{2\alpha}{\varepsilon_0} + \left(\frac{\dot{\alpha}_0}{\varepsilon_0}\right)^2 - \frac{2\alpha_0}{\varepsilon_0} \right]^{\frac{3}{2}}}; \quad (8)$$

$$\dot{\varepsilon}_t = \frac{d^3t}{d\alpha^3} = - \frac{3}{\varepsilon_0^3 \left[ \frac{2\alpha}{\varepsilon_0} + \left(\frac{\dot{\alpha}_0}{\varepsilon_0}\right)^2 - \frac{2\alpha_0}{\varepsilon_0} \right]^{\frac{5}{2}}}. \quad (9)$$

Вид функцій, що описуються виразами (6)-(9) при нульових початкових умовах  $\alpha_0 = 0, \dot{\alpha}_0 = 0$  показано на рис. 2. (дод. 1). Якщо у формули (7)-(9) замість  $\alpha$  підставити вираз (5.1), то отримаємо:

$$\begin{aligned}\omega_t &= \frac{dt}{d\alpha} = \frac{1}{\varepsilon_0 t + \dot{\alpha}(t_0)} = \frac{1}{\dot{\alpha}(t)}; \\ \varepsilon_t &= \frac{d^2 t}{d\alpha^2} = -\frac{\varepsilon_0}{[\varepsilon_0 t + \dot{\alpha}(t_0)]^3} = -\frac{\varepsilon_0}{[\dot{\alpha}(t)]^3}; \\ \dot{\varepsilon}_t &= \frac{d^3 t}{d\alpha^3} = \frac{3\varepsilon_0^2}{[\varepsilon_0 t + \dot{\alpha}(t_0)]^5} = \frac{3\varepsilon_0^2}{[\dot{\alpha}(t)]^5}.\end{aligned}\tag{10}$$

Тоді формулу дискретного вимірювання швидкості зворотної функції кута повороту методом фіксованого кута  $\varphi = const$  на інтервалі  $[\alpha_i - \varphi; \alpha_i]$  можна подати у вигляді:  $\omega_t\left(\alpha_i - \frac{\varphi}{2}\right) = \frac{t(\alpha_i) - t(\alpha_i - \varphi)}{\varphi}$ .

Звідси за визначенням для абсолютної похибки  $\Delta_{2M}$  вимірювання швидкості зміни інтервалів часу, справедливий вираз:

$$\Delta_{2M}\left[\omega_t\left(\alpha_i - \frac{\varphi}{2}\right)\right] = \frac{t(\alpha_i) - t(\alpha_i - \varphi)}{\varphi} - \omega_t\left(\alpha_i - \frac{\varphi}{2}\right).$$

Відповідно до [8], для середньої частини кутових інтервалів вимірювань швидкостей  $\omega_t\left(\alpha_i \pm \frac{\varphi}{2}\right)$  маємо:

$$\begin{aligned}\Delta_{2M}\left[\omega_t\left(\alpha_i \pm \frac{\varphi}{2}\right)\right] &\leq \max|\dot{\varepsilon}_t| \frac{\varphi^2}{24}; \\ &[\alpha_i; \alpha_i + \varphi]; \\ &[\alpha_i - \varphi; \alpha_i].\end{aligned}\tag{11}$$

Тоді вираз для методичної похибки виміру прискорення інтервалів часу при повороті на кут  $\alpha_i$  можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned}\Delta_{2M}[\delta_t(\alpha_i)] &= \frac{\omega_t\left(\alpha_i + \frac{\varphi}{2}\right) \pm \Delta_{2M}\left[\omega_t\left(\alpha_i + \frac{\varphi}{2}\right)\right] - \omega_t\left(\alpha_i - \frac{\varphi}{2}\right) \pm \\ &\dots \frac{\pm \Delta_{2M}\left[\omega_t\left(\alpha_i - \frac{\varphi}{2}\right)\right]}{\varphi} - \varepsilon_t(\alpha_i).\end{aligned}\tag{12}$$

Ввівши позначення  $\alpha_i + \frac{\varphi}{2} = \xi_i$ , перепишемо цей вираз у вигляді:

$$\Delta_{2M}[\varepsilon_t(\alpha_i)] = \frac{\omega_t(\xi_i) \pm \Delta_{2M}[\omega_t(\xi_i)] - \omega_t(\xi_i - \varphi) \pm \Delta_{2M}[\omega_t(\xi_i - \varphi)]}{\varphi} - \varepsilon_t(\alpha_i)\tag{13}$$

Розклавши  $\omega_t(\xi_i - \varphi)$  в ряд Тейлора і обмежуючись трьома членами ряду з (13), після алгебраїчних перетворень отримаємо:

$$\Delta_{2M}\varepsilon_t(\alpha_i) \approx \frac{\Delta_{2M}\omega_t(\xi_i)}{\varphi} - \frac{\Delta_{2M}\omega_t(\xi_i - \varphi)}{\varphi} - \frac{\dot{\varepsilon}_t(\alpha_i)\varphi}{2}.\tag{14}$$

Вважатимемо тепер  $\frac{\Delta_{2M}\omega_t(\xi_i)}{\varphi}$ ,  $\frac{\Delta_{2M}\omega_t(\xi_i - \varphi)}{\varphi}$  і  $\frac{\dot{\varepsilon}_t(\alpha_i)\varphi}{2}$  випадковими величинами, рівномірно розподіленими в інтервалах  $\frac{\Delta_{\max}\omega_t}{\varphi}$  і  $\frac{(\dot{\varepsilon}_t \max)\varphi}{2}$ .

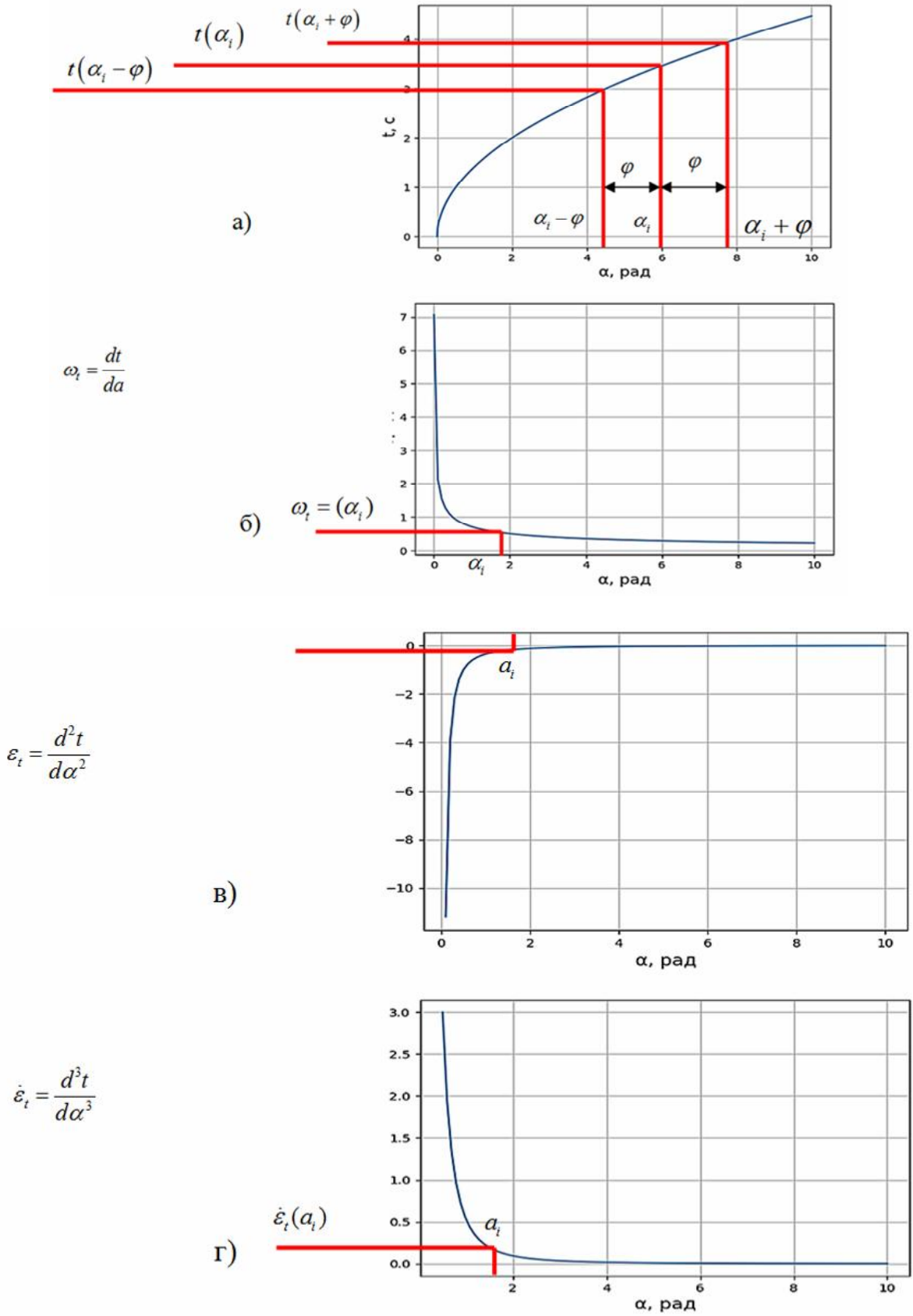


Рис. 2. Вид функцій, що описуються виразом (6)-(9), за нульових початкових умов  $\alpha_0 = 0, \dot{\alpha}_0 = 0$ .

Щільність розподілу випадкової величини  $\Delta_{2M}\varepsilon_i(\alpha_i)$  є композиція законів розподілу її складових. Визначимо довірчу межу композиції рівномірних розподілів вищезазначених випадкових величин. Для розрахунку скористаємося формулою, наведеною в [9]

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2} \quad (15)$$

де  $\theta$  - довірча межа сумарної похибки;  $\theta_i$  - межа  $i$ -ї рівномірно розподіленої складової похибки;  $k$  - коефіцієнт, що відповідає обраній довірчій ймовірності;  $m$ -число складових похибки.

Відповідно до [9] коефіцієнт  $k$  залежить від числа складових похибки та від відношення  $C$  довжин інтервалів, на яких рівномірно розподілені складові похибки. Так, всі інтервали розподілу мають однакову розмірність зворотної функції кутового прискорення - секунда на радіан у квадраті. З таблиці значень коефіцієнта  $k$ , наведеної в [9], при  $m=3$ ,  $C=1$  та довірчій ймовірності складових  $p=0,99$ , отримуємо  $k=1,376$ . Тоді з огляду на деяке завищення значень  $k$  через обране співвідношення довжин інтервалів розподілу  $C=1$ , можна записати:

$$\theta_{2M}[\varepsilon_i(\alpha_i)] \leq 1,376 \sqrt{2 \left( \frac{\Delta \max \omega_i}{\varphi} \right)^2 + \left[ \frac{(\dot{\varepsilon}_i \max) \varphi}{2} \right]^2}. \quad (16)$$

Звідси

$$\theta_{2M}[\varepsilon_i(\alpha_i)] \leq \frac{3,78(\Delta_{\max} \omega_i)^2}{\varphi^2} + \frac{1,89\varphi^2 (\dot{\varepsilon}_{i \max})^2}{4} \quad (17)$$

або з урахуванням (11):

$$\theta_{2M}^2[\varepsilon_i(\alpha_i)] \leq 0,476 \cdot \varphi^2 \cdot \dot{\varepsilon}_i^2 \max, \quad (17.1)$$

При нульових початкових умовах, тобто коли  $\alpha(t_0) = 0, \dot{\alpha}(t_0) = 0$  з (12), отримаємо:

$$\varepsilon_{i \max} = \frac{3}{\varepsilon_0^3 [t(\alpha_i - \varphi)]^5}, \quad (18)$$

де  $t(\alpha_i - \varphi)$  - величина, що відповідає моменту початку кожного  $i$ -го виміру кутового прискорення.

З (10), при  $\alpha(t_0) = 0$  маємо  $\varepsilon_i = -\frac{1}{\varepsilon_0^2 t^3}$ . Нехай  $\varepsilon_i$  отримує приріст рівний  $\theta_{2M}[\varepsilon_i(\alpha_i)]$ , тоді  $\theta_{2M}(\varepsilon_0)$  визначимо із співвідношення:

$$\varepsilon_i(\alpha_i) \pm \theta_{2M}[\varepsilon_i(\alpha_i)] = -\frac{1}{[\varepsilon_0 \pm \theta_{2M}(\varepsilon_0)]^2 t^3}. \quad (19)$$

Звідси:

$$\pm \theta_{2M}[\varepsilon_i(\alpha_i)] = -\frac{1}{[\varepsilon_0 \pm \theta_{2M}(\varepsilon_0)]^2 t^3} + \frac{1}{\varepsilon_0^2 t^3}. \quad (20)$$

Зробивши алгебраїчні перетворення і нехтуючи членами другого та вище порядку меншості, отримаємо:

$$\theta_{2M}(\varepsilon_0) = \frac{\varepsilon_0^3 t^3 \theta_{2M}[\varepsilon_i(\alpha_i)]}{2 \{1 - \varepsilon_0^2 t^3 \theta_{2M}[\varepsilon_i(\alpha_i)]\}}. \quad (21)$$

З огляду на те, що відносна довірча похибка  $\delta_{2M} = \frac{\theta_{2M}(\varepsilon_0)}{\varepsilon_0}$  і що  $\delta_{2M}(\varepsilon_0) \ll \varphi$ , можна записати:

$$\theta_{2M}[\varepsilon_i(\alpha_i)] = \frac{2\delta_{2M}}{\varepsilon_0^2 t^3}, \quad (22)$$

а для  $\theta_{2M} \max[\varepsilon_i(\alpha_i)]$ , буде справедливим вираз:

$$\theta_{2M \max} [\varepsilon_i(\alpha_i)] = \frac{2\delta_{2M}}{\varepsilon_0^2 [t(\alpha_i - \varphi)]^3}, \quad (23)$$

Тоді з (17.1) відповідно до (18) і (22) отримаємо:

$$\delta_{2M}(\alpha_i) \leq \frac{\varphi}{\varepsilon_0 [t(\alpha_i - \varphi)]^2}, \quad (24)$$

Згідно з формулами (5.1) і (6), для  $t(\alpha_i - \varphi)$  за нульових початкових умов можна записати:

$$t(\alpha_i - \varphi) = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 t_i^2 - 2\varphi}{\varepsilon_0}}, \quad (25)$$

тоді вираз (24) відповідно набуває вигляду:

$$\delta_{2M}(t_i) \leq \frac{\varphi}{\varepsilon_0 t_i^2 - 2\varphi}, \quad (26)$$

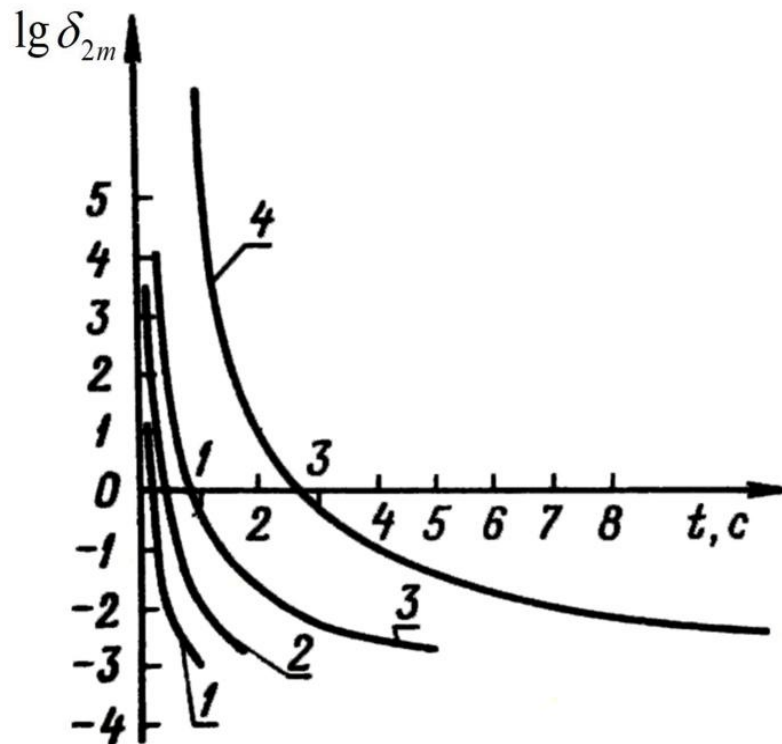


Рис. 3. Залежність величини  $\lg \delta_{2m}$  від значення  $t_i$  (при  $\varphi = 0,05 \text{ рад}$ )  
1 – 100; 2-10; 3 – 1,0; 4 - 0,1 рад/с<sup>2</sup>

### Висновок

Таким чином, вибираючи відповідне значення фіксованого кута  $\varphi$ , і момент початку виміру  $t_i - 1$ , можна забезпечити вимірювання з відносною методичною похибкою не вище заданого рівня. В даному випадку цей рівень визначається діапазоном постійних кутових прискорень, що вимірюються, технічними засобами, що формують кут  $\varphi$ , та моментом виміру. Залежно  $\lg \delta_{2M}(t_i) = f(t_i)$  для різних значень  $\varepsilon_0$  і  $\varphi$  представлені на рис. 3.

Оскільки тривалість постійного кутового прискорення обмежена, то графіки показують зміну методичної похибки до моменту часу, що відповідає двом повним оборотам валу, що задає постійне кутове прискорення.

**ДОДАТКИ**

Додаток 1

Графік залежності похідної прискорення від кута повороту для прискореного обертального руху в діапазоні кутів від 0 до 10 рад

Формула	Код
<p><b>1</b></p> $t(\alpha) = \sqrt{\frac{2\alpha}{\varepsilon_0} + \left(\frac{\dot{\alpha}_0}{\varepsilon_0}\right)^2} - \frac{2\alpha_0}{\varepsilon_0} - \frac{\alpha_0}{\varepsilon_0};$	<p><b>2</b></p> <pre>import numpy as np import matplotlib.pyplot as plt # Значення параметрів alpha_0 = 0 # Початковий кут повороту (у радіанах) alpha_dot_0 = 0 # початкова кутова швидкість (у рад/с) epsilon_0 = 1 # кутове прискорення (в рад/с^2) # Функція для розрахунку часу в залежності від кутового положення валу def t(alpha):     return np.sqrt(2 * alpha / epsilon_0 + (alpha_dot_0 / epsilon_0)**2 - 2 * alpha_0 / epsilon_0 - alpha_0 / epsilon_0) # Генерація значень кутового положення валу alpha_values = np.linspace(0, 10, 1000) # Розрахунок значень часу t_values = np.array([t(alpha) for alpha in alpha_values]) # Побудова графіка plt.plot(alpha_values, t_values) plt.xlabel('α, рад', fontsize=14) plt.ylabel('t, с', fontsize=14) plt.grid(True) plt.show()</pre>
$\omega_t = \frac{dt}{d\alpha} = + \frac{1}{\varepsilon_0 \sqrt{\frac{2\alpha}{\varepsilon_0} + \left(\frac{\dot{\alpha}_0}{\varepsilon_0}\right)^2} - \frac{2\alpha_0}{\varepsilon_0}}$	<pre>import numpy as np import matplotlib.pyplot as plt # Значення параметрів alpha_dot_0 = 0 # початкова кутова швидкість (у рад/с) epsilon_0 = 1 # кутове прискорення (в рад/с^2) alpha_0 = 0 # Початковий кут повороту (у радіанах) # Функція для розрахунку кутової швидкості в залежності від кута повороту def omega_t(alpha):     term = (2 * alpha) / epsilon_0 + (alpha_dot_0 / epsilon_0)**2 - (2 * alpha_0) / epsilon_0     return 1 / (epsilon_0 * np.sqrt(term)) # Генерація значень кутів повороту alpha_values = np.linspace(alpha_0 + 0.001, 10, 1000) # починаємо з ненульового значення, щоб уникнути поділу на нуль # Розрахунок значень кутової швидкості omega_values = np.array([omega_t(alpha) for alpha in alpha_values]) # Побудова графіка plt.plot(alpha_values, omega_values) plt.xlabel('α, рад', fontsize=14) plt.ylabel('ω_t, с', fontsize=14) plt.grid(True) plt.show()</pre>



Продовження додатку 1

1	2
$\varepsilon_t = \frac{d^2 t}{d\alpha^2} = - \frac{1}{\varepsilon_0^2 \left[ \frac{2\alpha}{\varepsilon_0} + \left( \frac{\dot{\alpha}_0}{\varepsilon_0} \right)^2 - \frac{2\alpha_0}{\varepsilon_0} \right]^{\frac{3}{2}}};$	<pre>import numpy as np import matplotlib.pyplot as plt # Значення параметрів alpha_dot_0 = 0 # початкова кутова швидкість (у рад/с) epsilon_0 = 1 # кутове прискорення (в рад/с^2) alpha_0 = 0 # Початковий кут повороту (у радіанах) # Функція для розрахунку прискорення в залежності від кута повороту def epsilon_t(alpha):     term = (2 * alpha) / epsilon_0 + (alpha_dot_0 / epsilon_0) ** 2 - (2 * alpha_0) / epsilon_0     return -1 / (epsilon_0**2 * term**(3/2)) # Генерація значень кутів повороту alpha_values = np.linspace(alpha_0 + 0.1, 10, 1000) # починаємо з ненульового значення, щоб уникнути поділу на нуль # Розрахунок значень прискорення epsilon_values = np.array([epsilon_t(alpha) for alpha in alpha_values]) # Побудова графіка plt.plot(alpha_values, epsilon_values) plt.xlabel('α, рад', fontsize=14) plt.ylabel('ε_t, с', fontsize=14) plt.grid(True) plt.show()</pre>
$\dot{\varepsilon}_t = \frac{d^3 t}{d\alpha^3} = - \frac{3}{\varepsilon_0^3 \left[ \frac{2\alpha}{\varepsilon_0} + \left( \frac{\dot{\alpha}_0}{\varepsilon_0} \right)^2 - \frac{2\alpha_0}{\varepsilon_0} \right]^{\frac{5}{2}}}.$	<pre>import numpy as np import matplotlib.pyplot as plt # Значення параметрів alpha_dot_0 = 0 # початкова кутова швидкість (у рад/с) epsilon_0 = 1 # кутове прискорення (в рад/с^2) alpha_0 = 0 # Початковий кут повороту (у радіанах) # Функція для розрахунку похідної прискорення в залежності від кута повороту def epsilon_dot_t(alpha):     term = (2 * alpha) / epsilon_0 + (alpha_dot_0 / epsilon_0) ** 2 - (2 * alpha_0) / epsilon_0     return 3 / (epsilon_0**3 * term**(5/2)) # Генерація значень кутів повороту alpha_values = np.linspace(alpha_0 + 1, 10, 1000) # починаємо з ненульового значення, щоб уникнути поділу на нуль # Розрахунок значень похідної прискорення epsilon_dot_values = np.array([epsilon_dot_t(alpha) for alpha in alpha_values]) # Побудова графіка plt.plot(alpha_values, epsilon_dot_values) plt.xlabel('α, рад', fontsize=14) plt.ylabel('\$\dot{\varepsilon}_t\$, с', fontsize=14) plt.grid(True) plt.show()</pre>

**Список літератури**

1. Єжов С. М., Макарець М. В., Романенко О. В. Класична механіка. — К. : ВПЦ "Київський університет", 2008. — 480 с.
2. Демська Н. П. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: Монографія. – Х. :, 2022. – 427 с.
3. Кучерук, В. Ю., Васілевський, О. М., & Наталич, О. М. (2007). Розвиток частотних методів визначення моментних характеристик електричних машин. Вісник Інженерної Академії України, № 3-4: 149-154.
4. Подчашинський, Ю. О. (2008). Вимірювання параметрів обертового руху на основі алгоритмічної обробки двовимірних відеозображень. Вісник ЖДТУ. Серія " Технічні науки", (4 (47)), 100-108.
5. Беячков А.В., Гуськов А.А., Юрманов С.Ю. (2016). Блок измерения угловой скорости и ускорения углового движения. Приволжский научный вестник, (12-2 (64)), 5-10.
6. Поколенко, Олег. (2015). Способ измерения углового ускорения. Theory and methods of learning mathematics, physics, informatics. 13. 147-150. 10.55056/tmn.v13i3.996.
7. Іванов В. А. Вибір періоду дискретності при вимірі швидкостей та прискорень. – Вимірювальна техніка, 1978. № 1, с. 46-48
8. Левідов В. А., Тихонов О. Н., Цивірко Г. П. Вимірювання швидкостей. М.: - Вид-во стандартів. 1972, 258 з
9. Кудряшова Ж. Ф. Розробка та обґрунтування методів статистичної обробки результатів спостереження при прямих та непрямих вимірах високої точності. Автореф. дис. - Л.: ВНДІМ, 1976, 23 с.

УДК 004.4'24:681.5.015.23

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.28

**Ю.В. Трофімова, І.С. Кондіус, Л.Ю. Федік***Луцький національний технічний університет***ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ МЕРЕЖ  
ОБ'ЄКТІВ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ**

*У статті викладено основні стадії проектування ліній зв'язку мережі. Розглянуто вибір типу з'єднання між пристроями та протоколів, які використовуються для проектування ліній зв'язку обчислювальних мереж. Досліджено їх переваги і недоліки. А також зазначені основні стандарти, якими керуються для проектування цих ліній зв'язку для об'єктів систем автоматизації. Крім цього враховані технологічні аспекти, які необхідно враховувати для досягнення оптимальної продуктивності, надійності та безпеки проектуючої лінії зв'язку обчислювальної мережі.*

*Ключові слова:* лінія зв'язку, обчислювальна мережа, проектування, стандарт.

**Yu.V. Trofimova, I.S. Kondius, L.Y. Fedik****FEATURES OF COMPUTER NETWORK COMMUNICATION LINE DESIGN  
AUTOMATION SYSTEM OBJECTS**

*The article outlines the main stages of designing network communication lines. The choice of the type of connection between devices and the protocols used for the design of communication lines of computer networks is considered. Their advantages and disadvantages are studied. Also, the main standards that are used to design these communication lines for objects of automation systems are specified. In addition, the technological aspects that must be taken into account in order to achieve optimal performance, reliability and security of the designing communication line of the computer network are taken into account.*

*Key words:* communication line, computer network, design, standard.

**Постановка проблеми.** Стрімкий розвиток техніки і технологій, неможливий без передачі великого обсягу даних мережами. Які стали надійно і високоефективно застосовуватися як на виробництві, так і в побуті. Під час проектування гнучких автоматизованих виробництв і пунктів управління об'єктами в системах автоматизації важливим етапом є проектування ліній зв'язку обчислювальних мереж. Наявність на підприємстві локальної обчислювальної мережі дозволяє користувачам колективно застосовувати різні спеціалізовані засоби та інструменти для вирішення професійних завдань. Внаслідок об'єднання комп'ютерів у мережу, якісного і надійного зв'язку між ними, забезпечення максимальної продуктивності та ефективності роботи мережі в цілому [1].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженнями ліній зв'язку обчислювальних мереж займалися такі вчені як: Чекмарьов Ю.В. (2009), Ахрамович В.М. (2010), Колесниченко Д.Н. (2011), Коломосець Г.П. (2012), Карпенко М.Ю. (2019), Трегуб В.Г. (2019) та інші.

**Вирішення невирішених раніше частин.** Однак невирішеними питанням під час проектування обчислювальних мереж залишилися лінії зв'язку обчислювальних мереж систем автоматизації.

**Формулювання цілей статті.** Тому формування етапів і особливостей проектування ліній зв'язку обчислювальних мереж стало завданням дослідження.

**Виклад основного матеріалу.** Для побудови комп'ютерних мереж застосовуються лінії зв'язку. Серед основних стадій проектування ліній зв'язку мережі слід виділити такі:

1. планування і дизайн мережі (визначення потреб користувачів і розміщення вузлів мережі, вибір технологій та протоколів, які будуть використовуватися для побудови мережі);
2. вибір обладнання (визначення типу обладнання, яке буде використовуватися для створення мережі, включаючи маршрутизатори, комутатори, кабелі тощо, розміщення вузлів мережі та потребу в пропускну здатності);
3. встановлення обладнання (монтаж, настройка і підключення кабелів, налаштування маршрутизаторів, комутаторів і іншого обладнання);
4. встановлення програмного забезпечення на кожному вузлі мережі (операційні системи, антивірусне програмне забезпечення, брандмауери тощо);
5. тестування та відлагодження мережі для перевірки її роботоздатності та надійності (перевірка з'єднань, швидкості передачі даних, виявлення та виправлення помилок і проблем, які можуть виникнути в процесі використання мережі);
6. забезпечення безпеки (використання шифрування для захисту передачі даних,

налаштування брандмауерів і інших захисних програм, а також забезпечення фізичної безпеки обладнання);

7. моніторинг і управління мережею (моніторинг швидкості передачі даних, стану обладнання та інших параметрів мережі, а також віддалене управління мережею за допомогою спеціального програмного забезпечення);

8. резервне копіювання та відновлення роботи мережі в разі виникнення помилок або аварій [2].

Однак локальні обчислювальні мережі на відміну від ліній зв'язку мережі являють собою систему комунікацій, яка дозволяє спільно користуватися ресурсами підключених комп'ютерів. Це можуть бути принтери, модеми, диски та інші пристрої. Локальні обчислювальні мережі дозволяють розташувати пристрої на значній відстані один від одного (до декількох кілометрів). Як правило, їх з'єднують швидкісні лінії зв'язку, а швидкість обміну при цьому становить від 1 до 10 Мбіт за секунду і більше.

Під час проектування локальних обчислювальних мереж дослідження їх основних характеристик здійснюється згідно стандарту ДСТУ ІЕС 60847:2003 Характеристика локальних обчислювальних мереж, а визначення технічних вимог до локальних обчислювальних мереж за ДСТУ 2229-93 "Системи оброблення інформації. Локальні обчислювальні мережі" [3].

Зокрема, для проектування волоконно-оптичних мереж користуються стандартом EN 50173-2007, який містить рекомендації щодо встановлення, налаштування та експлуатації мережі, а також дозволяє визначити мінімальні вимоги до якості зв'язку та пропускної здатності. А саме: рекомендації щодо вибору технічних засобів зв'язку, протоколів передачі даних, а також технічні вимоги до параметрів мережі: пропускної спроможності та швидкості передачі даних [4].

Наступним етапом проектування локальних обчислювальних мереж є вибір типу з'єднання між пристроями. Які класифікуються залежно від вимог до швидкості та надійності передачі даних, а також фізичної топології мережі на: коаксіальний кабель, вита пара, волоконно-оптичний кабель.

Коаксіальний кабель є одним із найпоширеніших типів з'єднання. Хоча він має досить низьку вартість, проте існує обмеження в швидкості передачі даних, які визначаються за ДСТУ EN 50117-1-2014 Кабелі коаксіальні для кабельних розподільчих мереж. Частина 1. Загальні технічні вимоги. У той же час вита пара сучасніший тип з'єднання, що використовується в більшості мереж Ethernet. Вона більш дорожча, ніж коаксіальний кабель і забезпечує більш високу швидкість передачі. До найсучасніших типів з'єднання слід віднести волоконно-оптичний кабель, який забезпечує найвищу швидкість передачі даних завдяки скляному чи пластиковому волокну, що передає дані у вигляді світлових імпульсів. Однак, недоліком цього типу з'єднання є найвища ціна і потреба особливого обладнання під час встановлення та обслуговування. Його вибір здійснюється за допомогою стандарту DIN VDE 0888 Маркування волоконно-оптичних кабелів [5].

Під час проектування волоконно-оптичних мереж також керуються стандартами ДСТУ 3256—95 "Системи передавання волоконно-оптичні. Терміни та визначення", ДСТУ 3257-95 Системи передавання волоконно-оптичні. Класифікація та умовні позначення, ДСТУ 3345—96 Системи передавання волоконно-оптичні. Загальні технічні вимоги. Завдяки цим стандартам визначають технічні параметри оптичних кабелів, а також норми їх експлуатації та контролю. А за допомогою стандарту ДСТУ EN 50173-1:2015 Інформаційні технології. Загальні кабельні системи. Частина 1. Загальні вимоги, визначають рекомендації щодо встановлення, налаштування, експлуатації мережі та вимоги до якості зв'язку і пропускної здатності [6].

Наступним етапом проектування локальних оптичних мереж є визначення фізичної топології мережі. Яка визначає фактичне розташування пристроїв у мережі та спосіб, яким вони з'єднані. Існує кілька типів фізичних топологій: зірка, кільце, шина та дерево.

Топологія зірка є найпоширенішою топологією у сучасних мережах. Завдяки тому, що всі пристрої пов'язані з центральним комутатором, керуючим передачею даних між пристроями, забезпечується високий рівень надійності. Через те, що відмова одного з пристроїв не зможе вплинути на роботу інших.

Стабільне застосування топології кільце може бути утруднене у випадку, якщо один із пристроїв виходить з ладу. Тому що всі пристрої з'єднані в кільце і дані передаються кільцем у одному напрямку. Така топологія вирізняється низькою вартістю, завдяки обмеженості кількості пристроїв, які можна підключити до кабелю.

Наступний тип фізичної топології мережі шина передбачає підключення пристроїв до одного кабелю. І забезпечує високу надійність і масштабованість як і топологія дерево. Проте останній тип топології потребує значної кількості кабелів і комутаторів [7].

До головних етапів проектування ліній зв'язку обчислювальних мереж відноситься вибір протоколів, які використовуватимуться у мережі. Адже завдяки протоколу здійснюється визначення способу передачі даних між пристроями, забезпечується безпека та конфіденційність інформації, що передається.

У сучасних локальних обчислювальних мережах застосовується велика різноманітність протоколів. Серед них найбільшою популярністю користуються Ethernet, TCP/IP, HTTP, FTP і SMTP.

Кожен із цих видів має свої особливості та переваги.

Так Ethernet — це найбільш популярний протокол кабельних комп'ютерних мереж, який функціонує на фізичному та каналному рівні мережевої моделі OSI. Було встановлено, що у 2016 році 85% комп'ютерів на планеті були підключені до мереж за протоколом Ethernet.

Ethernet як сімейство мережевих протоколів застосовується для передачі даних у локальних мережах (LAN). Вони визначають формат кадрів даних, метод доступу до мережі, а також способи передачі даних фізичним каналом зв'язку. Протокол Ethernet використовується для з'єднання комп'ютерів, серверів, принтерів, роутерів і іншого мережевого обладнання в одну локальну мережу. Для передачі даних протокол використовує метод доступу з детекцією несучої (CSMA/CD), який забезпечує ефективне використання пропускної спроможності каналу зв'язку. У процесі передачі даних протокол Ethernet використовує формат кадрів, що містять MAC- адреси призначення та джерела, даний пакет, контрольні суми та інші дані, що необхідні для правильної передачі даних. Ці кадри передаються фізичним каналом зв'язку витій парі кабелю, оптоволокну чи бездротовим каналам зв'язку.

Міжнародний комітет IEEE802, що спеціалізується на стандартизації в галузі локальних комп'ютерних мереж обмежує використання в локальних мережах кабелів довжиною до кількох кілометрів, підтримки декількох сотень станцій різноманітної топології зі швидкістю передачі інформації порядку 1-2 і більше Мбіт/с [8].

Враховуючи найбільшу популярність мережевого протоколу Ethernet, розглянемо стандарти, які застосовуються для його проектування в локальних обчислювальних мережах. До них відносяться IEEE 802.1b Інформаційні технології, мережі зв'язку і інформаційний обмін між системами, локальні і територіальні мережі, загальні специфікації, управління локальними і міськими мережами (1992), IEEE 802.2 Телекомунікаційний і інформаційний обмін між системами на каналному рівні (сумісно з стандартами IEEE 802.3, 802.4, 802.5) (1998) і IEEE 802.3 Характеристика кабельної системи для розподілених локальних і міських мереж з шинною топологією та товстим коаксіальним кабелем (10Base5), спосіб множинного доступу з контролем несучої виявленням конфліктів (CSMA/CD) (1995).

Завдяки стандарту IEEE 802.3 (частіше відомий як Ethernet) здійснюється визначення фізичних і логічних аспектів передачі даних мережею, параметрів кабелів, коннекторів, методів модуляції сигналу, форматів кадрів і інших аспектів фізичної технології мережі. А IEEE 802.2 (відомий як LLC) - отримання опису логічного каналу доступу до мереж, визначення формату кадрів даних, управління доступом до мережі та інші аспекти логічної технології мережі.

Визначити норми міжмодульного мостування в Ethernet-мережах, отримати опис, яким чином мережеві комутатори повинні взаємодіяти один із одним, щоб забезпечити ефективну передачу даних проектувальник здійснює згідно стандарту IEEE 802.1b (часто відомий як MAC Bridging) [9].

До найпоширеніших протоколів в інтернеті відноситься також протокол TCP/IP. Який забезпечує надійну передачу даних між пристроями та є основою інтернет-протоколу.

У той же час протокол HTTP використовується для передачі даних веб-сторінок між веб-сервером і веб-браузером. Він здійснює передачу інформації з високою швидкістю та має безліч додаткових функцій, таких як: кешування та керування сесіями.

На відміну від попередніх протоколів FTP використовується тільки для передачі файлів між пристроями. А надійна передача даних забезпечується завдяки безлічі функцій. Серед яких авторизація користувачів і керування правами доступу до файлів.

Для надсилання та отримання електронної пошти у локальних обчислювальних мережах використовується протокол SMTP. Завдяки якому забезпечується безпечна передача даних. Серед основних його функцій слід виділити перевірку правильності адреси електронної пошти та керування списками розсилки [10].

Під час проектування локальної обчислювальної мережі необхідно враховувати також такі фактори, як: швидкість передачі даних, пропускну спроможність, затримку і надійність. А також підбір обладнання відповідно до потреб користувачів і специфіки робочого процесу. Для цього

необхідно провести аналіз потреб користувачів, визначити особливості робочого процесу та оцінити технічні особливості обладнання.

Окрім цього, під час проектування ліній зв'язку обчислювальних мереж важливо враховувати питання безпеки та захисту від несанкціонованого доступу до мережі. Для цього можна використовувати різноманітні методи та технології, такі як: шифрування даних, аутентифікація користувачів і налаштування файрволів.

#### **Висновки**

Отже, проектування ліній зв'язку обчислювальних мереж є складним і відповідальним процесом, який потребує ретельного аналізу технічних вимог і врахування сучасних тенденцій та технологій. У процесі проектування ліній зв'язку обчислювальних мереж необхідно враховувати різноманітні фактори. Серед яких потреби користувачів, технічні характеристики обладнання, безпека та інші, що впливають на продуктивність та надійність мережі. При цьому необхідно дотримуватися певних стандартів. Адже правильно спроектована лінія зв'язку обчислювальної мережі забезпечить ефективну та надійну її роботу, що є важливим фактором для проектуючих об'єктів систем автоматизації.

#### **Перспективи подальших досліджень**

Особливості волоконно-оптичних систем передавання інформації під час проектування ліній зв'язку обчислювальних мереж об'єктів систем автоматизації.

#### **Інформаційні джерела:**

1. Федік Л.Ю., Кондіус І.С. Основні етапи проектування систем автоматизації і аналіз застосовуючих програм для реалізації цього процесу // Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки» Луцьк: ЛНТУ, 2022. Випуск 74. С.122-128 // DOI 10.36910/775.24153966.2022.74.20
2. ВИМОГИ ДО СУЧАСНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ МЕРЕЖ. URL: <http://um.co.ua/4/4-15/4-153335.html>. (Дата звернення: 3.07.2023)
3. ДСТУ 2229-93 Системи оброблення інформації. Локальні обчислювальні мережі. Терміни та визначення. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=73890](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=73890). (Дата звернення: 3.07.2023)
4. EN 50173-1:2007. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/clc/cb4e34df-3051-4940-a870-5a37b6ba8016/en-50173-1-2007>. (Дата звернення: 3.07.2023)
5. ДСТУ EN 50117-1:2014 Кабелі коаксіальні для кабельних розподільчих мереж. Частина 1. Загальні технічні умови (EN 50117-1:2002, EN 50117-1:2002/A1:2006, EN 50117-1:2002/A2:2013, IDT). URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=87553](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=87553). (Дата звернення: 3.07.2023)
6. EN 50173-1:2015 Інформаційні технології. Загальні кабельні системи. Частина 1. Загальні вимоги (EN 50173-1:2011, IDT). URL: [http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id\\_doc=96652](http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page.html?id_doc=96652). (Дата звернення: 3.07.2023)
7. Топологія комп'ютерних мереж. URL: [https://stud.com.ua/53329/informatika/topologiya\\_kompyuternih\\_merezh](https://stud.com.ua/53329/informatika/topologiya_kompyuternih_merezh). (Дата звернення: 3.07.2023)
8. Карпенко М.Ю. Конспект лекцій з курсу «Комп'ютерні мережі» (для студентів усіх форм навчання спеціальностей 122 Комп'ютерні науки, 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, 126 Інформаційні системи та технології) / М.Ю. Карпенко, Н.В. Макогон; Харків.нац.ун-т міськ.гос-ва ім. О.М. Бекетова. Харків: ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2019. С. 13
9. Трегуб В.Г. Проектування систем автоматизації: Навч.посібник. К.: Видавництво Ліра-К, 2019. 344 с.
10. Типи мережевих протоколів і їх призначення (HTTP, IP, SSH, FTP, POP3, MAC) URL: <https://deltahost.ua/ua/tipi-merezhevix-protokoliv-i-ih-priznachennya-http-ip-ssh-ftp-pop3-mac.html>. (Дата звернення: 3.07.2023)

УДК: 53.043; 537.3

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.29

**В. М. Максимич***Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна***ІЄРАРХІЧНА ГЕТЕРОСТРУКТУРА, СИНТЕЗОВАНА НА ОСНОВІ  
НАШІВПРОВІДНИКОВОЇ МАТРИЦІ СЕЛЕНІДУ ІНДІЮ І СУПРАМОЛЕКУЛЯРНОГО  
КОМПЛЕКСУ ТІОСЕЧОВИНА<ДИХЛОРИД КОБАЛЬТУ>: ВИГОТОВЛЕННЯ ТА  
ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ**

*Сформовано клатрат  $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{CoCl}_2>>$  за допомогою інтеркаляційної технології із ієрархічним типом розміщення компонентів за принципом субгосподар<господар<гість>>. Методом імпедансної спектроскопії досліджено електропровідні та поляризаційні властивості отриманого клатрату в діапазоні частот  $10^3 - 10^6$  Гц. Вимірювання проводилися за нормальних умов, за накладання постійного магнітного поля напруженістю 220 кА/м та за освітлення (освітлення проводилося імітатором сонячного спектру потужністю 982 Вт/м<sup>2</sup>). Методом термостимульованого розряду в температурному інтервалі від 240 до 340 К досліджено будову домішкового енергетичного спектру біля рівня Фермі. У клатраті  $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{CoCl}_2>>$  зафіксовано прояв мемристороного ефекту, додатний магнітоємнісний ефект та фотоелектричний ефект величиною 25 мВ.*

*Ключові слова:* інтеркаляція, селенід індію, клатрат, ієрархічна архітектура, система господар-гість.

**V. M. Maksymych****HIERARCHICAL HETEROSTRUCTURE SYNTHESIZED ON THE BASIS OF AN  
INDIUM SELENIDE SEMICONDUCTOR MATRIX AND SUPRAMOLECULAR COMPLEX  
THIOUREA<COBALT(II) CHLORIDE>: FABRICATION AND PHYSICAL PROPERTIES**

*The  $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{CoCl}_2>>$  clathrate was formed using intercalation technology with a hierarchical arrangement of components according to the principle of subhost<host<guest>>. Conductive and polarizing properties of the obtained clathrate in the frequency range of  $10^3 - 10^6$  Hz were investigated using impedance spectroscopy. Measurements were carried out under normal conditions, with the application of a permanent magnetic field with a strength of 220 kA/m and under illumination (illumination was carried out by a solar spectrum simulator with a power of 982 W/m<sup>2</sup>). The structure of the impurity energy spectrum near the Fermi level was investigated using the thermostimulated discharge method in the temperature range from 240 to 340 K. In the  $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{CoCl}_2>>$  clathrate, the manifestation of the memristor effect, the positive magnetocapacitive effect and the photoelectric effect of 25 mV were recorded.*

*Keywords:* intercalation, indium selenide, clathrate, hierarchical architecture, host-guest system.

**Постановка проблеми.** Стрімкий розвиток електроніки спонукав до пошуку нових функціонально-гібридних неорганічно/органічних матеріалів збудованих на рівні нанорозмірних об'єктів. Перспективним напрямом формування заданих наногібридизованих композитів є, зокрема, поєднання у них неорганічних та органічних речовин. Найефективніше таке поєднання компонент можна реалізувати за допомогою побудови відповідних супрамолекулярних комплексів. Такий підхід дозволяє будувати складні структури типу господар-гість, у яких молекулярні центри господаря налаштовані на селективне зв'язування певного визначеного гостя за так званним принципом «замок-ключ», зберігаючи при цьому ідентичність обох компонент. Властивості сформованих клатратів визначаються хімічним складом компонент, їхнім просторовим розподілом, «архітектурою» і типом міжмолекулярного зв'язку. Оскільки супрамолекулярні зв'язки між гетероінгредієнтами слабкі (зв'язок нековалентних сил, водневий зв'язок, галогенний зв'язок, електростатичний зв'язок та вандерваальсова взаємодія), то такі утворення менш стабільні, ніж молекули, що їх утворюють і є кінетично більш лабільними та динамічно гнучкішими. Тому, з такими структурами пов'язано виникнення багатьох специфічних фізичних ефектів, які можуть мати практичне застосування, зокрема, при створенні альтернативних неелектрохімічних джерел енергії.

**Методологія досліджень.** Матрицею субгосподарем було використано напівпровідниковий монокристал InSe. Вирощений методом Бріджмена-Стокбаргера, монокристал володіє яскраво вираженою шаруватою структурою і n-типом провідності, а ширина забороненої зони (за оптичними даними) складає 1,22 еВ [1, 2] (рис. 1). Кристали селеніду індію можуть служити матрицею для впровадження різного роду атомів інших матеріалів. Ними можуть бути як органічні, так і неорганічні сполуки. Наприклад, у роботі [3] в InSe інтеркалювали прополіс, в



результаті чого була сформована самоорганізована нанорозмірна структура із межею розділу InSe/прополіс. Були проведені дослідження із інтеркаляцією неорганічних елементів в InSe [4, 5].

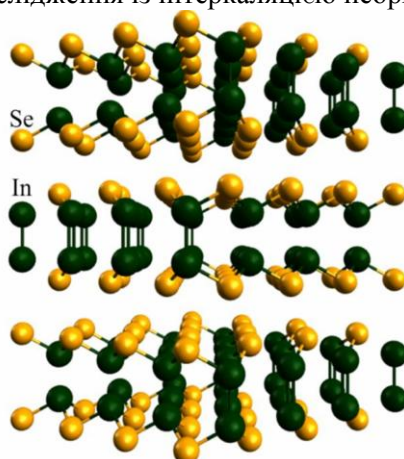


Рис. 1. Просторове зображення структури InSe.

Гостьовим компонентом, як проміжний господар, був вибраний органічний кавітанд тіосечовина ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$ ) (рис. 2). Тіосечовину також називають тіокарбамідом, 2-тіосечовиною, ізотіосечовиною [6]. Відстань зв'язку  $\text{C}=\text{S}$  становить 17,1 нм, відстані  $\text{C}-\text{N}$  в середньому 13,3 нм [7]. Господар-тіосечовина утворюється водневим зв'язком, і він може включати різноманітні гості-молекули відповідного розміру та форми [8]. Тіосечовина може виступати як проміжний господар завдяки міцним міжмолекулярним водневим зв'язкам між кислотними протонами груп  $\text{NH}_2$  і атомами кисню або сірки сусідніх молекул. В результаті з молекул сечовини утворюється хіральна спіральна порожниста трубка з мінімальним ван-дер-ваальсовим діаметром  $55\div 58$  нм. Дипольний момент тіосечовини становить  $18,86 \cdot 10^{-30}$  Кл\*м, відносна діелектрична проникність 2,224 [9]. Тіосечовина широко використовується в різних електрохімічних процесах [10]. У цю трубку можуть увійти гості з невеликим перерізом [11, 12].

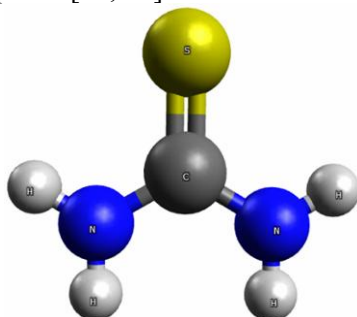


Рис. 2. Молекулярна структура тіосечовини.

Гостем було обрано неорганічний компонент дихлорид кобальту ( $\text{CoCl}_2$ ) [13, 14] (рис.3).

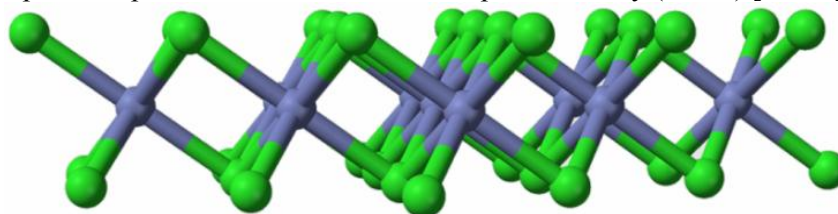


Рис. 3. Молекулярна структура дихлориду кобальту.

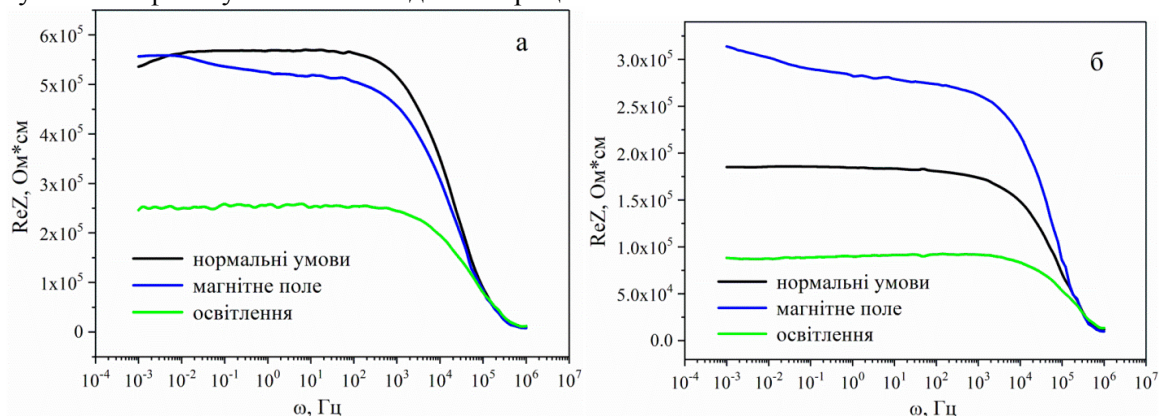
З метою дослідження механізмів струмопроходження та їх зміни при впровадженні супрамолекулярного комплексу  $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S} \leftarrow \text{CoCl}_2$  в напівпровідникову матрицю InSe, були виміряні імпедансні спектри за допомогою вимірювального комплексу "AUTOLAB" фірми "ECO CHEMIE" (Нідерланди) в напрямку кристалографічної осі  $\text{C}$  монокристалу в діапазоні частот  $10^{-3} \div 10^6$  Гц. Вимірювання імпедансних спектрів проводили за нормальних умов, в постійному магнітному полі (220 кА/м), та за освітлення (для стандартного сонячного спектру AM 1,5G загальна доступна

потужність становить  $982 \text{ Вт/м}^2$ ). Дія відповідних фізичних полів була направлена в напрямку пропускання вимірювального сигналу. Така геометрія вимірювань була обрана з метою колінеарної дії постійного магнітного поля та струму вимірювального сигналу.

З метою встановлення будови електронної енергетичної топології домішкових рівнів вимірювалися спектри термостимульованого розряду в режимі короткозамкнених контактів при лінійному нагріванні зі швидкістю  $5 \text{ }^\circ\text{C/хв}$ .

Впровадження гостьового контенту відбувалося за допомогою методики інкапсуляції, описаної, наприклад, в роботі [15]. При цьому, кавітат  $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{CoCl}_2>$  формувався попередньо при змішуванні насичених розчинів відповідних компонент у молярному співвідношенні 1:1.

**Викладення основного матеріалу.** На рис. 4 наведені частотні залежності реальної складової комплексного імпедансу 4-кратно розширеної матриці InSe (а) і сформованого на її основі клатрату  $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{CoCl}_2>>$  (б), виміряні за нормальних умов, у постійному магнітному полі та за освітлення. За нормальних умов поведінка залежності реальної частини комплексного опору від частоти характеризується вираженою частотною незалежністю в діапазоні  $10^{-3}$ - $10^2$  Гц, після чого переходить у спадну. Необхідно підкреслити неординарний характер  $\text{Re}Z(\omega)$  на низьких частотах – монотонний ріст із збільшенням частоти. Він може бути зумовлений дефектністю та неоднорідністю 4-кратно розширеної матриці InSe. Прикладене під час вимірювання постійне магнітне поле міняє вигляд  $\text{Re}Z(\omega)$ : крива стає частотозалежною у всьому досліджуваному діапазоні і набуває плавно спадного вигляду. При цьому, реальна частина комплексного опору починаючи із частоти  $5 \cdot 10^{-3}$  Гц зменшується за рахунок зєманівської делокалізації носіїв. Вплив освітлення на матрицю InSe, у свою чергу, призводить до 2-кратного зменшення  $\text{Re}Z$ , що зумовлено фоточутливістю вихідної матриці InSe.

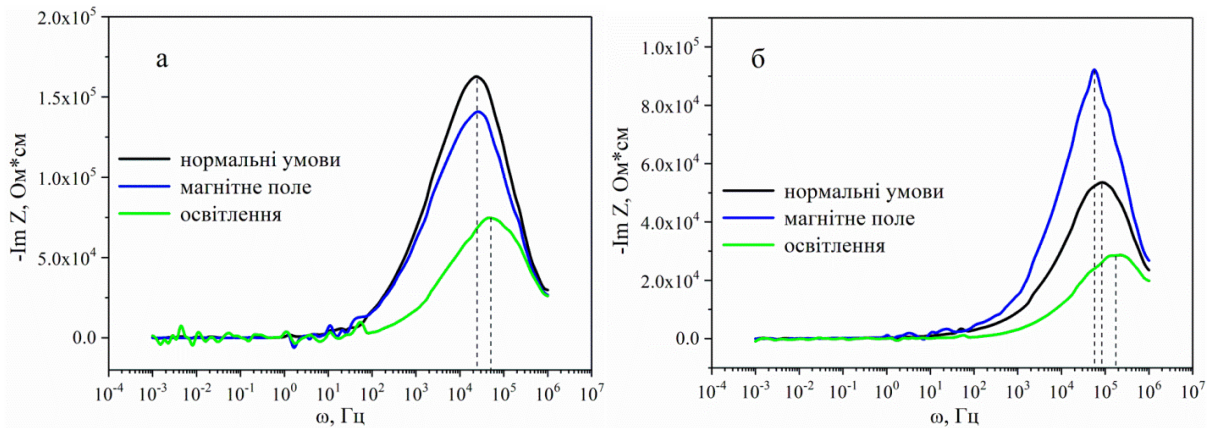


**Рис. 4. Частотні залежності дійсної складової питомого імпедансу 4-кратно розширеної матриці InSe (а) і клатрату  $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{CoCl}_2>>$  (б), виміряні за нормальних умов, в магнітному полі та за освітлення.**

Впровадження тіосечовини та дихлориду кобальту не призвело до суттєвих змін електропровідних властивостей досліджуваного клатрату  $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{CoCl}_2>>$  порівняно із 4-кратно розширеною матрицею InSe. Після інкапсуляції гостьових компонентів провідність в найнижкочастотнішій області (що відповідає струмопроходженню, зумовленому переважно делокалізованими носіями) збільшується майже втричі, що спричинено зростанням вільних носіїв заряду за рахунок гостьової підсистеми. У постійному магнітному полі для клатрату  $\text{InSe}<\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}<\text{CoCl}_2>>$  спостерігається абсолютно протилежна до матриці InSe поведінка: зафіксований додатній магніторезистивний ефект у всьому спостережуваному частотному діапазоні, який, найімовірніше, пов'язаний із зєманівським перерозподілом станів електронної підсистеми. Проте, характер поведінки  $\text{Re}Z(\omega)$  залишається незмінним. Як відомо, магнітне поле перешкоджає міжзонному тунелюванню і, таким чином, знижує провідність матеріалу. При відповідних параметрах перехід носіїв з валентної зони або домішкових мінізон у зону провідності може бути значно ускладнений. Крім того, магнітне поле знижує рухливість основних носіїв. Освітлення, як і для 4-кратно розширеної матриці InSe, призводить до 2-кратного зменшення дійсної частини комплексного опору, яке спричинено фоточутливістю селеніду індію у видимій області спектру.

Наступним кроком були проаналізовані результати вимірювань уявної частини комплексного імпедансу (рис. 5). Для вихідної 4-кратно розширеної матриці InSe спостерігається

характерний яскраво виражений основний релаксаційний максимум в околі частоти  $22 \cdot 10^3$  Гц, що відповідає рухливості носіїв заряду за даної температури. Постійне магнітне поле призводить до незначного зменшення (на 16%) за висотою основного релаксаційного максимуму. Під впливом освітлення спостерігається значно більше зменшення інтенсивності основного релаксаційного максимуму (більш як вдвічі) та його зміщення у сторону вищих частот. Такий результат викликаний фотоелектричним ефектом та зростанням при цьому рухливості носіїв.



**Рис. 5. Частотні залежності уявної складової питомого імпедансу 4-кратно розширеної матриці InSe (а) і клатрату InSe<CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S<CoCl<sub>2</sub>>> (б), виміряні за нормальних умов, в магнітному полі та за освітлення.**

Впровадження гостьового компонента та формування клатрату InSe<CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S<CoCl<sub>2</sub>>> призводить до 2-кратного зменшення  $-\text{Im}Z(\omega)$  із невеликим зміщенням основного релаксаційного максимуму (рис. 5б). Магнітне поле впливає на клатрат абсолютно протилежним чином, ніж на 4-кратно розширену матрицю. Накладання постійного магнітного поля призводить до зростання інтенсивності основного релаксаційного максимуму на 70 % та незначного його зміщення в сторону нижчих частот. Дане явище, як вже було сказано раніше, може бути пов'язане з тим, що магнітне поле перешкоджає тунелюванню через потенціальний бар'єр між напівпровідником та феромагнетиком. Вимірювання частотної залежності уявної складової комплексного імпедансу за освітлення показали, що пік релаксації зменшується на 90 % і він не набагато зміщується в сторону вищих частот. Також, за таких умов зникають низько- та середньочастотні осциляції, які були у випадку вихідної матриці.

Підтвердження вище наведених результатів бачимо і на діаграмах Найквіста (рис. 6). Спектри імпедансних вимірювань для усіх умов вимірювань мають форму незавершених півкіл, що пов'язано із обмеженістю частотного діапазону вимірювального обладнання. За нормальних умов крива годографу вихідної матриці InSe набуває звичного вигляду у формі півкола з низькочастотною ділянкою, паралельною до осі дійсної частини комплексного опору і напрямлена в сторону його зменшення (рис. 6а). Магнітне поле трансформує вигляд імпедансного спектру – комплексний опір зменшується за рахунок ефекту Зеємана, а низькочастотна ділянка паралельна до реальної частини комплексного опору змінює свій напрямок на протилежний – в сторону його зростання. Така поведінка годографу імпедансу при моделюванні є скінченним елементом постійної фази (BCPE), який відображає струмопроходження у просторово-обмеженій області з комплексною електропровідністю. Під дією освітлення дійсна та уявна складова комплексного опору зменшується більш як вдвічі. При цьому гілка годографу не змінює свого вигляду.

Впровадження комплексу CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S<CoCl<sub>2</sub>> в InSe не змінює кардинально вигляд діаграми Найквіста (рис. 6б). Вона залишається у формі незавершеного півкола, але вже без низькочастотної паралельної до реальної складової опору ділянки та з 2,5 рази меншим значенням комплексного опору. При моделюванні дану діаграму можна представити як паралельне підключення опору R та ємності C, що характеризують відповідно опір стадії перенесення електричного заряду та його накопичення. При поміщенні клатрату у постійне магнітне поле його комплексний опір зростає, а низькочастотна паралельна до реальної частини імпедансу ділянка направлена в сторону його зростання залишається як і для вихідної матриці. Освітлення ж, у свою чергу, призводить до 2-кратного зменшення комплексного опору із збереженням вигляду діаграми Найквіста.



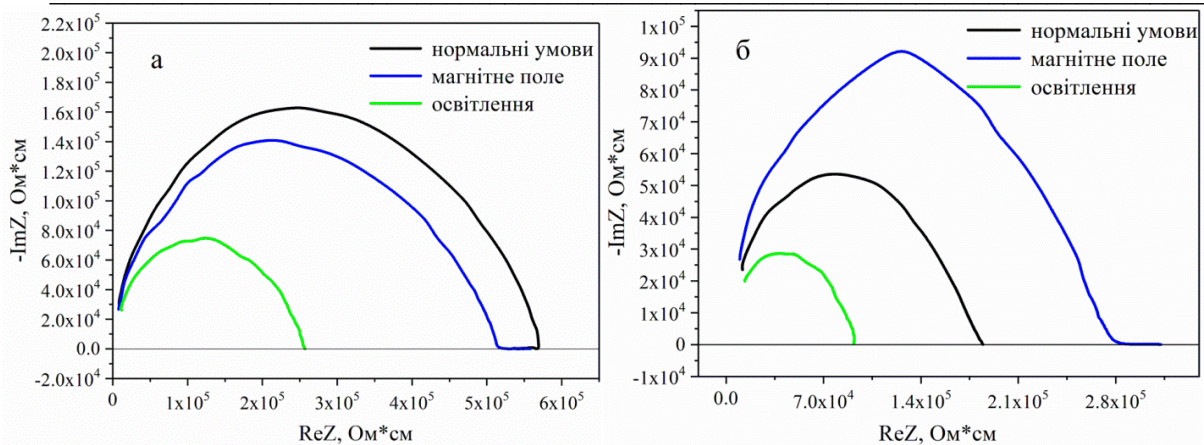


Рис. 6. Діаграми Найквіста 4-кратно розширеної матриці InSe (а) і клатрату InSe<CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S<CoCl<sub>2</sub>>> (б), виміряні за нормальних умов, в магнітному полі та за освітлення.

Також, були проміряні поляризаційні властивості 4-кратно розширеної матриці InSe, та клатрату InSe<CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S<CoCl<sub>2</sub>>> (рис. 7). Виходячи із практичних міркувань, будемо розглядати умови, за яких тангенс кута діелектричних втрат приймає значення менші за 1. Як видно з рис. 8, незалежно від умов вимірювання для вихідного кристалу тангенс кута діелектричних втрат приймає значення менші за 1 у вузькому високочастотному діапазоні:  $5 \cdot 10^4 - 10^6$  Гц. Діелектрична проникність, виміряна для матриці InSe набуває значень  $10^3$ . Можна констатувати, що магнітне поле не сильно впливає на вигляд та значення діелектричної проникності. Вплив світла дещо вагоміший. Зафіксований від'ємний фотодіелектричний ефект, який, найімовірніше, пов'язаний із безпосередньою взаємодією світла з напівпровідниковою матрицею InSe. У цьому випадку діелектрична проникність становить  $5 \cdot 10^2$ .

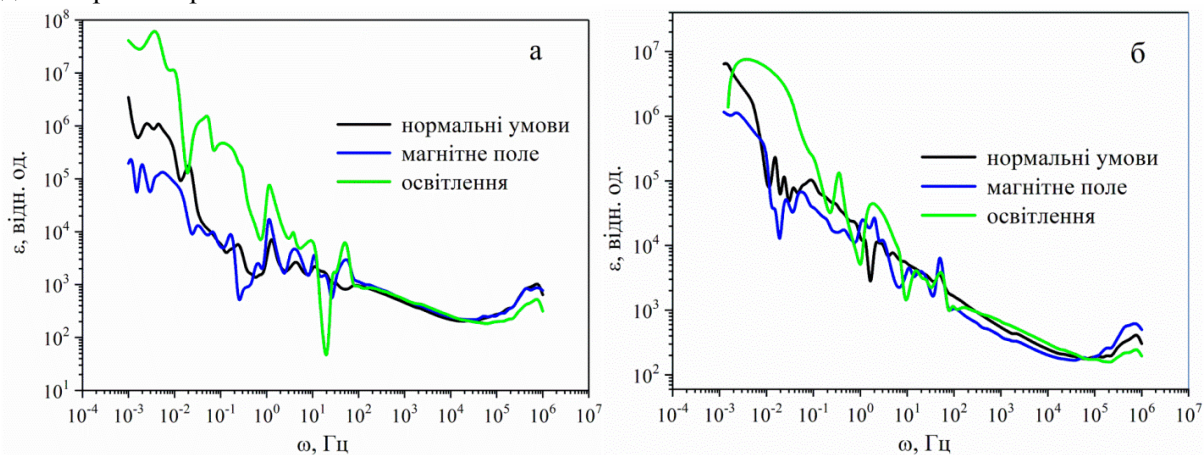


Рис. 7. Частотні залежності діелектричної проникності 4-кратно розширеної матриці InSe (а) і клатрату InSe<CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S<CoCl<sub>2</sub>>> (б), виміряні за нормальних умов, в магнітному полі та за освітлення.

Інкапсуляція CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S<CoCl<sub>2</sub>> в InSe звужує і зміщує діапазон частот в якій виконується умова  $\text{tg } \delta < 1$  у високочастотнішу, за якої діелектрична проникність набуває значень у 2,5 рази менших у порівнянні з вихідною 4-кратно розширеною матрицею InSe і становить  $4 \cdot 10^2$ . Світло, як і для вихідної 4-кратно розширеної матриці InSe, призводить до зменшення діелектричної проникності на 70 %. У магнітному полі для синтезованої структури InSe<CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S<CoCl<sub>2</sub>>>

виявлено додатний магнітоємнісний ефект  $\epsilon_H = \frac{\epsilon_H - \epsilon_0}{\epsilon_H} \cdot 100\% = 30\%$ , а діелектрична проникність становить  $\epsilon = 6 \cdot 10^2$ .

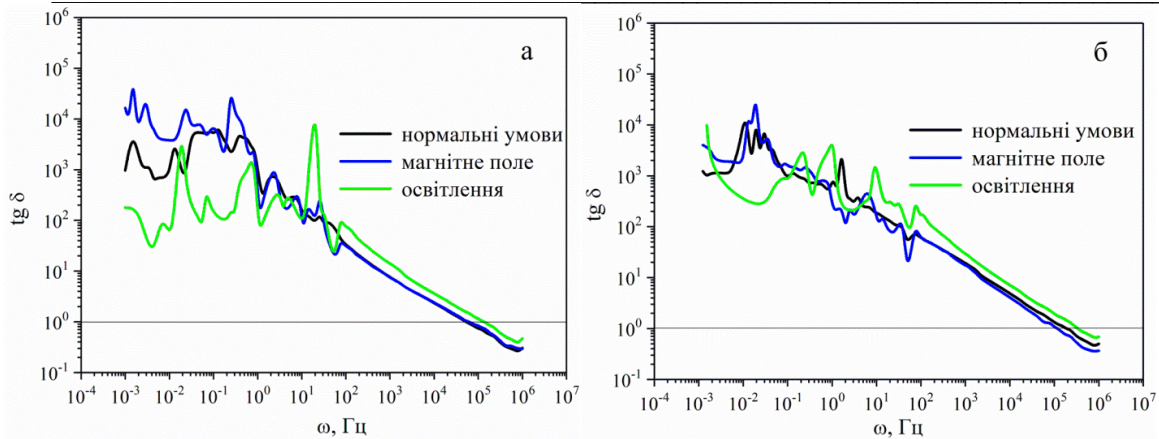


Рис. 8. Частотні залежності тангенса кута діелектричних втрат 4-кратно розширеної матриці InSe (а) і клатрату InSe<CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S<CoCl<sub>2</sub>>> (б), виміряні за нормальних умов, в магнітному полі та за освітлення.

ВАХ, виміряні за нормальних умов і в постійному магнітному полі, як для вихідної матриці InSe, так і для клатрату InSe<CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S<CoCl<sub>2</sub>>> мають лінійний вигляд і проходять через початок координат (рис. 9). Проте, цікавіша поведінка зафіксована за освітлення. Так, для вимірювань за освітлення для вихідної 4-кратно розширеної матриці InSe ВАХ перетинає вісь напруг у точці 40 мВ, а для клатрату InSe<CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S<CoCl<sub>2</sub>>> – у точці 25 мВ. Це свідчить про прояв фотоелектричного ефекту. Крім того, ВАХ мають гістерезисний вигляд, що також вказує на візуалізацію мемристорного ефекту.

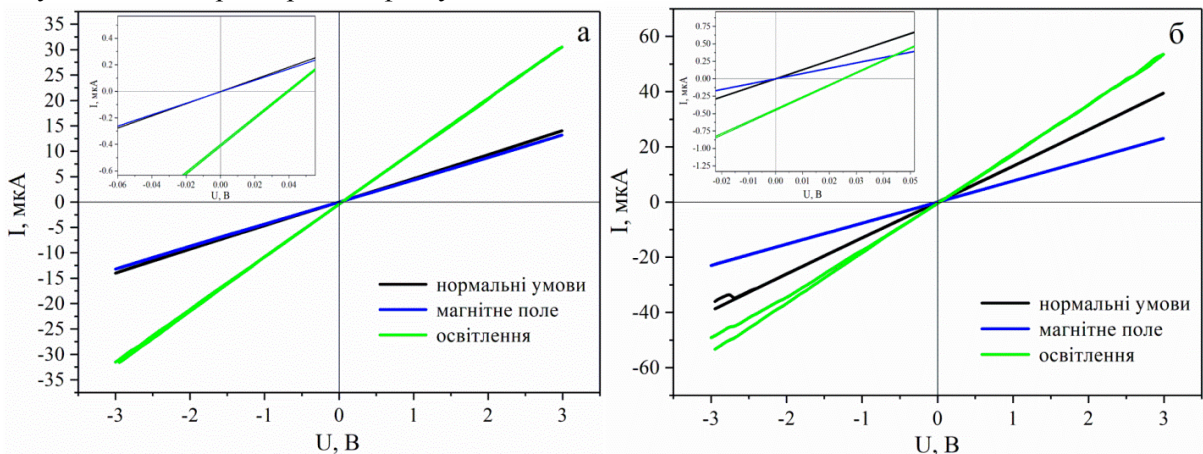


Рис. 9. ВАХ 4-кратно розширеної матриці InSe (а) і клатрату InSe<CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S<CoCl<sub>2</sub>>> (б), виміряні за нормальних умов, в магнітному полі та за освітлення.

З метою більш детального дослідження структури домішкового енергетичного спектру досліджуваного клатрату InSe<CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S<CoCl<sub>2</sub>>> були виміряні спектри термостимульованого розряду (рис. 10). Для вихідної 4-кратно розширеної матриці спостерігається квазінеперервна крива. В діапазоні температур 168 – 172 К спектр набуває мінізонного характеру з найбільш глибокими пастковими центрами. У всій досліджуваній температурній області відбувається релаксація гомозаряду, яка зумовлена інжекцією носіїв заряду та їх локалізацією на центрах прилипання. Після інкапсуляції гостей компонентів в InSe бачимо, що візуалізується спектральна смуга, що відповідає практично неперервному набору часів релаксації у всьому температурному інтервалі. При цьому, для клатрату InSe<CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S<CoCl<sub>2</sub>>> притаманним є релаксація гетерозаряду. Глибокі пасткові центри, зафіксовані для вихідної матриці зберігаються і для клатрату, але із значно меншими струмами та зміщенням в температурному діапазоні до 163 – 165 К. Релаксація гетерозаряду зумовлена перерозподілом носіїв заряду між напівпровідниковою матрицею та гостьовим компонентом таким чином, що сусідні пари різних фаз будуть заряджатися зарядом протилежного знаку і їх можна тоді розглядати як диполі.



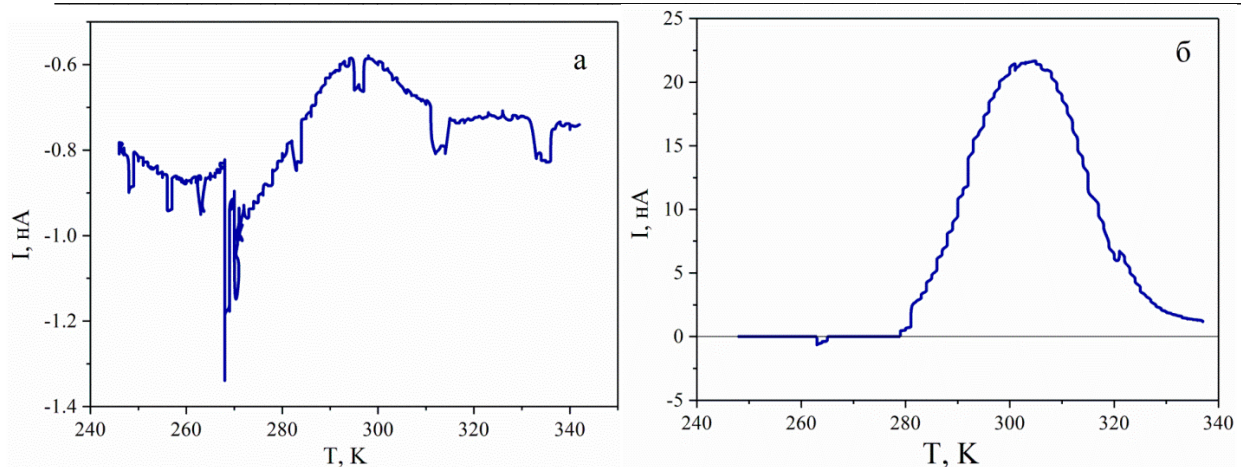


Рис. 10. Струми термостимульованого розряду 4-кратно розширеної матриці InSe (а) і клатрату InSe<CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S<CoCl<sub>2</sub>>> (б).

### Висновки:

1. Вперше сформовано клатрат з ієрархічною конструкцією компонентів типу субгосподар<<господар>гість> на основі n-провідної матриці InSe та інтеркальованими компонентами: тіосечовиною та дихлоридом кобальту.

2. Отримані результати імпедансних вимірювань важливі з точки зору практичного використання клатрату InSe<CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S<CoCl<sub>2</sub>>> як високочутливого датчика магнітного поля та поля світлової хвилі в широкому діапазоні частот.

3. У сформованому клатраті InSe<CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S<CoCl<sub>2</sub>>> виявлено додатний магнітоємнісний ефект  $\epsilon_H = \frac{\epsilon_H - \epsilon_0}{\epsilon_0} \cdot 100\% = 30\%$ , за якого діелектрична проникність становить  $\epsilon = 6 \cdot 10^2$ .

4. ВАХ клатрату InSe<CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S<CoCl<sub>2</sub>>> має вигляд гістерези, що свідчить про прояв мемристорного ефекту. Зареєстровано також фотоелектричний ефект величиною 25 мВ.

### Список використаних джерел:

1. Kuhn, A., Chevy, A., & Chevalier, R. (1975). *Crystal structure and interatomic distances in GaSe*. *Physica Status Solidi (a)*, 31(2), 469–475. doi:10.1002/pssa.2210310216;
2. Chevy, A., Kuhn, A., & Martin, M.-S. (1977). Large InSe monocrystals grown from a non-stoichiometric melt. *Journal of Crystal Growth*, 38(1), 118–122. doi:10.1016/0022-0248(77)90381-5;
3. Drapak, S. I., Bakhtinov, A. P., Gavrylyuk, S. V., Kovalyuk, Z. D., & Lytvyn, O. S. (2008). The formation of organic (propolis films)/inorganic (layered crystals) interfaces for optoelectronic applications. *Superlattices and Microstructures*, 44(4-5), 563–570. doi:10.1016/j.spmi.2007.12.019;
4. Boledzyuk, V. B., Kovalyuk, Z. D., Pyrlya, M. N., & Shevchenko, A. D. (2014). Electrochemical, optical, and magnetic properties of Ni x InSe (0 < x ≤ 1) intercalation compounds. *Inorganic Materials*, 50(10), 976–980. doi:10.1134/s0020168514100069;
5. Julien, C., & Samaras, I. (1992). Electrical characterization of lithium intercalated InSe. *Materials Science and Engineering: B*, 14(4), 408–412. doi:10.1016/0921-5107(92)90083-1
6. Huang F, Li Z & Jiang H, 1997. Analysis and control of thiourea content in ammonium containing zinc plating bath. *Cailiao Baohu* 30: 23–25;
7. Mullen, D., & Hellner, E. (1978). A simple refinement of density distributions of bonding electrons. IX. Bond electron density distribution in thiourea, CS(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>, at 123K. *Acta Crystallographica Section B Structural Crystallography and Crystal Chemistry*, 34(9), 2789–2794. doi:10.1107/s0567740878009243;
8. Takemoto K, Sonoda N. Inclusion Compounds of Urea, Thiourea and Selenurea, Inclusion Compounds. IJ.L. Atwood, J.E.D. Davies and D.D. MacNicol (Eds.), 1984, Vol. 2, p. 47-67;
9. Pluta, T., & Sadlej, A. J. (2001). Electric properties of urea and thiourea. *The Journal of Chemical Physics*, 114(1), 136. doi:10.1063/1.1328398;
10. Puzzarini, C. (2012). Molecular Structure of Thiourea. *The Journal of Physical Chemistry A*, 116(17), 4381–4387. doi:10.1021/jp301493b;

11. Kausar, S., Ataf Ali Altaf, Hamayun, M., Badshah, A. and Razzaq, A. (2020). Supramolecular Chemistry and DNA Interaction Studies of Ferrocenyl Ureas and Thioureas. <https://cdn.intechopen.com/pdfs/65830.pdf>;
12. Shang, X., Yang, Z., Fu, J., Zhao, P., & Xu, X. (2015). The Synthesis and Anion Recognition Property of Symmetrical Chemosensors Involving Thiourea Groups: Theory and Experiments. *Sensors*, 15(11), 28166–28176. doi:10.3390/s151128166;
13. Ковалюк З., Шевчик, В., Боledзюк, В., Нетяга, В. (2014). Дослідження електричних властивостей InSe інтеркальованого кобальтом. *Журнал нано- та електронної фізики*, Т. 6, № 4, с. 04038-1-04038-5. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/jnef\\_2014\\_6\\_4\\_40](http://nbuv.gov.ua/UJRN/jnef_2014_6_4_40);
14. Боledзюк, В., Шевченко, А., Кудринський, З. (2012). Вплив інтеркалювання кобальтом на властивості шаруватих кристалів In<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>. *Журн. нано- та електрон. фізики*, Т.4, № 3, с. 03017;
15. Chabecki, P., Całus, D., Ivashchyshyn, F., Pidluzhna, A., Hryhorchak, O., Bordun, I., Makarchuk, O., Kityk, A. V. (2020). Functional Energy Accumulation, Photo- and Magnetosensitive Hybridity in the GaSe-Based Hierarchical Structures. *Energies*, 13(17), 4321. doi:10.3390/en13174321.



УДК 537.312.5 : 537.311.322

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.30

С.А. Федосов<sup>1</sup>, Д.А. Захарчук<sup>2</sup>, О.В. Замуруєва<sup>1</sup>, Ю.В. Коваль<sup>2</sup><sup>1</sup>Волинський національний університет імені Лесі Українки<sup>2</sup>Луцький національний технічний університет**РІВЕНЬ ФЕРМІ В КРИСТАЛАХ  $n$ -CdSb З ГЛИБОКИМИ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ РІВНЯМИ ДЕФЕКТІВ**

*За результатами температурних залежностей концентрації носіїв струму досліджено зміни положення рівня Фермі у кристалах  $n$ -CdSb, легованих домішками Te і In, до і після опромінення  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$ . Розглянуто особливості положення рівня Фермі від температури в області домішкової та власної провідності. Дослідження базується на результатах експериментальних даних холлівських вимірювань і електропровідності. Для коректної оцінки температурної залежності рівня Фермі проведено аналіз граничних розв'язків рівняння електронейтральності, враховано температурні зміни ширини забороненої зони і рівня дефектів.*

*Ключові слова:* рівень Фермі, антимонід кадмію, легування, домішки, гамма-опромінення, радіаційні дефекти.

S. Fedosov, D. Zakharchuk, O. Zamurujeva, Yu. Koval

**FERMI LEVEL IN  $n$ -CdSb CRYSTALS WITH DEFECT DEEP ENERGY LEVELS**

*Changes in the position of the Fermi level in  $n$ -CdSb crystals doped with Te and In impurities before and after irradiation with  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -quanta are studied based on the results of the temperature dependences of the current carrier concentration. The features of the position of the Fermi level as a function of temperature in the region of impurity and intrinsic conductivity are considered. The study is based on the results of experimental data from Hall measurements and electrical conductivity. To correctly estimate the temperature dependence of the Fermi level, we analyzed the limiting solutions of the electroneutrality equation and took into account the temperature changes in the bandgap and the level of defects.*

*Keywords:* Fermi level, cadmium antimonide, doping, impurities, gamma radiation, radiation defects.

**Постановка проблеми.** При дослідженні зонної структури напівпровідників з глибокими рівнями цікавим є визначення положення рівня Фермі залежно від температури, що дає корисну інформацію про розподіл носіїв заряду в енергетичних зонах. Його положення може сильно змінюватися при введенні домішок, що створюють локалізовані стани. Перерозподіл електронів по станах при утворенні дискретних рівнів в забороненій зоні регулюється безпосередньо зміною положення рівня Фермі.

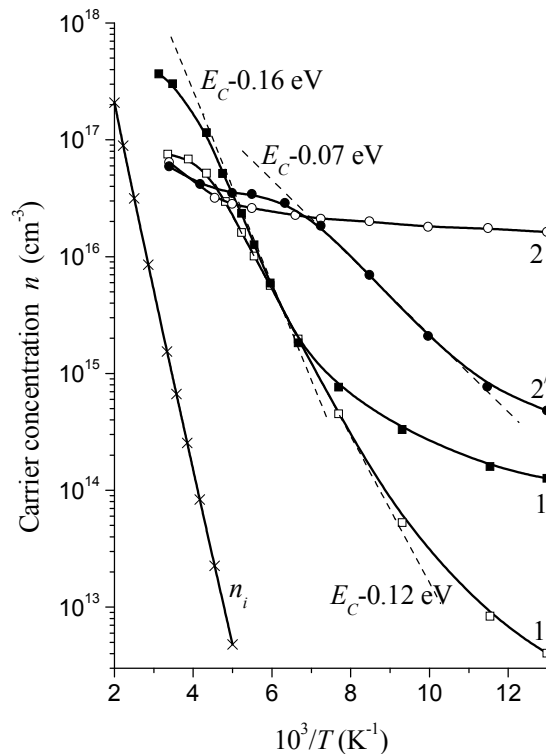
Вивченню зонної структури CdSb і оцінці положенню рівня Фермі присвячені роботи [1-4]. Зокрема автори [1] провели дослідження положення рівня Фермі для кристалів антимоніду кадмію, легованих міддю, лише при низьких температурах. До і після опромінення  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  досліджено положення рівня Фермі у кристалах CdSb, легованих індієм [3] і у спеціально нелегованих кристалах  $p$ -CdSb [4].

Введення дефектів у кристалічну ґратку змінюють важливі характеристики зонної структури напівпровідників, а тому вивчення проблем штучного створення матеріалів з прогнозованими характеристиками є важливим при конструюванні різного роду напівпровідникових пристроїв [5].

**Постановка завдань.** В роботі поставлено мету – за експериментальними результатами температурних залежностей концентрації носіїв струму розрахувати зміни від температури положення рівня Фермі  $E_F(T)$  в області домішкової провідності у кристалах CdSb  $n$ -типу провідності до і після  $\gamma$ -опромінення. Для коректного визначення  $E_F(T)$  провести аналіз розв'язку рівняння електронейтральності.

**Викладення основного матеріалу.** Донорні домішки, зокрема телур, активно взаємодіє з  $V_{\text{Cd}}$ . Леговані телуrom кристали CdSb<Te> мали  $n$ -тип провідності і концентрацією електронів провідності при кімнатній температурі ( $T = 295 \text{ K}$ )  $n \approx 7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (крива 1 рис. 1). Температурний хід кривої 1 рис. 1 різко відрізняється від аналогічної залежності для  $p$ -CdSb, що не містить телур [4]. Експоненційний характер кривої 1 рис. 1 показав, що при легуванні телуrom утворюються дефекти донорного типу з енергією іонізації (визначеною за цією залежністю –  $\Delta E \propto \Delta \ln n / \Delta(1/T)$ )  $E_C - 0,12 \text{ eV}$ . У результаті опромінення  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  дозами  $10^{18} \text{ см}^{-2}$  концентрація електронів при  $T = 295 \text{ K}$  зросла до  $4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  і на температурній залежності проявлявся глибокий рівень  $E_C - 0,16 \text{ eV}$  радіаційних дефектів (крива 1' рис. 1). Введення донорів

також з  $E_C - 0,16$  eV спостерігали автори [6], але при нейтронному опроміненні  $p$ -CdSb дозою  $2 \cdot 10^{18}$  см<sup>-2</sup>. Отже ймовірно, що за донори з енергетичними рівнями  $E_C - 0,16$  eV, які вводяться незалежно від виду опромінення і типу легуючих домішок, відповідальні власні дефекти решітки.



**Рис. 1. Температурні залежності концентрації носіїв струму  $n = f(10^3/T)$  у  $n$ -CdSb:**  
 1 – неопромінену CdSb<Te>; 1' –  $\gamma$ -опромінену ( $\Phi = 10^{18}$  см<sup>-2</sup>) CdSb<Te>; 2 – неопромінену CdSb<In>; 2' –  $\gamma$ -опромінену ( $\Phi = 4 \cdot 10^{18}$  см<sup>-2</sup>) CdSb<In>

Практично відсутні зміни концентрації носіїв струму після  $\gamma$ -опромінення при кімнатній температурі у CdSb<In> (криві 2, 2' рис. 1). Проте при азотних температурах концентрація носіїв струму після опромінення  $\gamma$ -квантами <sup>60</sup>Со різко зменшується (крива 2' рис. 1), тобто відбувається видалення електронів із зони провідності, що зумовлено згідно [7], утворенням радіаційних дефектів з глибоким рівнем у забороненій зоні кристалу.

У напівпровідникових матеріалах енергія Фермі визначається умовою розподілу електронів по рівнях енергії валентної зони, зони провідності і дискретних рівнях локалізованих станів. Рівень Фермі може змінювати своє положення в залежності від температури і концентрації домішок. Вводячи домішки в напівпровідник, в забороненій зоні напівпровідника утворюються дискретні рівні. Розподіл носіїв зарядів по цих рівнях регулюється зміною положення рівня Фермі. Якщо в напівпровіднику є донорна і акцепторна домішки з концентраціями  $N_d$  і  $N_a$ , в результаті термічної іонізації створюється деяке число вільних електронів і дірок. Вільні носії заряду створюються за рахунок іонізації атомів домішки і основного елементу, в результаті в напівпровіднику створюється деяка кількість вільних носіїв зарядів і іонів. Але сумарний заряд довільного фізично малого об'єму повинен бути рівним нулю.

Розподіл електронів по станах описується рівнянням електронейтральності:

$$n + n_d - p - p_a = N_d - N_a = N_d', \quad (1)$$

де  $n$  – концентрація електронів в зоні провідності;  $p$  – концентрація дірок у валентній зоні;  $n_d = N_d - N_d^+ = N_d - p_d$  і  $p_a = N_a - N_a^- = N_a - n_a$  – концентрації електронів на донорному і дірок, що знаходяться на акцепторному рівнях. Якщо виразити  $n$ ,  $n_d$ ,  $p$ ,  $p_a$  через  $E_F$ , то отримаємо рівняння, за допомогою якого можна визначити положення рівня Фермі в загальному випадку.

Для напівпровідникового кристалу  $n$ -типу провідності, що містить донорну домішку з енергетичним рівнем  $E_d$  ( $N_d \neq 0$ ,  $N_a = 0$ ), при умові, коли  $N_d \gg N_a$ , рівняння (1) приймає вид:

$$n + n_d - p = N_d, \quad \text{або} \quad n = p + N_d^+. \quad (2)$$

Згідно з формулою (2), вільні електрони виникають за рахунок переходів із валентної зони, що приводить до утворення вільних дірок  $p$  і з рівня домішки, за рахунок чого виникають  $N_d^+$  іонів донорної домішки.

При низьких температурах електрони в зоні провідності виникають тільки за рахунок іонізації атомів домішки (власна провідність відсутня ( $p \ll n$ )). Тоді в рівнянні (2) можна знехтувати концентрацією дірок у валентній зоні:

$$n + n_d = N_d, \quad \text{або} \quad n = p_d. \quad (3)$$

Виразивши у (3)  $n$ ,  $p_d$  через  $E_F$ , одержано рівняння для знаходження рівня Фермі, коли основну роль відіграє іонізація домішки ( $p \ll N_d^+$  і  $n = N_d^+$ )

$$E_F = E_d + kT \ln \left[ \frac{1}{4} \left( \sqrt{1 + \frac{8N_d}{N_C} \exp\left(\frac{\Delta E_d}{kT}\right)} - 1 \right) \right] \quad (4)$$

справедливе в області від  $T = 0$  К до температури насичення  $T_n$ .

При граничних випадках низьких температур, коли у (4) виконується нерівність:

$$\frac{8N_d}{N_C} \exp\left(\frac{\Delta E_d}{kT}\right) \gg 1, \\ E_F = \frac{E_C + E_d}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_d}{2N_C}\right). \quad (5)$$

У випадку зростання температури  $N_C \gg 8N_d$ , або

$$\frac{8N_d}{N_C} \exp\left(\frac{\Delta E_d}{kT}\right) \ll 1$$

і положення рівня Фермі визначається:

$$E_F = E_C + kT \ln\left(\frac{N_d}{N_C}\right), \quad (6)$$

а концентрація електронів

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) = N_C \exp\left(\ln \frac{N_d}{N_C}\right) = N_d.$$

У цьому випадку концентрація електронів не залежить від температури і рівна концентрації домішки – область виснаження домішки.

При зростанні температури  $T \geq T_n$  зростає концентрація дірок і може стати порівняна з концентрацією електронів. У цьому випадку рівняння (2) має вигляд:

$$n = p + N_d$$

і є справедливим, коли домішка повністю іонізована. Рівень Фермі в області від  $T_n$  і вище ( $N_a^- = N_a$  і  $n \geq N_a$ ) описується:

$$E_F = E_C + kT \ln \left[ \frac{N_d}{2N_C} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{N_d^2}} \right) \right]. \quad (7)$$

При виконанні у (7) граничних умов:

$$\frac{4n_i^2}{N_d^2} \ll 1 \quad \text{і} \quad \frac{4n_i^2}{N_d^2} \gg 1$$

положення рівня Фермі визначається, відповідно, (6), що відповідає області виснаження домішки ( $n = N_d$ ,  $p = \frac{n_i^2}{N_d}$ ) та як у випадку власного напівпровідника ( $n = p = n_i$ ):

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right) = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3kT}{4} \ln\left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right). \quad (8)$$

Оскільки вимірювання проводилися в діапазоні температур ( $T \approx 300$  К) близьких до власної, оцінено можливий вклад власної провідності. Для цього розраховано температурну залежність концентрації власних носіїв струму  $n_i = f(10^3/T)$  (рис. 1) з урахуванням залежності ширини забороненої зони від температури:

$$n_i = n = p = (N_C N_V)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right),$$

де  $E_g(T) = 0,535 - 3,56 \cdot 10^{-4} T$  еВ [8].

Ефективні густини станів в зоні провідності і у валентній зоні відповідно дорівнюють:

$$N_C = 2,510 \cdot 10^{19} M \left(\frac{m_n^*}{m_0}\right)^{3/2} \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} = 4,472 \cdot 10^{18} \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} \text{ см}^{-3},$$

$$N_V = 2,510 \cdot 10^{19} M \left(\frac{m_p^*}{m_0}\right)^{3/2} \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} = 8,216 \cdot 10^{18} \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} \text{ см}^{-3},$$

де  $M = 2$  – число екстремумів зон;  $m_n^* \approx 0,2 m_0$  і  $m_p^* \approx 0,3 m_0$  – ефективні маси густини станів відповідно електронів та дірок [9].

Вважаючи, що концентрація донорів у вихідному (неопромінену) CdSb<In> (криві 2 рис. 1а) має значення  $N_d \approx 2,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , розраховано для граничних умов (криві 1-3 рис. 2а) положення  $E_F(T)$  за формулами: 1 – (5); 2 – (6); 3 – (8). Аналіз теоретичних розрахунків показує, що для даних кристалів температура насичення (виснаження)  $T_n$  є меншою 50 К (перетин кривих 1 і 2 рис. 2а), а температура переходу від виснаження домішки до власної провідності (перетин кривих 2 і 3 рис. 2а)  $\approx 380$  К.

Досліджуваний діапазон температур в основному відповідає області виснаження: домішка уся іонізована, концентрація електронів  $n = N_d$  залишається сталою (крива 2 рис. 1), концентрація дірок  $p = n_i$  (неосновних носіїв струму) зростає, рівень Фермі визначається згідно (6) як:

$$E_F = E_C + kT \ln\left(\frac{n}{N_C}\right)$$

і прямує до середини забороненої зони (крива 4 рис. 2а). При  $T \approx 200$  К для неопромінених CdSb<In> з подальшим ростом  $p$  відбувається і зростання  $n$  (уся домішка іонізована і необхідно враховувати іонізацію основної речовини  $n = n_i + N_d$ ):

$$E_F = E_C + kT \ln\left(\frac{n_i + N_d}{N_C}\right). \quad (9)$$

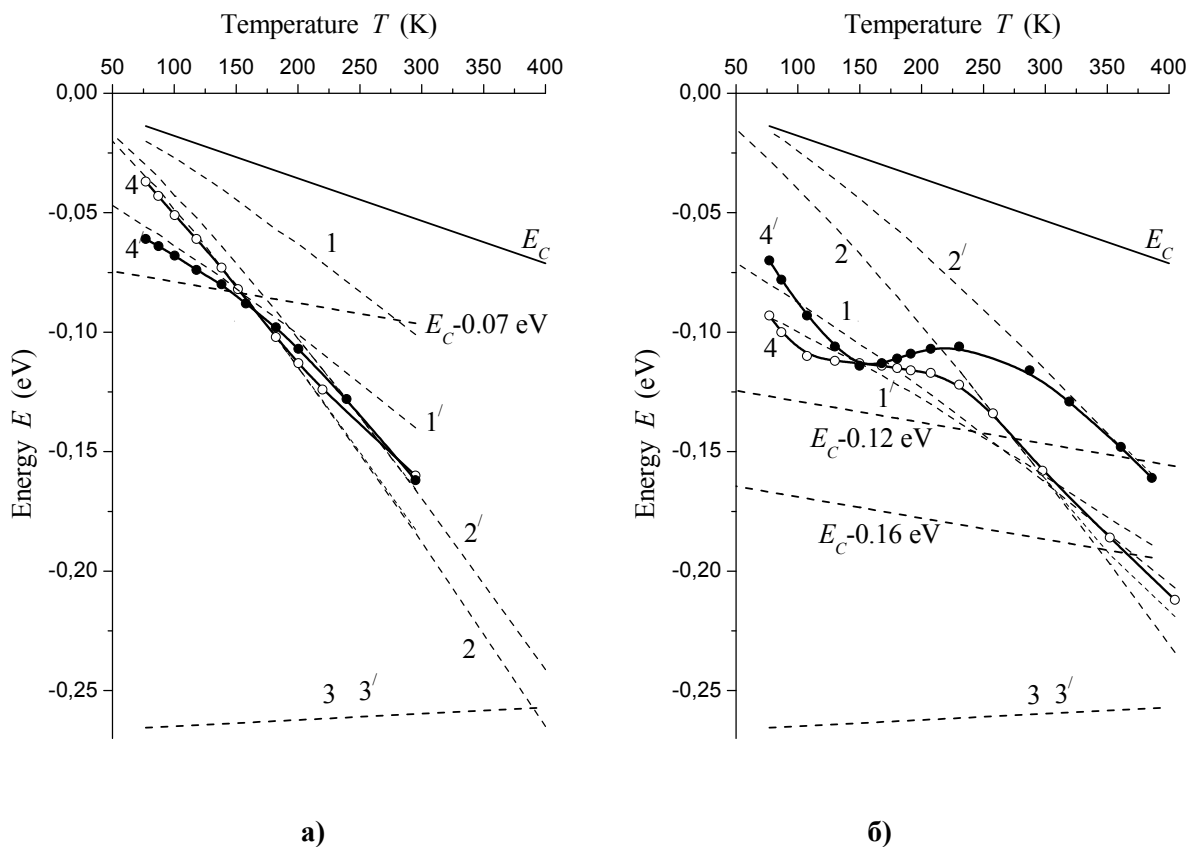


Рис. 2. Температурні залежності положення рівня Фермі  $E_F = f(T)$  в легованих (а) In і (б) Te кристалах  $n$ -CdSb до (1-4) і після (1'-4') опромінення (1-3, 1'-3' – розраховані за граничними умовами)

Для опроміненого  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  ( $\Phi = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ )  $n$ -CdSb<In> з  $N_d \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (крива 2' рис. 1) в досліджуваному діапазоні температур ( $T = 77 \div 300 \text{ K}$ ) спостерігається прояв рівня  $E_C - 0,07 \text{ eV}$ , що ускладнює розрахунок  $E_F(T)$ . На основі аналогічного неопроміненому CdSb<In> аналізу та експериментальних результатів зроблено відповідні побудови для  $\gamma$ -опроміненого CdSb<In> з  $N_d \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (криві 1'-4' рис. 2а). Залежність 4 рис. 2а в області низьких температур  $T \leq 200 \text{ K}$ , при виконанні граничної умови, описується згідно (5), а з подальшим ростом температури умовами (6) і (9). Для цих напівпровідників іонізація основної речовини стає відчутною при  $T > 300 \text{ K}$ .

Як видно з рис. 2б одержані залежності  $E_F(T)$  для CdSb<Te> можна умовно поділити на три температурні діапазони: область низьких температур, область виснаження домішки та область високих температур. При низьких температурах середня енергія теплових коливань ґратки значно менша за ширину забороненої зони, внаслідок чого ці коливання не можуть забезпечити суттєвого збудження електронів валентної зони та їх перехід у зону провідності. Проте необхідно відмітити, що цієї енергії виявляється достатньо для збудження та переходу в зону провідності носіїв заряду з глибоких енергетичних рівнів. Тому в області низьких температур відбувається збудження практично лише домішкових носіїв заряду.

З підвищенням температури концентрація носіїв заряду в зоні провідності збільшується, а на глибоких рівнях зменшується, тобто вони виснажуються. При повному виснаженні домішки концентрація носіїв заряду в зоні провідності стає практично рівною концентрації донорної домішки. При подальшому підвищенні температури починається більш інтенсивне збудження власних носіїв, внаслідок чого рівень Фермі прямує в напрямку до середини забороненої зони.

Дещо інший хід залежності  $E_F(T)$  одержано для  $\gamma$ -опроміненого ( $\Phi = 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ) CdSb<Te>. У даному випадку спостерігається лише дві чітко виражені області. У першій (при

відносно низьких температурах), як для CdSb<Te> до опромінення, відбувається збудження носіїв заряду з глибокого рівня, а у другій (при  $T > 200$  К) починається його виснаження. Наявність зсуву температури переходу від першої до другої області для опромінених кристалів в порівнянні з неопроміненими в область більш високих температур пояснюється іонізацією глибокого рівня  $E_C - 0,16$  еВ при вищих температурах, а ніж для рівня  $E_C - 0,12$  еВ.

**Висновки.** Одержані результати мають практичне значення, зокрема для різноманітних розрахунків, в яких використовуються значення рівня Фермі в залежності від температури. Аналіз теоретичної оцінки показує, що для  $n$ -CdSb температура насичення (виснаження)  $T_n$  і температура переходу від виснаження домішки до власної провідності суттєво залежить від типу і кількості домішок. Для коректної оцінки положення рівня Фермі необхідним є детальний аналіз процесів утворення вільних носіїв струму, впливу неосновних носіїв струму, необхідністю враховувати іонізацію основної речовини.

#### Список використаних джерел:

1. Андроник И. К., Арушанов Э. К., Емельяненко О. В., Наследов Д. Н. Электрические свойства легированных кристаллов CdSb при низких температурах. *Физика и техника полупроводников*. 1968. Т. 2, № 9. С. 1248–1252.
2. Bercha D. M., Slipukhina I. V., Sznajder M., Rashchanskii K. Z. Elementary Energy Bands in the Band Structure of the Narrow-band-gap Semiconductor CdSb. *Phys. Rev. B*. 2004. Vol. 70, № 23. P. 235206-1–235206-8.
3. Федосов А. В., Коваль Ю. В., Захарчук Д. А., Ящинський Л. В., Федосов С. А. Температурная зависимость уровня Ферми в монокристаллах антимионид кадмия при наличии глубокого энергетического уровня  $E_C - 0,3$  эВ. *Радиационная физика твердого тела* : труды XVI Междунар. совещания, 3-8 июля 2006 г., г. Севастополь, Украина. М. : ГНУ “НИИ ПМТ”, 2006. С. 183–185.
4. Федосов С. А., Замуруєва О. В., Захарчук Д. А., Сахнюк В. Є., Панасюк Л. І. Рівень Фермі в кристалах антимионіду кадмію при наявності радіаційних дефектів. *Наукові нотатки*. 2022. № 73. С. 143–148.
5. Баранський П. І. Федосов А. В., Гайдар Г. П. *Неоднорідності напівпровідників і актуальні задачі міждефектної взаємодії в радіаційній фізиці і нанотехнології*. Київ-Луцьк : РВВ Луцьк. нац. техн. ун-ту, 2006. 316 с.
6. Федосов С. А., Давидюк Г. Е., Божко В. В. [и др.]. Влияние радиационных дефектов на некоторые электрические и оптические свойства монокристаллов антимионид кадмия. *Неорганические материалы*. 1996. Т. 32, № 11. С. 1333–1337.
7. Семенюк А. К. *Радіаційні ефекти в багатодолінних напівпровідниках*. Луцьк : Надстир'я, 2001. 323 с.
8. Abraham A. Photoelectric Effect in CdSb. *Czech. J. Phys.* 1965. Vol. 15, № 2. P. 138–140.
9. Семизоров А. Ф. Об анизотропии термо ЭДС CdSb. *Термоэлектричество*. 2004. № 2. С. 25–29.

УДК 541.14 + 544.47

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.31

**Н.В. Данилюк**

*Навчально-науковий центр хімічного матеріалознавства та нанотехнологій,  
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника*

**ФОТОКАТАЛІТИЧНА ДЕГРАДАЦІЯ ТИПОВИХ АНТИБІОТИКІВ**

*Антибіотики - це хімічні сполуки, які використовуються для руйнування та запобігання росту бактерій. Вони використовуються в різних сферах, таких як медицина, сільське господарство та ветеринарія. Антибіотики все частіше потрапляють у стічні води, що створює загрозу розвитку антибактеріальної резистентності, тому їх необхідно усувати зі стічних вод. В даний час найпопулярніші методи видалення антибіотиків із води включають фізичну адсорбцію, флокуляцію та хімічне окиснення, однак ці процеси залишають значну кількість хімічних реагентів і полімерних електролітів у воді. Натомість, фотокаталітичний метод їх усунення із застосуванням напівпровідників, є ефективним засобом видалення різних органічних відходів, включаючи антибіотики. Для їх видалення протестовано різноманітні напівпровідникові матеріали, незважаючи на це, дослідження все ще тривають через різні проблеми. У цій роботі підсумовуються дослідження щодо видалення антибіотиків за допомогою фотокаталізу та детально описуються останні досягнення з використанням різних фотокаталізаторів на основі наноструктур.*

*Ключові слова: фотокаталіз, антибіотики, напівпровідники.*

**N.V. Danyliuk****PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF SOME TYPICAL ANTIBIOTICS**

*Antibiotics are chemical compounds used to destroy and prevent the growth of bacteria. They are used in various fields such as medicine, agriculture and veterinary medicine. Antibiotics are increasingly entering wastewater, which poses a threat of the development of antibacterial resistance, so they must be removed from wastewater. Currently, the most popular methods for removing antibiotics from water include physical adsorption, flocculation, and chemical oxidation, but these processes leave significant amounts of chemical reagents and polymer electrolytes in the water. Instead, the photocatalytic method of their elimination using semiconductors is an effective means of removing various organic wastes, including antibiotics. Various semiconductor materials have been tested to remove them, however, research is still ongoing due to various challenges. This paper summarizes research on the removal of antibiotics by photocatalysis and details the recent advances using various nanostructure-based photocatalysts.*

*Keywords: photocatalysis, antibiotics, semiconductors.*

**Вступ та постановка проблеми.** Зі швидким розвитком медичної промисловості споживання антибіотиків серед людей і тварин зростає. Це у свою чергу дозволило вчасно вилікувати багато хвороб та уникнути ускладнень захворювань [1]. На даний момент існують різні види антибіотиків, такі як тетрацикліни [2], сульфаніламідні, β-лактами, хінолони та пеніциліни. Тому варто приділяти значну увагу проблемі забруднення антибіотиками для збереження екосистеми і природного середовища.

Протягом останнього десятиліття було прийнято багато стратегій для вирішення проблеми антибіотиків у стічних водах [3]. Проте, очищення стічних вод вважається основним методом управління антибіотиками, оскільки стічні води збирають скиди лікарень, фармацевтичної промисловості та сільського господарства. Багато досліджень підтвердили, що звичайні методи очищення води не здатні видалити забруднюючі речовини.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В роботі [4] автори вивчали адсорбцію, десорбцію та біодеградацію сульфаніламідних антибіотиків в присутності активного мулу з біоцидом  $\text{NaN}_3$  та без нього. Науковці в роботі [5] досліджували руйнування чотирьох антибіотиків, включаючи норфлуксацин, офлуксацин, рокситроміцин і азитроміцин, шляхом застосування фотолізу UV254, озонування та UV/O<sub>3</sub>, досягнувши високої ефективності понад 87%. Тим не менш, застосування цих методів є обмеженим через їх високу вартість та низьку стабільність. Тому, на сьогодні вчені шукають нові методи руйнування антибіотиків у стічних водах, що робить ці дослідження популярною темою для дослідників у галузі екології та хімії.

Фотокаталіз - це один з найбільш багатообіцяючих методів усунення антибіотиків, який отримав велику увагу через його низьку вартість та ефективність під дією сонячного та УФ-опромінення [6]. Більшість антибіотиків стійкі до опромінення завдяки їхній надійній молекулярній структурі, тому основне завдання полягає в синтезі фотокаталізаторів з високою каталітичною активністю.

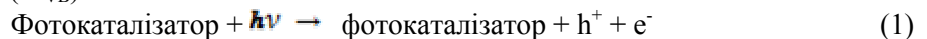


Фотодеградація антибіотиків була нещодавно розглянута в [7,8]. Однак знання механізмів деградації та основних реакційних шляхів типових фотокаталізаторів потребує глибшого вивчення. Крім того, впровадження широко використовуваних фотокаталітичних матеріалів та їх застосування в деградації антибіотиків має важливе значення для підтвердження їх практичної цінності та ефективності очищення води. У цьому огляді узагальнено вплив антибіотиків на живі організми, а також основний механізм фотокаталітичного розкладу антибіотиків. Детально розглядаються широко використовувані фотокаталітичні матеріали та обговорюються останні досягнення у використанні фотокаталізу для деградації антибіотиків.

**Постановка завдання.** Розкрити основні принципи фотокаталітичного очищення води від типових антибіотиків за допомогою напівпровідників.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Фармацевтичні препарати, значною мірою покращують здоров'я та якість життя людей, якщо їх використовувати для лікування інфекційних захворювань, однак неправильне використання ліків, особливо антибіотиків, завдає серйозних наслідків навколишньому середовищу та здоров'ю людей [9]. З точки зору мікроорганізмів, вивільнення антибіотиків у навколишнє середовище призводить до хромосомних мутацій нативних бактерій, викликаючи розвиток стійких до антибіотиків штамів бактерій, що може спричинити екологічні загрози, такі як токсикологічний вплив на патогени, зміна структури і розповсюдження угруповань водоростей. З іншого боку, споживання води або сільськогосподарських і побічних продуктів, що містять антибіотики, може викликати ряд симптом у людей, включаючи, блювоту, тремор, головний біль, діарею та нервозність.

**Механізм фотокаталітичного розкладу антибіотиків.** Ключові етапи фотодеградації антибіотиків напівпровідниками показані на Рис. 1. Механізми фотокаталітичної деградації антибіотиків можна поділити на три основні стадії: поглинання фотонів, збудження та руйнування [10]. Як тільки фотокаталізатор поглинає фотони з енергією, яка є вищою за енергію забороненої зони, електрони у валентній зоні (VB) можуть збуджуватися та переміщуватися в зону провідності (CB), де утворюється дірка ( $h^+_{VB}$ ):



Фотогенеровані електрони та дірки ефективно відокремлюються та переміщуються на поверхню фотокаталізатора, запускаючи вторинні реакції з адсорбованими антибіотиками. Як правило, фотогенеровані дірки можуть безпосередньо атакувати антибіотики, призводячи до деградації токсичних антибіотиків:



Існує два механізми фотодеградації антибіотиків. Перший — це відновний метод, який виникає, якщо потенціал CB напівпровідника є меншим порівняно з потенціалом окисно-

відновного потенціалу  $\frac{O_2}{\cdot O_2^-}$  (0.13 eV), де фотозбуджені електрони можуть реагувати з електроном. Акцептори, такі як  $O_2$ , зосереджуються на поверхні каталізатора, тим самим відновлюючи його до утворення аніону супероксидного радикалу  $\cdot O_2^-$ :



Інший метод, відноситься до окисаційного механізму, який активується, коли дірки мігрували до поверхні фотокаталізатора, що супроводжується утворенням гідроксильного

радикалу ( $\cdot OH$ ), при окисненні  $\frac{H_2O}{OH^-}$  в залежності від pH середовища:



Після збудження іони водню можуть рекомбінувати з електронами та генерувати теплову енергію, що зменшує ефективність фотодеградації:



Відомо, що стандартний окисно-відновний потенціал фотокаталізаторів у цьому випадку має

бути вищим, ніж потенціал  $\frac{OH}{OH^-}$  (+1.99 eV). Обидва реакційноздатні радикали ( $\cdot OH$  і  $\cdot O_2^-$ ) є високоактивними окислювачами [11]. Вони можуть ефективно мінералізувати будь-які антибіотики з утворенням води та вуглекислого газу під дією ультрафіолетового випромінювання:



Багато досліджень показали, що обидва методи (відновний і окисдаційний) повинні відбуватися синергетично, щоб запобігти накопиченню електронів у СВ і збільшити можливість рекомбінації електронів і дірок. Аналіз ефективності фотокаталітичного матеріалу, полягає у вимірюванні енергії забороненої зони ( $E_g$ ), і є дуже важливим фактором для оцінки фотокаталітичної ефективності [12].

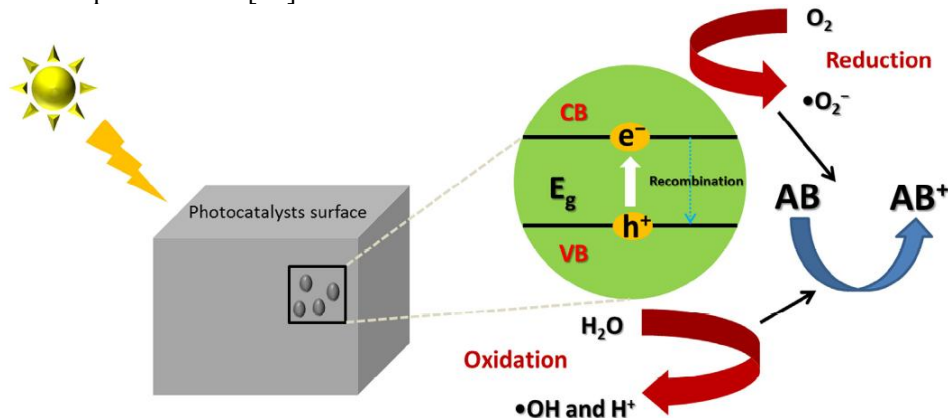


Рис. 1. Фотокаталітичний механізм деградації антибіотиків шляхом утворення фотоіндукованих носіїв заряду ( $e^-/h^+$ ) на поверхні фотокаталізаторів [6].

**Напівпровідникові фотокаталізатори на основі оксидів металів.** Металооксидні напівпровідники використовуються, як первинні фотокаталізатори або їх композити з іншими матеріалами для покращення деградації органічних забруднювачів, таких як пестициди, барвники та ароматичні вуглеводні [13]. Загалом оксиди металів мають деякі недоліки, такі як висока енергія забороненої зони і швидка рекомбінація електронно-діркової пари.  $TiO_2$ , є одним із найпопулярніших оксидів металів через його хороші оптичні та електронні властивості, хімічну стабільність і можливість повторного використання [14]. Крім того,  $ZnO$  є ще одним напівпровідниковим матеріалом, який має кращу квантову ефективність і вищу фотокаталітичну ефективність порівняно з  $TiO_2$ , особливо якщо використовується для фотодеградації антибіотиків в нейтральному рН [15].  $WO_3$  є ще одним фотокаталізатором, який привернув значну увагу науковців, завдяки своїй поширеності, економічній ефективності та нетоксичності. Натомість,  $W_{18}O_{49}$  вважається кращим фотокаталізатором із вищою ефективністю порівняно з  $WO_3$  [16]. Проте, він схильний до окиснення до  $WO_3$ , незважаючи на його чудові фотокаталітичні характеристики. Таким чином, науковці зосереджують увагу на конструкціях гібриду  $W_{18}O_{49}$  з іншими оксидами металів, щоб подолати цей окисдаційний бар'єр.

**Фотокаталізатори на основі аргентуму.** Застосування фотокаталізаторів на основі аргентуму, таких як  $AgX$  ( $X = Cl, Br, I$ ),  $Ag_2O$ ,  $Ag_3PO_4$  і  $Ag_2CO_3$ , детально описано в [17]. У випадку  $Ag_2CO_3$  проблема полягає в тому, що  $Ag_2CO_3$  є нестабільним через перетворення з  $Ag^+$  на  $Ag^0$ , за рахунок прийнятих електронів під час фотокаталітичних реакцій [18]. Крім того,  $Ag_2O$  демонструє низьку стабільність і швидку електронно-діркову рекомбінацію [19]. Їх висока фотокаталітична ефективність під час деградації антибіотиків залежить від сповільненої електронно-діркової рекомбінації та пов'язана з широкими смугами поглинання у видимій області світла, зумовленими локалізованими ефектами поверхневого плазмонного резонансу, індукованими наночастинками  $Ag^0$  [20].

**Фотокаталізатори на основі металоорганічних структур (metal-organic frameworks - МОФ).** Металоорганічні структури (МОФи) — це новий клас координаційних полімерів з періодичними сітчастими структурами, утвореними шляхом самоскладання між іонами металів та органічними лігандами. Шляхом модифікації лігандів із застосуванням функціональних груп можна отримати високопористі структури з великою площею поверхні [21]. МОФи проявили себе, як високоефективні матеріали для фотокаталітичного руйнування антибіотиків [22]. Видалення антибіотиків фотокаталітичними матеріалами на основі МОФів, зумовлене наявністю активних центрів та великою площею поверхні [23]. Органічний ліганд виконує роль VB, тоді як металевий кластер діє, як СВ. Під впливом світла МОФи поведуться, як напівпровідники, тому їх можна вважати потенційними фотокаталізаторами для високоефективної деградації антибіотиків, завдяки їх високій термічній і механічній стабільності [24].

**Фотокаталізатори на основі графітових нітридів карбону ( $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ).** Графітовий нітрид карбону ( $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ) – це новий клас полімерних напівпровідникових матеріалів, який є ще одним різновидом перспективного матеріалу для застосування в фотокаталітичних реакціях [25].  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  має ширину забороненої зони близько 2.7 еВ, і можна використовувати для фотокаталітичного руйнування антибіотиків у видимому спектрі світла. Однак чистий  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  показує низьку швидкість деградації, тому необхідна модифікація його поверхні [26]. Відомо, що допування іонами благородних металів покращує фотокаталітичну продуктивність в результаті швидкого розділення електронів і дірок, що утворюються на поверхні матеріалу. Проте, все ще триває велика кількість досліджень модифікації  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ , щоб отримати найвищу фотокаталітичну продуктивність видалення антибіотиків [27].

**Фотокаталітична деградація ципрофлоксацину.** Ципрофлоксацин — це фторхінолоновий антибіотик, який використовується для руйнування бактерій та запобігання різного роду інфекцій. Хімічна структура ципрофлоксацину показана на Рис 2-а. Ципрофлоксацин становить 73% від загального споживання антибіотиків, і має широкий антимікробний ефект, який впливає на грампозитивні і грамнегативні бактерії [28]. Однак присутність ципрофлоксацину у високих концентраціях обмежує фотосинтетичні шляхи і призводить до морфологічних деформацій у вищих організмів. Це у свою чергу призводить до серйозної шкоди здоров'ю людини. На сьогодні, в різних дослідженнях описано використання модифікованих фотокаталізаторів для забезпечення високої фотокаталітичної ефективності розкладу ципрофлоксацину. В роботі [29] автори підготували частинки  $\text{Cu}_2\text{O}$  доповані  $\text{Zn}$  сольвотермальним методом для фотокаталітичного руйнування ципрофлоксацину. Фотокаталітичні експерименти показали, що оксид  $\text{Cu}_2\text{O}$  легований  $\text{Zn}$ , проявляє вищі фотокаталітичні характеристики та можливість повторного використання, порівняно з нелегованим  $\text{Cu}_2\text{O}$ . 94.6% ципрофлоксацину було зруйновано в присутності  $\text{Cu}_2\text{O}$ , допованого атомами  $\text{Zn}$ . Після 5 циклів деградації ципрофлоксацину, відсоток руйнування все ще залишається 91%, що пов'язано з підвищеною інтенсивністю поглинання у видимому діапазоні світла, ніж у нелегованого  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Крім того, новий фотокаталізатор  $\text{CeO}_2\text{-Ag/AgBr}$  був описаний в роботі [30]. Результати продемонстрували підвищену фотокаталітичну активність під час фотодеградації ципрофлоксацину під опроміненням видимим світлом. Висока ефективність пояснюється, швидким процесом міжфазного перенесення заряду та посиленням розділенням фотогенерованих електронно-діркових пар.

**Фотокаталітична деградація тетрацикліну.** Тетрацикліни - це серія антибіотиків широкого спектру дії, які вперше були прийняті для застосування в 1940 році, їх хімічна структура показана на Рис 2-б. Усі тетрацикліни мають протизапальну дію і раніше використовувалися для лікування ревматизму. Хоча тетрациклін відіграє важливу роль у медицині, наявність тетрацикліну у водному середовищі викликає негативний вплив на навколишнє середовище, включаючи канцерогенність та токсичність для навколишнього середовища. За останні роки було проведено низку досліджень, пов'язаних з деградацією тетрацикліну за допомогою різних фотокаталітичних матеріалів [31]. Новий фотокаталізатор розкладу тетрацикліну був запропонований в роботі [32]. Нанокompatитний  $\text{TiO}_2/g\text{-C}_3\text{N}_4$  фотокаталізатор був отриманий за допомогою полімеризації графітового нітриду карбону на поверхні діоксиду титану. Представлений фотокаталізатор продемонстрував найвищу швидкість розкладу тетрацикліну, яка становить 2.2 мг/хв, що у 2 рази вище, ніж у випадку чистого  $\text{TiO}_2$ , і в 2.3 разів вище, ніж активність вихідного  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ . В роботі [33] описано новий гетероструктурований фотокаталізатор  $\text{AgI/BiVO}_4$ , результати досліджень продемонстрували чудову фотоактивність під час руйнування тетрацикліну під дією видимого світла. Протягом 60 хвилин молекули тетрацикліну руйнувалися на 94.91%, що значно більше, ніж ефективність чистого  $\text{BiVO}_4$  (62.68%) та  $\text{AgI}$  (75.43%), за однакових експериментальних умов.

**Фотокаталітична деградація норфлоксацину.** Норфлоксацин – ще один антибіотик із групи фторхінолонів, який широко використовується для лікування інфекцій сечовивідних шляхів. На Рис 2-в показано хімічну структуру норфлоксацину. В даний час, існує декілька досліджень про розклад норфлоксацину фотокаталітичним методом з використанням різних матеріалів [34]. В роботі [35] автори підготували іммобілізовану плівку  $\text{TiO}_2/\text{Ti}$  з відкритими гранями {001} за допомогою простого гідротермального методу. Експериментальні результати продемонстрували чудову фотокаталітичну активність щодо розкладу норфлоксацину в різній водній матриці. Визначено, що гідроксильні радикали в основному беруть участь у фотокаталітичній деградації норфлоксацину і утворюються на поверхні грані {001} плівки  $\text{TiO}_2/\text{Ti}$ . Науковці в роботі [36] реалізували фотодеградацію норфлоксацину за допомогою нового фотокаталізатора за Z-схемою

Ag/FeTiO<sub>3</sub>/Ag/BiFeO<sub>3</sub>, синтезованого з використанням золь-гель методу. Результати показали, що ступінь фотокаталітичної деградації норфлуксацину досягає 96.5% протягом 150 хв при використанні композиту Ag/FeTiO<sub>3</sub>/Ag/BiFeO<sub>3</sub>, який можна повторно використовувати, ще декілька циклів фотодеградації антибіотику.

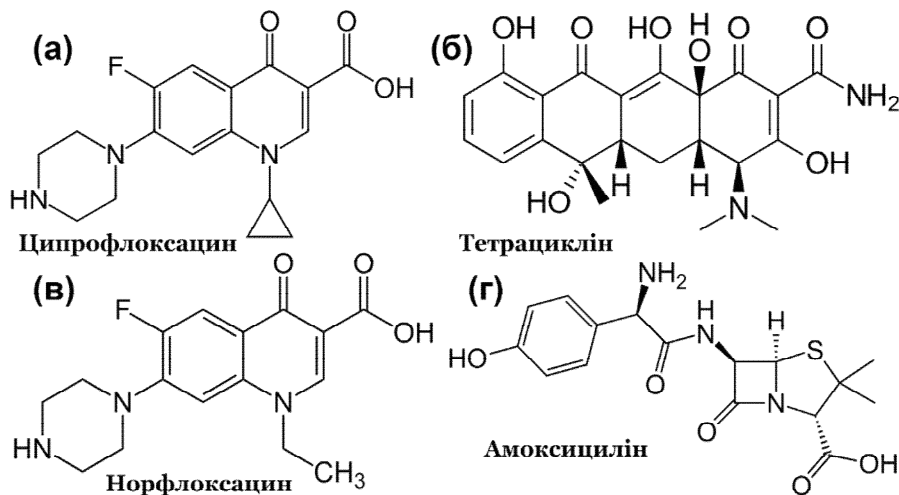


Рис. 2. Зображення хімічної структури досліджуваних антибіотиків у фотокаталітичних процесах: (а) Ципрофлоксацин; (б) Тетрациклін; (в) Норфлуксацин; (г) Амоксицилін.

**Фотокаталітична деградація амоксициліну.** Амоксицилін — це антибіотик пеніцилінового ряду, який широко використовується для лікування різноманітних бактеріальних інфекцій, таких як зубні інфекції, інфекції грудної клітки, вуха та горла. На Рис 2-г показано хімічну структуру амоксициліну. Однак амоксицилін у водному середовищі вважається новим забруднювачем, який може спричинити негативний вплив на здоров'я водних організмів у присутності розчинених молекул у воді. На сьогодні, є деякі дослідження про використання різних фотокаталітичних матеріалів для розкладу амоксициліну [37]. Наприклад, фотодеградація амоксициліну наночастинками діоксиду титану, завантаженими на оксид графену (GO/TiO<sub>2</sub>) гідротермальним методом, описана в [38]. Автори представили, що ключові показники, такі як рН, доза GO/TiO<sub>2</sub>, інтенсивність УФ-випромінювання та початкова концентрація амоксициліну мали значний ефект на продуктивність розкладу амоксициліну. Максимальна ефективність розкладу амоксициліну (99%) була досягнута за наступних експериментальних умов: рН = 6, дозування GO/TiO<sub>2</sub> 0.4 г/л, концентрація амоксициліну 50 мг/л та інтенсивність УФ-випромінювання 36 Вт. Крім того, науковці в [39] синтезували новий фотокаталізатор із фторованого графіту на основі нітриду карбону з магнітними властивостями гідротермальним методом, який можна використовувати для розкладу амоксициліну у воді. Порівняно з g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, фторований Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> з великою питомою площею поверхні (243 м<sup>2</sup>г<sup>-1</sup>), призвів до покращення ефективності розкладу амоксициліну та повної мінералізації розчину.

**Висновки.** У цьому огляді підсумовано дослідження щодо фотокаталітичної деградації антибіотиків. Розглянуто можливі механізми фотокаталітичного розкладу антибіотиків залежно від утворених вільних радикалів та активних форм кисню. Проаналізовано широко використовувані антибіотики, а також представлено ряд використовуваних фотокаталізаторів. Визначено, що допування гетероатомами використовується, як метод підвищення фотокаталітичної ефективності матеріалів. Однак слід зазначити, що металеві допанти можуть служити центрами рекомбінації, які можуть спричинити зниження ефективності фотокаталізаторів. Отже, майбутні дослідження повинні зосередитися на різних варіантах підвищення ефективності існуючих фотокаталізаторів, включаючи легування неметалами, такими як азот, бор та фосфор. Тим часом, утворення гетеропереходу з іншими напівпровідниками, також може відігравати значну роль у модифікації фотокаталізаторів та покращити деградацію антибіотиків. Таким чином, ці методи можуть створити фотокаталізатори видимого спектру світла з підвищеною фотокаталітичною активністю, шляхом звуження ширини забороненої зони фотокаталізатора. Фізико-хімічні властивості, такі як морфологія та площа поверхні, також є дуже важливими факторами в роботі фотокаталізаторів. Тому, вивчення механізму фотокаталітичної деградації на атомарному рівні, є необхідним завданням для підвищення ефективності деградації антибіотиків.

**Список використаних джерел:**

- [1] E.Y. Klein, T.P. Van Boeckel, E.M. Martinez, S. Pant, S. Gandra, S.A. Levin, H. Goossens, R. Laxminarayan, Global increase and geographic convergence in antibiotic consumption between 2000 and 2015, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 115 (2018) 3463–3470. <https://doi.org/10.1073/pnas.1717295115>.
- [2] J. Jeong, W. Song, W.J. Cooper, J. Jung, J. Greaves, Degradation of tetracycline antibiotics: Mechanisms and kinetic studies for advanced oxidation/reduction processes, *Chemosphere*. 78 (2010) 533–540. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.11.024>.
- [3] F. Barancheshme, M. Munir, Strategies to combat antibiotic resistance in the wastewater treatment plants, *Front. Microbiol.* 8 (2018) 2603. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02603>.
- [4] S.F. Yang, C.F. Lin, A. Yu-Chen Lin, P.K. Andy Hong, Sorption and biodegradation of sulfonamide antibiotics by activated sludge: Experimental assessment using batch data obtained under aerobic conditions, *Water Res.* 45 (2011) 3389–3397. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.03.052>.
- [5] P. Liu, H. Zhang, Y. Feng, F. Yang, J. Zhang, Removal of trace antibiotics from wastewater: A systematic study of nanofiltration combined with ozone-based advanced oxidation processes, *Chem. Eng. J.* 240 (2014) 211–220. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.11.057>.
- [6] X. Bai, W. Chen, B. Wang, T. Sun, B. Wu, Y. Wang, Photocatalytic Degradation of Some Typical Antibiotics: Recent Advances and Future Outlooks., *Int. J. Mol. Sci.* 23 (2022) 8130. <https://doi.org/10.3390/ijms23158130>.
- [7] S. Shurbaji, P.T. Huong, T.M. Altahtamouni, Review on the visible light photocatalysis for the decomposition of ciprofloxacin, norfloxacin, tetracyclines, and sulfonamides antibiotics in wastewater, *Catalysts*. 11 (2021) 437. <https://doi.org/10.3390/catal11040437>.
- [8] Z. Wei, J. Liu, W. Shangguan, A review on photocatalysis in antibiotic wastewater: Pollutant degradation and hydrogen production, *Chinese J. Catal.* 41 (2020) 1440–1450. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(19\)63448-0](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(19)63448-0).
- [9] S.I. Polianciuc, A.E. Gurzău, B. Kiss, M.G. Ștefan, F. Loghin, Antibiotics in the environment: causes and consequences., *Med. Pharm. Reports*. 93 (2020) 231–240. <https://doi.org/10.15386/mpr-1742>.
- [10] J.O. Adeyemi, T. Ajiboye, D.C. Onwudiwe, Mineralization of Antibiotics in Wastewater Via Photocatalysis, *Water. Air. Soil Pollut.* 232 (2021) 1–28. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05167-3>.
- [11] T. Hirakawa, K. Yawata, Y. Nosaka, Photocatalytic reactivity for O<sup>2</sup>- and OH radical formation in anatase and rutile TiO<sub>2</sub> suspension as the effect of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> addition, *Appl. Catal. A Gen.* 325 (2007) 105–111. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2007.03.015>.
- [12] B. Ohtani, Photocatalysis A to Z-What we know and what we do not know in a scientific sense, *J. Photochem. Photobiol. C Photochem. Rev.* 11 (2010) 157–178. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2011.02.001>.
- [13] M.M. Khan, S.F. Adil, A. Al-Mayouf, Metal oxides as photocatalysts, *J. Saudi Chem. Soc.* 19 (2015) 462–464. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2015.04.003>.
- [14] I. Mironyuk, N. Danyliuk, L. Turovska, I. Mykytyn, Structural, morphological and photocatalytic properties of TiO<sub>2</sub> obtained by thermolytic decomposition of the [Ti(OH)<sub>6</sub>]<sup>3+</sup>•3Cl<sup>-</sup> aquacomplex, *Phys. Chem. Solid State*. 23 (2022) 741–755. <https://doi.org/10.15330/pcss.23.4.741-755>.
- [15] B. Abebe, H.C.A. Murthy, E. Amare, Enhancing the photocatalytic efficiency of ZnO: Defects, heterojunction, and optimization, *Environ. Nanotechnology, Monit. Manag.* 14 (2020) 100336. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100336>.
- [16] C. Feng, L. Tang, Y. Deng, J. Wang, W. Tang, Y. Liu, Z. Chen, J. Yu, J. Wang, Q. Liang, Synthesis of branched WO<sub>3</sub>@W<sub>18</sub>O<sub>49</sub> homojunction with enhanced interfacial charge separation and full-spectrum photocatalytic performance, *Chem. Eng. J.* 389 (2020) 124474. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124474>.
- [17] H. Cheng, P. Wang, Z. Wang, Y. Liu, B. Huang, Silver-based visible light-responsive photocatalysts, 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102890-2.00013-0>.
- [18] H. Dong, G. Chen, J. Sun, C. Li, Y. Yu, D. Chen, A novel high-efficiency visible-light sensitive Ag<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> photocatalyst with universal photodegradation performances: Simple synthesis, reaction mechanism and first-principles study, *Appl. Catal. B Environ.* 134–135 (2013) 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2012.12.041>.
- [19] X. Wang, S. Li, H. Yu, J. Yu, S. Liu, Ag<sub>2</sub>O as a new visible-light photocatalyst: Self-stability and high photocatalytic activity, *Chem. - A Eur. J.* 17 (2011) 7777–7780. <https://doi.org/10.1002/chem.201101032>.
- [20] K.C. Lee, S.J. Lin, C.H. Lin, C.S. Tsai, Y.J. Lu, Size effect of Ag nanoparticles on surface plasmon resonance, *Surf. Coatings Technol.* 202 (2008) 5339–5342. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.06.080>.
- [21] H.C. Zhou, J.R. Long, O.M. Yaghi, Introduction to metal-organic frameworks, *Chem. Rev.* 112 (2012) 673–674. <https://doi.org/10.1021/cr300014x>.
- [22] P. Li, J. Li, X. Feng, J. Li, Y. Hao, J. Zhang, H. Wang, A. Yin, J. Zhou, X. Ma, B. Wang, Metal-organic frameworks with photocatalytic bactericidal activity for integrated air cleaning, *Nat. Commun.* 10 (2019) 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10218-9>.

- [23] X. Chen, X. Peng, L. Jiang, X. Yuan, J. Fei, W. Zhang, Photocatalytic removal of antibiotics by MOF-derived  $\text{Ti}^{3+}$ - and oxygen vacancy-doped anatase/rutile  $\text{TiO}_2$  distributed in a carbon matrix, *Chem. Eng. J.* 427 (2022) 130945. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130945>.
- [24] S. Cheng, C. Zhang, J. Li, X. Pan, X. Zhai, Y. Jiao, Y. Li, W. Dong, X. Qi, Highly efficient removal of antibiotic from biomedical wastewater using Fenton-like catalyst magnetic pullulan hydrogels, *Carbohydr. Polym.* 262 (2021) 117951. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117951>.
- [25] N. Lakshmana Reddy, V.S. Kumbhar, K. Lee, M. V. Shankar, Graphitic carbon nitride-based nanocomposite materials for photocatalytic hydrogen generation, Elsevier Inc., 2020. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819552-9.00009-9>.
- [26] Y. Wu, Y. Wang, M. Li, Progress in photocatalysis of  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  and its modified compounds, *E3S Web Conf.* 233 (2021) 1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123301114>.
- [27] W.K. Darkwah, Y. Ao, Mini Review on the Structure and Properties (Photocatalysis), and Preparation Techniques of Graphitic Carbon Nitride Nano-Based Particle, and Its Applications, *Nanoscale Res. Lett.* 13 (2018). <https://doi.org/10.1186/s11671-018-2702-3>.
- [28] T.K. Kim, T. Kim, H. Park, I. Lee, A. Jo, K. Choi, K.D. Zoh, Degradation of ciprofloxacin and inactivation of ciprofloxacin resistant *E. faecium* during UV-LED (275 nm)/chlorine process, *Chem. Eng. J.* 394 (2020) 124803. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124803>.
- [29] X. Yu, J. Zhang, J. Zhang, J. Niu, J. Zhao, Y. Wei, B. Yao, Photocatalytic degradation of ciprofloxacin using Zn-doped  $\text{Cu}_2\text{O}$  particles: Analysis of degradation pathways and intermediates, *Chem. Eng. J.* 374 (2019) 316–327. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.05.177>.
- [30] X.J. Wen, C.G. Niu, L. Zhang, C. Liang, H. Guo, G.M. Zeng, Photocatalytic degradation of ciprofloxacin by a novel Z-scheme  $\text{CeO}_2\text{-Ag/AgBr}$  photocatalyst: Influencing factors, possible degradation pathways, and mechanism insight, *J. Catal.* 358 (2018) 141–154. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2017.11.029>.
- [31] P. Semeraro, S. Bettini, S. Sawalha, S. Pal, A. Licciulli, F. Marzo, N. Lovergine, L. Valli, G. Giancane, Photocatalytic degradation of tetracycline by  $\text{ZnO}/\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  paramagnetic nanocomposite material, *Nanomaterials.* 10 (2020) 1–12. <https://doi.org/10.3390/nano10081458>.
- [32] W. Wang, J. Fang, S. Shao, M. Lai, C. Lu, Compact and uniform  $\text{TiO}_2@g\text{-C}_3\text{N}_4$  core-shell quantum heterojunction for photocatalytic degradation of tetracycline antibiotics, *Appl. Catal. B Environ.* 217 (2017) 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.05.037>.
- [33] F. Chen, Q. Yang, J. Sun, F. Yao, S. Wang, Y. Wang, X. Wang, X. Li, C. Niu, D. Wang, G. Zeng, Enhanced Photocatalytic Degradation of Tetracycline by  $\text{AgI}/\text{BiVO}_4$  Heterojunction under Visible-Light Irradiation: Mineralization Efficiency and Mechanism, *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 8 (2016) 32887–32900. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b12278>.
- [34] I. Ahmad, R. Bano, S.G. Musharraf, M.A. Sheraz, S. Ahmed, H. Tahir, Q. Ul Arfeen, M.S. Bhatti, Z. Shad, S.F. Hussain, Photodegradation of norfloxacin in aqueous and organic solvents: A kinetic study, *J. Photochem. Photobiol. A Chem.* 302 (2015) 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2015.01.005>.
- [35] M. Sayed, L.A. Shah, J.A. Khan, N.S. Shah, J. Nisar, H.M. Khan, P. Zhang, A.R. Khan, Efficient photocatalytic degradation of norfloxacin in aqueous media by hydrothermally synthesized immobilized  $\text{TiO}_2/\text{Ti}$  films with exposed (001) facets, *J. Phys. Chem. A.* 120 (2016) 9916–9931. <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.6b09719>.
- [36] J. Tang, R. Wang, M. Liu, Z. Zhang, Y. Song, S. Xue, Z. Zhao, D.D. Dionysiou, Construction of novel Z-scheme  $\text{Ag}/\text{FeTiO}_3/\text{Ag}/\text{BiFeO}_3$  photocatalyst with enhanced visible-light-driven photocatalytic performance for degradation of norfloxacin, *Chem. Eng. J.* 351 (2018) 1056–1066. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.06.171>.
- [37] E.S. Elmolla, M. Chaudhuri, Photocatalytic degradation of amoxicillin, ampicillin and cloxacillin antibiotics in aqueous solution using UV/ $\text{TiO}_2$  and UV/ $\text{H}_2\text{O}_2/\text{TiO}_2$  photocatalysis, *Desalination.* 252 (2010) 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.11.003>.
- [38] D. Balarak, N. Mengelizadeh, P. Rajiv, K. Chandrika, Photocatalytic degradation of amoxicillin from aqueous solutions by titanium dioxide nanoparticles loaded on graphene oxide, *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28 (2021) 49743–49754. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13525-1>.
- [39] A. Mirzaei, Z. Chen, F. Haghghat, L. Yerushalmi, Magnetic fluorinated mesoporous  $g\text{-C}_3\text{N}_4$  for photocatalytic degradation of amoxicillin: Transformation mechanism and toxicity assessment, *Appl. Catal. B Environ.* 242 (2019) 337–348. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2018.10.009>.

**В.В. Наход, М.І. Скіпалький, П.В. Сахнюк, О.В. Замуруєва, С.А. Федосов**

*Волинський національний університет імені Лесі Українки*

## **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ГЕТЕРОСТРУКТУР**

*У статті проаналізовано публікації авторитетних світових науковців у галузі моделювання гетероструктур для розуміння закономірностей підтримки та розвитку цього напрямку у світі і в Україні, визначення перспектив нових досліджень. Розглянуто особливості міжнародної співпраці, окреслено коло провідних публікацій у науковій галузі, проаналізовано фактори впливу вчених різних країн на розвиток цієї галузі. Сформульовано пропозиції для покращення поширення результатів вітчизняних вчених у світовій науковій спільноті за цим напрямом.*

*Ключові слова:* моделювання, гетероструктури, наукові дослідження, публікації, галузі знань.

**V. Nakhod, M. Skipalskiy, P. Sakhniuk, O. Zamurujeva, S. Fedosov**

## **MODELING OF PROCESSES FORMING HETEROSTRUCTURES**

*The article analyzes the publications of authoritative world scientists in the field of modeling of heterostructures to understand the patterns of support and development of this area in the world and in Ukraine, to identify prospects for new research. The peculiarities of international cooperation are considered, the range of leading publications in the scientific field is outlined, the factors of influence of scientists of different countries on the development of this field are analyzed. Proposals were formulated to improve the dissemination of the results of domestic scientists in the world scientific community in this direction.*

*Keywords:* modeling, heterostructures, scientific research, publications, subject areas.

**Постановка проблеми.** Фізика двовимірних (2D) матеріалів і гетероструктур на основі таких кристалів розвивається надзвичайно швидко. З цими новими матеріалами почала з'являтися справжня двовимірна фізика (наприклад, відсутність дальнього порядку, двовимірні екситони, перехід від співмірного до неспівмірного тощо). Також починають з'являтися нові гетероструктурні пристрої, такі як тунельні транзистори, резонансні тунельні діоди та світловипромінювальні діоди. Складені з окремих двовимірних кристалів, такі пристрої використовують властивості цих матеріалів для створення функцій, недоступних в інших гетероструктурах.

Штучні гетероструктури Ван-дер-Ваальса з двовимірними (2D) атомними кристалами є перспективними як активний канал або як буферний контактний шар для пристроїв нового покоління. Однак справжні двовимірні гетероструктурні пристрої залишаються обмеженими через процес перенесення за участю домішок і формування метастабільної та неоднорідної гетероструктури. Підбір окремих двовимірних матеріалів у гетероструктури Ван-дер-Ваальса дозволяє створювати шаруваті тривимірні матеріали з бажаними електронними та оптичними властивостями. Основною проблемою у виготовленні цих структур є формування чистих границь між окремими двовимірними матеріалами, що впливає на ефективність пристроїв.

Проблемами моделювання гетероструктур займається значна кількість науковців усього світу, що відображено у великій кількості і цитованості публікацій у наукометричній базі даних Scopus та підтверджує актуальність таких досліджень. Однак, незначна кількість статей українських вчених є ознакою необхідної популяризації і розвитку цього перспективного наукового напрямку в українських наукових центрах.

**Постановка завдань.** В роботі поставлено мету – виконати аналіз досліджень, які стосуються моделювання процесів формування гетероструктур, зробити спробу визначити особливості розвитку даної тематики у світі та пошуку шляхів ефективного розвитку цього напрямку в Україні.

**Методологія досліджень.** Проведено аналіз публікацій, індексованих у наукометричній базі Scopus за ключовими словами (тегом) «modeling of heterostructures» (моделювання гетероструктур) і «modeling of heterostructure formation» (моделювання формування гетероструктур). Для порівняльного аналізу відібрано статті з пошуку у назві статті (Article title), анотації (Abstract) і ключових словах (Keywords) у 2 039 наукових працях за період 2002-2023 рр. Аналізувалися: країни і наукові організації авторів, наявність фінансової підтримки досліджень, самі публікації, а також найпопулярніші і найцитованіші видання, у яких здійснено публікацію, їх кількість та приналежність до галузі знань.



**Викладення основного матеріалу.** Станом на січень 2023 р. у наукометричній БД Scopus за період 1987-2023 рр. опубліковано 176 наукових праць пов'язаних з моделюванням формування гетероструктур, але значно більша їх кількість (2 427) у загальному запиті – моделювання гетероструктур. Це робить коректним і доцільним саме порівняльний аналіз за двома запитами (більш загального і уточненого). Високі сумарні h-індекси ( $h = 94$  і  $28$ ) і щорічне (а з 2010 р. особливо різке) зростання кількості публікацій, лише підтверджує велику зацікавленість науковців до цих досліджень і особливо підвищений інтерес в останні роки.

Із аналізу за двома пошуковими запитами із 2 039 і 166 наукових праць за період 2002-2023 рр. більше половини всіх робіт незмінно опубліковано вченими зі США (рис. 1). Серед країн-лідерів, також, є: Китай, РФ, Німеччина, Франція тощо. Значно важливіше знати не країни-лідери, а установи, де проводяться передові дослідження, щоб переймати досвід їхньої діяльності. Такі дослідження з даної тематики зосереджено у провідних науково-дослідних центрах (табл. 1, рядок 1), серед яких: *CNRS Centre National de la Recherche Scientifique, Chinese Academy of Sciences, Purdue University, Massachusetts Institute of Technology, National University of Singapore, Cornell University* тощо. Саме ці організації займають лідируючі позиції з досліджень присвячених моделюванню процесів формування гетероструктур, а отже володіють високим науковим потенціалом і найкращими матеріально-технічними базами. Закономірно, що провідні центри належать саме країнам-лідерам, досвід яких українським науковцям слід вивчати і переймати, а організаціям налагоджувати тісні партнерські відносини.

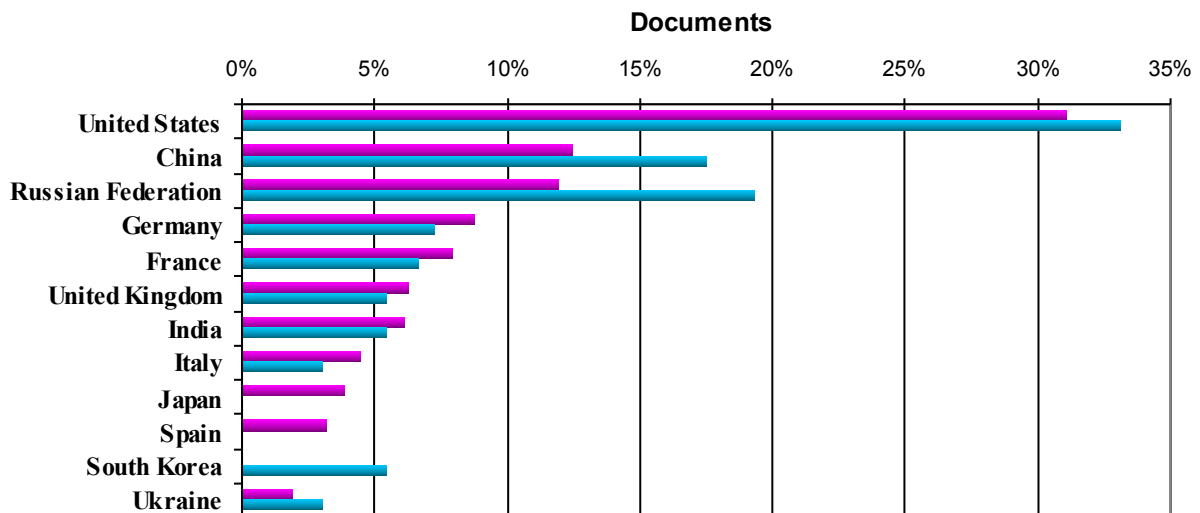


Рис. 1. Діаграма країн із найбільшою кількістю публікацій та України

Важливим аспектом для проведення досліджень є їх фінансова підтримка. Найбільшими світовими організаціями, що фінансують дослідження в даній галузі – здебільшого організації з Китаю, США і країн ЄС (табл. 1, рядок 2): *National Science Foundation, National Natural Science Foundation of China, U.S. Department of Energy, Horizon 2020 Framework Programme, Basic Energy Sciences, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Office of Science* тощо. Майже усі ці організації, як і були, так і залишаються незмінними донині основними спонсорами досліджень. Тому для успішної реалізації досліджень українським науковцям слід шукати шляхи для їх фінансової підтримки саме серед цих потужних організацій. Як один із варіантів для українських вчених – виконання своїх досліджень або в закордонних центрах, які вже мають таку підтримку, вигравши певний дослідницький грант, або плідна співпраця української організації із закордонною.

У найцитованіших і водночас найновіших публікаціях (2002-2023 рр.) відображаються найбільш прогресивні і найактуальніші результати досліджень пов'язаних з моделюванням формувань гетероструктур. Автори [1] використали індуковане лазером фазове моделювання, розробку полі морфів для створення омічного гетерофазного гомопереходу між напівпровідниковим гексагональним (2H) і металевим моноклінним (1T') дителлуридом молібдену ( $\text{MoTe}_2$ ), який є стабільним до  $300^\circ\text{C}$  і збільшує рухливість носіїв транзистора  $\text{MoTe}_2$  приблизно в 50 разів, зберігаючи при цьому високе співвідношення струмів увімкнення/вимкнення  $10^6$ . Результати скануючої просвічуючої електронної мікроскопії в поєднанні з теоретичними

розрахунками показали, що вакансія Те запускає локальний фазовий перехід у  $\text{MoTe}_2$ , досягаючи справжнього 2D приладу з омичним контактом. У [2] представлено техніку швидкого пакетного виготовлення гетероструктур Ван-дер-Ваальса, продемонстровану контрольованим виробництвом моно-, дво- і тришарових графенових стеків, інкапсульованих у гексагональний нітрид бору, з виходом, близьким до 100 %. Для одношарових пристроїв виявлено напівкласичні середні вільні довжини до 0,9 мкм, причому найвужчі зразки демонстрували чіткі ознаки того, що на рухливість впливало граничне розсіювання. У [3] повідомлено про однобаковий синтетичний підхід з використанням єдиного гетерогенного твердого джерела для безперервного виготовлення бічних гетероструктур з кількома контактами, що складаються з моношарів дихалькогенідів перехідних металів. Послідовне утворення гетеропереходів досягалося виключно зміною складу реакційоздатного газового середовища в присутності водяної пари. Це дозволяло вибірково контролювати спричинене водою окислення та випаровування кожного попередника перехідного металу, а також його зародження на підкладці, що призводить до послідовної крайової епітаксії окремих дихалькогенідів перехідного металу. Даний новий підхід пропонує більшу гнучкість і контроль, ніж попередні методи, для безперервного зростання бічних гетероструктур на основі перехідних металів і дихалькогенідів.

Таблиця 1.

**Передові організації світових досліджень**

Моделювання гетероструктур		Моделювання формування гетероструктур
<i>Russian Academy of Sciences, RF</i> <i>CNRS Centre National de la Recherche Scientifique, France</i> <i>Ioffe Institute, RF</i> <i>Chinese Academy of Sciences, China</i> <i>Purdue University, US</i> <i>National Institute for Materials Science, Japan</i> <i>Ministry of Education China, China</i> <i>National University of Singapore, Singapore</i> <i>Massachusetts Institute of Technology, US</i> <i>Pennsylvania State University, US</i>	<b>Науково - дослідні центри</b>	<i>Ioffe Institute, RF</i> <i>CNRS Centre National de la Recherche Scientifique, France</i> <i>Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics University ITMO, RF</i> <i>Russian Academy of Sciences, RF</i> <i>Chinese Academy of Sciences, China</i> <i>Cornell University, US</i> <i>National University of Singapore, Singapore</i> <i>Tsinghua University, China</i> <i>University of Nebraska–Lincoln, US</i> <i>University of California, Santa Barbara, US</i>
<i>National Science Foundation</i> <i>National Natural Science Foundation of China</i> <i>U.S. Department of Energy</i> <i>Russian Foundation for Basic Research</i> <i>Horizon 2020 Framework Programme Engineering and Physical Sciences Research Council</i> <i>Basic Energy Sciences</i> <i>Deutsche Forschungsgemeinschaft</i> <i>Office of Science</i> <i>European Research Council</i>	<b>Організації, що фінансують дослідження</b>	<i>National Science Foundation</i> <i>National Natural Science Foundation of China</i> <i>Russian Foundation for Basic Research</i> <i>Air Force Office of Scientific Research</i> <i>Russian Science Foundation</i> <i>U.S. Department of Energy</i> <i>Office of Science</i> <i>Basic Energy Sciences</i> <i>Department of Science and Technology, Ministry of Science and Technology, India</i> <i>Division of Materials Sciences and Engineering</i>

У [4] повідомлено про ефективну стратегію суттєвого інгібування дифузії іонів у площині в двовимірних галюїдних перовскітах шляхом включення жорстких  $\pi$ -спряжених органічних лігандів. Показані високостабільні та регульовані бічні епітаксціальні гетероструктури, мультигетероструктури та надгратки. Майже атомно чіткі межі розділу та епітаксійне зростання виявляються за допомогою просвічуючої електронної мікроскопії високої роздільної здатності з корекцією аберацій низької дози. Моделювання молекулярної динаміки підтвердило знижений

розлад гетероструктури та більшу енергію утворення вакансій двовимірних перовскітів у присутності спряжених лігандів. Ці результати дають зрозуміти іммобілізацію та стабілізацію галогенідних перовскітних напівпровідників і демонструють матеріальну платформу для складних і молекулярно-тонких надграток, пристроїв та інтегральних схем. У статті [5] представлено теоретичний аналіз поведінки дислокацій та релаксації напружень у семіполярній III-нітридній гетероепітаксії, наприклад, для шарів  $Al_xGa_{1-x}N$  і  $In_yGa_{1-y}N$ , вирощених на напівполярних площинах типу hh2-h-m- або h0h-m підкладок GaN. Показано, що напруження зсуву на унікальній похилій базальній (0001) площині не звертаються до нуля для таких геометрій росту. Це призводить до початку релаксаційних процесів у напівполярних III-нітридних гетероструктурах через ковзання дислокацій у базальних системах ковзання і до утворення дислокацій невідповідності (MD) з деякими векторами Бюргерса на напівполярному гетероінтерфейсі. Результати моделювання обговорюються у світлі останніх експериментальних спостережень МН та нахилу кристалічної ґратки в семіполярних III-нітридних гетероепітаксіальних шарах.

Зокрема у найбільш цитованій з моделювання гетероструктур роботі [6] розглянуто властивості нових двовимірних кристалів і вивчено, як їхні властивості використовуються в нових гетероструктурних пристроях. Робота [7] присвячена вивченню гетероструктури, що складається з двошарового графену, в якому два шари графену закручені відносно один одного на певний кут. Експериментально продемонстровано, що для кутів близьких до «магічного» кута, структура електронної зони поблизу нульової енергії Фермі стає плоскою через сильний міжшаровий зв'язок. Властивості двошарових графенових гетероструктур із закрученим магічним кутом дозволяють припустити, що ці матеріали можна використовувати для вивчення інших екзотичних квантових фаз багатьох тіл у двох вимірах за відсутності магнітного поля. Доступність плоских зон через електричну настроюваність і настроюваність смуги пропускання через кут закручування може прокласти шлях до більш екзотичних корельованих систем, таких як нетрадиційні надпровідники та квантові спінові рідини. Автори [8] розширюють діапазон гетероструктур на основі 2D кристалів до фотоактивних за допомогою напівпровідникових діхалькогенідів перехідних металів (TMDC)/графенових стеків. Сингулярності Ван Хова в електронній щільності станів TMDC гарантують посилену взаємодію між світлом і речовиною, що призводить до посиленого поглинання фотонів і створення електронних дірок (які збираються в прозорих графенових електродах). Це дозволяє розробляти надзвичайно ефективні гнучкі фотоелектричні пристрої з фоточутливістю понад 0,1 А/Вт (що відповідає зовнішньому квантовому ККД понад 30 %).

У [9] автори вивчали контактну геометрію, в якій металізовано лише одновимірний край двовимірного шару графену. На додаток до кращої продуктивності звичайних поверхневих контактів, геометрія крайового контакту дозволила повністю відокремити збірку шарів і процеси металізації контактів. У графенових гетероструктурах це забезпечило високу електронну продуктивність, включаючи низькотемпературний балістичний транспорт на відстані більше 15 мікрометрів, і рухливість при кімнатній температурі, порівнянну з теоретичною межею розсіювання фононів. Геометрія крайового контакту надало нові можливості для проектування багатошарових структур із комплементарних 2D матеріалів. У [10] розглянуто значні останні досягнення та важливі нові розробки у 2D-матеріалах «за межами графену». Авторами надано уявлення про теоретичне моделювання та розуміння сил Ван-дер-Ваальса (vdW), які утримують разом двовимірні шари в об'ємних твердих тілах, а також їхні екситонні властивості та морфологію росту. Крім того, висвітлено нещодавні прориви в синтезі та характеристиках TMD і обговорено нові сімейства 2D матеріалів, включаючи моноелементні 2D матеріали (наприклад, силіцен, фосфорен тощо) і MXenes на основі карбиду та нітриду вуглецю перехідного металу. Також обговорено легування та функціоналізацію двовимірних матеріалів за межами графену, які дозволяють застосовувати пристрої, а потім прогрес у електронних, оптоелектронних і магнітних пристроях і теорії. Запропоновано, також, перспективи майбутнього двовимірних матеріалів за межами графену.

Найвагоміші результати досліджень світових науковців опубліковано у авторитетних виданнях (табл. 2). Найбільшу кількість водночас, як за загальнішим так і за уточненим запитом, опубліковано у журналах (табл. 2, рядок 1): *Journal of Applied Physics* (SJR 0,67), *Nature Communications* (SJR 4,85), *Physical Review B* (SJR 1,54), *Applied Physics Letters* (SJR 1,03), *Journal of Physics: Conference Series* (SJR 0,21), *Nano Letters* (SJR 3,76) тощо, які є традиційно найпопулярнішими для світових фахівців даного напрямку досліджень. Тоді як найбільш цитовані статті опубліковані в основному лише у топових Q1 (з високим SJR) журналах (табл. 2, рядок 1):

*Science* (SJR 14,59), *Nature* (SJR 17,9), *Nature Communications* (SJR 4,85), *ACS Nano* (SJR 4,61), *Nature Nanotechnology* (SJR 11,7) тощо. А журнали, такі як: *Nature Communications*, *Journal of Applied Physics*, водночас є як найбільш популярні так і цитованими. Також, значна кількість публікацій видана не лише у топових журналах, але й у великій кількості матеріалів конференцій, таких як: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* (SJR 0,19), *IEEE Transactions on Electron Devices* (SJR 0,7), *Materials Research Society Symposium - Proceedings*, що вказує на важливість участі науковців у роботі таких заходів, зокрема представлення на них своїх наукових результатів.

Таблиця 2.

**Порівняльна характеристика джерела публікацій світових досліджень**

Моделювання гетероструктур		Моделювання формування гетероструктур
<p><i>Journal of Applied Physics</i>, US (Q2 0,67)</p> <p><i>Nature Communications</i>, UK (Q1 4,85)</p> <p><i>Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering</i>, US (0,19)</p> <p><i>Applied Physics Letters</i>, US (Q1 1,03)</p> <p><i>Physical Review B</i>, US (Q1 1,54)</p> <p><i>IEEE Transactions on Electron Devices</i>, US (Q2 0,7)</p> <p><i>Journal of Physics: Conference Series</i>, UK (0,21)</p> <p><i>Nano Letters</i>, US (Q1 3,76)</p> <p><i>Materials Research Society Symposium - Proceedings</i>, US</p>	<p><b>Най-популярніші, країна (SJR)</b></p>	<p><i>Nature Communications</i>, UK (Q1 4,85)</p> <p><i>Physical Review B</i>, US (Q1 1,54)</p> <p><i>Applied Surface Science</i>, Netherlands (Q1 1,15)</p> <p><i>Journal of Physics: Conference Series</i>, UK (0,21)</p> <p><i>Nano Letters</i>, US (Q1 3,76)</p> <p><i>2D Materials</i>, UK (Q1 2,01)</p> <p><i>ACS applied materials &amp; interfaces</i>, US (Q1 2,14)</p> <p><i>Applied Physics Letters</i>, US (Q1 1,03)</p> <p><i>Journal of Applied Physics</i>, US (Q2 0,67)</p> <p><i>Journal of Physical Chemistry C</i>, US (Q1 1,1)</p>
<p><i>Science</i>, US (Q1 14,59)</p> <p><i>Nature</i>, UK (Q1 17,9)</p> <p><i>ACS Nano</i>, US (Q1 4,61)</p> <p><i>Nature Nanotechnology</i>, UK (Q1 11,7)</p>	<p><b>Най-цитованіші, країна (SJR)</b></p>	<p><i>Science</i>, US (Q1 14,59)</p> <p><i>Nature Communications</i>, UK (Q1 4,85)</p> <p><i>Nature</i>, UK (Q1 17,9)</p> <p><i>Journal of Applied Physics</i>, US (Q2 0,67)</p> <p><i>Small</i>, Germany (Q1 3,23)</p> <p><i>Chemical Engineering Journal</i>, Netherlands (Q1 2,42)</p>

Важливим аспектом сучасних досліджень є формування наукових колективів, із підбором і залученням фахівців з різних галузей знань, для забезпечення комплексних результатів. Тому цікавими і важливими є результати аналізу за галуззю знань, з якою позиціонується певна публікація. Для світових публікацій пов'язаних з моделюванням процесів формування гетероструктур, як за загальнішим так і за уточненим запитами, переважаючими є галузі: «Фізика та астрономія», «Матеріалознавство», «Інженерія», «Хімія» (рис. 2).

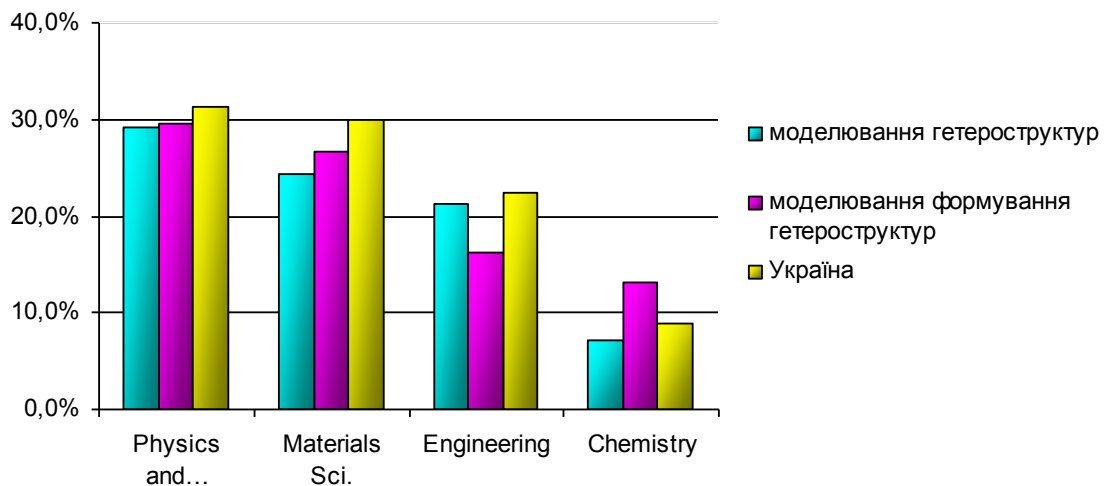


Рис. 2. Переважаючі галузі знань публікацій з моделювання процесів формування гетероструктур

Хоча загальна тенденція і зберігається незалежно від пошукового запиту – чітко виділені чотири галузі знань, однак, дещо вищі світові відсоткові значення кількості публікацій за більш загальним проти за уточненим запитами пов'язані з галуззю «Інженерія» (21,2 проти 16,2 %). Тоді як для «Матеріалознавства» (24,3 проти 26,7 %) і «Хімії» (7,2 проти 13,1 %) ситуація протилежна та майже незмінна для галузі «Фізика та астрономія» (29,1 і 29,6 %). Лідерство «Фізики та астрономії» вказує на те, що відповідні дослідження більше інтегровані саме до конкретних областей фізики і перейшли у практичне русло, яке пов'язане з матеріалознавством, інженерією чи хімією. Також є очевидними, в залежності від виду запиту, незначні зміни пріоритетів у напрямках досліджень, а саме інтерес науковців комп'ютерних наук і біохімії.

Для України, із 39 наукових публікацій за більш загальним запитом (за уточненим лише 5, тому оцінка не проводилася із-за некоректності аналізу) переважаючі є усі ті ж галузі як і в світі (рис. 1), лише з дещо іншими пріоритетами. Майже однакові значення для «Фізика та астрономія» (31,3 % проти 29,1 %) і «Інженерія» (22,5 проти 21,2 %) та дещо вищі для «Матеріалознавства» (30 проти 24,3 %) і «Хімії» (8,9 проти 7,2 %). Однак значно вищі українські відсоткові значення кількості публікацій за основними галузями знань проти світових становить більше 90 % (на інші близько 8 %) можна пояснити значним фундаментальним доробком, сконцентрованим саме на цих галузях. Менша за основними (80 %) і значно більша (20 %) кількості публікацій пов'язані з іншими галузями («Комп'ютерні науки», «Біохімія», «Біотехнології» тощо) пояснюється значними фундаментальними і розвинутими прикладними напрацюваннями. Світові науковці намагаються знайти практичне застосування результатів своїх досліджень. Також, часто такі напрями визначаються наявною матеріальною базою, розробленим програмним забезпеченням, або публікаціями у співпраці вчених з різних країн, де кожна наукова група чітко виконує свою частину роботи.

**Висновки.** Проведений порівняльний аналіз світових публікацій пов'язаних з вивченням проблем моделювання процесів формування гетероструктур (і моделювання гетероструктур) дає можливість зрозуміти, які сучасні виклики стоять перед науковцями і які можливі шляхи їх подолання. Однозначно, дана тематика є актуальною і потребує подальших комплексних наукових досліджень, як у фундаментальному так і прикладному аспектах. Наведена інформація і надані пропозиції в статті будуть корисним для українських фахівців, які займаються даним питаннями і дозволять раціонально спрямувати свою наукову діяльність для ефективних шляхів розвитку цього напрямку і розв'язання дослідницьких проблем на рівні світових.

#### Список використаних джерел:

10. Cho S., Kim S., Kim J.H., (...), Lee Y.H., Yang H. Phase patterning for ohmic homojunction contact in MoTe<sub>2</sub>. *Science*. 2015. Vol. 349. № 6248. P. 625–628.

11. Pizzocchero F., Gammelgaard L., Jessen B.S., et al. The hot pick-up technique for batch assembly of van der Waals heterostructures. *Nature Communications*. 2016. Vol. 7. 11894.
12. Sahoo P.K., Memaran S., Xin Y., Balicas L., Gutiérrez H.R. One-pot growth of two-dimensional lateral heterostructures via sequential edge-epitaxy. *Nature*. 2018. Vol. 553, № 7686. P. 63–67.
13. Shi E., Yuan B., Shiring S.B., et al. Two-dimensional halide perovskite lateral epitaxial heterostructures. *Nature*. 2020. Vol. 580, № 7805. P. 614–620.
14. Romanov A.E., Young E.C., Wu F., (...), Denbaars S.P., Speck J.S. Basal plane misfit dislocations and stress relaxation in III-nitride semipolar heteroepitaxy. *Journal of Applied Physics*. 2011. Vol. 109, № 10. 103522.
15. Novoselov K.S., Mishchenko A., Carvalho A., Castro Neto A.H. 2D materials and van der Waals heterostructures. *Science*. 2016. Vol. 353, № 6298. aac9439.
16. Cao Y., Fatemi V., Demir A., (...), Ashoori R.C., Jarillo-Herrero P. Correlated insulator behaviour at half-filling in magic-angle graphene superlattices. *Nature*. 2018. Vol. 556, № 7699. P. 80–84.
17. Britnell L., Ribeiro R.M., Eckmann A., (...), Castro Neto A.H., Novoselov K.S. Strong light-matter interactions in heterostructures of atomically thin films). *Science*. 2013. Vol. 340, № 6138. P. 1311–1314.
18. Wang L., Meric I., Huang P.Y., (...), Shepard K.L., Dean C.R. One-dimensional electrical contact to a two-dimensional material. *Science*. 2013. Vol. 342, № 6158. P. 614–617.
19. Bhimanapati G.R., Lin Z., Meunier V., (...), Terrones M., Robinson J.A. Recent Advances in Two-Dimensional Materials beyond Graphene. *ACS Nano*. 2015. Vol. 9, № 12. P. 11509–11539.

УДК 539.3

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.33

**О. В. Верешко<sup>1</sup>, Св.Св. Гомон<sup>2</sup>**

*Луцький національний технічний університет<sup>1</sup>  
Національний університет водного господарства та природокористування<sup>2</sup>*

### **НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗГИНАЛЬНИХ ДЕРЕВ'ЯНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В УМОВАХ ВПЛИВУ АГРЕСИВНОГО КИСЛОТНОГО СЕРЕДОВИЩА З ВРАХУВАННЯМ ПОВНИХ ДІАГРАМ ДЕФОРМУВАННЯ МАТЕРІАЛУ**

*Проведено аналіз літературних джерел щодо методик розрахунку згинальних дерев'яних елементів з врахуванням фактору агресивного кислотного середовища. Виявлено, що практично відсутні методики розрахунку елементів за таких умов експлуатації. Встановлено реальний напружено-деформований стан згинального дерев'яного елемента з врахуванням дії на нього агресивного кислотного середовища з врахуванням дійсних механічних властивостей матеріалу та теорій механіки деформівного твердого тіла. В подальшому необхідно розробити методику розрахунку таких елементів за дії агресивного кислотного середовища.*

*Ключові слова:* Деревина, міцність, деформівність, напружено-деформований стан, кислотне середовище, згинальний елемент.

**O. V. Vereshko, S.S. Homon**

### **THE STRESSED AND DEFORMED STATE OF BENDING WOODEN ELEMENTS UNDER INFLUENCE OF AN AGGRESSIVE ACID ENVIRONMENT TAKING INTO ACCOUNT COMPLETE DIAGRAMS OF THE DEFORMATION MATERIAL**

*Wood can be subjected to various aggressive influences, including acidic ones. Various materials, including wood, can experience such effects at enterprises of the food and chemical industries and many others. It is more chemically resistant compared to metal, concrete and reinforced concrete. One of the most widespread are bending wooden elements and structures that can work under such operating conditions. Currently, the influence of an acidic environment on such elements is insufficiently studied, and the methods of calculation under such operating conditions, which take into account the actual mechanical properties of the material, are not fully presented.*

*An analysis of literary sources on calculation methods of bending wooden elements taking into account the factor of aggressive acidic environment was carried out. It was found that there are practically no methods for calculating elements under such operating conditions.*

*The main tool for creating a model of the operation of a bending element in an aggressive acid environment is the following prerequisites:*

- all necessary equilibrium equations that arise in the cross-section of the bending element;*
- deformation occurs according to a linear law;*
- the use of true functions of the full deformation diagrams of the compressed and stretched zones of the element.*

*Therefore, we will analyze the work of such an element in the following sequence:*

- it is necessary to determine the strength of the bending element and establish the main factors affecting it;*
- to propose a general method for determining the stiffness of an element and also to establish the factors that influence it.*

- to develop calculation methods for comparing the bearing capacity and stiffness of wooden bending elements.*

*The actual stress-strain state of a bending wooden element is established, taking into account the action of an aggressive acid medium on it, taking into account the actual mechanical properties of the material and the theories of the mechanics of a deformable solid body.*

*In the future, it is necessary to develop a methodology for calculating such elements under the action of an aggressive acid environment.*

*Key words:* Wood, strength, deformability, stressed-deformed state, acidic environment, bending element.

**Постановка проблеми.** Деревина – це цінний природний матеріал, який використовується як у повсякденному житті, так і в різних галузях народного господарства. З кожним роком запаси деревини у світі скорочуються. Тому необхідно раціонально використовувати наявні породи деревини. З іншого боку деревина може зазнавати різних агресивних впливів, в тому числі і кислотних. Таких впливів різні матеріали, в тому числі і деревина, можуть зазнавати на підприємствах харчової та хімічної промисловості та багато інших. Вона є більш хімічно стійкою у порівнянні з металом, бетоном та залізобетоном. Одним із найбільш розповсюджуваних є згинальні дерев'яні елементи та конструкції, які можуть працювати за таких умов експлуатації. На даний час недостатньо вивчений вплив кислотного середовища на такі елементи та не в повній мірі

*О. В. Верешко, Св.Св. Гомон*



представлені методики розрахунку за таких умов експлуатації, що враховують дійсні механічні властивості матеріалу.

**Аналіз останніх досліджень.** Міцнісні показники деревини під дією активних водних та кислотних середовищ вивчалися різними вченими [1-5]. Але, на жаль, результати їх експериментальних досліджень для різних порід деревини значно різняться, що не в повній мірі дозволяє враховувати при розрахунку дерев'яних елементів та конструкцій за таких умов експлуатації. Деформівні характеристики в даних роботах взагалі практично не вивчалися.

Нами були проведені цілеспрямовані широкомасштабні експериментальні дослідження деревини берези та сосни на зразках конструкційних розмірів перерізом 30x30x120 мм та встановлено істинні значення граничної міцності, критичних, граничних та залишкових деформацій під дією молочної, соляної та оцтової кислот різної концентрації [6-9]. На основі експерименту також побудовані повні діаграми деформування. Також запропонована методика з визначення початкового модуля пружності та модуля деформацій [10] за таких умов експлуатації та встановлено істинні значення зміни питомої ваги деревини берези та сосни за різної концентрації кислотного середовища [11].

Але актуальною задачею залишається встановлення напружено-деформованого стану згинальних дерев'яних елементів за дії на них агресивного кислотного середовища.

**Постановка завдання.** Метою роботи є встановлення напружено-деформованого стану дерев'яних елементів в умовах впливу агресивного кислотного середовища з врахуванням повних діаграм деформування матеріалу.

**Виклад основного матеріалу.** Чинні норми проектування [12,13] практично не дозволяють розрахувати дерев'яні елементи та конструкції за дії агресивного кислотного середовища. Тільки в роботі [5] запропоновано методику розрахунку таких елементів і конструкцій і то тільки з обмеженими експлуатаційними характеристиками, що не дає в повній мірі встановити дійсний напружено-деформований стан з прогнозованими механічними властивостями матеріалу.

Отже, необхідно розробити методику розрахунку, яка б давала можливість розраховувати згинальні елементи та конструкції на основі деревини за дії агресивного кислотного середовища з врахуванням всіх експлуатаційних факторів та істинних механічних властивостей матеріалу, а також прослідкувати зміни роботи на різних стадіях навантаження елемента.

Основним інструментом для створення такої моделі роботи згинального елемента в агресивному кислотному середовищі є наступні передумови:

- всі необхідні рівняння рівноваги, які виникають у поперечному перерізі згинального елемента;
- деформування відбувається за лінійним законом;
- використання істинних функцій повних діаграм деформування стиснутої та розтягнутої зон елемента.

Отже, аналіз роботи такого елемента будемо проводити в наступній послідовності:

- необхідно визначити міцність згинального елемента та встановити основні фактори, які на неї впливають;
- запропонувати загальну методику з визначення жорсткості елемента та також встановити фактори, які на неї впливають.
- розробити методики розрахунку з порівняння несучої здатності та жорсткості дерев'яних згинальних елементів.

Основним інструментом для розрахунку згинальних елементів на основі деревини, а як наслідок визначення моменту, слугує функція залежності відносних деформацій від прикладеного навантаження. Отже, в такому елементі деревина працює в стиснутій та розтягнутій зонах за жорсткого режиму прикладання навантаження, компенсуючи рівнодійну

$$u_c = f_c(\sigma_c); \quad (1)$$

$$u_t = f_t(\sigma_t). \quad (2)$$

Для розрахунків запропонуємо довільні функції залежності зусиль від деформацій (3), (4).

$$\sigma_c = f_c(u_c); \quad (3)$$

$$\sigma_t = f_t(u_t). \quad (4)$$

Дані функції апроксимуємо в одну безперервну функцію (5) (Рис.1)

$$\sigma_w = f_w(u_w). \quad (5)$$

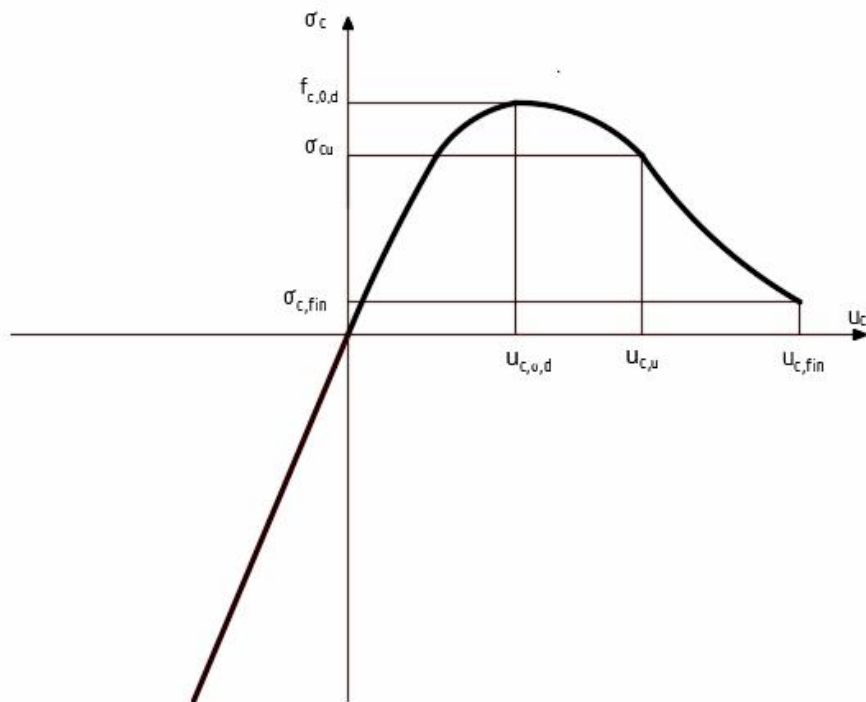


Рис. 1. Функція залежності напружень від деформацій

Функція напружень від деформацій не є безперечною. Тобто, дана залежність розпочинається в точці, де деревина зазнає розриву за розтягу та має точку екстремуму при навантаженні за стиску.

Запишемо рівняння рівноваги для окремого елемента (Рис.2)

$$\begin{cases} \sum N_x = 0; \\ \sum M_z = 0; \end{cases} \quad (6)$$

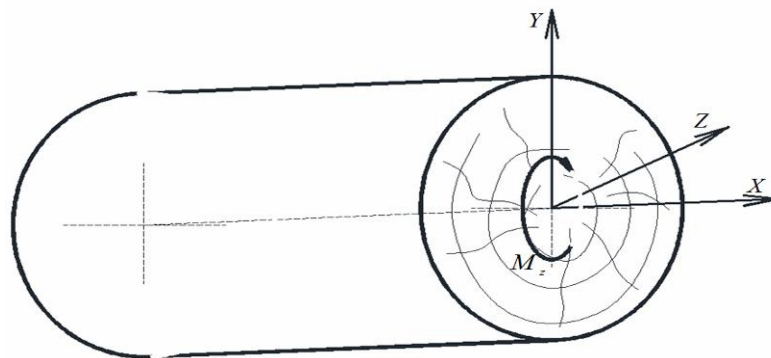


Рис.2. Внутрішні зусилля в згинальному дерев'яному елементі

Загальний вигляд рівноваги згинального елемента на основі деревини зображений на рис 3.

Враховуючи внутрішні напруження від дії зовнішнього моменту рівняння (6) можливо подати у наступному вигляді

$$\begin{cases} \int f_w(u_w) dA = 0; \\ \int f_w(u_w) z_w dA - M_z = 0. \end{cases} \quad (7)$$

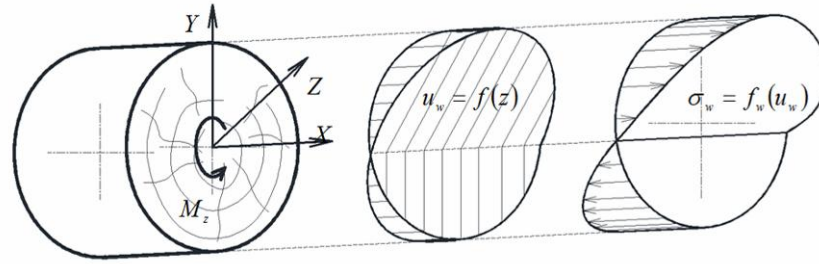


Рис. 3. Напружено-деформований стан згинального дерев'яного елемента

Враховуючи внутрішні напруження від дії зовнішнього моменту рівняння (6) можливо подати у наступному вигляді

$$\begin{cases} \int f_w(u_w) dA = 0; \\ \int f_w(u_w) z_w dA - M_z = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Оскільки поперечний переріз елемента має змінну ширину перерізу, то рівняння (7) можна записати у такому вигляді

$$\begin{cases} \int f_w(u_w) f_b(z) dz = 0; \\ \int f_w(u_w) z_w f_b(z) dz - M_z = 0. \end{cases} \quad (8)$$

де  $b = f_b(z)$  - функція зміни ширини перерізу по висоті перерізу.

Щоб проаналізувати дійсну роботу деревини як матеріалу, необхідно задатися функцією стану елемента.

Запропонуємо функцію полінома 4-го степеня [14] для опису дійсних діаграм деформування деревини за стиску (Рис. 4)

$$\sigma_c = f_c(u) = \sum_{i=1}^4 w_i \frac{u_c^i}{u_{c,0,d}^{i-1}}, \quad (9)$$

де  $\sigma_c$  - нормальні напруження стиску вздовж волокон;  $u_c$  - відносна деформація, що відповідає напруженню  $\sigma_c$ ;  $u_{c,0,d}$  - деформація деревини, яка відповідає максимальній міцності  $f_{c,0,d}$ ;  $w_i$  - коефіцієнти поліному;  $i$  - кількість коефіцієнтів функції.

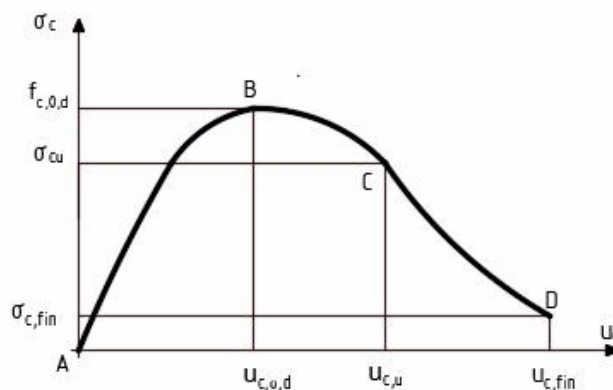


Рис.4. Повна діаграма деформування деревини за осьового стиску вздовж волокон отримана за функцією (9)

А також розтягу (Рис.5)

$$\sigma_t = f_t(u) = E_t \cdot u_t. \quad (10)$$

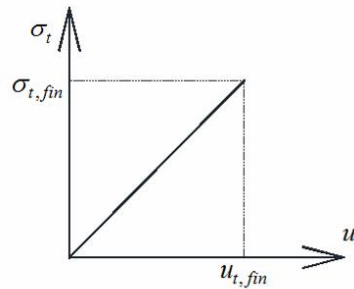


Рис. 5. Діаграма деформування деревини розтягу вздовж волокон отримана за функцією (10)

Припустимо, що поперечний переріз має довільну форму (Рис.6) та розділивши його на дві зони (стиснуту та розтягнуту) основні рівняння рівноваги набудуть наступного вигляду

$$\begin{cases} N_c - N_t = 0 \\ M_c + M_t - M_z = 0 \end{cases} \quad (11)$$

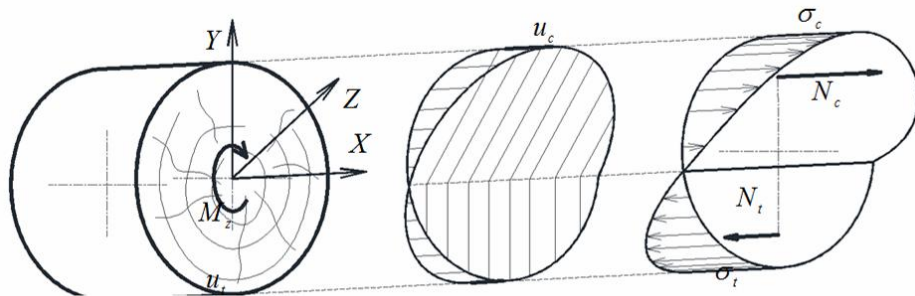


Рис. 6. Напружено-деформований стан згинального дерев'яного елемента

Отже, внутрішні зусилля з врахуванням рівняння рівноваги (11), а також при цьому враховуючи межі інтегрування по висоті перерізу та функцію зміни ширини перерізу, набудуть такого вигляду

$$N_c = \int_0^{z_c} f_c(u) \cdot f_b(z) dz; \quad (12)$$

$$N_t = \int_0^{z_t} f_t(u) \cdot f_b(z) dz. \quad (13)$$

$$M_c = \int_0^{z_c} f_c(u) \cdot f_b(z) \cdot z dz \quad (14)$$

$$M_t = \int_0^{z_t} f_t(u) \cdot f_b(z) \cdot z dz \quad (15)$$

Змінимо межі інтегрування для формул внутрішніх зусиль, що сприймає переріз враховуючи залежність (16) та (17)

$$dz = du \frac{z_c}{u_c} = du \frac{z_t}{u_t}; \quad (16)$$

$$z = u \frac{z_c}{u_c} = u \frac{z_t}{u_t}. \quad (17)$$

Отже, внутрішні зусилля матимуть наступний вигляд

$$N_c = \int_0^{u_c} f_c(u) \cdot f_b(u) \frac{z_c}{u_c} du; \quad (18)$$

$$N_t = \int_0^{u_t} f_t(u) \cdot f_b(u) \frac{z_t}{z_u} du ; \quad (19)$$

$$M_c = \int_0^{u_c} f_c(u) \cdot f_b(u) \cdot \left(\frac{z_c}{u_c}\right)^2 \cdot u du ; \quad (20)$$

$$M_t = \int_0^{u_t} f_t(u) \cdot f_b(u) \cdot \left(\frac{z_t}{u_t}\right)^2 \cdot u du . \quad (21)$$

Отже, встановлено дійсний напружено-деформований стан згинального дерев'яного елемента з врахуванням дії на нього агресивного кислотного середовища та з врахуванням теорій механіки деформівного твердого тіла.

**Висновки.** 1. Проведено аналіз літературних джерел щодо методик розрахунку згинальних дерев'яних елементів з врахуванням фактору агресивного кислотного середовища.

2. Виявлено, що практично відсутні методики розрахунку елементів за таких умов експлуатації.

3. Встановлено дійсний напружено-деформований стан згинального дерев'яного елемента з врахуванням дії на нього агресивного кислотного середовища з врахуванням дійсних механічних властивостей матеріалу та теорій механіки деформівного твердого тіла.

4. В подальшому необхідно розробити методику розрахунку таких елементів за дії агресивного кислотного середовища.

#### Список використаних джерел

1. Madsen B. Recommended moisture adjustment factor for lumber stresses. *Can. J. Civil Engineering*. 1982. Vol. 9. №4. P. 602–610.
2. Mårtensson A. Mechanical behavior of wood exposed to humidity variations. Thesis, Report TVBK-1006, *Lund Institute of Technology, Dept. Struct. Eng.*, Sweden, 1992. 189 p.
3. Сашин М.А. Прогнозирование и повышение долговечности и длительной прочности древесины в строительных изделиях и конструкциях: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.05. 2006. 182 с.
4. Ванін С.И., Прикот Н.Г. Влияние кислот и щелочей на физико-механические свойства древесины. *Труды ЛТА*, 1947. Вып. 61. С. 55-90.
5. Гринкруг Н.В. Моделирование и расчет элементов деревянных конструкций при химических агрессивных воздействиях: дисс. канд. техн. наук, 05.23.01. 2004. 202 с.
6. Гомон Св.Св., Гомон С.С., Матвіюк О.В., Верешко О.В., Черномаз Н.Ю. Застосування деревини в умовах агресивних середовищ. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. Луцьк, 2022. Вип.17. С. 15-22.
7. Гомон Св.Св., Матвіюк О.В., Савчук С.М., Верешко О.В., Кулаковський Л.Я. Вплив агресивного середовища на міцнісні та деформівні показники суцільної деревини хвойних порід. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Серія «Технічні науки»*. Рівне: НУВГП, 2021. Випуск 2(94). С. 69–80.
8. Гомон Св.Св., Савчук С.М., Верешко О.В., Кулаковський Л.Я. Методика експериментальних досліджень суцільної деревини на стиск уздовж волокон під впливом агресивного середовища. *Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2021. Вип. 39. С. 57–62.
8. Гомон Св.Св., Матвіюк О.В., Довбенко Т.О., Савчук С.М., Верешко О.В., Кулаковський Л.Я. Дослідження міцнісних показників деревини під впливом агресивного середовища. *Ресурсоекономі матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Рівне: НУВГП, 2021. Вип. 40. С. 10-17.
9. Верешко О.В., Гомон Св.Св., Гомон Св.Ст., Довбенко Т.О. Деформівні показники деревини сосни та берези під дією кислотних середовищ. *Наукові нотатки*. Луцьк: ЛНТУ, 2021. №72. С. 175-179.
10. Homon S., Gomon S., Vereshko O., Matviiuk O. Method of determination the initial elasticity modulus and timber deformation modulus under the influence of acid environment. *Scientific Journal of Ternopil National Technical University*. Ternopil: TNTU, 2022. Vol 105. No1. P. 29–39.
11. Верешко О.В., Гомон Св.Св. Дослідження зміни густини деревини листяних та хвойних порід під дією кислотних середовищ. *Наукові нотатки*. Луцьк: ЛНТУ, 2022. №73. С. 265-269.
12. ДБН В.2.6-161:2017. Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення. Київ: Укрархбудінформ, 2017. 111с.
13. Eurocode 5. (2004). Design of timber structures. Part 1.1. General rules and rules for buildings, 124.
14. Гомон Св.Св., Ясній П.В., Гомон П.С., Ясній В.П. Класична модель дійсної роботи суцільної та модифікованої деревини осьовим стиском вздовж волокон: монографія. Рівне: Волинські обереги, 2023. 316 с.

Р.Я. Швець, Ф.О. Іващишин

Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

## ЕЛЕКТРОПРОВІДНІ ВЛАСТИВОСТІ МУЛЬТИПОШАРОВОГО ІНТЕРКАЛАТУ InSe<ПРОПОЛІС>

*Представлено результати дослідження характеристик розширеної матриці InSe з інтеркальованими між її шари прополісом. Встановлено характер змін частотної поведінки імпедансу за нормальних умов, в постійному магнітному полі і при освітленні. Встановлено, що впровадження прополісу між шари монокристалу InSe приводить до 4-кратного зменшення дійсної частини опору. Для інтеркалату InSe<прополіс> зафіксовано додатний магнітоопір та аномальний додатний фоторезистивний ефект. Інтеркалат InSe<прополіс> характеризується квазінеперервним домішковим спектром, як засвідчують зареєстровані струми термостимульованого розряду. Використавши теорію перескокової провідності запропоновану М. Pollack і Т.Н. Geballe, яка враховує перескоки носіїв заряду між локалізованими у просторі станами за рахунок їх взаємодії із фононами розраховано густину станів на рівні Фермі, густину глибоких пасток, розкид пасткових рівнів поблизу рівня Фермі та середню відстань перескоку.*

*Ключові слова:* інтеркалат, InSe, прополіс, магніторезистивний ефект, перескокова провідність.

R. Ya. Shvets, F.O. Ivashchyn

## ELECTRICAL PROPERTIES OF MULTILAYER INTERCALATE InSe<PROPOLIS>

*The results of studying the characteristics of an expanded InSe matrix with propolis intercalated between its layers are presented. The nature of changes in the frequency behavior of the impedance under normal conditions, in a constant magnetic field and under illumination is determined. It was found that the introduction of propolis between the layers of InSe single crystal leads to a 4-fold decrease in the real part of the impedance. A positive magnetoresistance and an anomalous positive photoresistive effect were recorded for the InSe<propolis> intercalate. The intercalate InSe<propolis> is characterized by a quasi-continuous impurity spectrum as evidenced by the recorded currents of the thermally stimulated discharge. Using the theory of hopping conductivity proposed by M. Pollack and T.H. Geballe, which takes into account the hopping of charge carriers between states localized in space due to their interaction with phonons, the density of states at the Fermi level, the density of deep traps, the scattering of trap levels near the Fermi level and the average hopping distance were calculated.*

*Keywords:* intercalate, InSe, propolis, magnetoresistive effect, jump conductivity.

**Постановка проблеми.** Формування різноманітних композиційних матеріалів на основі наночастинок сьогодні становить потужний інструмент створення фізичних систем із потрібними властивостями та неординарними ефектами. Велике зацікавлення в даному випадку привертають різного роду анізотропні матеріали та сформовані на їх основі неорганічно/неорганічні, органо/неорганічні та біо/неорганічні гібридні структури. В даному контексті особливо виділяються різного роду 2D-матеріали на основі яких можна формувати багат шарові композити, які завдяки сформованій  $\delta$ -топології компонент проявляють унікальні фізичні властивості та цінні функціональні можливості [1-3]. На цьому шляху важливу роль відіграють інтеркаляційні технології, застосування яких дозволяє використовуючи широку варіабельність гетероінгредієнтів формувати комплекси типу господар-гість. Відповідні комплекси завдяки слабкій взаємодії між матеріалом господарем та гостем дають можливість досягнути функціональної гібридності пристроям на їх основі та відкривають нові сфери їх практичного застосування [4, 5].

Серед 2D-матеріалів-господарів особливе місце посідають шаруваті напівпровідникові кристали групи  $A^3B^6$  – InSe та GaSe. Завдяки своїй просторовій анізотропії вони проявляють унікальні (2D) електронні властивості, такі, як велика електронна рухливість, квантовий ефект Холла, аномальний оптичний відгук чи індуковані стани нульового опору [6, 7]. За рахунок слабкої взаємодії (ван дер ваальсовий зв'язок) між шарами в кристалі існує можливість інтеркаляції іншорідних атомів чи молекул формуючи мультипошарову гібридну 2D структуру [8-11].

З іншої сторони застосування різноманітних органічних речовин дозволяє значно розширити функціональність традиційних пристроїв надаючи їм функціональну гібридність. Цікавим в цьому контексті матеріалом є прополіс, який є біологічно активною органічною речовиною, яка веде себе аналогічно напівпровіднику. В роботі [12] показано, що електричні властивості та діапазон фоточутливості структур напівпровідник/прополіс залежать, як від агрегатного стану речовини (рідке чи тверде), способу його нанесення на пластини напівпровідника, так і від матеріалу

підкладки. В роботі [13] зроблено припущення, що незважаючи на надзвичайно складний хімічний склад прополісу, плівкам цієї речовини притаманна своєрідна упорядкованість (по аналогії із деякими неорганічними напівпровідниками присутній дальній порядок). Це припущення ґрунтувалося на тому, що температурна енергія активації провідності таких плівок в певному температурному інтервалі корелювала із шириною забороненої зони [13].

**Постановка завдань.** Розуміння закономірностей електропровідності та поляризаційних властивостей інтеркаляційних органо/неорганічних наноконструкцій є далеко не повним. Незаперечним є лише те, що фізичні властивості наночастинок в умовах обмеженої гостьової геометрії значно відрізняються від властивостей відповідних об'ємних матеріалів, як за рахунок квантово-розмірних ефектів, так і за рахунок взаємодії зі стінками матриць. Вивчення викликаних наноконструкціями змін властивостей матеріалів є необхідною умовою для їх успішного застосування. Саме у цьому ракурсі вдається спостерігати нові унікальні явища і ефекти. Тому в даній роботі буде досліджено інтеркаляційно сформовану мультипошарову структуру InSe<прополіс> та встановлено механізми струмопроходження та поляризації в ній.

**Методологія досліджень.** Для формування мультипошарової 2D органо/неорганічної структури було вирізано монокристал InSe із геометричними розмірами 5,6x6,9x0,14 мм та масою 24,8 мг. Вирощений методом Бріджмена-Стокбаргера монокристал InSe характеризується n-типом провідності, а ширина забороненої зони (за оптичними даними) складає 1,22 еВ [6, 7]. Даний монокристал характеризується наявністю так званих гостьових позицій – орієнтованих перпендикулярно до кристалографічної осі С областей дій слабких ван-дер-ваальсових сил. Особливості кристалічної будови цього матеріалу не вимагають прецизійної механічної і хімічної обробки поверхні і зумовлюють підвищену інертність до адсорбції сторонніх атомів чи молекул. Відсутність обірваних зв'язків на його поверхні забезпечує дуже малу швидкість поверхневої рекомбінації. Крім того, їм властива висока фоточутливість у видимій області спектру.

У якості органічного гостьового компоненту використовувався прополіс. Тонкі плівки даного матеріалу проявляють напівпровідникові властивості та фоточутливість у видимій області спектру. Відповідно для досліджень було виготовлено 10 % спиртовий розчин прополісу.

Формування інтеркалантної структури проводили в два етапи. На першій стадії у вихідну матрицю впроваджується нітрит натрію методом прямого експонування в його розплаві напівпровідникового монокристалу InSe при температурі 300 °С впродовж 5÷10 хвилин. В результаті n-стадійного упорядкування відстань між відповідними шарами суттєво зростає [26]. Процес інтеркаляції тривав до досягнення розширення матриці InSe в 3,5 рази після чого його товщина становила 0,49 мм. Після цього нітрит натрію вимивався водою до повного видалення із розширеної матриці InSe. На другому етапі розширену матрицю InSe поміщали в 10 % спиртовий розчин прополісу та витримували в ній протягом 24 год. Після цього зразок виймався і висушувався при кімнатній температурі. Вміст гостьового контенту контролювався прецизійними гравіметричним і хімічним аналізами.

Імпедансні виміри проводилися в напрямку кристалографічної осі С в діапазоні частот  $10^{-3} \div 10^6$  Гц за допомогою вимірювального комплексу "AUTOLAB" фірми "ECO CHEMIE" (Нідерланди), укомплектованого комп'ютерними програмами FRA-2 та GPES. Вимірювання імпедансних залежностей проводили за нормальних умов, а також у постійному магнітному полі (напруженістю 2,75 кОе) та полі світлової хвилі (імітатор сонячного випромінювання потужністю 65 Вт) в напрямку їх прикладання, а саме вздовж кристалографічної осі С. Така геометрія вимірювань вибиралася для того, щоб можна було абстрагуватися від сили Лоренца. Спектри термостимульованого розряду записувалися в режимі короткозамкнутих контактів при лінійному нагріві зі швидкістю 5° С /хв.

**Викладення основного матеріалу.** Розглянемо спочатку залежність дійсної частини комплексного опору від частоти  $\text{Re}Z(\omega)$  представлену на рис. 1. Для вихідної матриці InSe спостерігається типова поведінка  $\text{Re}Z(\omega)$  (крива 1 на рис. 1) – частотонезалежна ділянка від  $10^{-3}$  до  $10^2$  Гц, що відображає провідність, яка зумовлена рівноважними носіями за даної температури. Дана провідність є активаційного типу і її можна представити наступним чином:

$$\sigma_0 = e n \mu \quad (1)$$

де  $e$  – заряд електрона,  $n$  – їх концентрація за даної температури,  $\mu$  – рухливість. Наступне збільшення частоти ( $\omega > 10^2$  Гц) приводить до монотонного зменшення  $\text{Re}Z$  за рахунок зростання вкладу перескокової провідності яка зумовлена стрибками нерівноважних носіїв по локалізованих станах біля рівня Фермі. При цьому носії заряду перескакують із одного центра, локалізованого у



забороненій зоні напівпровідника, до іншого із випусканням, або поглинанням фонуна. Провідність вказаного типу є активаційною, тобто

$$\sigma \sim \exp\left[-\frac{\Delta W}{kT}\right] \quad (2)$$

Дана провідність при змінному струмі буде залежати від частоти

$$\sigma(\omega) \sim \omega^n \quad (3)$$

де показник  $n$  може приймати значення у межах  $0.64 \leq n \leq 1.0$ . В результаті загальна провідність розширеної матриці InSe визначатиметься як сума (1) та (3) визначатиметься співвідношенням

$$\sigma'(\omega) = en\mu + A\omega^n \quad (4)$$

Впровадження між шари розширеної матриці InSe органічного гостя прополісу за нормальних умов (крива 4 на рис. 1) приводить до більше як 4-кратного зменшення  $ReZ(\omega)$ . Поряд із цим значно розширюється частотозалежна ділянка  $ReZ(\omega)$  до  $10^4$  Гц. Така поведінка  $ReZ(\omega)$  для інтеркалату InSe<прополіс> може бути пояснена формуванням гостя із n-типом провідності, який характеризується значно вищою концентрацією рівноважних носіїв струму.

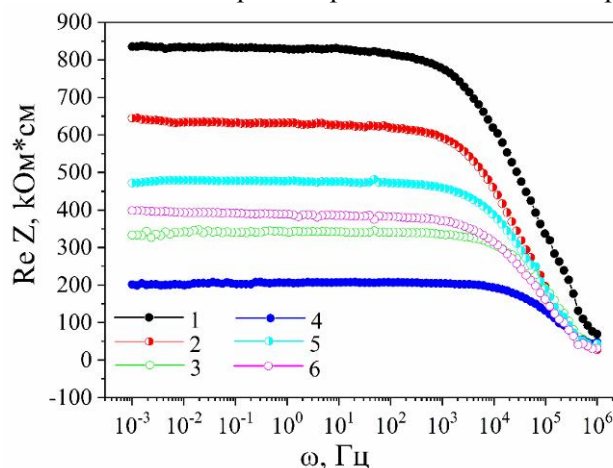


Рис. 1. Частотні залежності дійсної складової питомого імпедансу вихідної розширеної матриці InSe (1, 2, 3) та інтеркалату InSe<прополіс> (4, 5, 6), виміряні за нормальних умов (1, 4), в магнітному полі (2, 5) та при освітленні (3, 6).

Поміщення розширеної матриці InSe у постійне магнітне поле не змінює характеру поведінки  $ReZ(\omega)$  (крива 2 на рис. 1) та приводить до появи від'ємного магніторезистивного ефекту. Така поведінка  $ReZ$  під дією постійного магнітного поля може бути пояснена зесманівським перерозподілом стану електронної підсистеми в результаті чого відбувається делокалізація додаткових носіїв струму. Дія постійного магнітного поля на інтеркалат InSe<прополіс> є протилежною (крива 5 на рис. 1) – візуалізується додатній магніторезистивний

ефект ( $\delta_H = \frac{\rho_H}{\rho_0}$ ) величиною 2,35 рази. Даний результат може бути пов'язаний із гостьовою підсистемою дія постійного магнітного поля на яку буде перешкоджати міжзонному тунелюванню в результаті знижуючи провідність матеріалу. При відповідних параметрах перехід носіїв з валентної зони або домішкових мінізон у зону провідності може бути значно ускладнений. Крім того, магнітне поле знижує рухливість основних носіїв гостьової підсистеми.

Освітлення розширеної матриці InSe приводить до очікуваного більше як 2-кратного зменшення  $ReZ$  залишаючи без змін характер частотної поведінки (крива 3 на рис. 1). Від'ємний фоторезистивний ефект пов'язаний безпосередньо із фоточутливістю монокристалу InSe. Проте абсолютно неординарну поведінку отримуємо при освітленні інтеркалату InSe<прополіс> – 2-кратне зростання  $ReZ$  (крива 6 на рис. 1). Даний результат може бути пояснений, якщо допустити, що власне для інтеркалату InSe<прополіс> реалізується умова близькості валентної зони господаря і незаповненої смуги станів гостьового контенту, так, що при освітленні білим світлом буде відбуватися просторове розділення заряду, в результаті чого нерівноважні електрони будуть накопичуватися у квантових ямах, створюючи, тим самим, фотоіндуковані центри прилипання

дірок на гетеромежі господар-гість. Локалізація на них основних носіїв струму і викличе зменшення концентрації делокалізованих носіїв струму, тобто спостережуваний ріст  $ReZ$ .

Для детального аналізу електропровідності розглянемо частотну поведінку уявної складової комплексного імпедансу  $-ImZ(\omega)$  представленого на рис. 2. Основний результат на який варта звернути увагу, що для всіх вимірних залежностей  $-ImZ(\omega)$  основний релаксаційний максимум проявляється у досліджуваному частотному діапазоні – у його високочастотній частині. Для вихідної розширеної матриці InSe основний релаксаційний максимум знаходиться в околі частоти  $4 \cdot 10^4$  Гц, що відповідає рухливості носіїв заряду за даної температури (крива 1 на рис. 2). Накладання постійного магнітного поля не змінює положення основного релаксаційного максимуму (крива 2 на рис. 2), але приводить до невеликого зниження його інтенсивності та до його значного звуження. Це підтверджує вище наведене припущення про зєсманівське модифікування структури домішкових рівнів в смугах локалізованих станів звуження яких приводить до перерозподілу домішкових рівнів над і під рівнем Фермі. Освітлення приводить не тільки до значного зменшення інтенсивності та ширини основного релаксаційного максимуму (крива 3 на рис.2), але і до зміщення його положення в сторону вищих частот ( $1,5 \cdot 10^5$  Гц), що свідчить про зростання рухливості основних носіїв заряду.

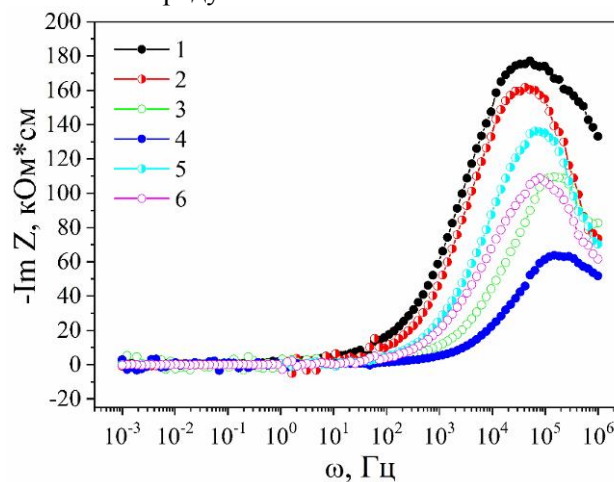


Рис. 2. Частотні залежності уявної складової питомого імпедансу вихідної розширеної матриці InSe (1, 2, 3) та інтеркалату InSe<прополіс> (4, 5, 6), виміряні за нормальних умов (1, 4), в магнітному полі (2, 5) та при освітленні (3, 6).

Для інтеркалату InSe<прополіс> даний максимум зміщується в сторону вищих частот ( $2 \cdot 10^5$  Гц) (крива 4 на рис. 2), що свідчить про зростання рухливості основних носіїв заряду. Також при цьому зменшується майже в тричі інтенсивність основного релаксаційного максимуму. Такий результат може бути спричинений формуванням після інтеркаляції в забороненій зоні широкого квазінеперервного спектру енергетичних станів за рахунок гостьової підсистеми. Постійне магнітне поле приводить до зміщення положення основного релаксаційного максимуму в сторону нижчих частот ( $7 \cdot 10^4$  Гц) та до зростання його інтенсивності (крива 5 на рис. 2), що підтверджує висунуте вище припущення про зменшення рухливості носіїв заряду в постійному магнітному полі. Подібного характеру зміни спостерігаються і при освітленні інтеркалату InSe<прополіс> (крива 6 на рис. 2) – зміщення максимуму в сторону нижчих частот ( $7 \cdot 10^4$  Гц), що свідчить про зменшення рухливості основних носіїв заряду.

Для підтвердження отриманих результатів були виміряні спектри струмів термостимульованого розряду для вихідної розширеної матриці та інтеркалату InSe<прополіс> (рис. 3а, 3б). Як можемо бачити спектр для вихідної розширеної матриці InSe представляє собою дві яскраво виражені вузькі смуги локалізованих станів. Натомість для інтеркалату InSe<прополіс> цей спектр переходить до квазінеперервного вигляду, що підтверджує висунуті вище припущення.

Використавши теорію перескокової провідності запропоновану М. Pollak і Т.Н. Geballe, яка враховує перескоки носіїв заряду між локалізованими у просторі станами за рахунок їх взаємодії із фононами отримаємо наступний вираз для дійсної частини електропровідності:

$$\sigma(\omega) = \frac{\pi}{96} e^2 k_B T \alpha^{-5} N_F^2 \omega \left[ \ln \left( \frac{V_0}{\omega} \right) \right]^4, \quad (5)$$

де  $e$  – заряд електрона;  $N_F$  – Густина станів на рівні Фермі;  $\alpha$  – постійна спаду хвильової функції локалізованого носія;  $v_\phi$  – фононна частота. Використовуючи формулу та маючи експериментально виміряні значення  $\sigma(\omega)$  ми визначили густину станів на рівні фермі  $N_F$ .

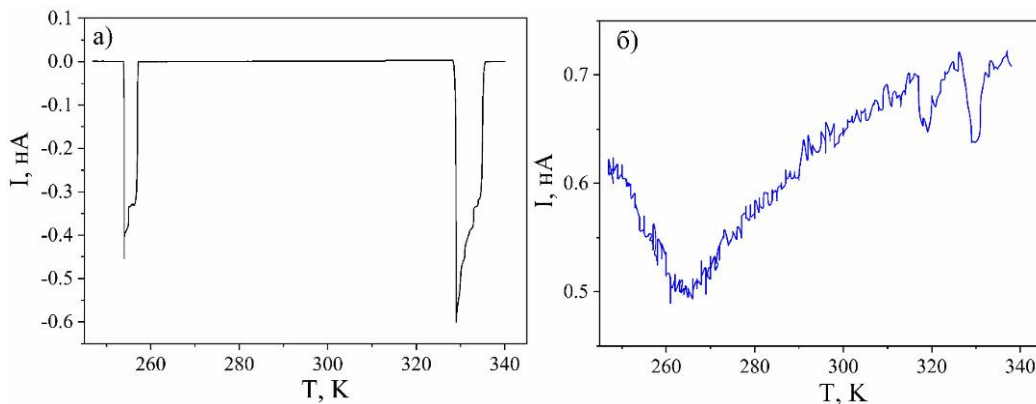


Рис. 3. Струми термостимульованого розряду, виміряні для вихідної розширеної матриці InSe (а) та інтеркалату InSe<прополіс> (б).

Згідно з теорією перескокової провідності на змінному струмі, середній час перескоку  $\tau$  носія із поглинанням, або випусканням фонуна визначається за виразом:

$$\tau^{-1} = v_\phi \exp(-2\alpha R), \quad (6)$$

де  $R$  – відстань перескоку. Експериментально  $\tau^{-1}$  являє собою середню частоту, при якій виконується закон  $\omega^{0.9}$ . Визначивши значення  $\tau^{-1}$  експериментально, можна вирахувати за формулою середню відстань перескоку  $R$ .

Знаючи величини  $N_F$  та  $R$  із співвідношення

$$, \quad (7)$$

Можна оцінити розкид пасткових рівнів поблизу рівня Фермі  $I$ . Це в свою чергу дає можливість за формулою

$$N_c = N_F I \quad (8)$$

оцінити реальну густину глибоких пасток  $N_c$ .

Отримані значення відповідних величин згідно представлених розрахунків наведені у таблиці 1. Як можемо бачити для вихідної розширеної матриці InSe дія постійного магнітного поля приводить до значного зростання густини станів на рівні Фермі  $N_F$ , значного зменшення розкиду пасткових рівнів поблизу рівня Фермі  $I$  та невеликого зменшення густини глибоких пасток  $N_c$ . Впровадження прополісу між шари розширеної матриці InSe приводить до значного зростання густини станів на рівні Фермі  $N_F$  у 1,6 рази та зменшення розкиду пасткових рівнів поблизу рівня Фермі  $I$  у 1,6 рази. Накладання постійного магнітного поля на інтеркалат InSe<прополіс> приводить до помітного зменшення густини станів на рівні Фермі  $N_F$ , а освітлення помітно зменшує розкид пасткових рівнів поблизу рівня Фермі  $I$ . Загалом радіус перескоку  $R$  та густина глибоких пасток  $N_c$  залишаються змінюється ідентично як для вихідної розширеної матриці так і для інтеркалату InSe<прополіс>.

Наступним кроком розглянемо поведінку годографу імпедансу на діаграмах Найквіста, які представлені на рис. 4. Діаграми Найквіста, як для вихідної розширеної матриці InSe, так і для інкапсуляту InSe<прополіс> виміряні за нормальних умов, в магнітному полі та при освітленні представляють собою яскраво виражені два півкола, які відображають перенесення електричного заряду через саму матрицю InSe та шару прополісу.

При моделюванні такої імпедансної картини можна представити послідовним підключенням двох паралельних R||C ланок.

ВАХ як для вихідної розширеної матриці InSe, так і для інкапсуляту InSe<прополіс> виміряні за нормальних умов, в магнітному полі та при освітленні представляють собою прямі лінії, які тільки при освітленні не проходять через початок координат (рис. 5). Це свідчить про реєстрацію фотоЕРС. У випадку вихідної розширеної матриці InSe фотоЕРС становить 75 мВ, а у випадку інкапсуляту InSe<прополіс> величина зменшується майже в два рази і становить 43 мВ.

Таблиця 1.

Параметри домішкового спектру для вдосліджуваних зразків

Зразок	Умови вимірювання	$Nf \cdot 10^{44}, J^{-1}m^{-1}$	$R \cdot 10^{-8}, m$	$J \cdot 10^{-22}, J$	$Nt \cdot 10^{22}, m^3$
InSe	НУ	0,76	2,42	4,43	3,36
	МП	1,07	2,52	2,80	3,00
	С	1,14	2,52	2,62	3,00
Інтеркалат InSe<прополіс>	НУ	1,21	2,42	2,78	3,36
	МП	1,11	2,52	2,70	3,00
	С	1,21	2,52	2,47	3,00

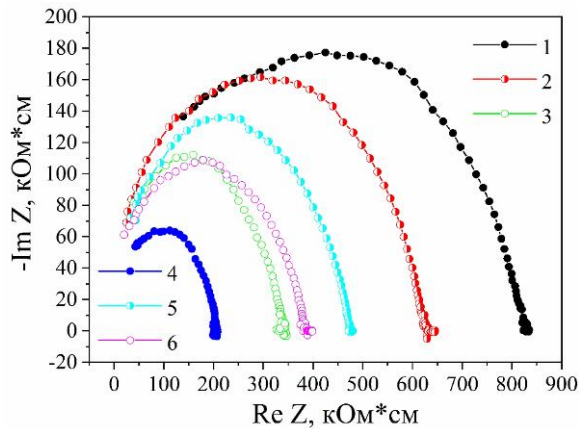


Рис. 4. Діаграми Найквіста виміряні для вихідної розширеної матриці InSe (1, 2, 3) та інтеркаляту InSe<прополіс> (4, 5, 6), виміряні за нормальних умов (1, 4), в магнітному полі (2, 5) та при освітленні (3, 6).

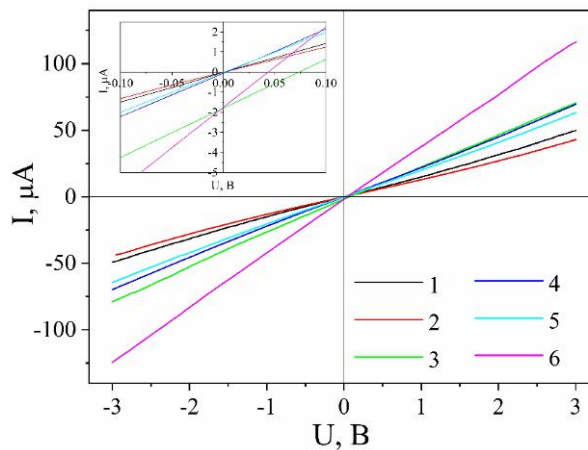


Рис. 5. ВАХ вихідної розширеної матриці InSe (1, 2, 3) та інтеркаляту InSe<прополіс> (4, 5, 6), виміряні за нормальних умов (1, 4), в магнітному полі (2, 5) та при освітленні (3, 6).

**Висновки:**

1. Вперше інтеркаляційною методикою сформовано органічно/неорганічний інкапсулят InSe<прополіс>.
2. Сформовані тонкі плівки прополісу між шари монокристалу InSe характеризуються п-типом провідності, як і вихідна матриця.

3. Інкапсулят InSe<прополіс> проявляє додатній магніторезистивний ефект величиною 2,35 рази на відміну від вихідної розширеної матриці.

4. Для інкапсуляту InSe<прополіс> зафіксовано аномальний ріст опору при освітленні видимим світлом, на відміну від вихідних прекурсорів, які є фоточутливими за даних умов.

#### Список використаних джерел:

1. Tan, C., Cao, X., Wu, X.-J., He, Q., Yang, J., Zhang, X., ... Zhang, H. (2017). *Recent Advances in Ultrathin Two-Dimensional Nanomaterials*. *Chemical Reviews*, 117(9), 6225–6331. doi:10.1021/acs.chemrev.6b00558
2. Oh, S. M., Patil, S. B., Jin, X., & Hwang, S.-J. (2018). *Recent Applications of 2D Inorganic Nanosheets for Emerging Energy Storage System*. *Chemistry - A European Journal*, 24(19), 4757–4773. doi:10.1002/chem.201704284
3. Gu, T., Jin, X., Park, S., Kim, M. G., & Hwang, S. (2021). *Molecular-Level Control of the Intersheet Distance and Electronic Coupling between 2D Semiconducting and Metallic Nanosheets: Establishing Design Rules for High-Performance Hybrid Photocatalysts*. *Advanced Science*, 8(7), 2004530. doi:10.1002/advs.202004530
4. Stark, M. S., Kuntz, K. L., Martens, S. J., & Warren, S. C. (2019). *Intercalation of Layered Materials from Bulk to 2D*. *Advanced Materials*, 1808213. doi:10.1002/adma.201808213
5. Wu, Y., Xing, H., Lian, C.-S., Lian, H., He, J., Duan, W., ... Liu, Y. (2019). *Ion intercalation engineering of electronic properties of two-dimensional crystals of 2H-TaSe<sub>2</sub>*. *Physical Review Materials*, 3(10). doi:10.1103/physrevmaterials.3.104003
6. Iñarrea, J. (2017). *Microscopic theory for radiation-induced zero-resistance states in 2D electron systems: Franck-Condon blockade*. *Applied Physics Letters*, 110(14), 143105. doi:10.1063/1.4979830
7. Bandurina, D. A., Tyurnina, A. V., Yu, G. L., Mishchenko, A., Zólyomi, V., Morozov, S. V., ... Cao, Y. (2016). *High electron mobility, quantum Hall effect and anomalous optical response in atomically thin InSe*. *Nature Nanotechnology*, 12(3), 223–227. doi:10.1038/nnano.2016.242
8. Huang, W., Gan, L., Li, H., Ma, Y., & Zhai, T. (2016). *2D layered group IIIA metal chalcogenides: synthesis, properties and applications in electronics and optoelectronics*. *CrystEngComm*, 18(22), 3968–3984. doi:10.1039/c5ce01986a
9. Chabecki, P., Calus, D., Ivashchyshyn, F., Pidluzhna, A., Hryhorchak, O., Bordun, I., ... Kityk, A. V. (2020). *Functional Energy Accumulation, Photo- and Magnetosensitive Hybridity in the GaSe-Based Hierarchical Structures*. *Energies*, 13(17), 4321. doi:10.3390/en13174321
10. Maksymych, V., Calus, D., Ivashchyshyn, F., Pidluzhna, A., Chabecki, P., & Shvets, R. (2021). *Quantum energy accumulation in semiconductor<math>\square</math><math>\square</math>ionic liquid<math>\square</math><math>\square</math>layered clathrates*. *Applied Nanoscience*. doi:10.1007/s13204-021-01763-1
11. Ivashchyshyn, F., Pidluzhna, A., Calus, D., Hryhorchak, O., Chabecki, P., Makarchuk, O. (2021). *Multivoltaic GaSe<math>\langle</math>SmCl<sub>3</sub>><math>\rangle</math> clathrate as new hybrid functional nanostructure*. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 39(2), e136726-1-5. doi: 10.24425/bpasts.2021.136726
12. Juliano, C., Pala, C. L., & Cossu, M. (2007). *Preparation and characterisation of polymeric films containing propolis*. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 17(3), 177–181. doi:10.1016/s1773-2247(07)50033-x
13. Brus, V. V., Pidkamin, L. J., Ilashchuk, M. I., & Maryanchuk, P. D. (2014). *11th International Conference “Correlation Optics”: Propolis films for hybrid biomaterial-inorganic electronics and optoelectronics*. *Applied Optics*, 53(10), B121. doi:10.1364/ao.53.00b121

УДК 648.4.05

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.35

З.С. Сірко<sup>1</sup>, О.Ю. Цапко<sup>1</sup>, І.О. Швачич<sup>1</sup>, Н.О. Толстушко<sup>2</sup>, М.М. Толстушко<sup>2</sup><sup>1</sup>Український державний науково-дослідний інститут «Ресурс»<sup>2</sup>Луцький національний технічний університет**ВОГНЕЗАХИСТ ЦЕЛЮЛОЗОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ**

У статті озвучені проблеми вогнезахисту целюлозовмісних матеріалів, зокрема деревних матеріалів та виробів. Зазначено, що незважаючи на цілий ряд особливих властивостей, якими володіє деревина, є за своєю структурою горючим матеріалом. Авторами статті розроблений вогнезахисний засіб на лаковій основі, що складається із системи антипіренів (фосфатна основа у поєднанні з декстрином) та функціональних добавок. Результати випробувань показали, що розроблений вогнезахисний засіб на лаковій основі забезпечує групу важкогорючих матеріалів у відповідності з ДСТУ 8829.

*Ключові слова:* вогнезахист, вогнезахисний засіб, оброблення, деревина вогнезахисний ефект.

**Z.S. Sirko, O.Y. Tsapko, I.O. Shvachych, N.O. Tolstushko, M.M. Tolstushko****FIRE PROTECTION OF CELLULOSE-CONTAINING MATERIALS**

The article covers the issues of fire protection of cellulose-containing materials, in particular wood. It is shown that despite a number of valuable properties that wood possesses, it is a rather combustible material by its composition. It is known from literary sources that one of the most important steps in protecting wood from fire is fire-retardant treatment. It is carried out in two main ways: surface treatment (application of special compounds to the surface of wood to form a fire-resistant layer) and deep impregnation of wood with fire retardants. The purpose of the research is to develop an effective flame retardant on a varnish basis. The authors of the article developed a varnish-based flame retardant consisting of a system of flame retardants (phosphate base combined with dextrin) and functional additives. In the research methodology, it is stated that the testing of wood samples was carried out in accordance with DSTU 8829 on the OTM installation, within 300 seconds for each sample. The methodology also includes means for measuring flue gas temperature, test time, and determining sample weight loss before and after tests.

*Key words:* fire protection, fire retardant, treatment, wood, fire retardant effect.

**Постановка проблеми.** Основними целюлозовмісними матеріалами є деревина, текстильні матеріали та папір. Деревина – один із найбільш розповсюджених матеріалів, яка знайшла широке застосування у будівництві (будівельні споруди, паркет, дверні та віконні коробки, дверні полотна, меблі), виробництві шпал, сірників, музичних інструментів а також деревинно-композиційних матеріалів (ДСП, ДВП, OSB, арболіт, декоративні вироби і т.і.). Таке різноманітне використання деревини пояснюють рідкісним поєднанням у ній дуже багатьох цінних властивостей. Деревина являє собою досить міцний і одночасно легкий матеріал (висока питома щільність, мала питома вага), має високі тепло-звуко- та електроізоляційні властивості, здатна без руйнувань поглинати удари внаслідок пружності, гасити вібрації. Вона досить легко обробляється різальними інструментами, склеюється, надійно утримує металеві та інші кріплення[1-4]. Разом з тим, деревина за своїм складом доволі горючий матеріал. Вона містить у своєму складі близько 49% вуглецю, 6,1 водню, 6,02% азоту та до 1% мінеральних речовин і кисню. Температура займання деревини знаходиться в межах 240 – 270°C, температура самозаймання – в межах 350 – 450°C [5]. Одним з найважливіших кроків захисту деревини від вогню є вогнезахисне оброблення. Вогнезахисті засоби для деревини дуже різні, але всі вони призначені для того, щоб якомога більше знизити пожежну небезпеку конструкцій із деревини, а також матеріалів та виробів на її основі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З аналізу бачимо, що вогнезахисна обробка деревини здійснюють двома основними способами:

- поверхнева обробка (нанесення на дерев'яну поверхню спеціальних речовин або засобів, які утворюють насичений вогнезахисний шар):

- глибоке просочення деревини антипіренами (сольовими водними розчинами) з поглинанням приблизно 65 кг/м<sup>3</sup> [6] солей. Вогнезахисний ефект дає те, що під час впливу високих температур розкладається не лише матеріал з деревини, але й солі, які поєднуючись, утворюють важкогорючі сполуки та суттєво зменшують кількість горючих газів, які утворюються під час розкладання деревини.

Автори статті пропонують для захисту деревини використовувати ефективний вогнезахисний засіб на лаковій основі.



**Постановка завдань.** Метою роботи є розроблення ефективного вогнезахисного засобу на лаковій основі.

**Викладення основного матеріалу.** Методи випробувань з визначення горючості проводили у відповідності з ДСТУ 8829:2019 «Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація». Цей стандарт установлює метод випробування для оцінювання характеристик горіння дерев'яних конструкцій та виробів. Даним стандартом регламентуються методи випробувань з метою оцінки процесу горіння дерев'яних конструкцій та матеріалів.

Під час вимірювання температури димових газів була використана термопара з діаметром електродів 0,5 мм та діапазоном вимірювання від 0 до 1000°C. Час випробувань визначався за допомогою секундоміра з похибкою вимірювання не більше ніж  $\pm 1$ с. Визначення втрати маси зразків до та після вогневих випробувань отримували за допомогою лабораторних ваг з похибкою вимірювання не більше  $\pm 0,1$  г.

Для проведення випробувань використовували установку ОТМ (рис. 1), яка складається з газового пальника, керамічного коробу, металевої підставки, тримача зразка, термоелектричних перетворювачів, ротаметра, секундоміра.



Рис. 1. Установка ОТМ для проведення випробувань

Для проведення досліджень використовували зразки деревини сосни розмірами 150x60x30 мм. Зразки деревини були оброблені вогнезахисним лаковим засобом в три шари із загальною витратою в середньому 290 г/м<sup>2</sup>. Засіб на водній основі, складається із системи антипіренів (фосфатна основа у поєднанні з декстрином) та функціональних добавок. Зразки перед вогневим випробуванням показані на рис. 2.

Для випробувань використовували установку ОТМ, на якій протягом 300 с здійснювали вогневий вплив на кожний зразок. Температура димових газів фіксувалася протягом встановленого періоду часу, який становив не більше 190°C для кожного зразка. Зразок після вогневого випробування показаний на рис. 3.

Шар пінококсу, що утворився під дією вогневого потоку на вогнезахисне покриття наведений на рис. 4.

Після проведених вогневих випробувань визначали втрату маси. По завершенню випробувань не спостерігалось самостійне горіння та розповсюдження полум'я поверхнею досліджуваного зразка. Результати випробувань зразків деревини, оброблених вогнезахисним лаковим засобом наведені у таблиці 1.

Після проведених випробувань встановлено, що засіб на лаковій основі забезпечує групу важкогорючих матеріалів згідно з п. 7.3 ДСТУ 8829:2019, тобто вогнезахиснена деревина вогнезахисним засобом класифікується як важкогорючий матеріал, а саме: температура димових газів не перевищила 260°C, втрата маси не більше 60%.



Табл. 1.

## Результати випробувань зразків деревини

№ зразка	Температура в камері печі, °С	Маса зразка, г		Втрата маси зразка, г
		До випробувань	Після випробувань	
30	190	142,5	133,7	6,2
37	191	144,6	135,3	6,4
43	190	143,4	134,9	5,9



Рис. 2. Зразок перед вогневим випробуванням



Рис. 3. Зразок після вогневого випробування



Рис. 4. Шар пінококсу, утворений під дією вогневого потоку на вогнезахисне покриття

**Висновки.**

1. Для вогнезахисту зразків деревини розроблений засіб на водній основі, що складається із системи антипіренів (фосфатна основа у поєднанні з декстрином) та функціональних добавок.
2. Проведено випробування зразків деревини сосни, оброблених розробленим вогнезахисним засобом, на горючість згідно з методами випробувань за ДСТУ 8829:2019.

3. Результати випробувань показали, що розроблений вогнезахисний засіб на лаковій основі забезпечує групу важкогорючих матеріалів у відповідності з п. 7.3 ДСТУ 8829, тобто вогнезахисна деревина вогнезахисним засобом класифікується як важкогорючий матеріал.

#### Список використаних джерел

1. Войтович І.Г. Основи технології виробів з деревини. Львів: ТзОВ «Країна ангелів», 2010. 304 с.
2. Цапко Ю.В., Бондаренко О.П., Цапко О.Ю. Вогнезахист виробів з текстильних матеріалів. Теорія та практика. Київ: ТОВ «ЦП «Компринт»», 2021. 138 с.
3. Кірик М.Д. Механічне оброблення деревини та деревних матеріалів. Львів: ТзОВ «Кольорове небо», 2006. 412 с.
4. Бехта П.А. Технологія деревинних композиційних матеріалів: підручник. – Київ: Основа, 2003. 336 с.
5. Вінтонів І.С., Сопушинський І.М., Тайшінгер А. Деревинознавство: навчальний посібник. Львів: Априорі, 2007. 312 с.
6. Бут В.П., Жартовський В.М., Білошицький М.В., Цапко Ю.В., Барило О.Г. Особливості дослідження тривалості вогнезахисту деревини просочувальними засобами. Науковий вісник УкрНДПБ, 2004, № 1 (9). С. 21 – 25.

**Рецензент** Дідух Володимир Федорович, доктор технічних наук, професор кафедри аграрної інженерії імені професора Г.А. Хайліса Луцького національного технічного університету, Заслужений діяч науки і техніки України.

О.В. Андрійчук<sup>1</sup>, М.О. Щьоголев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут проблем реєстрації інформації Національної академії наук України

<sup>2</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ЛІНГВІСТИКИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ СОЦІАЛЬНОЇ НАПРУЖЕНОСТІ

*Кризові події та інформаційні операції є основними причинами збільшення напруженості в суспільстві. Для визначення рівня напруженості, що виникає в групі людей через певну подію, використовують соціологічні опитування. Але цей метод не дає детальної інформації про зміну рівня напруженості, пов'язаної з новинними подіями, та про їхній вплив на загальний рівень напруженості в суспільстві. Це ускладнює прийняття рішень державними посадовими особами в кризових ситуаціях.*

*У роботі пропонується спосіб визначення соціальної напруженості на основі даних з соціальних мереж. Розглянуто підхід до застосування інструментарію підтримки прийняття рішень для вимірювання соціальної напруженості. На основі зібраних з соціальної мережі даних проведено практичний приклад моделювання напруженості в Україні. За допомогою методу цільового динамічного оцінювання альтернатив побудовано рейтинг новинних публікацій відповідно до їхнього впливу на підвищення загального рівня напруженості в суспільстві.*

*Ключові слова:* рівень соціальної напруженості, соціальні мережі, сентимент-аналіз, метод цільового динамічного оцінювання альтернатив, система підтримки прийняття рішень.

O.V. Andriichuk, M.O. Shchoholiev

## APPLICATION OF DECISION-MAKING AND COMPUTATIONAL LINGUISTIC METHODS FOR OVERALL ESTIMATION OF THE LEVEL OF SOCIAL TENSION

*Crisis events and information operations are major causes of increased tension in society. Sociological surveys are used to determine the level of tension arising in a group of people because of a particular event. But this method does not provide detailed information on changes in the level of tension associated with news events and their impact on the overall level of tension in society. This makes it difficult for public officials to make decisions in crisis situations.*

*The paper proposes a way to determine social tension based on data from social networks. An approach for usage of decision support tools for measuring social tension is considered. On the basis of the data collected from the social network a practical example of modeling the tension in Ukraine is carried out. Using the method of targeted dynamic evaluation of alternatives, a rating of news publications according to their influence on the increase in the general level of tension in society is obtained.*

*Keywords:* level of social tension, social networks, sentiment analysis, method of goal dynamic estimating of alternatives, decision support system.

**Постановка проблеми.** Кризові події та інформаційні операції є основними причинами збільшення напруженості в суспільстві. Для визначення рівня напруженості, що виникає в групі людей через певну подію, використовують соціологічні опитування. Але такий спосіб не дає детальної інформації про зміну рівня напруженості, пов'язаної з новинними подіями, та про їхній вплив на загальний рівень напруженості в суспільстві. Це ускладнює прийняття рішень державними посадовими особами в кризових ситуаціях.

Інформаційні операції можуть призводити до формування соціальної напруженості (СН) у певних цільових групах [1, 2]. Дослідження інформаційних операцій є актуальним питанням в умовах швидкого розвитку інформаційних технологій та їхнього впливу на всі сфери життя людей. Формування інформаційного середовища може чинити певний вплив на суспільство, соціальні групи та окремих людей, що може призвести до СН [3].

СН залежить від масштабу об'єкта (країна, регіон, місто, район), специфіки місцевого населення, соціально-економічних та природно-екологічних чинників і, як наслідок, є унікальною. Динамічність визначається незворотністю процесів розвитку складних систем, швидкістю протікання сучасних соціальних та інформаційних процесів, що постійно збільшується. Неповнота опису СН виникає через те, що процеси можуть тільки починатися, але не встигнути повністю проявитися. Це особливо актуально при оперативному моніторингу СН. Використання статистичних даних під час вимірювання СН пов'язане з неточностями, помилками, суперечливістю, недостовірністю і неоднозначностями під час збирання інформації. Існує низка способів вимірювання СН, але неможливо однозначно формалізувати її у вигляді функції або системи рівнянь, що унеможливило побудову аналітичної моделі. Характеристики СН

проблематично повною мірою описати кількісно, і тому недоцільно говорити про існування еталонних значень цих характеристик. СН впливає на людей, які мають свободу волі. Не можна точно передбачити поведінку людини як компонента соціальної системи.

Отже, СН належить до слабо структурованих предметних областей [4-6]. Для моделювання у таких предметних областях доцільно використовувати експертні системи підтримки прийняття рішень (СППР) [7,8].

**Загальний опис підходу.** Розглянемо підхід до застосування інструментарію підтримки прийняття рішень для вимірювання СН. Цей підхід певним чином переключається з підходами, запропонованими для розпізнавання інформаційних операцій [9]. У рамках підходу засобами СППР будуються бази знань (БЗ), у яких шляхом послідовної декомпозиції розкриваються чинники СН, вказуються відповідні новинні теги та новинні публікації. При цьому використовуються результати контент-моніторингу (зокрема соціальних мереж) та знання експертів [10]. У результаті аналізу емоційності коментарів до новинних публікацій із використанням методів TF-IDF [11] та Word2vec [12-14] визначається рівень напруженості, пов'язаної з тими чи іншими новинними подіями та, як наслідок, їхній внесок у підвищення СН. Згодом, за допомогою методу ієрархічного цільового динамічного оцінювання альтернатив [15], рівень СН визначають як ступінь досягнення головної мети, розраховують рейтинги новинних публікацій і рейтинги новинних подій, що зробили свій внесок у підвищення СН.

Зміст методики застосування інструментарію СППР для вимірювання СН, що пропонується, полягає в наступному:

- 1) Проводиться попереднє дослідження об'єкта, для якого буде вимірюватися СН, підбирається група експертів.
- 2) Проводиться експертна декомпозиція факторів (критеріїв) СН. Вводяться в БЗ СППР критерії СН у вигляді відповідних цілей.
- 3) Вводяться в БЗ СППР цілі, що відповідають новинним тегам. Додаються зв'язки з відповідними факторами СН.
- 4) Вводяться в БЗ СППР проекти, що відповідають новинним публікаціям, і встановлюються їхні впливи на відповідні новинні теги.
- 5) Проекти об'єднуються в комплексні проекти, що відповідають кожному новинному тегу.
- 6) Кожний частковий коефіцієнт впливу (ЧКВ) проекту (новинної публікації) визначається як нормоване значення добутку кількості переглядів новинної публікації на її рівень напруженості.
- 7) ЧКВ цілі (новинного тега) визначається як нормоване значення суми добутків кількості переглядів пов'язаних із нею новинних публікацій на їхній рівень напруженості.
- 8) ЧКВ цілі (критерію СН) визначається або експертним шляхом [16], або шляхом знаходження нормованих значень суми добутків кількостей переглядів, пов'язаних до відповідних новинних тегів новинних публікацій, на їхній рівень напруженості.
- 9) Обчислюються ступені досягнення головної цілі як показника рівня СН. Також за необхідності обчислюється рівень СН за конкретними факторами.
- 10) Обчислюються рейтинги ефективності проектів та комплексних проектів як показники внеску кожної з новинних публікацій у створення СН.

Обчислені ступені досягнення цілей, рейтинги ефективності проектів та комплексних проектів використовуються при формуванні рекомендацій СППР.

Однією з найважливіших переваг запропонованого підходу є оперативність роботи, оскільки дані збираються щогодини і на їхній основі відразу розраховується оновлена оцінка рівня СН. Також слід відзначити можливість спостерігати за отриманими оцінками динаміку СН, що якісно відрізняє одержувані результати від тих, які можна отримати за допомогою традиційних методів соціологічних досліджень. Перевага застосування методів сентимент-аналізу та СППР полягає в оперативності опрацювання актуальних даних та отримання відповідних оцінок та рекомендацій. Окрім того, достовірність результатів може бути підвищена, оскільки в СППР поряд з об'єктивною інформацією (коментарі з соціальних мереж) можна використовувати ще й експертне оцінювання. Серед недоліків окремо слід виділити проблему спотворення результатів коментарями з фейкових облікових записів. Також недоліком використання інструментарію СППР, є те, що іноді вона може давати нестійкі рекомендації (наприклад, якщо значення ЧКВ цілей майже рівні в рамках однієї декомпозиції).

**Метод цільового динамічного оцінювання альтернатив.** Метод цільового динамічного оцінювання альтернатив (МЦДОА) [15] є ефективним інструментом для оцінювання альтернатив

на інтервалі часу в СППР. За допомогою МЦДОА можна використовувати загальні моделі предметних областей, які адекватно відображають особливості складних систем. Моделі в МЦДОА представлені у вигляді ієрархії цілей, які зручно зображуються у вигляді зв'язного орієнтованого графа. В СППР моделі предметних областей являють собою їх бази знань (БЗ). Оцінювання здійснюється на основі БЗ, яка складається з кореневої вершини графа, якій відповідає головна ціль проблеми, проміжних цілей та проєктів, яким відповідають термінальні вершини графа. Дуги графа навантажені величинами часових затримок впливів, що дозволяє враховувати динаміку зміни відносних оцінок альтернатив у часі.

У порівнянні з іншими методами, наприклад, багатокритеріальними [17], де знаходять застосування відповідні методи оптимізації [18], МЦДОА дозволяє оцінювати різномірні проєкти та залучати до побудови моделі групи експертів. Удосконалений МЦДОА, який реалізований в СППР "Солон-3" [19], полягає у виконанні ряду процедур з побудови БЗ та розрахунку рейтингів варіантів рішень на основі БЗ. МЦДОА можна позиціонувати як основоположний метод у галузі експертної підтримки прийняття рішень.

Процес побудови ієрархії цілей починається з формулювання головної цілі проблеми та можливих варіантів її вирішення, які потрібно оцінити. Головна ціль далі декомпонується на більш прості складові – цілі, що впливають на неї. Ці цілі також можуть бути декомпозовані, а до переліку цілей, що впливають на поточну ціль, можуть бути включені вже раніше сформульовані цілі. Процес декомпозиції продовжується до тих пір, поки множина цілей, які впливають на цілі, що розкриваються, не буде складатися лише з варіантів рішень, що оцінюються, та розкритих цілей. Декомпозиція зупиняється, коли всі цілі розкрито.

Отже, ієрархія цілей відображається на орієнтованому графі, де вершини позначені формулюваннями цілей, а дуги відповідають впливу досягнення однієї цілі на досягнення іншої. Граф є односторонньо зв'язним завдяки описаному процесу побудови ієрархії цілей, оскільки з будь-якої вершини графа існує шлях до вершини, що позначає головну ціль. Кожній цілі поставлено у відповідність показник ступеня досягнення  $d_i \in R$ ,  $i \in [1, n]$ ,  $n$  – кількість цілей в ієрархії.  $0 \leq d_i \leq 1$ , причому  $d = 1$  при повному досягненні  $i$ -ї цілі, а  $d_i = 0$  – при відсутності жодного процесу в її досягненні. Кожен вплив може бути як позитивним, так і негативним для досягнення тієї чи іншої цілі. Якщо прогрес досягнення підцілі (вершини з якої виходить дуга впливу) сприяє прогресу досягненню цілі (вершини в яку входить дуга впливу), то такий вплив є позитивним. В протилежному випадку вплив є негативним. Ступінь впливу однієї цілі на досягнення іншої виражається відповідним показником – ЧКВ. У МЦДОА враховується зміна ЧКВ в часовій динаміці, тому ЧКВ  $w_{ij}$   $i$ -ї цілі на  $j$ -ту в момент часу  $t$  визначається виразом:

$$w_{ij}(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } t < \tau_{ij}, \\ w_{ij}, & \text{if } t \geq \tau_{ij}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\tau_{ij}$  – експертна оцінка затримки впливу  $i$ -ї цілі на  $j$ -ту. Для досягнення цілей нижнього рівня ієрархії (проєктів) затримка їх впливу на цілі збільшується на величину, яка визначається тривалістю виконання проєкту.

Як зазначалось вище, визначення ЧКВ, позначених у (1) через  $w_{ij}$ ,  $j \in \mathbf{N}$  – коефіцієнти впливу цілей  $j$  на деяку ціль  $i$  в ієрархії, відбувається в рамках уже визначених сумісних підгруп. Сумісними вважаються цілі, досягнення кожної з яких не виключає необхідності та можливості досягнення будь-якої іншої. В протилежному випадку цілі вважаються несумісними. Множина несумісних цілей має бути розділена на окремі підмножини сумісних цілей. Таким чином ЧКВ групи сумісних цілей є нормованими величинами, та для кожної  $k$ -ї групи сумісних цілей задовольняють умову:

$$\sum_{j=1}^K |w_{ij}^{(k)}| = 1, \quad (2)$$

де  $w_{ij}^{(k)}$  – ЧКВ  $j$ -ї цілі на  $i$ -у ціль в  $k$ -й групі сумісних цілей;  $K$  – кількість сумісних цілей у  $k$ -й групі.

У зв'язку з тим, що цілі можуть мати як позитивний, так і негативний вплив, що відображається знаком відповідного ЧКВ, для порівнянь впливів цілей, які мають негативний вплив, замінюються на їхні логічні заперечення. Таким чином при визначенні ЧКВ всі цілі  $j$  в  $k$ -й підгрупі сумісних цілей мають позитивний вплив на досягнення  $i$ -ї цілі.

МЦДОА пропонує узагальнену процедуру визначення ступеня досягнення будь-якої цілі ієрархії в заданий момент часу  $t$ . Для визначення ступеня досягнення певної цілі необхідно проаналізувати ступені досягнення цілей, які безпосередньо впливають на цю ціль, для кожної підмножини сумісних цілей [15]. Таким чином, ступінь досягнення  $i$ -ї цілі в момент часу  $t$  описується формулою для  $d_i(t)$ :

$$d_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{if } D_i(t) < T_i, \\ T_i, & \text{if } D_i(t) = T_i, \\ f(D_i(t)), & \text{if } T_i < D_i(t) < 1 - \sum |w_{ij}^{(k)}|, \\ 1, & \text{if } 1 - \sum |w_{ij}^{(k)}| \leq D_i(t) \leq 1, \end{cases} \quad (3)$$

де  $D_i(t) = \sup_k \sum_j w_{ij}^{(k)} d_j(t)$ ;  $T_i$  – поріг досягнення  $i$ -ї цілі;  $f(D_i(t))$  – функція ступеня досягнення  $i$ -ї цілі в момент часу  $t$ ;  $w_{ij}^{(k)}$  – ЧКВ  $j$ -ї цілі в  $k$ -й групі сумісних цілей, який має негативний вплив на  $i$ -ту ціль.

Для розрахунку рейтингу (відносної оцінки) варіанта рішення, який відповідає  $i$ -й цілі ієрархії в певний момент часу  $t$  за допомогою МЦДОА, необхідно визначити різницю між ступенями досягнення головної цілі  $d_0(t)$ , при повному досягненні всіх цілей, що відповідають визначеним варіантам рішень для порівняння:  $d_i(t) = 1$ ,  $i \in L$ ,  $L = \{m..n\}$  та за умови  $d_i(t) = 1$ ,  $i \in L \setminus \{i\}$ ,  $d_i(t) = 0$ . Отже, рейтинг альтернативи (варіанта рішення) визначається як різниця між ступенем досягнення головної цілі при наявності впливу цієї альтернативи на головну ціль та без такого впливу.

Для визначення  $d_i(t)$  – ступеня досягнення  $i$ -ї цілі на момент часу  $t$  за допомогою МЦДОА потрібно спочатку визначити множину цілей, що не впливають на інші цілі даної ієрархії. З цієї множини цілей починається розрахунок ступенів досягнення цілей, призначаючи первісні значення рівними 1 або 0. Далі формується множина цілей, що можуть бути досягнуті безпосередньо з цієї попередньої множини.

Для кожної цілі з цієї множини проводиться визначення ступеня її досягнення на момент часу  $t$ . Просування по графу ієрархії від цілей нижнього рівня до цілей верхніх рівнів і, врешті, до головної цілі проводиться у ході визначення ступенів досягнення цілей. Якщо у графі є зворотні зв'язки, то ітераційний процес визначення ступенів досягнення цілей припиняється, коли модуль різниці між обчисленими значеннями ступеня досягнення обраної цілі на сусідніх ітераціях  $(x)$  та  $(x + 1)$  не перевищує заданої точності  $\varepsilon$ :

$$d_i(t)^{(x)} - d_i(t)^{(x+1)} \leq \varepsilon, \quad (4)$$

Перед використанням методу встановлюють точність розрахунків  $\varepsilon$  і період планування. Виходячи зі специфіки задач, що вирішуються, вибирається мінімальна одиниця вимірювання часових проміжків (наприклад: 1 день, 3 години, 1 година, тощо). Рекомендований період планування визначається за графом ієрархії цілей, де враховуються затримки розповсюдження впливів, і ця величина позначає максимальну тривалість часового періоду, на якому відбуваються зміни відносних рейтингів проєктів. Хоча метод дозволяє розрахувати відносні рейтинги проєктів на будь-який момент часу від початку їхньої реалізації, обчислені значення рейтингів змінюються лише в реперних точках часової осі, які можна визначити заздалегідь і лише один раз, а не перед кожною ітерацією. Для визначення наступного моменту часу  $t^{(i+1)}$  для обчислення ступенів досягнення цілей застосовується наступний вираз:

$$t^{(i+1)} = \inf_{k, \tau_k \geq t} (\tau_k), k \in \{1, 2, \dots, n - 1\}, \quad (5)$$

де  $\tau_k$  – значення затримок впливів цілей в ієрархії, що містить у собі  $n$  цілей. Водночас пропонується пройти від цілей нижнього рівня до верхнього, обчислюючи та додаючи до списку всі можливі затримки впливів цілей в ієрархії. Цей прохід проводиться одночасно з визначенням ступеня досягнення головної цілі ієрархії та, якщо є зворотні зв'язки, прохід продовжується до виконання умови (4). Формування списку затримок впливів цілей проводиться разом з розрахунком рекомендованого періоду планування, який відповідає максимальній величині серед обчислених затримок впливів.



**Результати досліджень.** Розглянемо практичний приклад застосування описаної вище методики для розрахунку СН засобами СППР на прикладі українського інформаційного простору.

На рис. 1 наведено приклад побудованої засобами СППР "Солон-3" [19] фрагмента БЗ СН в Україні, спричиненої динамікою публікативної активності 26.10.2022 для періоду часу 10:00-13:59. У таблиці 1 міститься перелік формулювань усіх цілей і проєктів БЗ. На рис. 1 наведено побудовану модель СН у вигляді графу ієрархії цілей. Вершина під номером 0 відповідає головній цілі.

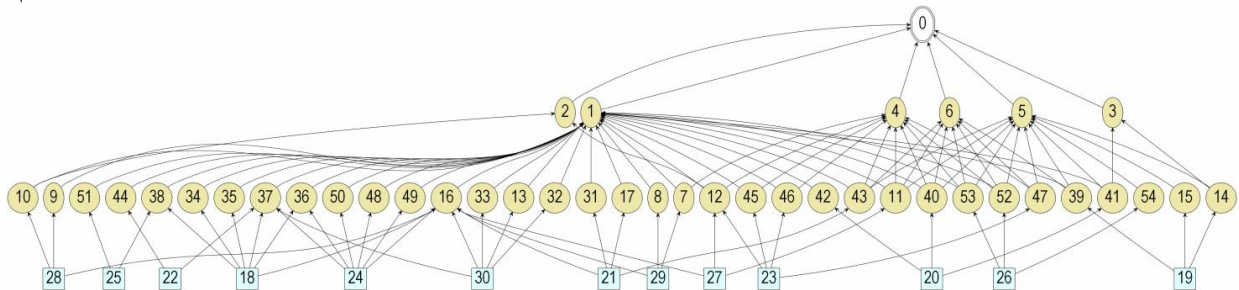


Рис.1 Фрагмент побудованої БЗ соціальної напруженості

Жовті вершини під номерами від 1 до 6 відповідають критеріям СН. Жовті вершини під номерами від 7 до 17 та від 31 до 54 відповідають новинним тегам. Блакитні вершини нижнього рівня ієрархії (або проєкти) під номерами від 18 до 30 відповідають новинним публікаціям.

Табл. 1.

**Перелік формулювань цілей**

№	Формулювання цілі	№	Формулювання цілі
0	Соціальна напруженість в Україні	28	11-річний хлопчик зі Львова збирає на безпілотник для ЗСУ
1	Війна в Україні	29	Окупанти викрадають українських дітей, аби змусити їхніх батьків виїхати до РФ
2	Неможливість отримати гідну роботу	30	‘Діють дуже таємно’: Росія вербує афганських командос для війни
3	Проблеми у сфері охорони здоров'я	31	втрати
4	Криміногенна ситуація	32	найманці
5	Проблеми у сфері житлово-комунального господарства	33	ПВК Вагнера
6	Екологічні проблеми	34	США
7	викрадення дітей	35	Захід
8	окупанти	36	Україна
9	хлопчик	37	Росія
10	волонтер	38	Путін
11	Одеса	39	Рівне
12	колаборант	40	новини Дніпра
13	Афганістан	41	ракетний удар
14	відключення	42	БРСМ-Нафта
15	електроенергія	43	новини Херсонської області
16	війна	44	мобілізація
17	ЗСУ	45	зрадники
18	Путін наляканий і у відчаї покладає останню надію на зиму в Європі — CNN	46	Укрпошта
19	Мер Рівного попередив про відключення світла у місті: де та коли сьогодні будуть обмеження	47	Харківська область
20	Виїжджала з АЗС, коли її охопила вогняна куля: з'явилися подробиці загибелі вагітної жінки у Дніпрі	48	кордон



21	ЗСУ знищили `Град` рашистів на Херсонщині: фото	49	диверсант
22	У Магадані мобілізували чоловіка, який через хворобу майже не може ходити	50	строковик
23	СБУ на Харківщині викрила колаборантку, яка збиралася керувати	51	Сі Цзінпін
24	У РФ російського військового сплутали з українським диверсантом і застрелили: свідкам наказали мовчати	52	новини Дніпропетровської області
25	Ганебніше не придумати: китайське керівництво вдосконалило принизливе прізвисько для Путіна	53	новини Одеської області
26	В Одеській та Дніпропетровській областях 26 жовтня не буде світла - ДТЕК	54	ДТЕК

В якості значення СН країни використовується розрахований в рамках МЦДОА ступінь досягнення головної цілі. Але для визначення динаміки зміни СН слід робити ряд розрахунків на часових проміжках ("вікнах") довжиною до 6 годин. Це пов'язано з тим, що зазвичай на перші дві години припадає лівова частка всіх коментарів до новинної публікації. А далі з'являються нові публікації та беруть на себе увагу аудиторії читачів. Використання таких "вікон" дозволяє боротися з надлишковістю моделі. Слід також зазначити, що можна для більшої детальності розраховувати ще й ступені досягнення цілей, які відповідають критеріям (складовим) СН. Але в рамках поточної військової ситуації в Україні така детальність мало що дасть, оскільки критерій номер 1 ("Війна в Україні") вносить переважну більшість в ступінь досягнення головної цілі. Отже, достатньо зупинитись на розрахунку тільки ступеня досягнення головної цілі.

В рамках згаданого вище часового проміжку було використано 2 "вікна" довжиною по 3 години.

У результаті розрахунку рівня СН засобами СППР як ступеня досягнення головної цілі 26.10.2022 за інтервал часу 10:00-12:59 було отримано значення 0.74594.

Фрагмент (топ 5) результатів розрахунку рейтингу новинних публікацій засобами СППР як ефективності проєктів для 1-го "вікна" показано в таблиці 2.

Табл. 2.

#### Фрагмент (топ-5) рейтингу новинних публікацій для 1-го "вікна"

Ефективність	Новинна публікація
0.12553	Виїжджала з АЗС, коли її охопила вогняна куля: з'явилися подробиці загибелі вагітної жінки у Дніпрі
0.11964	У Магадані мобілізували чоловіка, який через хворобу майже не може ходити
0.11774	Путін наляканий і у відчаї покладає останню надію на зиму в Європі — CNN
0.10436	ЗСУ знищили `Град` рашистів на Херсонщині: фото
0.08125	Окупанти викрадають українських дітей, аби змусити їхніх батьків виїхати до РФ

Фрагмент (топ-5) результатів розрахунку рейтингу новинних тегів засобами СППР як ефективності комплексних проєктів для 1-го "вікна" показано в таблиці 3. Кожен складний проєкт складається з простих проєктів, які відповідають деяким новинним публікаціям, що містять визначений новинний тег.

У результаті розрахунку рівня СН засобами СППР як ступеня досягнення головної цілі 26.10.2022 за період часу 11:00-13:59 було отримано значення 0.80731.

Фрагмент (топ 5) результатів розрахунку рейтингу новинних публікацій засобами СППР як ефективності проєктів для 2-го "вікна" показано в таблиці 4.

Табл. 3.

**Фрагмент (топ-5) рейтингу новинних тегів для 1-го "вікна"**

Ефективність	Новинний тег
0.09206	війна
0.06984	Росія
0.05396	Путін
0.03862	викрадення дітей
0.03111	БРСМ-Нафта

Табл. 4.

**Фрагмент (топ-5) рейтингу новинних публікацій для 2-го "вікна"**

Ефективність	Новинна публікація
0.12552	Путін наляканий і у відчаї покладає останню надію на зиму в Європі — CNN
0.12531	Виїжджала з АЗС, коли її охопила вогняна куля: з'явилися подробиці загибелі вагітної жінки у Дніпрі
0.11785	У Магадані мобілізували чоловіка, який через хворобу майже не може ходити
0.10287	ЗСУ знищили `Град` рашистів на Херсонщині: фото
0.08127	11-річний хлопчик зі Львова збирає на безпілотною для ЗСУ

Фрагмент (топ-5) результатів розрахунку рейтингу новинних тегів засобами СППР як ефективності комплексних проєктів для 1-го "вікна" показано в таблиці 5. Кожен складний проєкт складається з простих проєктів, які відповідають деяким новинним публікаціям, що містять визначений новинний тег.

Таблиця 5.

**Фрагмент (топ-5) рейтингу новинних тегів для 2-го "вікна"**

Ефективність	Новинний тег
0.09249	війна
0.06691	Росія
0.05914	Путін
0.03762	викрадення дітей
0.03019	БРСМ-Нафта

Отже, видно позитивну динаміку СН протягом двох "вікон". Далі аналогічно слід обчислювати значення СН для наступних "вікон" та стежити за її динамікою.

**Висновки.** У роботі було розглянуто підхід до застосування інструментарію підтримки прийняття рішень для вимірювання соціальної напруженості, подано математичний опис методу цільового динамічного оцінювання альтернатив. Розглянуто практичний приклад застосування запропонованого підходу для розрахунку соціальної напруженості для українського інформаційного простору.

**Список використаних джерел**

1. Information operations roadmap – DoD US. – Washington, D.C.: GPO, 2003. [Електронний ресурс] Режим доступу: [https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/FOID/Reading\\_Room/Other/Information\\_Operations\\_Roadmap\\_30\\_October\\_2003.pdf](https://www.esd.whs.mil/Portals/54/Documents/FOID/Reading_Room/Other/Information_Operations_Roadmap_30_October_2003.pdf)
2. Military Information Support Operations. Incorporating Change 1 20 December 2011. // Joint Publication 3-13.2 – 2010. – 125 P. [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://fas.org/irp/doddir/dod/jp3-13-2.pdf>

3. Shchoholiev M., Tretynyk V. The System of Operative Determination of the Level of Tension in Society Based on Data from Social Networks // *Information & Security: An International Journal*, 43(3), – 2019 – pp. 375-382. DOI: 10.11610/isij.4328
4. Averkin A.N., Kuznetsov O.P., Kulinich A.A., Titova N.V. Decision-making support in weakly structured subject domains: Analysis of situations and evaluation of alternatives // *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 45(3) – 2006 – pp. 469–479.
5. Tsyganok V., Kadenko S., Andriychuk O., Roik, P. Usage of multicriteria decision-making support arsenal for strategic planning in environmental protection sphere // *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 24(5-6) – 2017. – pp. 227-238.
6. Kadenko S.V. Prospects and Potential of Expert Decision-making Support Techniques Implementation in Information Security Area // *CEUR Workshop Proceedings (ceur-ws.org)*, 1813, – 2016. – pp. 8-14. [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://ceur-ws.org/Vol-1813/paper2.pdf>
7. Saaty T.L. *Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process* / Pittsburgh, PA: RWS Publications, – 2000.
8. Lee D.T. Expert Decision-support Systems for Decision-making // *Journal of Information Technology*, 3(2) – 1988. – pp. 85-94.
9. Dodonov A., Lande, D., Tsyganok, V., Andriichuk, O., Kadenko, S., Graivoronskaya, A. (2019). *Information Operations Recognition. From Nonlinear Analysis to Decision-Making.* / Lambert Academic Publishing. – 2019.
10. Shchoholiev M., Andriichuk O., Tsyganok V., Tretynyk V. Decision-making and computational linguistic tools application for overall estimation of the level of social tension // *Journal of Physics: Conference Series*, 1780 – 2021. – pp. 1-9.
11. Manning C.D., Raghavan P., Schütze H. *Introduction to Information Retrieval.* / Cambridge University Press, – 2008. – 506 p. DOI: 10.1017/CBO9780511809071
12. Mikolov T., Chen K., Corrado G., Dean J. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space // *arXiv:1301.3781v3* – 2013 – 12 p. DOI: 10.48550/arXiv.1301.3781
13. Mikolov T., Le Q.V., Sutskever I. Exploiting Similarities among Languages for Machine Translation // *arXiv:1309.4168v1* – 2013 – 10 p. DOI: 10.48550/arXiv.1309.4168
14. Rong X. word2vec Parameter Learning Explained // *arXiv:1411.2738v4* – 2016 – 21 p. DOI: 10.48550/arXiv.1411.2738
15. Totsenko V.G. One Approach to the Decision Making Support in R&D Planning. Part 2. The Method of Goal Dynamic Estimating of Alternatives // *Journal of Automation and Information Sciences*, 33(4) – 2001. – pp. 82–90.
16. Totsenko V.G., Tsyganok V.V. Method of paired comparisons using feedback with expert. // *Journal of Automation and Information Sciences*, 31(7–9) – 1999. – pp.86–96.
17. Figueira J., Salvatore G., Ehrgott M. (Eds.). *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys* / New York: Springer. – 2005.
18. Steuer R.E. *Multiple criteria optimization; theory, computation, and application.* / Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. – 1986.
19. Свідоцтво про держ. реєстрацію автор. права на твір №8669. МОН України Держ. деп. інтелект. власності. Комп'ютерна програма "Система підтримки прийняття рішень СОЛОН-3" (СППР СОЛОН-3) / В.Г.Тоценко, П.Т.Качанов, В.В.Циганок // зареєстровано 31.10.2003.

З.С. Сірко<sup>1</sup>, Д.П. Торчилевський<sup>1</sup>, В.М. Грицун<sup>1</sup>, Н.О. Толстушко<sup>2</sup>, М.М. Толстушко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Український державний науково-дослідний інститут «Ресурс»

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

## ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ШЛІФУВАННЯ ПРОФІЛЬНИХ ПОГОНАЖНИХ ВИРОБІВ ІЗ ДЕРЕВИНИ ТА ДЕРЕВИННИХ МАТЕРІАЛІВ

*Шліфування – один із способів механічного оброблення деревини багаторізовим інструментом з неорганізованою геометрією – шліфувальною шкуркою. Основне призначення процесів шліфування деревини та деревинних матеріалів полягає у підготовленні поверхні до опорядження шляхом усунення кінематичних та технологічних нерівностей від попереднього механічного оброблення деревини. Існує проблема оброблення складних профільних поверхонь виробів із деревини та деревинних матеріалів, які сьогодні знайшли широке застосування у конструкціях меблів та столярних виробів. Авторами розроблена конструкція еластичної шліфувальної шкурки та технологія її виготовлення. Проведені експериментальні дослідження розробленої шкурки, наведені результати досліджень та показані переваги розробленого еластичного шліфувального інструменту.*

*Ключові слова:* еластична шліфувальна шкурка, вироби із деревини та деревинних матеріалів, профільні поверхні, експериментальні дослідження, стійкість інструменту, шорсткість обробленої поверхні.

Z.S. Sirko, D.P. Torchylevskyi, V.M. Hrytsun, N.O. Tolstushko, M.M. Tolstushko

## A TOOL FOR GRINDING PROFILED WOOD PRODUCTS AND WOOD MATERIALS

*Grinding is one of the methods of mechanical processing of wood with a multi-cutting tool with an unorganized geometry - a grinding wheel. The main purpose of the processes of grinding wood and wood materials is to prepare the surface for equipment by eliminating kinematic and technological irregularities from the previous mechanical processing of wood (sawing, milling, etc.). There is a problem of processing complex profiled surfaces of products made of wood and wood materials, which today are widely used in the construction of furniture and carpentry. Domestic sanding paper does not have sufficient elasticity and allows you to process profile parts only with a radius of curvature greater than 5 mm. At smaller values of the radius of curvature, the sanding paper breaks, cracks are observed on its surface, which leads to poor processing of parts and rapid wear of the sanding belt. The authors developed the design of the elastic sanding skin and the technology of its production. Experimental studies of the developed skin were carried out, the results of the studies were presented, and the advantages of the developed elastic grinding tool were shown.*

*Key words:* elastic sanding pad, products made of wood and wood materials, profiled surfaces, experimental studies, stability of the tool, roughness of the treated surface.

**Постановка проблеми.** Процес шліфування є процесом масового мікрорізання – різання поверхні матеріалу одночасно великим числом різців. Із-за незначної товщини стружок, що зрізаються та наявності в зоні контакту шкурки з деталлю абразивних зерен, які безпосередньо не приймають участі в зрізанні стружки, питома робота різання під час шліфування в декілька разів вища, ніж під час різання шляхом пиляння чи фрезерування (лезовим інструментом) [1]. Та незважаючи на це, шліфування є поки що єдиним ефективним процесом для досягнення високих класів шорсткості поверхні.

В царині досліджень процесів абразивного оброблення деревини та деревинних матеріалів існує три основних напрямки:

– дослідження з виявлення факторів, обумовлених матеріалом, що обробляється шліфувальним інструментом та режимами оброблення, на основні оціночні показники процесу шліфування (питому продуктивність, шорсткість поверхні, зносостійкість тощо);

– дослідження, направлені на розроблення та створення нових інструментів, які можуть замінити шліфувальні шкурки;

– дослідження, направлені на вдосконалення існуючих шліфувальних шкурок.

Роботи першого напрямку, виконані вітчизняними та зарубіжними вченими [2, 3, 4], дозволяють математично моделювати процес шліфування та вибирати оптимальні характеристики існуючих абразивних інструментів, режими та умови їх експлуатації.

Менше вивчені питання другого напрямку, що стосуються створення нових конструкцій та видів інструментів, що можуть замінити шліфувальні шкурки.

Роботи третього напрямку, тобто вдосконалення існуючих шліфувальних шкурок, реалізують наступні ідеї: розроблення шкурок з програмним нанесенням зерен на основу [5], зменшення щільності насипання абразивних зерен [6], застосування рельєфної основи [7], зміцнення шліфувальних стрічок лаком або клеєм.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз результатів цих робіт показав, що вдосконалення конструкцій шліфувальних шкурок є одним із найперспективніших напрямків в підвищенні ефективності стрічкового шліфування деревини та деревинних матеріалів.

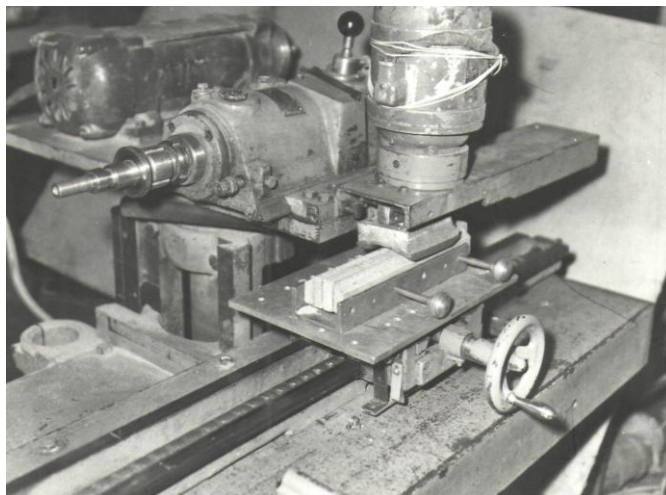
Всі три вищенаведені напрямки абразивного оброблення деревини та деревинних матеріалів в основному вивчені для оброблення плоских поверхонь.

Оброблення складних профільних поверхонь досліджено мало, особливо в напрямку створення гнучких шліфувальних стрічок.

Розроблення та виготовлення інструменту, який замінить імпорту еластичну шліфувальну стрічку під час шліфування профільних погонажних виробів, є актуальним та економічно доцільним.

**Постановка завдань.** Метою роботи є розроблення еластичної шліфувальної стрічки для шліфування складних профільних погонажних виробів із деревини та деревинних матеріалів.

**Викладення основного матеріалу.** Для досліджень використовували заготовки із деревинно-стружкової плити та деревини твердих листяних порід. Для шліфування складних профільних поверхонь задіяли розроблену високоеластичну шліфувальну шкурку, яка виготовлена із бавовняної тканини – саржі легкої № 2 сувороті Л2 з нанесеним на неї за допомогою еластичного синтетичного в'язучого з добавкою незначної кількості дибутилфталату (2-3%) абразивних зерен нормального електрокорунда зернистістю 32 мкм. Дослідження еластичної шкурки проводили за допомогою лабораторної установки з інструментом зворотно-поступального руху, загальний вигляд якої показано на рис. 1.



*Рис. 1. Загальний вигляд лабораторної установки із зворотно-поступальним рухом інструменту*

На спеціальній лабораторній установці були проведені дослідження зразків із деревинно-стружкової плити та деревини твердих листяних порід на стійкість еластичної шліфувальної шкурки та шорсткість оброблених поверхонь. Також досліджувалась різальна здатність еластичної шліфувальної шкурки в залежності від її зернистості. Після закінчення операції еластичного шліфування візуально оцінювали зміну геометрії профілю шляхом порівняння із зразком-еталоном. Було відмічено, що за рахунок гнучкості еластичної шліфувальної шкурки зміна профілю практично не спостерігалась.

Дослідження проводили за швидкості подачі 7 та 30 м/хв, частотою подвійних ходів інструмента 23,3 Гц. В якості основи для інструмента із зворотно-поступальним рухом використовували пробкові «утюжки», якими обладнані імпорتنі лінії для профільного шліфування. Результати досліджень стійкості еластичної шліфувальної шкурки та шорсткості оброблених поверхонь деревинних матеріалів наведені у табл. 1.

Також була досліджена різальна здатність еластичної шліфувальної шкурки в залежності від її зернистості (табл. 2).

Також після закінчення операції еластичного шліфування візуально оцінювалась зміна геометрії профілю шляхом порівняння із зразком-еталоном. Було відмічено, що за рахунок гнучкості еластичної шліфувальної шкурки зміна профілю практично не спостерігалась.

Табл. 1.

**Результати досліджень стійкості еластичної шліфувальної шкурки та шорсткості оброблених поверхонь деревинних матеріалів**

Матеріали	Швидкість подачі матеріалу, м/хв	Частота подвійних ходів інструменту, Гц	Стійкість інструменту, пог.м	Шорсткість оброблених поверхонь, мкм
Деревинно-стружкова плита	7	23,3	1900	96
	30		1500	125
Деревина твердих листяних порід	7	23,3	1400	88
	30		1100	110

Табл. 2.

**Результати досліджень різальної здатності еластичної шліфувальної шкурки**

Зернистість	Різальна здатність еластичної шліфувальної шкурки, мм <sup>3</sup> /хв.
	Електрокорунд нормальний
50	1637
40	1583
32	1420
25	1380
20	1300
16	737
12	480
10	320
8	210
6	108

**Висновки.**

1. Розроблена конструкція еластичної шліфувальної шкурки для оброблення профільних погонажних виробів із деревини та деревинних матеріалів.
2. Результати досліджень еластичної шліфувальної шкурки показали її відносну стійкість та задовільну якість (шорсткість) оброблених поверхонь.
3. Запропонована еластична шліфувальна шкурка має високу різальну здатність та практично не змінює геометрію початкового профілю виробу.

**Список використаних джерел**

1. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.
2. Паньков Л.А., Костин Н.В. Ленточное шлифование высокопрочных материалов. М.: Машиностроение, 1978. 126 с.
3. Яцюк Я.М. Новый способ механической обработки древесины. Львов: Вища школа, 1975. 256 с.
4. Петер Кох. Процессы механической обработки древесины. М.: Лесная промышленность, 1969. 328 с.
5. Виксман Е.С. Алмазные инструменты с упорядоченным расположением зерен / Синтетические алмазы в промышленности. К.: Наукова думка, 1974. С. 18-22.
6. Зайцева М.А. Исследование влияния различных технических характеристик шлифовальных шкурок на процесс шлифования древесины: автореф. дис. канд. техн. наук. Л., 1967. 21 с.
7. Lgalov V.V. Predicting the surface microrelief of abrasive grinding. Russian Engineering Research. 2013, № 4 (33). P 229-235.

**Рецензент** Дідух Володимир Федорович, доктор технічних наук, професор кафедри аграрної інженерії імені професора Г.А. Хайліса Луцького національного технічного університету, Заслужений діяч науки і техніки України.

УДК 648.4.05

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.38

З.С. Сірко<sup>1</sup>, Д.П. Торчилевський<sup>1</sup>, В.М. Грицун<sup>1</sup>, Н.О. Толстушко<sup>2</sup>, М.М. Толстушко<sup>2</sup><sup>1</sup>Український державний науково-дослідний інститут «Ресурс»<sup>2</sup>Луцький національний технічний університет

### МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СТАЛІ МАРКИ 7ХНМФБ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕРЕВОРІЗАЛЬНИХ ПИЛ

*В статті висвітлені питання, пов'язані з дослідженнями механічних властивостей інструментальних сталей, які використовують для виготовлення дереворізальних пил (рамних, стрічкових та круглих пил). Фахівцями інституту у співдружності з Українським науково-дослідним інститутом «Спецсталь» (м. Запоріжжя) була розроблена нова вітчизняна легована інструментальна сталь марки 7ХНМФБ, яка має ряд переваг перед відомими сталями марки 9ХФ та 9ХФМ: підвищені жаростійкість, корозійна стійкість, кислотостійкість, зносостійкість та опір повзучості. Дані дослідження дають можливість прогнозувати, що дереворізальні пили, які будуть виготовлені із нової марки сталі за своїми експлуатаційними властивостями будуть перевершувати пили, що виготовляються із відомих сталей.*

*Ключові слова:* леговані інструментальні сталі, випробування, механічні властивості, дереворізальні пили.

Z.S. Sirko, D.P. Torchylevskiy, V.M. Hrytsun, N.O. Tolstushko, M.M. Tolstushko

### MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL GRADE 7ХНМФБ FOR MANUFACTURING WOOD CUTTING SAWS

*The article covers issues related to research into the mechanical properties of tool steels used for the manufacture of wood-cutting saws (frame, band and circular saws). Specialists of the institute, in cooperation with the Ukrainian Research Institute "Spetsstal" (Zaporizhia), developed a new domestic alloyed tool steel of the brand 7ХНМФБ, which has a number of advantages over the well-known steels of the brand 9ХФ and 9ХФМ: increased heat resistance, corrosion resistance, acid resistance, wear resistance and creep resistance. The impact toughness of steels, temporary resistance to rupture and fracture toughness were also determined. In the course of research, it was established that the new 7ХНМФБ steel grade is superior to known steels in all parameters. This applies to such important indicators as strength limit, yield limit, relative elongation and relative contraction, impact toughness and fracture toughness. Such indicators became possible thanks to the chemical composition of the new steel and the technology of its smelting. These researches make it possible to predict that wood-cutting saws, which will be made from a new brand of steel, will outperform saws made from known steels in terms of their operational properties.*

*Key words:* alloyed tool steels, tests, mechanical properties, wood-cutting saws.

**Постановка проблеми.** Дереворізальні пили виготовляють із інструментальних сталей, до яких відносяться вуглецеві інструментальні сталі, леговані інструментальні сталі, швидкорізальні сталі, тверді сплави. Більшість пил виготовляють із легованих інструментальних сталей, які мають ряд переваг: жаростійкість, корозійну стійкість, кислотостійкість, зносостійкість та опір повзучості [1].

Леговані сталі мають непростий склад на основі заліза, вуглецю та різних хімічних елементів, які впливають на структурні перетворення металу на молекулярному рівні [2-4]. Процентний вміст легуючих елементів визначає фізико-хімічні властивості сталі.

Найбільш поширеними елементами для легування сталі являються: кремній, марганець, алюміній, хром, молібден, нікель, вольфрам, титан, ванадій, ніобій, мідь, кобальт, бор та рідкоземельні метали [5]. Шкідливими елементами легованих сталей є такі елементи як сірка та фосфор.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Більшість легованих сталей та дереворізальних пил із них виготовляли в Російській Федерації. В період незалежності нашої держави відчувався дефіцит у дереворізальному інструменті із легованих сталей 9ХФ та 9ХФМ. Тому виникла проблема розробити вітчизняну леговану сталь для дереворізального інструменту з покращеними фізико-хімічними властивостями.

Фахівцями інституту у співдружності з Українським науково-дослідним інститутом «Спецсталь» (м. Запоріжжя) була розроблена сталь марки 7ХНМФБ із хімічним складом в %: вуглецю – 0,78; хрому – 1,0; марганцю – 0,45; ванадію – 0,2; молібдену – 0,25; нікелю – 1,1; ніобію – 0,2; рідкоземельних елементів до 0,08. Сталь була виготовлена на металургійному комбінаті ПАТ «Запоріжсталь».



**Постановка завдань.** Метою роботи є визначення механічних властивостей сталі марки 7ХНМФБ для виготовлення дереворізальних пил.

**Викладення основного матеріалу.** Твердість сталі, межу міцності, межу плинності, відносне видовження, відносне звуження визначали в інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка за стандартними методиками.

Твердість сталі HRC визначали за допомогою приладу Роквелла (ТК-2), в якому використовували діамантовий конус, що має при вершині кут  $120^\circ$ , який передає глибину відбитка на індикатор. За одиницю твердості приймали значення, що відповідає переміщенню наконечника (індентора) під час вдавлювання на 0,002 мм.

Для визначення величини сили, що діє на зразок до його руйнування (значення навантаження, за якого відбувається руйнування) використовували універсальну випробувальну машину УВМ-50, після чого вираховували межу міцності сталі  $\sigma_B$  як відношення сили до площі в МПа.

Межу плинності, що встановлює межу між пружною і пружно-пластичною зоною деформування, визначали як відношення розтягуючої сили до початкової площі перерізу зразка. Зразок повинен мати таку форму, щоб в межах заданої ділянки напружений стан був лінійним. Ця ділянка зразка називається робочою частиною. Вона являє собою стрижень з прямолінійною віссю і перерізом круглої форми постійної площі. Рівнодіюча сила з обох кінців повинна бути направлена точно вздовж осі. Для здійснення зазначених умов у випробувальній машині містяться два захоплювача, а на зразку – дві конічні головки. Випробування проводили на універсальній гідравлічній машині моделі ВМГ-30.

Відносне видовження визначали відношенням збільшення довжини тіла під час розтягу до довжини тіла до деформації. Для випробувань на видовження використовували спеціальну розривну машину INSTRON (США), що оснащена електромеханічним приводом для навантажування зразка, захватами для його фіксації, а також системою вимірювання та реєстрації даних. Для вимірювання деформації застосовували спеціальний тензометр, яким обладнана розривна машина.

Відносне звуження визначали як відношення зменшення площі поперечного перерізу в місці розриву зразка до початкової площі його поперечного перерізу та виражали у відсотках. Випробування проводили на спеціальній розривній машині INSTRON.

Експлуатаційні властивості дереворізальних пил залежать, в основному, від механічних властивостей сталі, із якої вони виготовлені. Виходячи із цього, були проведені дослідження механічних властивостей нової сталі марки 7ХНМФБ у порівнянні до відомих сталей 9ХФ та 9ХФМ. Результати досліджень механічних властивостей даних сталей після термічного оброблення на твердість HRC 50-35 наведені у табл. 1.

Табл. 1.

**Результати досліджень механічних властивостей сталей 9ХФ, 9ХФМ та 7ХНМФБ**

Марка сталі	Твердість, HRC	Межа міцності $\sigma_B$ , МПа	Межа плинності $\sigma_T$ , МПа	Відносне видовження $\delta$ , %	Відносне звуження $\psi$ , %
9ХФ	50	950	500	5,0	8,0
	45	920	480	6,0	13,0
	40	890	450	6,5	22,0
	35	840	420	9,5	28,0
9ХФМ	50	970	520	5,5	14,0
	45	940	500	6,5	18,0
	40	900	470	8,0	27,0
	35	850	435	12,0	32,0
7ХНМФБ	50	980	540	7,0	27,0
	45	950	520	9,0	30,0
	40	910	490	12,5	40,0
	35	870	450	14,5	46,0

Загартування всіх сталей проводили за температури  $850 \pm 10^\circ\text{C}$  в масло, тривалість відпуску – дві години.

Результати досліджень ударної в'язкості після термооброблення на HRC 50-35, в'язкості руйнування наведені у табл. 2.

Табл. 2.

**Результати досліджень ударної в'язкості, тимчасового опору розриву та в'язкості руйнування**

Марка сталі	Твердість, HRC	Ударна в'язкість, KCU кДж/м <sup>2</sup> за температури $20 \pm 2^\circ\text{C}$	Тимчасовий опір розриву, МПа	В'язкість руйнування $K_{1C}$ , МПа · м <sup>1/2</sup>
9ХФ	50	120	930	13,8
	45	138	700	22,0
	40	252	620	22,2
	35	323	540	24,0
9ХФМ	50	130	950	16,0
	45	195	710	23,8
	40	348	630	24,7
	35	377	550	25,2
7ХНМФБ	50	120	970	20,5
	45	144	730	24,0
	40	228	650	27,0
	35	319	570	29,0

**Висновки.**

1. Проведені дослідження механічних властивостей нової розробленої інструментальної легованої сталі марки 7ХНМФБ у порівнянні із відомими марками сталей 9ХФ та 9ХФМ.

2. Результати досліджень механічних властивостей сталей показали, що нова розроблена легована інструментальна сталь марки 7ХНМФБ за всіма показниками перевершує відомі сталі.

3. За результатами досліджень можна рекомендувати нову леговану інструментальну сталь марки 7ХНМФБ для виготовлення дереворізального інструменту.

**Список використаних джерел**

1. Кірик М.Д. Інструмент для оброблення деревини та деревних матеріалів. Коломия: ВМЦ Коломийського механіко-технологічного коледжу, 1999. 190 с.

2. Сірко З.С. Експлуатація лісопиляльних рам: Монографія. Київ: «Центр учбової літератури», 2017. 208 с.

3. Кірик М.Д. Різання деревини та деревних матеріалів. Львів: Український державний лісотехнічний університет, 2000. 218 с.

4. Инструментальные стали: справочник. Москва: «Металлургия», 1977. 168 с.

5. Выбор и эксплуатация распиловочного оборудования: практические рекомендации. Кировоград: «Астра», 2003. 88 с.

**Рецензент** Дідух Володимир Федорович, доктор технічних наук, професор кафедри аграрної інженерії імені професора Г.А. Хайліса Луцького національного технічного університету, Заслужений діяч науки і техніки України.

О.Є. Андрейків<sup>1</sup>, І.Я. Долінська<sup>2</sup>, С.В. Настасяк<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Львівський національний університет імені Івана Франка

<sup>2</sup>Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України

## МОДЕЛЮВАННЯ РОСТУ СИСТЕМ ТРІЩИН У МЕТАЛЕВИХ ПЛАСТИНАХ ЗА ДІЇ ДОВГОТРИВАЛОГО РОЗТЯГУ І ВОДЕНЬВМІСНИХ СЕРЕДОВИЩ

*Застосовуючи раніше розроблений деформаційний підхід, побудовано розрахункові моделі для визначення залишкової довговічності пластин із системами тріщин за дії довготривалого статичного навантаження і воденьвмісного середовища. Як показують експериментальні дані, воднево-механічна тріщина рухається стрибкоподібно з довжиною стрибка між максимумами величин деформацій і напружень біля вершини тріщини. Визначення цієї довжини стрибка за певний час під дією водню і механічних деформацій покладено в основу створення математичної моделі поширення воднево-механічної тріщини. Модель застосовано до визначення залишкової довговічності пластини з різними типами систем воднево-механічних тріщин: періодичною, двоякоперіодичною та періодичною системою паралельних тріщин. Встановлено залежність залишкової довговічності пластини від силового параметра навантаження, концентрації водню і геометричних параметрів систем тріщин.*

*Ключові слова:* система воднево-механічних тріщин, математична модель, деформаційний підхід, залишкова довговічність.

O.Ye. Andreykiv, I.Ya. Dolinska, S.V. Nastasyak

## SIMULATION OF THE GROWTH OF CRACK SYSTEMS IN METAL PLATES UNDER THE ACTION OF LONG-TERM STRETCHING AND HYDROGEN-CONTAINING ENVIRONMENTS

*Using the previously developed deformation approach, calculation models were built to determine the residual life time of plates with crack systems under the action of a long-term static load and a hydrogen-containing environment. As experimental data show, a hydrogen-mechanical crack moves in a jump-like manner with a jump length between the maxima of deformations and stresses near the top of the crack. Determination of this jump length over a certain time under the action of hydrogen and mechanical deformations is the basis for creating a mathematical model of hydrogen-mechanical crack propagation. The model is applied to determine the residual life time of a plate with different types of hydrogen-mechanical crack systems: periodic, double-periodic, and periodic parallel crack systems. The dependence of the residual life time of the plate on the force parameter of the load, the concentration of hydrogen and the geometric parameters of the crack systems was established.*

*Key words:* system of hydrogen-mechanical cracks, mathematical model, deformation approach, residual life time.

**Постановка проблеми.** Як показує експлуатаційна практика, конструкційні матеріали високої міцності під дією навантаження досить часто схильні до шкідливого впливу водню, особливо водневої крихкості [1, 2] та зародження у них тріщин [1, 3, 4]. Часто розвиток таких тріщин призводить до руйнування відповідальних елементів конструкцій. Для уникнення непередбаченого руйнування визначальною є оцінка періоду докритичного росту тріщин – залишкової довговічності елементів конструкцій. Тут слід застосовувати відповідні математичні моделі, які описують характер руйнування елементів металоконструкцій, що працюють у водневмісних середовищах за тривалих навантажень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема водневого руйнування металевих сплавів давно є в центрі уваги фізиків, матеріалознавців та інженерів-механіків [1]. У праці [5] проаналізовано вплив газоподібного водню на ріст тріщини в структурних сталях з урахуванням теплового чинника та ефектів гідрування-дегазації металів. Вивчено роль водню у поширенні тріщин за циклічних [6–9] та статичних навантажень [10]. Виявлено [6, 9] різке збільшення (на порядок) швидкості росту втомних тріщин в умовах дії газоподібного водню під високим тиском порівняно із випробуваннями на повітрі [6]. У працях [7, 8] отримано формулу для визначення швидкості поширення тріщини залежно від локальної концентрації водню у вершині тріщини, концентрації його в об'ємі металу і діапазону зміни коефіцієнта інтенсивності напружень. Запропоновано фізико-механічну модель оцінювання кінетики росту внутрішніх водневих дефектів з урахуванням нестационарних теплових інфузій [5]. Отримано [11] рівняння зміни розмірів втомної тріщини в стінці трубопроводу від часу. Застосовуючи деформаційний підхід побудовано математичні моделі визначення періоду докритичного росту воднево-механічних тріщин [1, 5]. Більшість із відомих у літературі математичних моделей [1, 4, 5, 12] для опису швидкості поширення тріщин за дії воденьвмісних середовищ описують ріст одинарних тріщин.

© О.Є. Андрейків, І.Я. Долінська, С.В. Настасяк

Однак, як показує практика [1], все-частіше елементи конструкцій піддаються зародженню і поширенню в них систем тріщин. Важливо проаналізувати вплив систем тріщин на залишкову довговічність елементів конструкцій порівняно із одною тріщиною. Розрахункові моделі цієї проблеми вивчені ще недостатньо. Саме цим питанням присвячена стаття.

**Метою статті** є розроблення математичної моделі для дослідження кінетики поширення систем воднево-механічних тріщин в металевих пластинах і визначення на цій основі їх залишкової довговічності.

#### Виклад основного матеріалу.

**Математична модель росту систем воднево-механічних тріщин у пластині.** Розглянемо пластину, послаблену системою  $n$  тріщин, яка перебуває під дією довготривалого статичного розтягу, що описується рівномірно розподіленими зусиллями інтенсивності  $p$  (рис. 1) і воденьвмісного середовища. Поверхні тріщин вважаються покритими оксидною плівкою, а на ювенільних поверхнях їх рухомих вершин створюється поверхнева концентрація водню  $C_{H_0}$ . Така ситуація в подальшому зумовлює дифузію водню в зону передруйнування перед вершинами тріщин, а також зміну міцнісних та пластичних характеристик матеріалу пластини. Вважаємо, що всі тріщини приймаються в однакових умовах, а навантаження прикладене перпендикулярно до лінії їх розміщення, так що напружено-деформований стан у пластині симетричний відносно лінії розміщення тріщин. Задача полягає у визначенні часу  $t = t_*$ , за який внаслідок дії силового чинника і середовища одна з тріщин  $a_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) досягне свого критичного розміру, що призведе до руйнування пластини. Для розв'язання задачі сформулюємо математичну модель, яка описуватиме кінетику поширення систем воднево-механічних тріщин. На основі вище сказаного, для побудови моделі розглянемо розвиток  $a_i$ -вої тріщини в  $j$ -вій вершині ( $j = 1, 2$ ) (рис. 1).

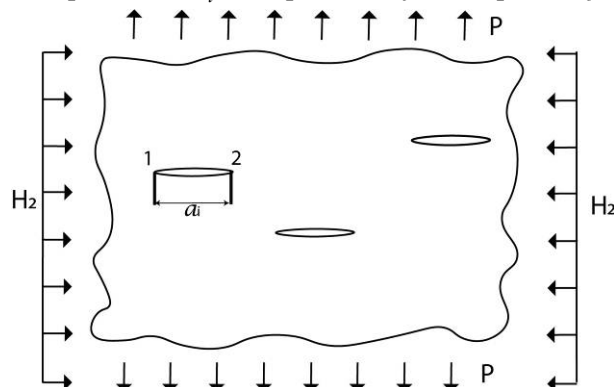


Рис. 1. Схема навантаження пластини з системою воднево-механічних тріщин.

Оскільки водневий чинник найбільше впливає на пластичні характеристики матеріалу, то для дослідження локального руйнування пластини – поширення тріщини застосуємо деформаційний підхід [1]. Раніше на основі даного підходу авторами праці [1] побудовано кінетичне рівняння для визначення швидкості поширення одинарної воднево-механічної тріщини. Беручи за основу побудову даного рівняння нижче сформульовано математичну модель для дослідження систем воднево-механічних тріщин. Враховуючи ефект Горського [1], а також результати експериментальних досліджень [1] впливу водню на деформаційні властивості металів залежність деформації  $\varepsilon_{ij}(p, C_H^{ij})$  металу від параметру навантаження  $p$  і концентрації водню  $C_H^{ij}$  (малі та середні значення) запишемо у вигляді лінійної функції

$$\varepsilon_{ij}(p, C_H) = \varepsilon_{ij_0}(p) + BC_H^{ij}, \quad (1)$$

де  $\varepsilon_{ij_0}(p)$  – деформація металу, викликана зовнішнім навантаженням;  $B$  – експериментально встановлена константа, яка залежить від типу матеріалу і температури випробувань;  $C_H^{ij}$  – концентрація водню біля  $j$ -вої вершини  $i$ -вої тріщини.

Беручи до уваги співвідношення (1) вважатимемо, що пластини перебуває в умовах дії воденьвмісних середовищ за їх малих і середніх концентрацій  $C_H$ . Для подальшого опису розвитку тріщин необхідно задати умову, яка дасть можливість за розподілом водню в зоні

передруйнування і наявною там пружно-пластичною ситуацією визначити момент елементарного акту локального руйнування. Відомо [13], що напруження і деформації в зоні передруйнування в площині тріщини вздовж лінії, перпендикулярній до її контуру, змінюються. Вони спочатку зростають на певній віддалі від контуру тріщини, де досягають своїх максимумів, а потім спадають. Встановлено [13], що максимальні деформації за розтягу в зоні передруйнування виникають на віддалі рівній розкриттю  $i$ -вої тріщини  $\delta_{ij}$  від її  $j$ -вої вершини, а максимальні нормальні напруження – на віддалі  $2\delta_{ij}$ . З огляду на це, область максимальної концентрації водню зсувається на віддаль  $2\delta_{ij}$  від вершини тріщини. Тоді можна припустити, що локальна нестійкість металу в зоні передруйнування пройде за деякий період часу  $t_*$  на певній віддалі від  $j$ -вої вершини  $i$ -вої тріщини. Враховуючи, що область максимальних концентрацій водню зсувається на віддаль  $2\delta_{ij}$  від вершини тріщини, то локальна нестійкість металу пройде за час  $t_*$  на віддалі

$$x_{ij*} = 2\alpha_{ij}\delta_{ij}. \quad (2)$$

Тут  $\alpha_{ij}$  – характеристика системи метал–середовище, вона визначається із експерименту для кожного конкретного випадку.

Воднево-механічне руйнування матеріалів – одне з видів заповільненого руйнування, за якого відбувається стрибкоподібний рух тріщини. Тобто тріщини поширюються стрибками малих розмірів за відносно великі проміжки часу – періоди підготовки стрибка. Надалі вважатимемо, що  $x_{ij*}$  – довжина елементарного стрибка  $i$ -вої тріщини з  $j$ -вої вершини. Тоді середню швидкість поширення  $i$ -вої тріщини можна подати так:

$$V_{ij} \approx x_{ij*}t_*^{-1}. \quad (3)$$

З урахуванням рівності (2) рівняння (3) запишемо у вигляді

$$V_{ij} = 2\alpha_{ij}\delta_{ij}t_*^{-1}. \quad (4)$$

Для визначення моменту елементарного акту руйнування – стрибка тріщини застосуємо класичний деформаційний критерій міцності, який запишемо у вигляді [1]

$$\varepsilon_{ij}(p) = \varepsilon_c(p, C_H^{ij}). \quad (5)$$

Тут  $\varepsilon_c(p, C_H^{ij})$  – критичне значення деформацій розтягу для металу за дії воденьвмісного середовища.

На основі лінійної залежності (1), рівність (5) можна записати у такому вигляді

$$\varepsilon_{ij}(p) = \varepsilon_{c_1} - B_1 C_H^{ij}(x_{ij*}, t_*), \quad (6)$$

де  $\varepsilon_{c_1}$  – критичне значення деформацій розтягу для металу за відсутності водню;  $B_1$  – константа, яку визначають експериментально;  $C_H^{ij}(x_{ij*}, t_*)$  – концентрація водню, утворена за час  $t_*$  на віддалі  $x_{ij*}$  від вершини тріщини.

Відомо, що між величиною деформації  $\varepsilon_{ij}$  в зоні передруйнування і величиною розкриття тріщини  $\delta_{ij}$  існує пропорційна залежність, то деформацію виразимо через розкриття тріщини в її вершині [1]

$$\varepsilon_{ij} = h^{-1}\delta_{ij}, \quad (7)$$

де  $h$  – коефіцієнт пропорційності.

З урахуванням залежності (7) із співвідношення (6) можна записати наступну рівність

$$1 - \delta_{ij}\delta_C^{-1} = B_2 C_H^{ij}(x_{ij*}, t_*), \quad (8)$$

де  $B_2 = B_1 h \delta_C^{-1}$ ;  $\delta_C$  – критичне значення розкриття тріщини у її вершині.

Отже задача звелася до визначення концентрації водню  $C_H^{ij}(x_{ij*}, t_*)$ , що утворюється за час  $t_*$  на віддалі  $x_{ij*}$  від вершини тріщини. У праці [1] розв'язано задачу дифузії водню в полі механічних напружень у вершині тріщини і отримано вирази для визначення концентрації водню

для малих і великих періодів часу. Застосовуючи метод граничної інтерполяції запропоновано формулу для визначення концентрації водню  $C_H(x, t)$  на всьому діапазоні зміни часу [1]

$$C_H(x, t) = 2C_0 \sqrt{\tau} \exp[2m_H \xi - 0,25 \xi^2 \tau^{-1}] \times \left[ \xi \sqrt{\pi} \exp(m \xi) + 2\sqrt{\tau} \exp(-0,25 \xi^2 \tau^{-1}) \right]^{-1}, \quad (9)$$

де  $\tau = Dt/x_m^2$ ,  $D$  – коефіцієнт дифузії водню,  $t$  – час,  $x_m = 2\delta$  – абсциса точки максимуму механічних напружень;  $\xi = x/x_m$ ,  $x$  – координата, напрямлена від вершини тріщини в глибину тріщини;  $m_H = V_H(\sigma_m - \sigma_0)/(2RT_0)$ ,  $R$  – універсальна газова стала,  $T_0$  – абсолютна температура,  $V_H$  – парціальний молярний об'єм водню в металі,  $\sigma_m = 2,4\sigma_T$ ,  $\sigma_0 = \sigma_T/\sqrt{3}$ ,  $\sigma_T$  – границя текучості матеріалу;  $C_0$  – концентрація водню на поверхні вершини тріщини.

Підставимо у співвідношення (8) залежності (9) і (4). Після необхідних математичних перетворень отримаємо рівняння для визначення швидкості поширення  $i$ -вої воднево-механічної тріщини

$$\frac{\alpha_{ij} \delta_{ij} V_{ij}}{D} \exp\left(\frac{\alpha_{ij} \delta_{ij} \pi V_{ij}}{D}\right) = \frac{2}{\pi(1 - \delta_{ij} \delta_C^{-1})^2} \exp(-2\alpha_{ij} m_H) \times \left[ B_2 C_0^{ij} \exp(2\alpha_{ij} m_H) - 1 + \delta_{ij} \delta_C^{-1} \right]^2. \quad (10)$$

Рівняння (10) відносно швидкості росту тріщини  $V_{ij} = \frac{da_{ij}}{dt}$  можна розв'язати тільки чисельно або аналітично для кожного конкретного значення параметрів  $\alpha_{ij}, B_2, C_0^{ij}, m_H, D$ . Однак щоб побудувати математичну модель для оцінювання залишкової довговічності пластин з системами тріщин необхідно мати аналітичне рівняння для опису росту тріщин. Тому рівняння (10) дещо спростимо. Якщо  $\frac{\alpha_{ij} \delta_{ij} V_{ij}}{D} \ll 1$ , то рівняння (10) можна записати у наступному вигляді

$$V_{ij} = \frac{2D}{\pi \alpha_{ij} \delta_{ij} (1 - \delta_{ij} \delta_C^{-1})^2} \exp(-2\alpha_{ij} m_H) \times \left[ B_2 C_0^{ij} \exp(2\alpha_{ij} m_H) - 1 + \delta_{ij} \delta_C^{-1} \right]^2. \quad (11)$$

Рівняння (11) описує кінетику росту воднево-механічних тріщин. Щоб визначити період їх докритичного росту (залишковий ресурс елемента конструкцій) необхідно до рівняння (11) додати відповідні початкові і кінцеві умови процесу поширення тріщин. Початкова умова процесу локального руйнування така: в початковий момент часу (момент часу від якого починаємо розраховувати залишкову довговічність елемента конструкції) тріщина має початковий розмір, а кінцева умова – час досягання тріщини свого граничного розміру визначатиме залишкову довговічність елемента конструкції. Таким чином, до рівняння (11) додаємо наступні умови

$$t = 0, \quad l_{ij}(0) = l_{ij0}; \quad t = t_*, \quad l_{ij}(t_*) = l_{ij*}, \quad \delta_{ij}(l_{ij*}) = \delta_c, \quad t_* = \min(t_{ij}), \quad (12)$$

де  $l_{ij*}$  – критичний розмір  $i$ -ої тріщини;  $t_{ij}$  – час можливого критичного старту  $i$ -вої тріщини.

Таким чином, за відомими характеристиками матеріалу період докритичного росту воднево-механічних тріщин визначається на підставі співвідношень (11), (12).

Далі, застосуємо математичну модель (11), (12) до розв'язання задач про визначення залишкової довговічності пластин, послаблених різними типами систем тріщин, за їхнього довготривалого статичного розтягу в умовах воденьвмісного середовища.

**Визначення залишкової довговічності пластини з періодичною системою воднево-механічних тріщин.** Нехай нескінченна пластинка з системою періодичних прямолінійних тріщин початкової довжини  $2l_0$ , розміщених вздовж однієї лінії піддається розтягу у нескінченно віддалених точках рівномірно розподіленим зусиллям інтенсивності  $p$  (рис. 2). Водночас пластинка перебуває під дією воденьвмісного середовища. За дії середовища і силового чинника

тріщини в пластині розвиватимуться як воднево-механічні тріщини. Задача полягає у визначенні часу  $t = t_*$ , за який в результаті дії навантаження і середовища тріщини підростуть до критичного розміру  $l = l_*$  і пластина зруйнується. Вважаємо, що тріщини однакового розміру  $l$ , перебувають в однакових умовах дії напружено-деформованого стану і дії водню, а зовнішні навантаження розтягу  $p$  прикладені так, що напружено-деформований стан у пластині симетричний відносно ліній розміщення тріщин. Якщо напружено-деформований стан симетричний відносно ліній розміщення тріщин, то рівняння (11) набуде такого вигляду

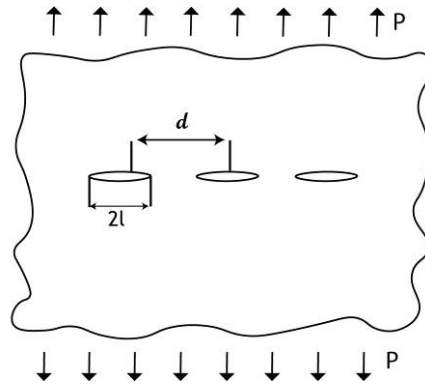


Рис. 2. Схема навантаження пластини з періодичною системою тріщин.

$$V = \frac{2D}{\pi\alpha\delta(1 - \delta_t\delta_c^{-1})^2} \exp(-2\alpha m_H) \times [B_2 C_0 \exp(2\alpha m_H) - 1 + \delta_t\delta_c^{-1}]^2. \quad (13)$$

Відповідно умови (13) запишемо так

$$t = 0, \quad l(0) = l_0; \quad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*, \quad \delta(t_*) = \delta_c. \quad (14)$$

Застосуємо математичні співвідношення (13), (14) для конкретної пластини, яка виготовлена зі сталі 4147. У праці [1] для сталі 4147 на основі експериментальних даних і теоретичних результатів швидкості росту одинарної воднево-механічної тріщини визначено її характеристики, що входять в рівняння (14). Вони приймають такі значення

$$\delta_c = 0,89 \cdot 10^{-4} \text{ м}; \quad m_H = 0,6528; \quad D = 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}. \quad (15)$$

Величина  $C_0$  дорівнює концентрації водню за тиску 21 МПа. Величини  $\alpha$  і  $A_2$  визначені на основі експериментальних даних, наведених у праці [1], застосовуючи метод найменших квадратів і рівняння (13). Підставляючи значення характеристик матеріалу (15) в рівняння (13) отримаємо

$$\frac{dl}{dt} = \frac{7,141 \cdot 10^{-7}}{\delta_t \cdot \left(1 - \frac{\delta_t}{\delta_c}\right)^2} \cdot \left(\frac{\delta_t}{\delta_c} - 0,043\right)^2. \quad (16)$$

Деформаційний параметр розкриття тріщини  $\delta_t$ , що входить в рівняння (16) визначатимемо на основі результатів праць [14] у такому вигляді

$$\delta_t = \frac{K_I^2}{\sigma_t E (1 - \lambda^2)}, \quad \lambda = \frac{p}{\sigma_t}, \quad (17)$$

де  $K_I$  – коефіцієнт інтенсивності напружень в вершині тріщини;  $p$  – інтенсивність рівномірно розподілених довготривалих статичних зусиль, що діють на пластину;  $E$  – модуль пружності;  $\sigma_t$  – усереднені напруження в зоні передруйнування.

Підставимо співвідношення (17) в рівняння (16)

$$\frac{dl}{dt} = \frac{7,141 \cdot 10^{-7} \delta_c \sigma_t E (1 - \lambda^2)}{K_I^2 \cdot \left(1 - \frac{K_I^2}{\sigma_t E \delta_c (1 - \lambda^2)}\right)^2} \cdot \left(\frac{K_I^2}{\sigma_t E \delta_c (1 - \lambda^2)} - 0,043\right)^2. \quad (18)$$



Для випадку періодичної системи тріщин в пластині коефіцієнт інтенсивності напружень визначають зі співвідношення [15]

$$K_I = p\sqrt{dtg(\pi l/d)}. \quad (19)$$

З урахуванням рівності (19) рівняння (20) набуде вигляду

$$\frac{dl}{dt} = \frac{7,141 \cdot 10^{-7} \delta_c \sigma_i E (1 - \lambda^2)}{p^2 dtg(\pi l/d) \cdot \left(1 - \frac{p^2 dtg(\pi l/d)}{\sigma_i E \delta_c (1 - \lambda^2)}\right)^2} \cdot \left(\frac{p^2 dtg(\pi l/d)}{\sigma_i E \delta_c (1 - \lambda^2)} - 0,043\right)^2 \quad (20)$$

за початкової і кінцевої умов

$$t = 0, \quad l(0) = l_0; \quad t = t_*, \quad l(t_*) = l_*, \quad \delta_{ij}(l_{ij*}) = \delta_c. \quad (21)$$

Для даного випадку критичний розмір тріщини  $l_*$  визначаємо з критерію критичного розкриття тріщини [1]

$$\delta_i(l_*) = \delta_c. \quad (22)$$

Інтегруючи рівняння (20) за початкової і кінцевої умов (21), отримаємо співвідношення для визначення залишкової довговічності  $t = t_*$  пластини з періодичною системою тріщин за дії довготривалого статичного розтягу і воденьвмісного середовища

$$t_* = \int_{l_0}^{l_*} p^2 dtg(\pi l/d) \cdot \left(1 - \frac{p^2 dtg(\pi l/d)}{\sigma_i E \delta_c (1 - p^2 \sigma_i^{-2})}\right)^2 \times \\ \times 1,4 \cdot 10^6 \delta_c^{-1} \sigma_i^{-1} E^{-1} (1 - p^2 \sigma_i^{-2})^{-1} \cdot \left(\frac{p^2 dtg(\pi l/d)}{\sigma_i E \delta_c (1 - p^2 \sigma_i^{-2})} - 0,043\right)^{-2} dl. \quad (23)$$

Реалізацію математичної задачі (23) проведемо для пластини зі сталі 4147 з такими характеристиками матеріалу і геометричними параметрами:  $\sigma_i = 996$  МПа,  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа,  $d = 0,1$  м.

З рівності (22) з урахуванням співвідношень (17), (19) визначали критичну довжину тріщини. На рис. 3 за співвідношенням (23) побудовано залежність залишкової довговічності пластини зі сталі 4147 із періодичною системою тріщин від зміни навантаження  $p$  (рис. 3а) і початкового розміру тріщини (рис. 3б, крива 1,  $p = 100$  МПа,  $l_* = 0,048$  м). Для проведення якісного аналізу впливу систем тріщин на довговічність пластини на рис. 3б (крива 2) побудовано криву довговічності пластини з одною тріщиною.

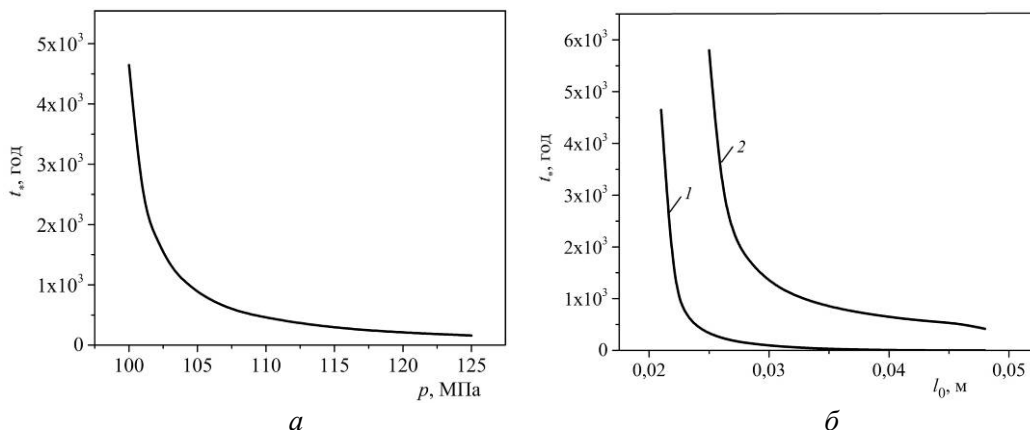


Рис. 3. Залежність залишкової довговічності пластини від зміни параметра навантаження (а) і початкового розміру тріщин (б).

Аналізуючи криві на рис. 3б бачимо, що довговічність пластини з періодичною системою тріщин менша (більше ніж на порядок) ніж довговічність пластини з однією тріщиною. В цілому незначне збільшення параметра навантаження  $p$  і початкового розміру тріщини  $l_0$  призводять до

зменшення залишкової довговічності пластини, яка піддана довготривалому статичному розтягу в умовах воденьвмісного середовища.

**Оцінка залишкової довговічності пластини, послабленої двоякоперіодичною системою воднево-механічних тріщин.** Розглядається нескінченна пластина з системою двоякоперіодичних прямолінійних тріщин початкової довжини  $2l_0$ , центри яких розміщені у вузлах квадратної решітки із стороною  $d$  (рис. 4). Пластина на безмежності піддається дії довготривалого статичного навантаження. Вважається, що навантаження прикладені перпендикулярно до лінії розміщення тріщини, тобто в пластині виникає симетричний відносно лінії розміщення тріщин напружено-деформований стан. Водночас, пластина перебуває в умовах дії воденьвмісного середовища. За заданих умов навантаження і середовища тріщини в пластині розвиватимуться і зрештою досягнуть граничних розмірів, що призведе до її руйнування. Задача полягає у визначенні часу  $t = t_*$ , за який тріщини в умовах заданого навантаження досягнуть свого критичного розміру  $l = l_*$ . Цей час визначатиме залишкову довговічність пластини.

З урахуванням того, що напружено-деформований стан в пластині симетричний відносно лінії розміщення тріщин для розв'язання задачі застосуємо вище наведене рівняння (13). Приймаємо, що пластина виготовлена зі сталі 4147. Тоді розв'язок поставленої задачі зводиться до розв'язання математичних співвідношень (16), (21). Інтегруючи рівняння (16) за умов (21) отримаємо співвідношення для визначення залишкової довговічності пластини з системою двоякоперіодичних тріщин за дії воденьвмісного середовища і довготривалого статичного розтягу

$$t_* = 1,4 \cdot 10^6 \int_{l_0}^{l_*} \delta_t(l) \delta_c^{-1} \left(1 - \frac{\delta_t(l)}{\delta_c}\right)^2 \cdot \left(\frac{\delta_t(l)}{\delta_c} - 0,043\right)^{-2} dl. \quad (24)$$

Тут параметр розкриття тріщини визначаємо зі співвідношення (17), а коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_I(l)$  для випадку двоякоперіодичної системи тріщин у пластині на основі праці [15]

$$K_I(l) = p\sqrt{\pi l} \left(1 + \frac{3\pi\lambda_1^2}{8\sqrt{3}} - 0,0337\pi^2\lambda_1^4 + 0,0583\pi^3\lambda_1^6\right) + O(\lambda_1^8), \quad \lambda_1 = 2ld^{-1}. \quad (25)$$

Значення критичного розміру тріщини  $l_*$  визначали із критерію (22). Для навантаження  $p = 200$  МПа величина  $l_* = 0,0148$  м.

За співвідношенням (24) з урахуванням (17) і (25) на рис. 5 (крива 1) побудовано залежність залишкової довговічності пластини з двоякоперіодичною системою воднево-механічних тріщин від початкового розміру тріщини. Встановлено, що наявність двоякоперіодичної системи тріщин зменшує довговічність пластини порівняно із однією тріщиною (крива 2).

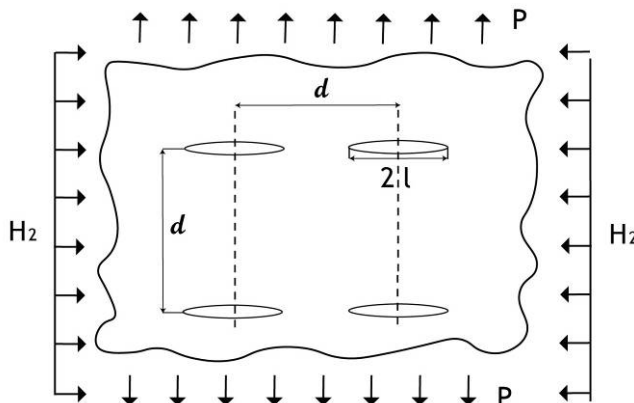


Рис. 4. Схема навантаження пластини з двоякоперіодичною системою тріщин.

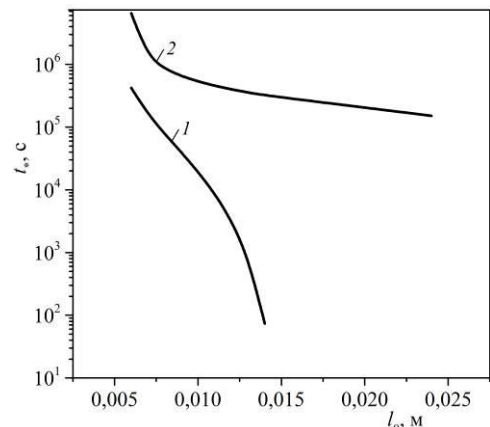


Рис. 5. Залежність залишкової довговічності пластини від початкового розміру тріщини.

**Оцінка залишкової довговічності пластини, послабленої періодичною системою паралельних воднево-механічних тріщин.** Розглядається нескінченна пластина з періодичною системою паралельних прямолінійних тріщин однакової початкової довжини (рис. 6), які

знаходяться на віддалі  $d$  одна від одної. Пластина знаходиться під дією розтягу на безмежності зусиллями  $p$ , напрямленими перпендикулярно до лінії розміщення тріщин. Окрім дії силового чинника, пластина контактує із воденьвмісним середовищем, яке попадає в тріщини. Сумісна дія воденьвмісного середовища і довготривалого статичного навантаження призведе до поширення системи тріщин. Розвиток останніх до їх критичного розміру може призвести до непередбачуваного руйнування пластини. Задача полягає у визначенні часу  $t = t_*$ , за який тріщини підростуть до критичного розміру і пройде руйнування пластини (пластина не зможе уже виконувати свої функціональні можливості).

Приймаємо, що пластина виготовлена зі сталі 4147. Тоді реалізацію поставленої задачі проведемо аналогічно до попереднього випадку на основі математичної моделі (16), (21). Для визначення параметра розкриття тріщини (17) в рівнянні (16) необхідно знати коефіцієнт інтенсивності напружень для періодичної системи паралельних тріщин однакової довжини. У праці [15] для даного випадку наведено співвідношення для визначення коефіцієнта інтенсивності напружень, яке справедливе для малих і великих відстанях між тріщинами

$$K_I = p \sqrt{\frac{l}{\lambda_2} \operatorname{th}(\pi\lambda_2)} \cdot \left( 1 + \frac{\pi^2 \lambda_2^2}{24 \operatorname{ch}(\pi\lambda_2)} - \frac{\pi^4 \lambda_2^4}{640 \operatorname{ch}(\pi\lambda_2)} \right), \quad \lambda_2 = 2ld^{-1}. \quad (26)$$

Розв'язавши математичну задачу (16), (21), отримаємо співвідношення для визначення залишкової довговічності пластини з періодичною системою прямолінійних воднево-механічних тріщин

$$\begin{aligned} t_* = & \frac{1,4 \cdot 10^6 p^2 \delta_C^{-1}}{\sigma_t E (1 - p^2 \sigma_t^{-2})} \int_{l_0}^l \frac{l \cdot \operatorname{th}(\pi\lambda_2)}{\lambda_2} \cdot \left( 1 + \frac{\pi^2 \lambda_2^2}{24 \operatorname{ch}(\pi\lambda_2)} - \frac{\pi^4 \lambda_2^4}{640 \operatorname{ch}(\pi\lambda_2)} \right)^2 \times \\ & \times \left( 1 - \frac{p^2 l \lambda_2^{-1} \operatorname{th}(\pi\lambda_2) \delta_C^{-1}}{\sigma_t E (1 - p^2 \sigma_t^{-2})} \cdot \left( 1 + \frac{\pi^2 \lambda_2^2}{24 \operatorname{ch}(\pi\lambda_2)} - \frac{\pi^4 \lambda_2^4}{640 \operatorname{ch}(\pi\lambda_2)} \right)^2 \right)^2 \times \\ & \times \left( \frac{p^2 l \lambda_2^{-1} \operatorname{th}(\pi\lambda_2) \delta_C^{-1}}{\sigma_t E (1 - p^2 \sigma_t^{-2})} \cdot \left( 1 + \frac{\pi^2 \lambda_2^2}{24 \operatorname{ch}(\pi\lambda_2)} - \frac{\pi^4 \lambda_2^4}{640 \operatorname{ch}(\pi\lambda_2)} \right)^2 - 0,043 \right)^{-2} dl. \end{aligned} \quad (27)$$

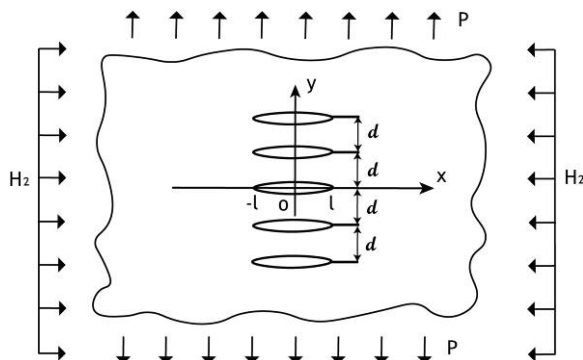


Рис. 6.

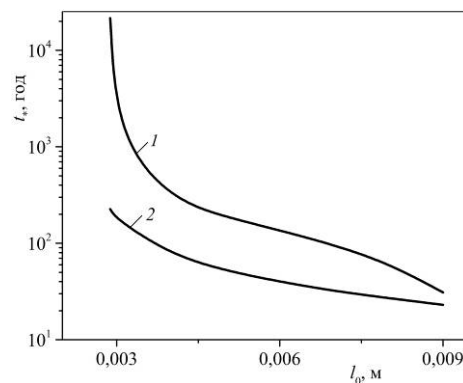


Рис. 7.

Рис. 6. Схема навантаження пластини з періодичною системою паралельних тріщин.

Рис. 7. Залежність залишкової довговічності пластини від початкового розміру тріщини: крива 1 – періодична система паралельних тріщин; крива 2 – одна наскрізна тріщина.

Чисельну апробацію співвідношення (27) проведено для конкретної пластини зі сталі 4147, механічні характеристики якої наведено вище. На рис. 7 побудовано залежності залишкової довговічності пластини з періодичною системою паралельних тріщин (крива 1) і однією тріщиною (крива 2) від початкового розміру дефекту. При цьому  $d = 0,25$  м. Показано, що залишкова довговічність пластини з системою тріщин є більша ніж пластини з однією тріщиною.

**Висновки**

Застосовуючи раніше розроблений авторами деформаційних підхід побудовано математичну модель для дослідження кінетики розвитку систем воднево-механічних тріщин у пластинах за їх довготривалого розтягу. На основі сформульованої моделі визначено залишкову довговічність пластини зі сталі 4147 з системою періодичних тріщин, двоякоперіодичною системою та періодичною системою паралельних тріщин. Встановлено, що періодична і двоякоперіодична системи тріщин у пластині призводить до зменшення її залишкової довговічності порівняно із наявністю однієї тріщини. Водночас періодична система паралельних тріщин призводить до збільшення довговічності пластини порівняно із наявністю однієї тріщини.

**Список використаних джерел**

1. Андрейків О.Є., Гембара О.В. Механіка руйнування та довговічність металевих матеріалів у водневмісних середовищах. Київ: Наукова думка, 2008. 344 с.
2. Shuang Liang, Minsheng Huang, Lv Zhao, Yaxin Zhu, Zhenhuan Li. Effect of multiple hydrogen embrittlement mechanisms on crack propagation behavior of FCC metals: Competition vs. synergy. *International Journal of Plasticity*. 2021. Vol. 143. 103023.
3. Alexander Balitskii. Hydrogen assisted crack initiation and propagation in nickel-cobalt heat resistant superalloys. *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 16. P. 134–140.
4. Alla V. Balueva, Iliya N. Dashevskiy, Jerry Magana. A New Model for Hydrogen-Induced Crack (HIC) Growth in Metal Alloy Pipelines Under Extreme Pressure. *Procedia Structural Integrity*. 2020. Vol. 28. P. 873–885.
5. Panasyuk V.V., Andreykiv O.Y., Gembara O.V. Hydrogen degradation of materials under long-term operation of technological equipment. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2000. 25(1). P. 67–74.
6. Ronevich J.A., Somerday B.P., Feng Z. Hydrogen accelerated fatigue crack growth of friction stir welded X52 steel pipe. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. 42(7). P. 4259–4268.
7. Dmytrakh I.M., Leshchak R.L., Syrotyuk A.M., Barna R.A. Effect of hydrogen concentration on fatigue crack growth behaviour in pipeline steel. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. 42(9). P. 6401–6408.
8. Dmytrakh I.M., Smiyan O.D., Syrotyuk A.M., Bilyy O.L. Relationship between fatigue crack growth behaviour and local hydrogen concentration near crack tip in pipeline steel. *International Journal of Fatigue*. 2013. 50. P. 26–32.
9. Briottet L., Moro I., Escot M., Furtado J., Bortot P., Tamponi G.M., Solin J., Odemer G., Blanc C., Andrieu E. Fatigue crack initiation and growth in a CrMo steel under hydrogen pressure. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. 40(47). P. 17021–17030.
10. Toribio J., Kharin V. A hydrogen diffusion model for applications in fusion nuclear technology. *Fusion Engineering and Design*. 2000. 51– 52. P. 213–218.
11. Balueva Alla Modeling of Hydrogen Embrittlement Cracking in Pipe-lines under High Pressures. *Procedia Materials Science*. 2014. Vol. 3. P. 1310–1315.
12. Jorge Palma Carrasco, Diego David Silva Diniz, José Maria Andrade Barbosa, Antonio Almeida Silva, Marco Antonio dos Santos. Numerical simulation of the hydrogen trapping effect on crack propagation in API 5CT P110 steel under cathodic overprotection. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019. Vol. 44, Is. 5. P. 3230–3239.
13. McMeeking R. M. Finite deformation analysis of crack tip opening in elastic-plastic materials and implications for fracture. *Journal of the Mechanics and Physics Solids*. 1977. 25(5). P. 357–381.
14. Yadzhak N. Generalization of the equivalent area method for the case of short fatigue cracks in a three-dimensional body. *Visnyk of the Lviv University. Series Mechanics and Mathematics*. 2020. № 89. С. 134–141.
15. Саврук М. П. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами. К.: Наук. думка, 1988. 620 с.

**Рецензент:** Гембара Оксана Володимирівна, доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України

УДК 539.3

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.40

**А.В. Подворний, В.М. Трач***Національний університет водного господарства та природокористування***ВПЛИВ ШАРУВАТОСТІ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН АНІЗОТРОПНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ОБОЛОНОК ПІД ОСЬОВИМ ТИСКОМ В ПРОСТОРОВІЙ ПОСТАНОВЦІ**

*Приведений підхід до отримання тривимірної системи диференціальних рівнянь рівноваги теорії пружності для анізотропної шаруватої циліндричної оболонки на основі модифікованого варіаційного принципу Ху-Васідзу. Розв'язок системи, у випадку осьового тиску, проводиться з використанням чисельних методів: прямих в осьовому напрямку та дискретної ортогоналізації в радіальному. Проаналізовано характер розподілу компонентів напружено-деформованого стану залежно від кількості перехресно-армованих шарів.*

*Ключові слова: просторова постановка, анізотропна оболонка, напружено-деформований стан, осьовий тиск.*

**A.V. Podvorni, V.M. Trach****INFLUENCE OF LAYERING ON THE STRESS-STRAIN STATE OF ANISOTROPIC CYLINDRICAL SHELLS UNDER AXIAL PRESSURE IN A SPATIAL FORMATION**

*An approach to obtaining a non-homogeneous three-dimensional system of differential equations of equilibrium in the theory of elasticity in partial derivatives for an anisotropic layered cylindrical shell is presented. The anisotropy of the material is associated with the deviation of the main directions of elasticity of the fibrous material from the axes of its own curvilinear coordinate system of the shell and thus the formation of a single plane of elastic symmetry of the mechanical characteristics parallel to the middle surface of the cylinder. To reduce the dimension of the system in the case of axisymmetric deformation under axial compression, the method of straight lines is used. The obtained one-dimensional system of high order is solved in the radial direction by the numerical method of discrete orthogonalization.*

*The deformation of an anisotropic layered non-thin cylindrical shell in a spatial formulation under the action of axial compression is considered. Graphical dependences of the components of the stress-strain state on the number of cross-reinforced layers of the same thickness are presented.*

*Key words: spatial formulation, anisotropic shell, stress-strain state, axial compression.*

**Постановка проблеми.** Нетонкі циліндричні оболонки з композитних матеріалів знайшли широке застосування в різноманітних елементах авіа-, машинобудування та в конструкціях трубопроводів. Відповідно до цього розв'язок задачі про напружено-деформований стан (НДС) таких конструктивних елементів є важливою складовою визначення їх режимів експлуатації та прогнозування ресурсу. Одним із способів виготовлення композитних оболонкових конструкцій є намотування волокнистого матеріалу на оправки. При цьому має місце розбіжність між головними напрямками пружності отриманого волокнистого композиту та власною криволінійною системою координат оболонки (рис. 1) і матеріал конструкції отримує одну площину пружної симетрії механічних характеристик паралельну серединній поверхні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Детальні дослідження таких анізотропних тонких та середньої товщини оболонок проведені в роботах [1, 2, 3] в рамках двовимірних теорій. Однак аналіз несучої здатності нетонких оболонкових конструкцій вимагає застосування більш точних теорій. Однією з таких є тривимірна теорія пружності, що дозволяє враховувати низьку зсувну жорсткість та обтиснення матеріалу оболонки за товщиною під навантаженням.

В роботах присвячених дослідженню НДС оболонкових конструкцій в просторовій постановці основна увага зосереджена на ізотропних та ортотропних матеріалах і лише одиничні дослідження [4, 5] проведено для одноплосинного виду анізотропії і то, лише для окремих випадків умов на торцях. Складність розв'язку такої задачі полягає у взаємозв'язку між деформаціями розтягу (стиску), зсуву, згину та кручення, що вимагає використання додаткових математичних методів.

В приведеній роботі для отримання тривимірної системи рівнянь рівноваги теорії пружності використаний модифікований варіаційний принцип Ху-Васідзу. Розв'язок отриманої системи, у випадку осьового стиску циліндричної оболонки, проведемо поєднавши в єдиному обчислювальному процесі чисельні методи прямих в осьовому напрямку та дискретної ортогоналізації в радіальному.

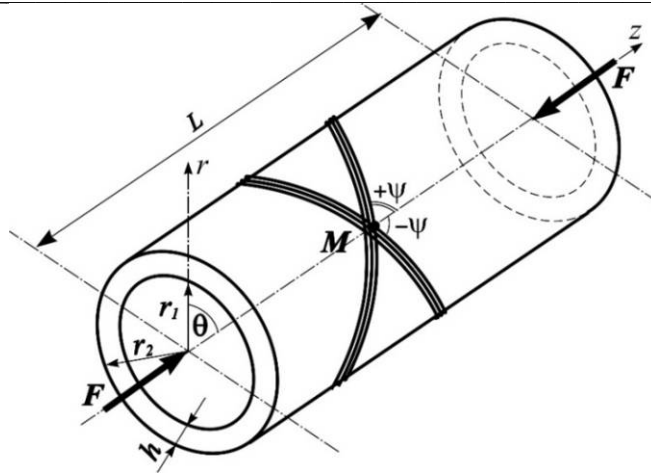


Рис. 1. Циліндрична нетонка анізотропна оболонка під дією осевого тиску

**Постановка задачі та методика розв’язку.** Відповідно до варіаційного принципу Ху-Васидзу [6] рівняння рівноваги, співвідношення пружності, геометричні залежності та відповідні граничні умови можливо отримати з умови стаціонарності функціоналу  $\Pi_1$ , що визначається з інтегралу:

$$\begin{aligned} \Pi_1 = & \left\{ \iiint_V \left[ W(e_{ij}) - T(u_i) + \Phi(u_i) - \sigma_{ij} \left[ e_{ij} - \frac{1}{2} (u_{i;j} + u_{j;i}) \right] \right] dV + \right. \\ & \left. + \iint_{S_1} \Psi(u_i) dS - \iint_{S_2} p_i (u_i - \bar{u}_i) dS \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

В (1) варіюються без додаткових умов переміщення  $u_i$ , деформації  $e_{ij}$ , напруження  $\sigma_{ij}$ , напруження  $p_i$  на поверхні  $S_2$ , що викликані переміщеннями  $\bar{u}_i$ . Також в цьому функціоналі  $W(e_{ij})$  – потенціальна енергія деформації,  $T(u_i)$  – кінетична енергія,  $\Phi(u_i)$ ,  $\Psi(u_i)$  – потенціали об’ємних і поверхневих навантажень,  $u_i$  – компоненти вектора переміщень, крапка з комою перед параметрами  $i, j$  означає коваріантну похідну за координатою з відповідним індексом  $i, j, k = 1, 2, 3$ .

Відповідно до підходу описаного в [7] з умови варіації функціоналу (1) здобудемо неоднорідну тривимірну система з шести диференціальних рівнянь рівноваги лінійної теорії пружності для анізотропних циліндричних оболонок.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}^i}{\partial r} = & -\frac{c_{23}^i + 1}{r} \sigma_{rr}^i - \frac{\partial \tau_{rz}^i}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}^i}{\partial \theta} + \frac{c_{22}^i}{r^2} u_r^i + \frac{c_{12}^i}{r} \frac{\partial u_z^i}{\partial z} + \frac{c_{26}^i}{r^2} \frac{\partial u_z^i}{\partial \theta} + \\ & + \frac{c_{26}^i}{r} \frac{\partial u_\theta^i}{\partial z} + \frac{c_{22}^i}{r^2} \frac{\partial u_\theta^i}{\partial \theta} + q_r; \\ \frac{\partial \tau_{rz}^i}{\partial r} = & c_{13}^i \frac{\partial \sigma_{rr}^i}{\partial z} - \frac{1}{r} \tau_{rz}^i - \frac{c_{12}^i}{r} \frac{\partial u_r^i}{\partial z} - c_{11}^i \frac{\partial^2 u_z^i}{\partial z^2} - \frac{c_{66}^i}{r^2} \frac{\partial^2 u_z^i}{\partial \theta^2} - \frac{c_{12}^i + c_{66}^i}{r} \frac{\partial^2 u_\theta^i}{\partial z \partial \theta} + \\ & + \frac{c_{36}^i}{r} \frac{\partial \sigma_{rr}^i}{\partial \theta} - \frac{c_{26}^i}{r^2} \frac{\partial u_r^i}{\partial \theta} - \frac{2c_{16}^i}{r} \frac{\partial^2 u_z^i}{\partial z \partial \theta} - c_{16}^i \frac{\partial^2 u_\theta^i}{\partial z^2} - \frac{c_{26}^i}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta^i}{\partial \theta^2} + q_z; \\ \frac{\partial \tau_{r\theta}^i}{\partial r} = & \frac{c_{23}^i}{r} \frac{\partial \sigma_{rr}^i}{\partial \theta} - \frac{2}{r} \tau_{r\theta}^i - \frac{c_{22}^i}{r^2} \frac{\partial u_r^i}{\partial \theta} - \frac{c_{12}^i + c_{66}^i}{r} \frac{\partial^2 u_z^i}{\partial z \partial \theta} - c_{66}^i \frac{\partial^2 u_\theta^i}{\partial z^2} - \frac{c_{22}^i}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta^i}{\partial \theta^2} + \\ & + c_{36}^i \frac{\partial \sigma_{rr}^i}{\partial z} - \frac{c_{26}^i}{r} \frac{\partial u_r^i}{\partial z} - c_{16}^i \frac{\partial^2 u_z^i}{\partial z^2} - \frac{c_{26}^i}{r^2} \frac{\partial^2 u_z^i}{\partial \theta^2} - \frac{2c_{26}^i}{r} \frac{\partial^2 u_\theta^i}{\partial z \partial \theta} + q_\theta; \\ \frac{\partial u_r^i}{\partial r} = & c_{33}^i \sigma_{rr}^i + \frac{c_{23}^i}{r} u_r^i + c_{13}^i \frac{\partial u_z^i}{\partial z} + \frac{c_{36}^i}{r} \frac{\partial u_z^i}{\partial \theta} + c_{36}^i \frac{\partial u_\theta^i}{\partial z} + \frac{c_{23}^i}{r} \frac{\partial u_\theta^i}{\partial \theta}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial u_z^i}{\partial r} &= a_{55}^i \tau_{rz}^i + a_{45}^i \tau_{r\theta}^i - \frac{\partial u_r^i}{\partial z}; \\ \frac{\partial u_\theta^i}{\partial r} &= a_{45}^i \tau_{rz}^i + a_{44}^i \tau_{r\theta}^i - \frac{1}{r} \frac{\partial u_r^i}{\partial \theta} + \frac{1}{r} u_\theta^i.\end{aligned}\quad (2)$$

В (2)  $r$  – радіус циліндричної оболонки незалежний від координат  $z$  та  $\theta$ ;  $\sigma_{rr}$ ,  $\tau_{rz}$ ,  $\tau_{r\theta}$  – напруження, а  $u_z$ ,  $u_\theta$ ,  $u_r$  – переміщення оболонки за напрямками відповідно осей  $z$ ,  $\theta$ ,  $r$ . Сталі  $c_{kl}^i$  ( $k, l=1, 2, 3, 6$ ) – механічні характеристики матеріалу оболонки [7], що визначаються за допомогою констант  $a_{kl}$  [8],  $i$  – номер шару оболонки.

Система (2) записана в частинних похідних відносно шести компонентів векторів напружень  $\sigma_1^T = (\sigma_{rr}, \tau_{r\theta}, \tau_{rz})$  та переміщень  $u^T = (u_r, u_\theta, u_z)$  і використовується для дослідження напружено-деформованого стану анізотропних нетонких композитних циліндричних оболонок. Для її отримання було використано модифікацію варіаційного принципу Ху-Васідзу, що дозволяє записати відповідні рівнянням (2) граничні умови.

Узагальнений закон Гука для анізотропної оболонкової конструкції запишемо у формі [7]

$$\begin{aligned}\sigma_{zz}^i &= c_{11}^i e_{zz}^i + c_{12}^i e_{\theta\theta}^i + c_{16}^i e_{z\theta}^i - c_{13}^i \sigma_{rr}^i; \\ \sigma_{\theta\theta}^i &= c_{12}^i e_{zz}^i + c_{22}^i e_{\theta\theta}^i + c_{26}^i e_{z\theta}^i - c_{23}^i \sigma_{rr}^i; \\ \tau_{z\theta}^i &= c_{16}^i e_{zz}^i + c_{26}^i e_{\theta\theta}^i + c_{66}^i e_{z\theta}^i - c_{36}^i \sigma_{rr}^i; \\ e_{rr}^i &= c_{13}^i e_{zz}^i + c_{23}^i e_{\theta\theta}^i + c_{36}^i e_{z\theta}^i + c_{33}^i \sigma_{rr}^i; \\ e_{rz}^i &= a_{45}^i \tau_{r\theta}^i + a_{55}^i \tau_{rz}^i; \quad e_{r\theta}^i = a_{44}^i \tau_{r\theta}^i + a_{45}^i \tau_{rz}^i.\end{aligned}\quad (3)$$

В (3)  $e_{zz}$ ,  $e_{\theta\theta}$ ,  $e_{rr}$  – відносні лінійні деформації за напрямками координатних осей  $r$ ,  $\theta$ ,  $z$ , а  $e_{z\theta}$ ,  $e_{rz}$ ,  $e_{r\theta}$  – дотичні відповідним координатним поверхням відносні зсувні деформації

$$\begin{aligned}e_{zz}^i &= \frac{\partial u_z^i}{\partial z}; \quad e_{\theta\theta}^i = \frac{1}{r} u_r^i; \quad e_{rr}^i = \frac{\partial u_r^i}{\partial r}; \\ e_{z\theta}^i &= \frac{\partial u_\theta^i}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_z^i}{\partial \theta}; \quad e_{rz}^i = \frac{\partial u_r^i}{\partial z} + \frac{\partial u_z^i}{\partial r}; \quad e_{r\theta}^i = \frac{\partial u_\theta^i}{\partial r} - \frac{1}{r} u_\theta^i + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r^i}{\partial \theta}.\end{aligned}\quad (4)$$

Розв'язок системи (2), у випадку осьового тиску, повинен відповідати умовам на бічних поверхнях:  
при  $r=r_1$

$$\sigma_{rr}^0(r_1, z, \theta) = 0; \quad \tau_{rz}^0(r_1, z, \theta) = 0; \quad \tau_{r\theta}^0(r_1, z, \theta) = 0$$

і при  $r=r_2$

$$\sigma_{rr}^n(r_2, z, \theta) = 0; \quad \tau_{rz}^n(r_2, z, \theta) = 0; \quad \tau_{r\theta}^n(r_2, z, \theta) = 0.\quad (5)$$

На торцях при  $z=0, z=L$  (рис. 1), прийемо наступні умови:

$$\sigma_{zz}^i = \sigma_{zz}^l, \quad u_r^i = u_\theta^i = 0.\quad (6)$$

Тут  $\sigma_{zz}^l$  – рівномірно розподілене на торцях оболонки нормальне напруження, що відповідає прикладеному стискаючому осьовому навантаженню.

Також необхідне забезпечення умов жорсткого контакту шарів для напружень та переміщень:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr}^i(r_i) &= \sigma_{rr}^{i+1}(r_i); \quad \tau_{rz}^i(r_i) = \tau_{rz}^{i+1}(r_i); \quad \tau_{r\theta}^i(r_i) = \tau_{r\theta}^{i+1}(r_i); \\ u_r^i(r_i) &= u_r^{i+1}(r_i); \quad u_z^i(r_i) = u_z^{i+1}(r_i); \quad u_\theta^i(r_i) = u_\theta^{i+1}(r_i),\end{aligned}\quad (7)$$

де  $i$  – номер шару оболонки.

**Методика розв'язку задачі.** При розв'язку задачі напружено-деформованого стану циліндричних оболонок під рівномірно розподіленим по торцях осьовим тиском вважатимемо, що оболонка деформується із збереженням осьової симетрії.

Одним з підходів, що дозволяє зменшити розмірність системи (2) є метод прямих [2, 5]. Враховуючи, що в роботі розглядатимемо лише випадки вісесиметричної деформації, отриману



таким чином двовимірну систему диференціальних рівнянь в частинних похідних на основі (2) приведемо до одновимірної системи звичайних диференціальних рівнянь високого порядку шляхом заміни похідних по координаті  $z$  різницевиими співвідношеннями.

Для цього розбиваємо інтервал зміни похідних по координаті  $z$  на  $n-1$  рівних відрізків за допомогою  $n$  рівновіддалених точок, тобто:

$$\frac{\partial x(r, z_i)}{\partial z} \approx \frac{1}{2(z_{i+1} - z_i)} (x(r, z_{i+1}) - x(r, z_{i-1}));$$

$$\frac{\partial^2 x(r, z_i)}{\partial z^2} \approx \frac{1}{(z_{i+1} - z_i)^2} (x(r, z_{i+1}) - 2x(r, z_i) + x(r, z_{i-1})). \quad (8)$$

Тут  $x$  – компоненти НДС (2);  $i=n$  – кількість рівновіддалених точок, якими розбивається оболонка вздовж твірної.

Таким чином, розв'язок поставленої задачі про НДС нетонкого циліндра зводиться до пошуку невідомих  $\sigma_{rr}, \tau_{rz}, \tau_{r\theta}, u_r, u_z, u_\theta$  у кожній  $i$ -й точці. А залежності (2) перетворюються в одновимірну систему порядку  $6n$  звичайних диференціальних рівнянь відносно похідної по координаті  $r$ , що в скороченому записі має вигляд

$$\frac{d\bar{y}}{dr} = T(r)\bar{y}, \quad (9)$$

де прийнято  $\bar{y} = \{ \sigma_{rr}^1; \tau_{rz}^1; \tau_{r\theta}^1; u_r^1; u_z^1; u_\theta^1; \dots; \sigma_{rr}^{n-1}; \tau_{rz}^{n-1}; \tau_{r\theta}^{n-1}; u_r^{n-1}; u_z^{n-1}; u_\theta^{n-1}; \sigma_{rr}^n; \tau_{rz}^n; \tau_{r\theta}^n; u_r^n; u_z^n; u_\theta^n \}$  з граничними умовами (5);  $T(r)$  – матриця коефіцієнтів при невідомих компонентах напружень та переміщень,  $n$  – кількість рівновіддалених прямих (точок) якими розбивається інтервал зміни похідних за координатою уздовж твірної  $z$  оболонки.

Розв'язок здобутої таким чином одновимірної крайової задачі високого порядку про напружено-деформований стан анізотропної нетонкої циліндричної оболонки під осьовим тиском проводиться при використанні стійкого чисельного методу дискретної ортогоналізації [1, 2, 5].

Компоненти напружень  $\sigma_{zz}, \sigma_{\theta\theta}, \tau_{z\theta}$  відшукаємо використовуючи відповідні залежності узагальненого закону Гука (3).

**Реалізація запропонованої методики дослідження напружено-деформованого стану композитної анізотропної циліндричної оболонки.** Запропонований в представленій роботі підхід до розв'язку задачі НДС анізотропних композитних нетонких оболонок дозволяє визначити всі виникаючі компоненти напружень та деформацій при осьовому тиску. На противагу цьому, існує спрощена ортотропна модель розрахунку таких оболонок, що не враховує механічні характеристики матеріалу  $c_{16}, c_{26}, c_{36}, a_{45}$  узагальненого закону Гука (3) і внаслідок цього не дає можливості визначити напруження  $\tau_{r\theta}, \tau_{z\theta}$  та переміщення  $u_\theta$ . Причому з досліджень [1, 9], що присвячені розрахункам анізотропних оболонок на стійкість та вільні коливання відповідно, на основі двовимірних теорій відомо, що збільшення кількості однакових за товщиною, перехресно-армованих шарів до семи-восьми веде до мінімальної різниці між результатами отриманими з використанням повної форми закону Гука для анізотропної оболонки та визначеними згідно ортотропної моделі. Представляє інтерес перевірити таку закономірність при дослідженні НДС шаруватих анізотропних циліндричних оболонок під осьовим тиском в просторовій постановці і встановити залежність між напруженнями  $\tau_{z\theta}$  та переміщеннями  $u_\theta$  і збільшенням кількості шарів з перехресним армуванням.

В якості прикладу розглянемо задачу дослідження напружено-деформованого стану циліндричної оболонки під дією осьового тиску. Геометричні параметри конструкції (рис. 1) такі: довжина уздовж твірної  $L=1,2$ м; радіуси внутрішньої  $r_1=0,54$ м та зовнішньої поверхонь  $r_2=0,66$ м. В якості матеріалу перехресно-армованих шарів обрано волокнистий композит склопластик з такими механічними характеристиками:  $E_{zz}=44,5E_0, E_{\theta\theta}=E_{rr}=10,7E_0, G_{z\theta}=G_{r\theta}=4,18E_0, G_{rz}=8,48E_0, \nu_{\theta z}=0,26, \nu_{z\theta}=0,0628, E_\theta=1000$ МПа. Кут перехресного армування шарів оболонки складає  $\psi = \pm 50^\circ$  до твірної  $z$  (рис. 1), причому внутрішній шар повернуто на кут  $\psi = +50^\circ$ . Розглянемо характер зміни, в залежності від кількості шарів, лише тих компонентів НДС, які у випадку ортотропної моделі розрахунку анізотропного циліндра при осьовому стиску приймаються рівними нулю, тобто

дотичне напруження  $\tau_{z\theta}$  та переміщення в коловому напрямку  $u_\theta$ . Величини  $\tau_{z\theta}$  визначатимемо для координати  $z=0$  вздовж твірної на зовнішній поверхні циліндра при  $r=0,66\text{м}$ , значення  $u_\theta$  обчислимо для координати  $z=0,25L$  на серединній поверхні оболонки при  $r=0,60\text{м}$ , де ці параметри приймають близькі до максимальних значення. Результати дослідження представлені на рис. 2 (а) для напружень  $\tau_{z\theta}$  при збільшенні непарної кількості шарів, а на рис. 2 (б) для напружень  $\tau_{z\theta}$  при парній кількості. Рис. 3 (а), (б) представляють зміну переміщень  $u_\theta$  в залежності від зростання відповідно непарної та парної кількості шарів з перехресним армуванням.

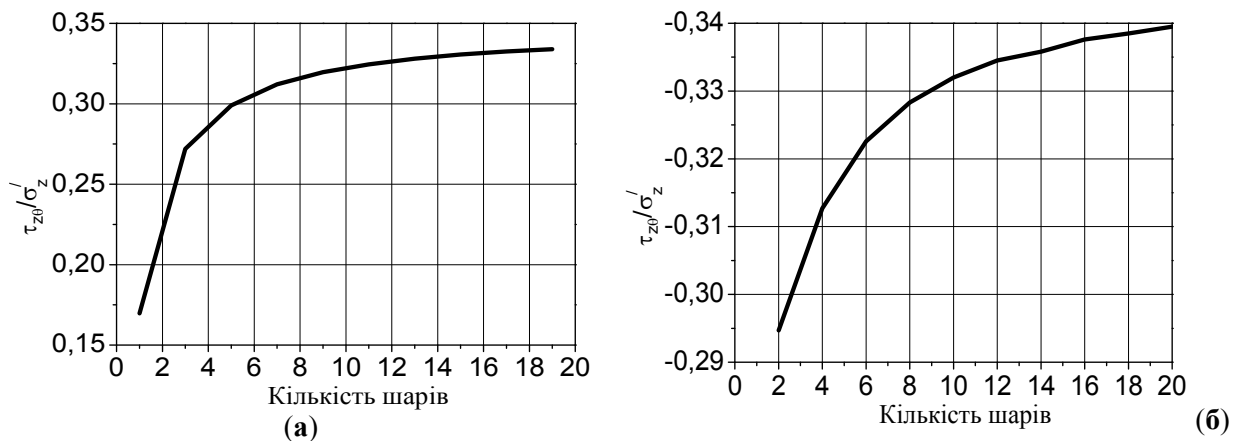


Рис. 2. Зміна величин дотичних напружень  $\tau_{z\theta}$  при збільшенні кількості шарів:

а) непарна кількість шарів; б) парна кількість шарів

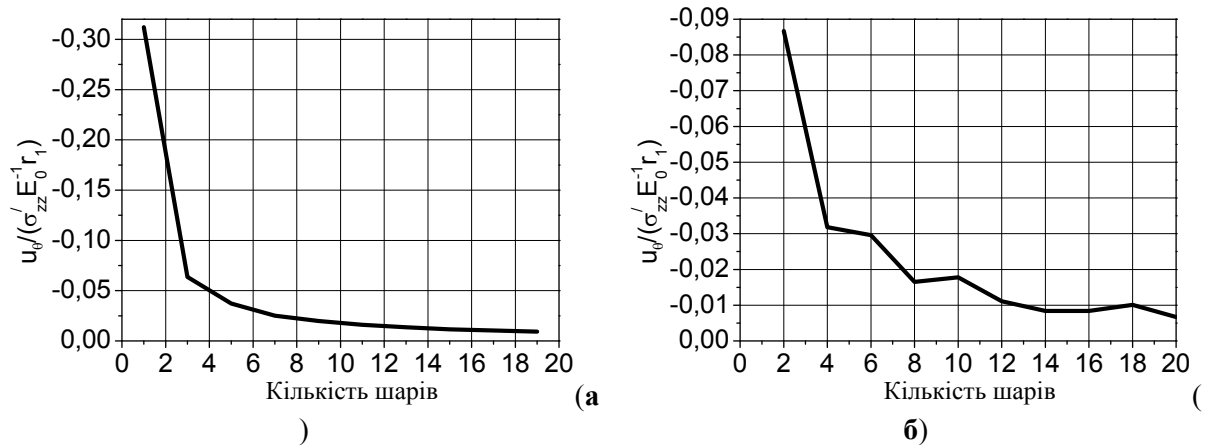


Рис. 3. Зміна величин переміщень  $u_\theta$  при збільшенні кількості шарів:

а) непарна кількість шарів; б) парна кількість шарів

Аналізуючи результати представлені на рис. 2, 3 зробимо такі висновки. Дотичні напруження  $\tau_{z\theta}$  із збільшенням кількості шарів зростають за абсолютними значеннями та усталюються. Так, для непарної кількості шарів (рис. 2 (а)) їх збільшення від одного до дев'ятнадцяти веде до зростання  $\tau_{z\theta}$  на близько 97%, а для парної (рис. 2 (б)) збільшення від двох до двадцяти – на 15%. При цьому найбільше зростання має місце для випадку непарної кількості шарів при їх збільшенні від одного до трьох на 60%, а для парної від двох до чотирьох – на 6%.

В той же час переміщення в коловому напрямку  $u_\theta$  при збільшенні кількості шарів  $\psi = \pm 50^\circ$  зменшують свої величини прямуючи до нуля. Так для пакету утвореного непарною кількістю шарів (рис. 3 (а)) збільшення їх кількості від одного до дев'ятнадцяти веде до зменшення  $u_\theta$  на 97%. Для парної структури (рис. 3 (б)) при двадцяти шарах  $u_\theta$  складає 7,7% від їх величин для двошарового циліндра. Причому найбільше зменшення  $u_\theta$  відбувається для непарного шаруватого пакету при переході від одного шару до трьох на 80%, а для парної структури при

зміні кількості шарів від двох до чотирьох – на 63%.

Таким чином зауважимо, що збільшення кількості перехресно-армованих шарів однакової товщини анізотропної циліндричної оболонки не дозволяє використовувати для її розрахунку спрощений ортотропний підхід. Так дотичні напруження  $\tau_{z\theta}$ , що неможливо визначити згідно ортотропної моделі при збільшенні числа шарів не зникають, а мають місце, як це показує представлений підхід, і впливають на несучу здатність анізотропних циліндричних композитних оболонок.

**Висновки.** В роботі представлено підхід до отримання тривимірної системи рівнянь рівноваги теорії пружності для циліндричних анізотропних шаруватих оболонок на основі модифікованого варіаційного принципу Ху-Васідзу. Запропоновано підхід до зменшення розмірності такої системи у випадку осьового тиску на основі врахування того, що деформування під навантаженням відбувається з урахуванням осьової симетрії оболонки та при використанні методу прямих уздовж твірної. Отримана нормальна одновимірна система високого порядку звичайних диференціальних рівнянь розв'язується в радіальному напрямку стійким чисельним методом дискретної ортогоналізації.

Представлений розв'язок задачі про напружено-деформований стан анізотропної циліндричної композитної оболонки під осьовим тиском. Показано залежність напружень та переміщень від збільшення кількості перехресно-армованих шарів однакової товщини та проаналізована різниця між результатами здобутими за запропонованим підходом та ортотропної моделлю розрахунку анізотропних оболонок.

#### Список використаних джерел.

1. Баженов В.А., Семенюк М.П., Трач В.М. Нелінійне деформування, стійкість і закритична поведінка анізотропних оболонок: монографія. К.: Каравела, 2010. 352 с.
2. Григоренко Я.М., Крюков Н.Н. Численные решения задач статики гибких слоистых оболочек с переменными параметрами. К.: Наук. думка, 1988, 264с.
3. Трач В.М., Подворний А.В., Хоружий М.М. Деформування та стійкість нетонких анізотропних оболонок: монографія. К.: Каравела, 2019. 274 с.
4. Григоренко Я.М., Василенко А.Т., Панкратова Н.Д. Задачи теории упругости неоднородных тел. К.: Наук. думка, 1991. 216 с.
5. Григоренко Я. М., Влайков Г. Г., Григоренко А. Я. Численно-аналитическое решение задач механики оболочек на основе различных моделей: монография. К.: Академперіодика, 2006. 472 с.
6. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности. М.: Мир, 1987. 542 с.
7. Семенюк М.П., Трач В.М., Подворний А.В. Напружено-деформований стан товстостінної анізотропної циліндричної оболонки. *Прикладна механіка*. 2023. **59**, №1. С. 91-102.
8. Лехницький С.Г. Теория упругости анизотропного тела. 2-е изд., испр. и доп. М.: Наука, 1977. 415 с.
9. Механика композитов. В 12 т. Т. 9. Динамика элементов конструкций / Кубенко В.Д., Бабаев А.Э., Беспалова Е.И. и др. / под общей ред. Гузя А.Н. Киев: «А.С.К.», 1999. 379с.

**О. А. Нестеров**

*Одеський національний морський університет*

## **МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЦИКЛІЧНОЇ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ СТАЛЕЙ МОРСЬКИХ ПОРТОВИХ КОНСТРУКЦІЙ**

*Запропоновано метод підвищення циклічної тріщиностійкості конструкцій підйально-розвантажувального обладнання морських портів використанням спеціального технологічного середовища. Механізм позитивного ефекту полягає у гальмуванні стадії поширення тріщини штучним створенням ефекту її закриття. Експерименти проведено на сталі 09Г2С стінки вантажної лебідки порталного крану. Даним методом досягається повне гальмування росту тріщин в середньоамплітудній області навантаження. Оцінки закриття тріщини показали його відповідальність за отримані ефекти.*

*Ключові слова:* лебідка крану, втомна міцність, закриття тріщини.

**O. A. Nesterov**

## **A METHOD OF INCREASING CYCLIC CRACK RESISTANCE OF STEEL OF MARINE PORT STRUCTURES**

*A method of increasing cyclic crack resistance of structures of lifting and handling equipment of marine ports using a special technological environment is proposed. The mechanism of the positive effect consists in retarding the stage of crack propagation by creating the artificial crack closure effects. Experiments were carried out on the steel 09G2C of walls of the cargo winch of the gantry crane. Complete retardation of crack growth in the medium-amplitude region of the load have been achieved using the method. Evaluations of crack closure showed its responsibility for the obtained effects.*

*Key words:* crane hoist, fatigue strength, fatigue crack closure.

**Постановка проблеми.** Значна частина сталених конструкцій морського портового підйально-розвантажувального обладнання експлуатується в режимі інтенсивного циклічного навантаження, що зумовлює підвищену увагу до характеристик втомної міцності матеріалів. Вони в сукупності характеризують стадії зародження та поширення втомних тріщин, а їх довговічність визначає загальну довговічність конструкції. Необхідно враховувати, що нормативи експлуатації портового обладнання не допускають її продовження при виявленні дефектів типу тріщин, їх необхідно усунути. Однак це не означає ігнорування стадії росту тріщини з огляду обґрунтування роботоздатності таких конструкцій. Можна використовувати методи запобігання появи втомних тріщин через підвищення циклічної тріщиностійкості матеріалів і за рахунок цього підвищувати загальну довговічність металоконструкції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Понаднормова експлуатація конструкцій портового підйально-розвантажувального обладнання найчастіше зумовлює появу втомних тріщин в найбільш навантажених його елементах [1, 2]. Практикою експлуатації встановлені ділянки з високою вірогідністю появи в них тріщин і вони знаходяться під особливою увагою при експертизі технічного стану такого обладнання. Звідси заслуговують на увагу методи підвищення циклічної тріщиностійкості конструкційних сталей. Зокрема, відомі методи гальмування втомних тріщин в конструкційних сталях штучним створенням так званого ефекту закриття тріщин [3–7]. Перспективним є метод, що полягає у використанні спеціального технологічного середовища [8], яке, попадаючи в порожнину втомної тріщини, формує тверді продукти взаємодії зі сталлю. Це зумовлює їх клиновий ефект, запобігаючи змиканню берегів тріщини в частині півциклу розвантаження. У такий спосіб зменшується циклічна пластична деформація у вершині тріщини, що зменшує швидкість її поширення. У низці праць [9, 10] показано високу ефективність даного методу гальмування втомних тріщин в конструкційних сталях. Водночас суть ідеї підвищення втомної міцності сталей морських портових конструкцій базується на гальмуванні стадії зародження втомних тріщин, як це було запропоновано стосовно насосних штанг нафтовидобувного обладнання, які також експлуатуються в умовах циклічного навантаження [11]. Позитивний ефект проявився в істотному підвищенні границі витривалості сталей штанг.

**Постановка завдань.** У даній праці метод підвищення втомної міцності сталей використанням спеціального технологічного середовища поширено на елементи конструкцій підйально-розвантажувального обладнання. Об'єкт підвищення втомної міцності – вантажна лебідка порталного крану після 35 років експлуатації. Корпус лебідки з огляду її цілісності

складається з двох основних конструктивних елементів (рис. 1): торцевої стінки барабану з листової вальцьованої сталі 09Г2С та валу зі сталі 20. Обидві сталі мають феритно-перлітну мікроструктуру. У наведеному прикладі в зварному з'єднанні виникла втомна тріщина (рис. 1), траскторія якої поширилася на стінку барабану з ризиком її неконтрольованого руйнування. Таким чином, цілісність стінки лебідки практично визначає її довговічність.



Рис. 1. Ділянка стінки лебідки з утвореною в ній втомною тріщиною (вказано стрілками)

#### Виклад основного матеріалу.

*Вплив спеціального технологічного середовища на гальмування росту втомних тріщин в сталі 09Г2С вантажної лебідки.*

Експериментальна апробація методу гальмування росту втомної тріщини проведена у кілька етапів. Зразки вирізали у напрямі вальцювання листового матеріалу товщиною 25 мм та механічно доводили до розмірів 12 мм x 18 мм x 170 мм (товщина, висота та довжина, відповідно). Використовуючи методичні рекомендації [12], будували кінетичні діаграми втомного руйнування в координатах «швидкість росту тріщини  $da/dN$  – розмах коефіцієнта інтенсивності напружень  $\Delta K$ », де  $a$  – довжина тріщини, включаючи концентратор напружень,  $N$  – кількість циклів навантаження. Періодично оптичним методом визначали на бокових поверхнях зразка просування тріщини з чутливістю 0,02 мм.

Спочатку у повітрі вирощували втомну тріщину за частоти циклічного навантаження  $f = 10$  Гц з реєстрацією кінетики її росту приблизно до швидкості  $da/dN \sim 10^{-8}$  м/цикл. Це вже чітко виражена середньоамплітудна ділянка кінетичної діаграми, якій не притаманний істотний ефект закриття тріщини. Тоді крапельним методом подавали на концентратор зразка розчин спеціального технологічного середовища, який завдяки капілярному ефекту за кілька циклів заповняв порожнину втомної тріщини аж до її вершини. Зменшення швидкості росту тріщини спостерігали зразу ж на першому етапі контролю довжини тріщини після введення в тріщину технологічного середовища. Через кілька таких етапів приріст тріщини вже не реєстрували, що свідчило про її повне гальмування. Далі продовжували експеримент, підвищували рівень навантаження, зберігаючи пульсвний його цикл. Це приводило до зростання розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень  $\Delta K$  за незмінної асиметрії циклу. Для певного діапазону  $\Delta K$  збільшення його рівня не спричиняло росту тріщини, тобто в межах чутливості реєстрації приросту тріщини збільшення її довжини на бокових поверхнях зразка не спостерігали. Це дало нам можливість стверджувати, що для заданих умов циклічного навантаження (частота  $f$ , асиметрія  $R$  та рівень  $\Delta K$ ) застосування спеціального технологічного середовища повністю унеможливує просування тріщини. Рис. 2а демонструє різкий вплив описаної процедури на гальмування росту тріщини аж до її повної зупинки і слугує підтвердженням значного позитивного ефекту від застосування даного методу.

Важливо було дослідити роль чинника частоти циклічного навантаження  $f$ , беручи до уваги, що саме низькочастотне навантаження властиве корпусу лебідки, якщо враховувати час підйому та

опускання вантажу. Тому наступний експеримент полягав у зниженні частоти циклічного навантаження  $f$  від 10 Гц (рис. 2а) до 0,5 Гц (рис. 2б), що наближувало до реальних експлуатаційних умов.

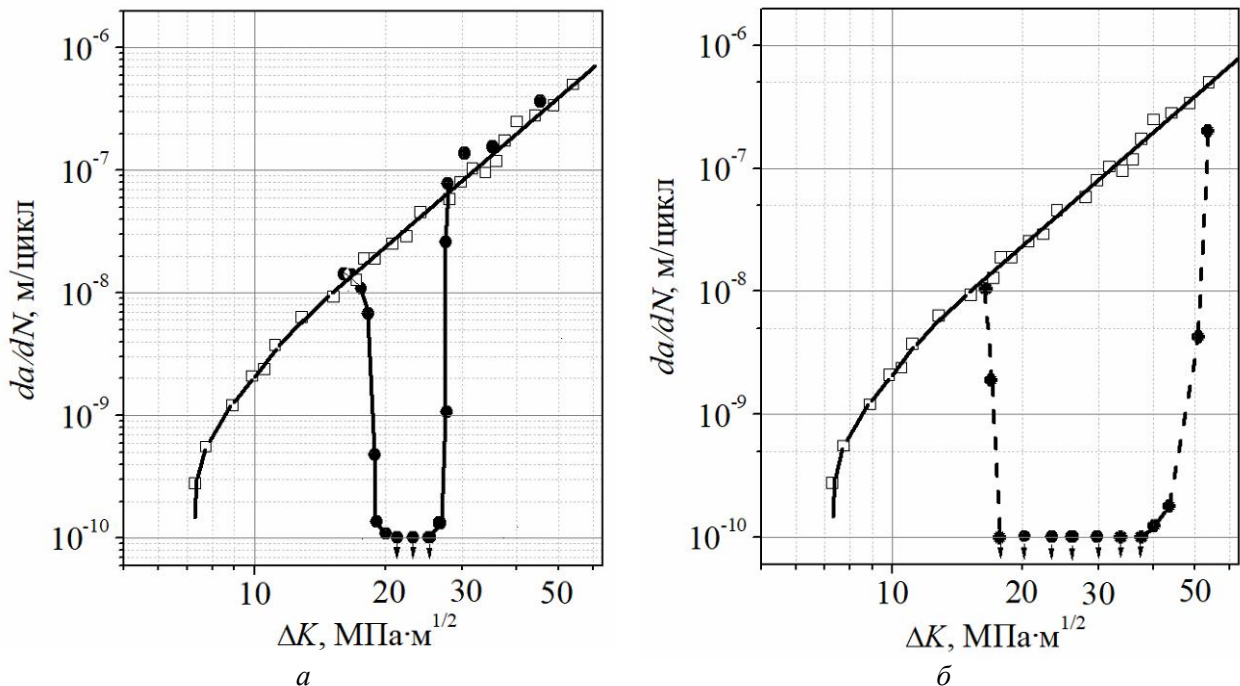


Рис. 2. Кінетика втомного росту тріщини у повітрі (світлі символи) та за дії спеціального технологічного середовища (темні символи) на зразках зі сталі 09Г2С за частоти  $f = 10$  Гц (а) та  $f = 0,5$  Гц (б) та коефіцієнта асиметрії циклу  $R = 0,05$

Встановлено, що зниження частоти  $f$  істотно розширює діапазон  $\Delta K$ , для якого спостерігали цілковите гальмування росту тріщини. Таким чином, ефект від застосування спеціального технологічного середовища зростає при зниженні частоти циклічного навантаження, тобто, при збільшенні часу дії середовища в циклі навантаження, а це практично важливо при аналізі експлуатаційних умов вантажної лебідки. З іншого боку, частотна залежність ефекту гальмування втомної тріщини вказує на змагальність процесу утворення твердих продуктів у порожнині тріщини та швидкості її росту. За нижчої частоти  $f$  сприятливіші умови для формування цих продуктів.

Для підтвердження ролі саме закриття втомної тріщини у гальмуванні її поширення аж до повної зупинки в середньоамплітудній області навантаження нами проведено експерименти з визначення ефекту закриття тріщини. Для цього періодично зупиняли експеримент і застосовували описану в праці [2] методику оцінювання закриття тріщини, використовуючи спеціальний тензометричний давач переміщень.

Приведені на рис. 3 діаграми переміщення  $\delta$  поблизу вершини тріщини засвідчують відповідальність штучного створення закриття тріщини у гальмуванні її росту. Якщо до дії технологічного середовища частка ефективного розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень  $\Delta K_{eff}$ , яка вважається механічною рушійною силою росту втомної тріщини, складає 90...95% номінального розмаху  $\Delta K$ , то за його дії – приблизно три чверті значення номінального  $\Delta K$  для частоти навантаження  $f = 10$  Гц та майже 10% значення номінального  $\Delta K$  для  $f = 0,5$  Гц.

*Технологічна процедура використання методу підвищення втомної міцності сталей.*

Для практичного використання методу розроблено герметичну камеру із прозорого хімічно інертного матеріалу, яка двома частинами охоплює потенційно небезпечну ділянку навколо осі барабану (рис. 4). В камеру заливають спеціальне технологічне середовище [4], яке неагресивне у корозійному відношенні з огляду зниження опору корозійно-механічному руйнуванню сталей [7]. Камера обертається разом зі стінкою лебідки, що забезпечує перемішування технологічного розчину. З іншого боку, цей розчин, як показано попередніми дослідженнями [4–6], активний у



формуванні в порожнині втомної тріщини значної кількості твердих продуктів взаємодії зі сталями феритно-перлітної мікроструктури.

Передбачається, що і в експлуатаційних умовах при зародженні втомної тріщини в ній будуть формуватися тверді продукти взаємодії технологічного середовища з металом, що запобігатиме змиканню тріщини в півциклі розвантаження. В параметрах механіки втомного росту тріщини це означає зменшення ефективного коефіцієнта інтенсивності напружень. Відповідно, знижується механічна рушійна сила втомного росту тріщини. Можна очікувати, що і у випадку вантажної лебідки, гальмування стадії зародження росту втомної тріщини буде ефективним з огляду на підвищення втомної міцності металу і довговічності лебідки загалом.

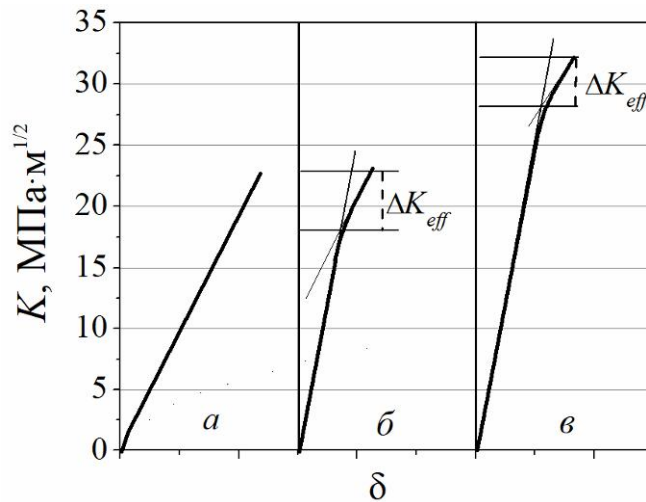


Рис. 3. Результати оцінювання ефекту закриття тріщини до застосування спеціального технологічного середовища (а) та з його використанням для частоти  $f = 10$  Гц (б) і  $0,5$  Гц (в)

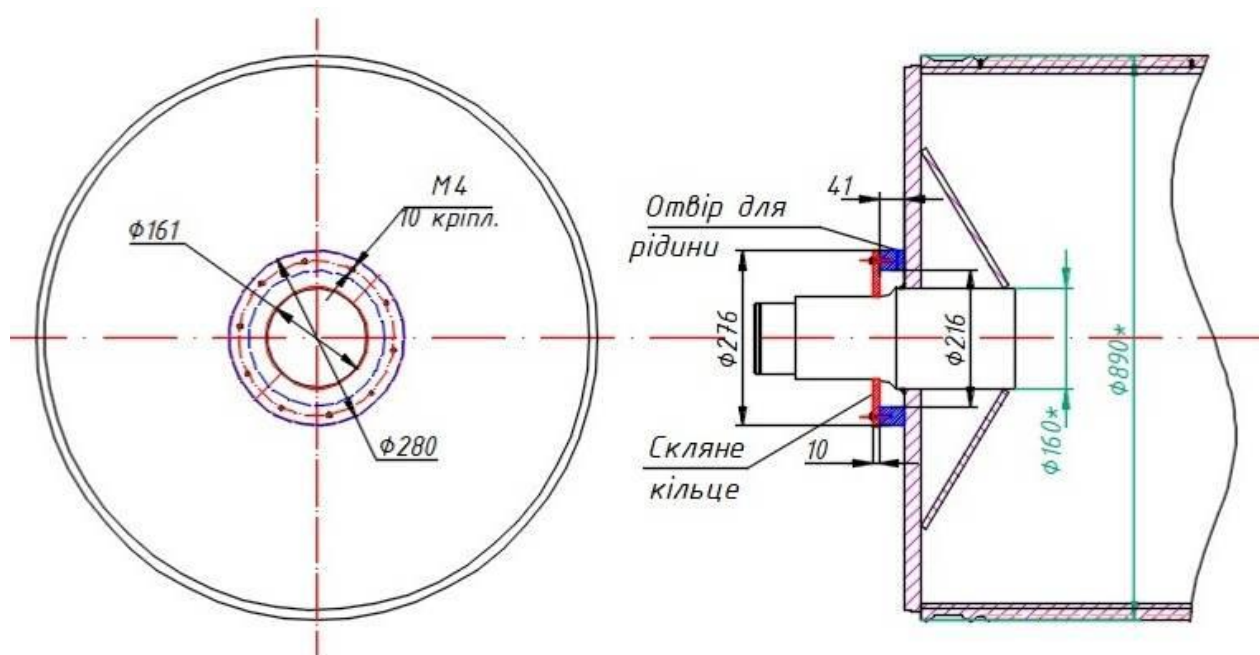


Рис. 4. Схематичне зображення камери для фіксації на вантажній лебідці та подавання в неї технологічного середовища

**Висновки.** Встановлено істотний гальмівний вплив спеціального технологічного середовища на втомний ріст тріщини в сталі 09Г2С стінки корпусу вантажної лебідки порталного крана в середньоамплітудній області кінетичної діаграми втомного руйнування аж до її повної зупинки в певному діапазоні розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень. Цей діапазон частотно залежний і збільшується зі зменшенням частоти циклічного навантаження. На прикладі лебідки опрацьовано технічну реалізацію методу підвищення втомної міцності відповідальних елементів конструкцій використанням спеціального технологічного середовища.



### Література

1. Degradation of steels of the reloading equipment operating beyond its designed service life / V.M. Pustovyi et al. *Materials Science*. 2022. Vol. 57, № 5. P. 640–648. URL: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00590-1> (date of access: 24.07.2023).
2. Wen H., Li Y. Study on stress distribution law and stress performance characteristics of multiple data mining for harbour portal crane detection. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 631, 012039. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/631/1/012039> (date of access: 24.07.2023).
3. A new method of increasing the cyclic crack resistance of structural parts / G. N. Nikiforchin et al. *Materials Science*. 1985. Vol. 21, № 2. P. 191–193. URL: <https://doi.org/10.1007/BF01150640> (date of access: 24.07.2023).
4. Venhrynyuk T. P. Fatigue crack retardation by the application of repair coatings to gas pipelines under pressure. *Materials Science*. 2013. Vol. 48, № 6. P. 739–742. URL: <https://doi.org/10.1007/s11003-013-9562-x> (date of access: 24.07.2023).
5. Pippan R., Hohenwarter A. Fatigue crack closure: a review of the physical phenomena. *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*. 2017. Vol. 40, № 4. P. 471–495. URL: <https://doi.org/10.1111/ffe.12578> (date of access: 24.07.2023).
6. Fatigue crack tip corrosion processes and oxide induced closure / A. K. Vasudevan et al. *Materials Science and Engineering*. 2022. Vol. A 861, 144383. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144383> (date of access: 24.07.2023).
7. On 50 years of fatigue crack closure dispute / D. Kujawski et al. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2023. Vol. 46, № 8. P. 2816–2829. URL: <https://doi.org/10.1111/ffe.14034> (date of access: 24.07.2023).
8. Патент України № 128514. Спосіб гальмування росту втомної тріщини / Г. М. Никифорчин та ін. Бюл. № 18. 2018.
9. Effective method for fatigue crack arrest in structural steels based on artificial creation of crack closure effect / Ya. Khaburskyi et al. *International Journal of Fatigue*. 2019. Vol. 127. P. 217–221. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.06.001> (date of access: 24.07.2023).
10. Analysis of the deceleration methods of fatigue crack growth rates under mode I loading type in pearlitic rail steel / G. Lesiuk et al. *Metals*. 2021. Vol. 11, № 4. P. 584. URL: <https://doi.org/10.3390/met11040584> (date of access: 24.07.2023).
11. Elevation of the fatigue strength of pump rods as a result of treatment with a special medium / B. V. Kopei et al. *Materials Science*. 2020. Vol. 56. P. 125–131. URL: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00406-0> (date of access: 24.07.2023).
12. ASTM E647-15e1, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. – ASTM International: West Conshohocken, PA, 2015. – 49 p.

**Рецензент:** Никифорчин Г. М., пров. наук. співроб. відділу діагностики корозійно-водневої деградації матеріалів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України, д.т.н., проф.

УДК 629.113

DOI 10.36910/775.24153966.2023.75.42

В.Г. Вербицький<sup>1</sup>, А.Є. Бондаренко<sup>2</sup>, Є.М. Місько<sup>2</sup>, О.О. Разбойніков<sup>3</sup>

Університет Ковентрі<sup>1</sup>  
Одеська державна академія будівництва та архітектури<sup>2</sup>  
Національний транспортний університет<sup>3</sup>

## ДО ПОБУДОВИ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОСТОРОВИХ ВЕРТИКАЛЬНИХ КОЛИВАНЬ ЗЧЛЕНОВАНОГО АВТОПОТЯГА

У статті запропонований варіант розвитку та удосконалення плоскої математичної моделі руху з урахуванням колії, на прикладі зчленованого дволанкового автопотяга, шляхом розробки та апробації окремих підсистем, які б мали враховувати перерозподіл вертикальних навантажень на вісі, за рахунок зміщення центрів мас, або впливу бокових сил в кругових режимах руху автопотяга. Аналіз запропонованих в роботі підсистем із зовнішнім збудженням показав експоненційне згасання збуджень демпфуючими елементами підвіски, що відповідає поведінці реального автопотяга. Запропонований підхід дозволить отримати просторову модель зчленованого автопоїзда, яка б могла враховувати зміну вертикальних навантажень та подальшу зміну сил поперечного прослизання, що впливають на поворотність та керованість автопоїзда.

*Ключові слова:* зчленований дволанковий автопотяг, крен, тангаж, вертикальні коливання.

V.G. Verbytskyi, A.E. Bondarenko, E.M. Misko, O.O. Razboinikov

## TO THE CONSTRUCTION OF A MATHEMATICAL MODEL OF SPATIAL VERTICAL OSCILLATIONS OF AN ARTICULATED TRAIN

The article proposes an option for the development and improvement of a flat mathematical model of motion taking into account the track, using the example of an articulated two-link road train, by developing and testing separate subsystems, which should take into account the redistribution of loads on the axle, due to the mixing of mass centers, or the influence of lateral forces in the circular driving modes of the road train. The analysis of subsystems with external excitation demonstrated the exponential damping of oscillations by the damping elements of the suspension, that corresponds to the behavior of a real road train. The proposed approach will make it possible to get a spatial model of an articulated road train, which could take into account the change in vertical loads and the subsequent change in lateral slip forces that affect the turnability and controllability of the road vehicle.

*Key words:* articulated two-link train, roll, pitch, vertical oscillations.

При розробці просторової математичної моделі руху зчленованого автопотяга необхідно окрему увагу приділити питанню створення підсистеми яка б враховувала вертикальні переміщення кожної з ланок автопотяга які характерні поведінці реального автопотяга. А саме, згасання коливань при зовнішньому збудженні (наїзд на перешкоду) та положення центрів мас автопотяга, або вплив бічних сил на центри мас (при сталому круговому русі, чи різкому прискоренні, гальмуванні). Окремі питання що до стійкості дволанкових транспортних засобів розглядалися в роботах [1, 2, 3], в роботах [4, 5] приділялась увага визначенням параметрів підвіски і їх вплив на стійкість руху, в даній роботі переслідувалась мета об'єднати усі вище зазначені здобутки та максимально наблизити до реального автопотяга.

В кругових режимах руху за рахунок відцентрових сил відбувається перерозподіл навантажень між коліями коліс, що в свою чергу призводить до зміни бічних сил відведення на кожному колесі, яке несе суттєвий вплив на показники стійкості та маневреності автопотяга в цілому. Аналогічна ситуація виникає при різкому гальмуванні, або раптовому зовнішньому збудженні (наїзд на дорожню перешкоду). Побудова повної просторової моделі являє собою доволі об'ємну задачу, тому в даній роботі розглянемо перший етап до створення просторової моделі, а саме, створення підсистеми яка б враховувала положення центрів мас автопотяга при певному зовнішньому збудженні.

Розглянемо послідовність побудови математичної моделі, яка б враховувала усі сили та моменти для зчленованого автобуса та надавала б можливість об'єднати систему вертикальної динаміки з системою математичних рівнянь плоскопаралельного руху отриманих раніше.

Повноцінна просторова модель повинна в себе включати дві окремі підсистеми. Перша складова – це системи рівнянь руху автопоїзда є рівняння плоскопаралельного руху, що враховують усі нелінійності, які притаманні плоскій двоколійній моделі: фізичні (нелінійні сили відведення) та геометричні (тригонометричні функції як від параметра кута повороту керованого модуля, так і тригонометричних функцій від змінної кута складання) нелінійності. Ця складова

рівнянь руху можливо отримана відомим методом «розрізання вузлів» в точці з'єднання двох ланок і детально описана в роботі [6].

Для прикладу розглянемо відому двоколіїну плоску модель автопотяга з наступними параметрами:  $a$  і  $b$  - відстань від центру мас тягача до центрів передньої (керованої) осі та задньої осі тягача;  $c$  - відстань від центру мас тягача до точки зчипки з другою ланкою;  $d_1$  - відстань від центру мас другої ланки до точки зчипки з тягачем;  $m$ ,  $m_1$  - маса тягача та напівпричепа;  $z$ ,  $z_1$  - висота центра мас тягача та напівпричепа;  $k_{ii}$  - коефіцієнт пружності підвіски  $i$ -того колеса;  $kd_{ii}$  - коефіцієнт демпфування підвіски  $i$ -того колеса;  $\gamma$  - кут складання (кут між поздовжніми осями тягача та напівпричепа).

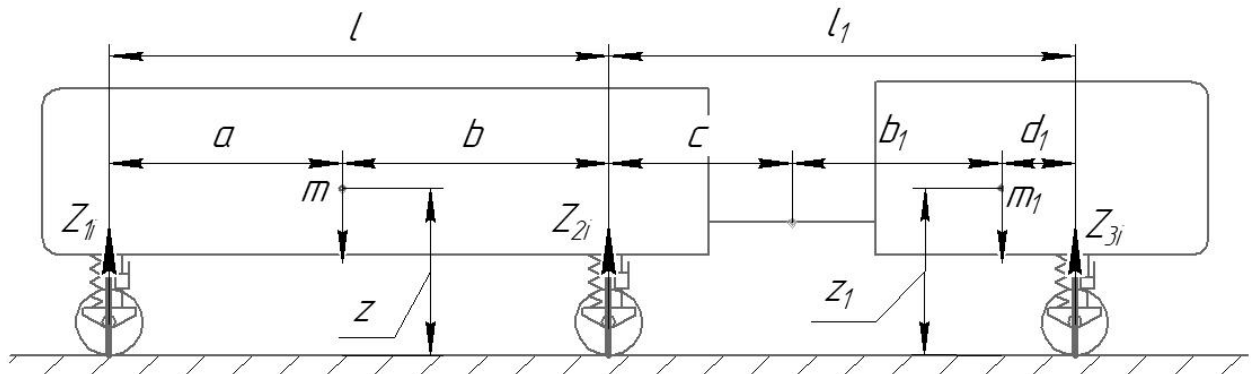


Рис. 1. Масово-геометричні параметр автопотяга

Друга складова просторової моделі утворюється групою рівнянь, що відповідають просторовим коливанням по кутам крену  $\psi$ ,  $\psi_1$  та тангажу  $\varphi$ ,  $\varphi_1$  (див. рисунок 2) обох ланок зчленованого автопотяга. Ці рівняння можуть бути отримані на основі формалізації рівнянь Лагранжа другого роду, для чого необхідно визначити кінетичну та потенціальну енергії системи. Коливання по кутам крену та тангажу розглядаються відносно поздовжніх та поперечних осей, що є проєкціями відповідних центральних осей інерції на горизонтальну опорну поверхню, за умови припущення малих значень кутів тангажу та крену, про що було вже написано в [7,8].

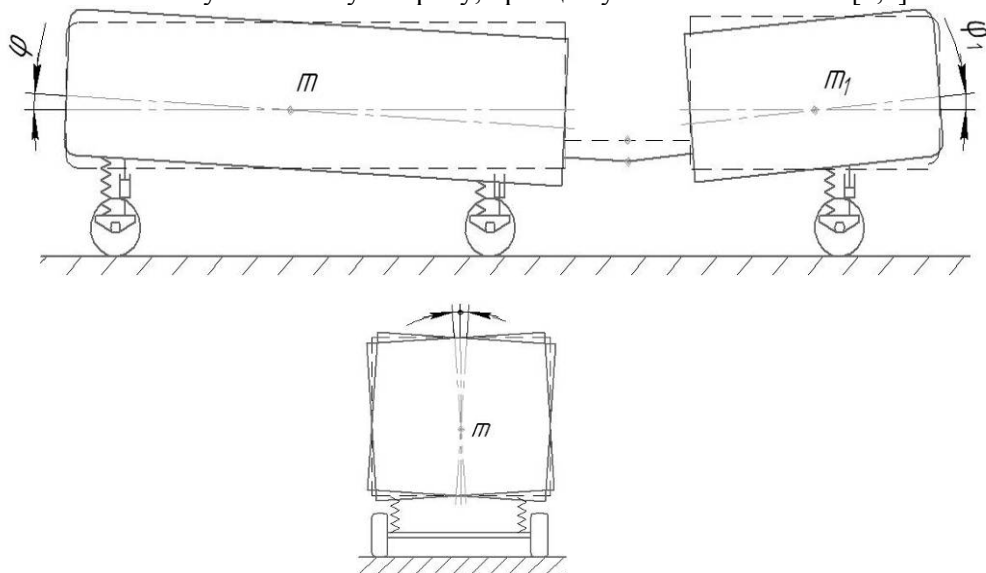


Рис. 2. Куты крену  $\psi$ ,  $\psi_1$  та тангажу  $\varphi$ ,  $\varphi_1$

Також в роботі [7] вже обговорювалось, що об'єднання цих двох підсистем вводить додаткову взаємну залежність, оскільки в систему просторового руху моментів сил інерції (поздовжніх та поперечних), які визначаються в плоскій моделі руху автопотяга, і прикладаються в центрах мас просторової моделі. В свою чергу, отримані в просторовій моделі вертикальні реакції

опор використовуються для визначення сил відведення в плоскій моделі. Це наближає таку математичну модель до реального зчленованого автопотяга.

На відміну від математичної моделі вертикальних коливань одноланкового колісного транспортного засобу, що має три ступеня вільності (переміщення центру мас по висоті  $z$ , по нахилу в поперечній осі  $\varphi$  (галопуванню) та нахилу у поздовжній осі  $\psi$  (крену), для зчленованого транспортного засобу необхідно додатково враховувати ще два ступеня вільності - по нахилу другої ланки в поперечній площині  $\varphi_1$  (галопуванню) та нахилу у поздовжній осі  $\psi_1$  (крену).

Саме для такої механічної системи, в якій присутні декілька ступенів свободи необхідно використати відомі диференціальні рівняння Лагранжа II роду:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q} = 0 \quad (i = 1 \dots 5) \quad (1)$$

Для складання рівнянь зчленованого автопотяга необхідно визначити функцію Лагранжа виду

$$L = T - P \quad (2)$$

де  $T$  – кінетична енергія системи;

$P$  – потенціальна енергія системи.

Визначимо кінетичну та потенціальну енергію системи. Отримаємо:

$$T = \frac{mz^2}{2} + \frac{J_y \varphi^2}{2} + \frac{(md_1^2 + J_{1y}) \varphi_1^2}{2} + \frac{J_x \psi^2}{2} + \frac{J_{x1} \psi_1^2}{2} \quad (3)$$

$$P = \frac{k_{11}(z - a\varphi - p\psi)^2}{2} + \frac{k_{12}(z - a\varphi + p\psi)^2}{2} + \frac{k_{21}(z + b\varphi - p\psi)^2}{2} + \frac{k_{22}(z + b\varphi + p\psi)^2}{2} + \frac{k_{31}(z + c\varphi - p\psi_1 + l_1\psi_1)^2}{2} + \frac{k_{32}(z + c\varphi + p\psi_1 + l_1\psi_1)^2}{2} \quad (4)$$

Як бачимо, в отриманих рівняннях присутні похідні другого порядку, які суттєво ускладнюють їх чисельне інтегрування. Для цього спростимо рівняння по координаті  $z$  та отримаємо два рівняння першого порядку, що з одного боку збільшить кількість розрахунків, а з іншого дозволить розв'язати систему чисельно, так як вона задовольняє приведеній системі Коші:

$$e_{10} = \frac{d}{dt} z(t) = Z(t) \quad (5)$$

$$e_1 = m \left( \frac{d}{dt} Z(t) \right) + k_{11}(-a\varphi(t) - \psi(t) + z(t)) + k_{12}(-a\varphi(t) + \psi(t) + z(t)) + k_{21}(b\varphi(t) - \psi(t) + z(t)) + k_{22}(b\varphi(t) + \psi(t) + z(t)) + k_{31}(c\varphi(t) - \psi_1(t) + l_1\varphi_1(t) + z(t)) + k_{32}(c\varphi(t) + \psi_1(t) + l_1\varphi_1(t) + z(t)) + kd_{11}(-a\varphi(t) - \Psi(t) + Z(t)) + kd_{12}(-a\varphi(t) + \Psi(t) + Z(t)) + kd_{21}(b\varphi(t) - \Psi(t) + Z(t)) + kd_{22}(b\varphi(t) + \Psi_1(t) + Z(t)) + kd_{31}(c\varphi(t) - \Psi(t) + l_1\varphi_1(t) + Z(t)) + kd_{32}(c\varphi(t) + \Psi_1(t) + l_1\varphi_1(t) + Z(t)) \quad (6)$$

Звернемо увагу на те, що параметр  $h$ , що присутній у цьому та наступних рівняннях, відповідає не параметру не висоти, а половині ширини колії досліджуваного прототипу.

Спрощення запропоноване в (5) проводиться аналогічно для усіх інших похідних. Відповідно, рівняння по куту галопування  $\varphi$  першої ланки, прийме вид:

$$e_{20} = \frac{d}{dt} \varphi(t) = \Phi(t) \quad (7)$$

$$e_2 = J_y \left( \frac{d}{dt} \Phi(t) \right) - k_{11}(-a\varphi(t) - h\psi(t) + z(t))a - k_{12}(-a\varphi(t) + h\psi(t) + z(t))a + k_{21}(b\varphi(t) - h\psi(t) + z(t))b + k_{22}(b\varphi(t) + h\psi(t) + z(t))b + k_{31}(c\varphi(t) - h\psi_1(t) + l_1\varphi_1(t) + z(t))c + k_{32}(c\varphi(t) + h\psi_1(t) + l_1\varphi_1(t) + z(t))c - kd_{11}(-a\varphi(t) - h\Psi(t) + Z(t))a - kd_{12}(-a\varphi(t) + h\Psi(t) + Z(t))b + kd_{21}(b\varphi(t) - h\Psi(t) + Z(t))b + kd_{22}(b\varphi(t) + h\Psi(t) + Z(t))b + kd_{31}(c\varphi(t) - h\Psi_1(t) + l_1\varphi_1(t) + Z(t))c + kd_{32}(c\varphi(t) + h\Psi_1(t) + l_1\varphi_1(t) + Z(t))c \quad (8)$$

Для визначення швидкостей та координат по куту галопування  $\varphi_1$  другої ланки:

$$e_{30} = \frac{d}{dt} \phi_1(t) = \dot{\phi}_1(t) \quad (9)$$

$$e_3 = J_{1y} \left( \frac{d}{dt} \phi_1(t) \right) + k_{31}(c\phi(t) - h\psi_1(t) + l_1\phi_1(t) + z(t))l_1 + k_{32}(c\phi(t) + h\psi_1(t) + l_1\phi_1(t) + z(t))l_1 + kd_{31}(c\phi(t) - h\psi_1(t) + l_1\phi_1(t) + Z(t))l_1 + kd_{32}(c\phi(t) + h\psi_1(t) + l_1\phi_1(t) + Z(t))l_1 \quad (10)$$

Рівняння для визначення координат та швидкостей по куту крену  $\psi$  першої ланки:

$$e_{40} = \frac{d}{dt} \psi(t) = \dot{\psi}(t) \quad (11)$$

$$e_4 = J_{1x} \left( \frac{d}{dt} \psi(t) \right) - k_{11}(-a\phi(t) - \psi(t) + z(t)) + k_{12}(-a\phi(t) + \psi(t) + z(t)) - k_{21}(b\phi(t) - \psi(t) + z(t)) + k_{22}(b\phi(t) + \psi(t) + z(t)) - kd_{11}(-a\phi(t) - \psi(t) + Z(t)) + kd_{12}(-a\phi(t) + \psi(t) + Z(t)) - kd_{21}(b\phi(t) - \psi(t) + Z(t)) + kd_{22}(b\phi(t) + \psi(t) + Z(t)) \quad (12)$$

Рівняння для визначення координат та швидкостей по куту крену  $\psi_1$  другої ланки:

$$e_{50} = \frac{d}{dt} \psi_1(t) = \dot{\psi}_1(t) \quad (13)$$

$$e_5 = J_{1x} \left( \frac{d}{dt} \psi_1(t) \right) - k_{31}(c\phi(t) - h\psi_1(t) + l_1\phi_1(t) + z(t))h + k_{32}(c\phi(t) + h\psi_1(t) + l_1\phi_1(t) + z(t))h - kd_{31}(c\phi(t) - h\psi_1(t) + l_1\phi_1(t) + Z(t))h + kd_{32}(c\phi(t) + h\psi_1(t) + l_1\phi_1(t) + Z(t))h \quad (14)$$

Після інтегрування рівнянь отримаємо значення фазових змінних як функції часу та відповідних вертикальних реакцій на кожному колесі, що необхідно для корекції коефіцієнтів відведення, які в свою чергу входять до рівнянь плоскопаралельного руху досліджуваного прототипу.

$$z_{10} = \frac{mb - \frac{m_1 b_1 (c - b)}{l_1}}{l} \quad (15)$$

$$z_{20} = \frac{ma - \frac{m_1 b_1 (a + c)}{l_1}}{l} \quad (16)$$

$$z_{30} = \frac{m_1 d_1}{l_1} \quad (17)$$

$$z_{11} = \frac{z_{10}}{2} + k_{11}(z(t) - a\phi(t) - h\psi(t)) \quad (18)$$

$$z_{12} = \frac{z_{10}}{2} + k_{12}(z(t) - a\phi(t) + h\psi(t)) \quad (19)$$

$$z_{21} = \frac{z_{20}}{2} + k_{21}(z(t) + b\phi(t) - h\psi(t)) \quad (20)$$

$$z_{22} = \frac{z_{20}}{2} + k_{22}(z(t) + b\phi(t) + h\psi(t)) \quad (21)$$

$$z_{31} = \frac{z_{30}}{2} + k_{31}(z(t) + c\phi(t) - h\psi(t) + l_1\phi_1(t)) \quad (22)$$

$$z_{32} = \frac{z_{30}}{2} + k_{32}(z(t) + c\phi(t) + h\psi(t) + l_1\phi_1(t)) \quad (22)$$

Отримані результати чисельного інтегрування основних змінних представимо у вигляді графіків для досліджуваного прототипу, що розглядається, за певних реальних початкових збурень.

Отримані в даній роботі залежності будуть використані при об'єднанні систем автопоїзда до просторової моделі. Необхідність розвитку та її ефективність будуть продемонстровані на прикладі аналізу властивостей поворотності дволанкового автопотяга з різними варіантами прикладання тягових (варіант тягового зусилля на другій осі першої ланки та на осі другої ланки автопоїзда), або гальмівних зусиль у наступних дослідженнях.



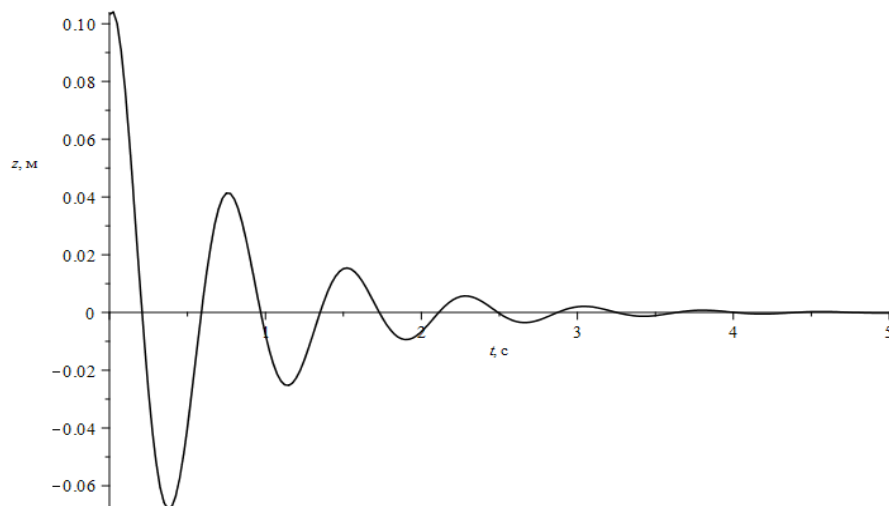


Рис. 3. Зміна координати вертикального переміщення  $z$  від часу

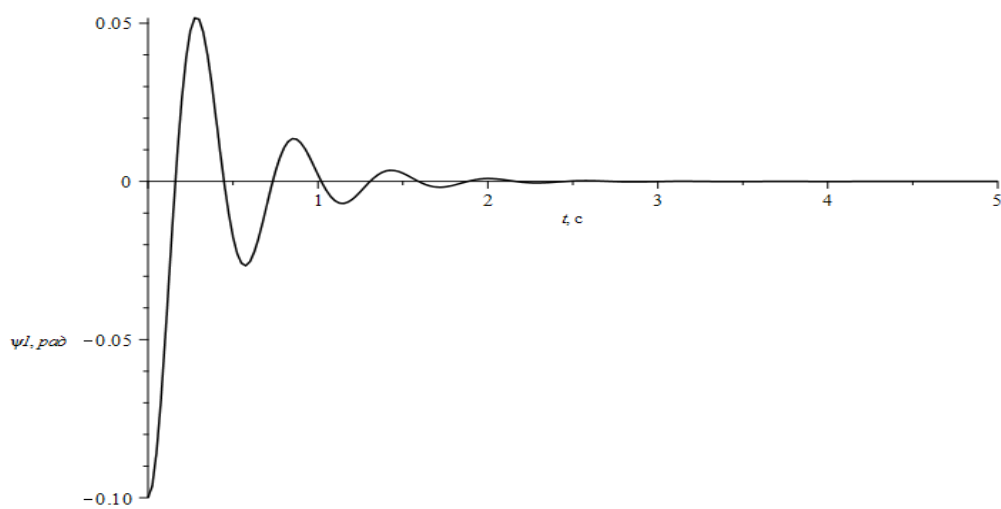


Рис. 4. Зміна кута крену другої ланки  $\psi_1$  від часу

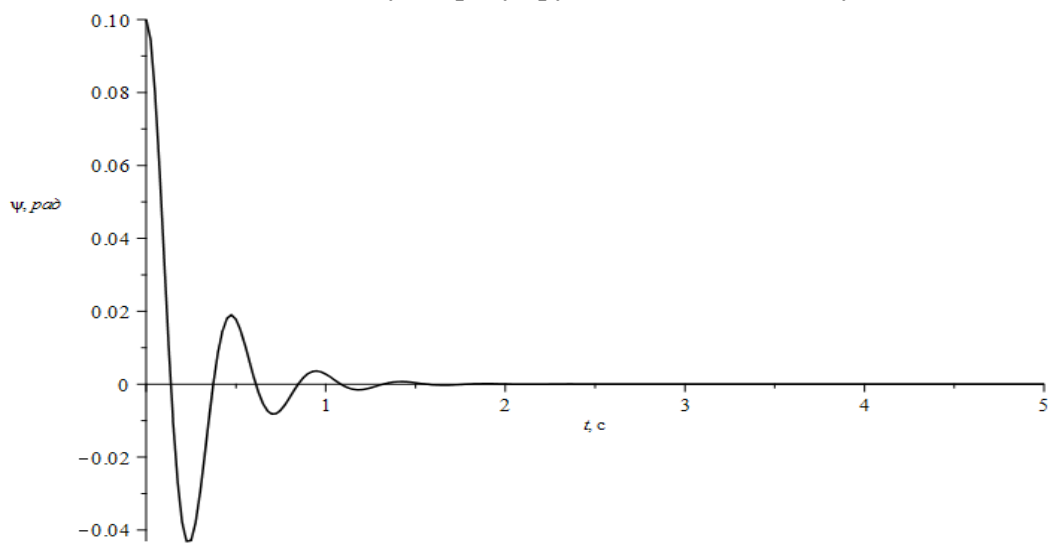
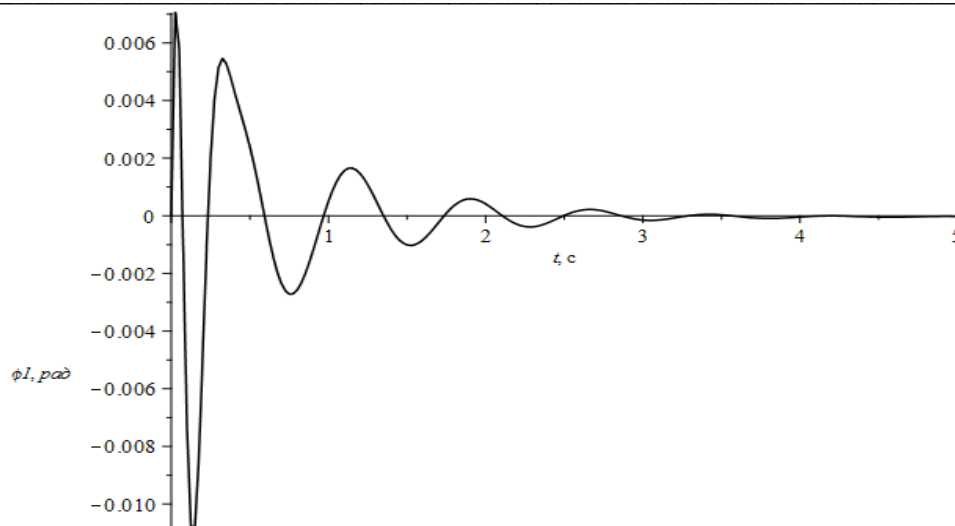
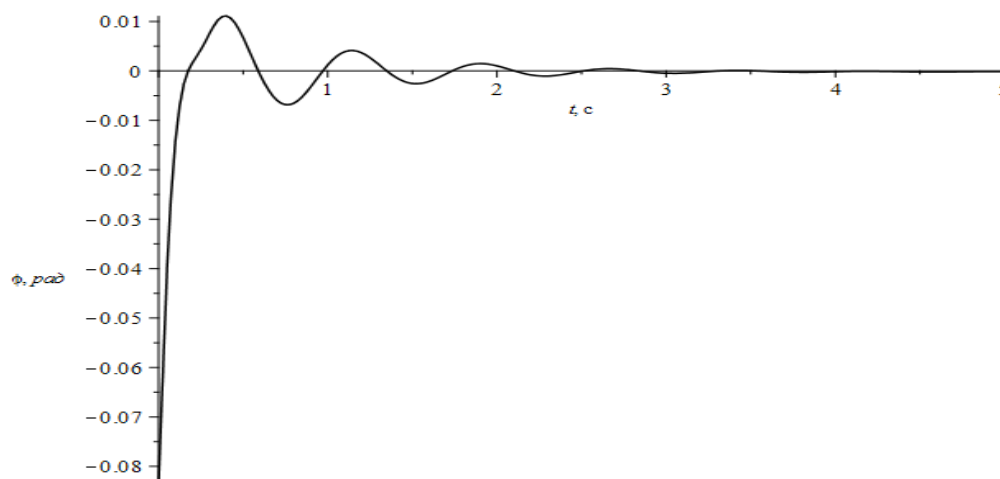


Рис. 5. Зміна кута галопування  $\psi$  першої ланки від часу

Рис. 6. Зміна кута галопування  $\phi_1$  другої ланки від часуРис. 7. Зміна кута галопування  $\phi$  першої ланки від часу

### Список використаних джерел

1. Pauwelussen J.P. XII International Heavy Truck Conference // Analysis and prevention of excessive lateral behaviour of articulated vehicles. Budapest, Hungary. 1995.
2. Кравченко А.П., Вербицкий В.Г. К вопросу анализа поворачиваемости двухзвенного автопоезда // транспортные системы: материалы VII Всероссийской научно-технической конференции. Красноярск, 25-27 ноября 2010 – новосибирск 2010 С. 358-363.
3. Сахно, В. П. Основні здобутки та напрямки досліджень стійкості руху автомобілів і автопоїздів / В. П. Сахно, В. Г. Вербицкий // Вісник Національного транспортного університету : науково-технічний збірник до 10-річчя заснування ТАУ / НТУ, Транспортна академія України ; гол. ред. М.Ф. Дмитриченко. – Київ : НТУ, 2002. – Вип. 6. – С. 67-73.
4. Жилейкин М. М., Котиев Г. О., Сарач Е. Б. Методика подбора характеристик управляемой подвески с двумя уровнями демпфирования многоосных колесных машин // Наука и образование, № 3, 2012.
5. Sayers M., Han D. A generic multibody vehicle model for simulating handling and braking. // Presented at the 1995 symposium of the international association of vehicle system dynamics, An Arbor, USA, 1995.
6. Загороднов М.І. Покращення показників маневреності і стійкості руху шарнірно-зчленованих автобусів – Київ: НТУ, 2015. 163 с.
7. Вербицкий В. Г. До аналізу побудова просторової математичної моделі дволанкового автопотяга з урахуванням вертикальної складової / Вербицкий В. Г., Мінаков В. М., Місько Є. М., Разбойников О. О. // Український журнал прикладної економіки та техніки, 2023 – Том 8. № 2. С. 165 – 172. DOI: <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2023-2-24>
8. Місько Є.М. Поліпшення показників повороткості та стійкості руху зчленованого міського автобуса особливо великого класу – Київ: НТУ, 2020. 184 с.



О.О. Чайка

Луцький національний технічний університет

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТРІЧКИ ЛЬОНУ В ПРОЦЕСІ ЇЇ ПІДБИРАННЯ

У статті наведено результати визначення параметрів стеблової стрічки льону в процесі її підбирання рулонним прес-підбирачем з комбінованим підбиральним апаратом. Наведено аналітичні залежності для визначення характеристик стрічки стебел льону з урахуванням параметрів льонозбиральної машини, якою формувалась стрічка льону на льоновищі, а також параметрів рулонного прес-підбирача та врожайності льону.

**Ключові слова:** комбінований підбиральний апарат, рулонний прес-підбирач, підбирання, транспортування, льоновище, стрічка льону, стебло льону.

O.O. Chaika

## DETERMINATION OF LINEN RIBBON PARAMETERS IN THE PROCESS OF ITS SELECTION

The world is constantly improving known and developing fundamentally new flax harvesters in order to solve the problems of improving the quality of raw flax and increasing the productivity of technological operations during flax harvesting. World-famous manufacturers of flax harvesting equipment spend a lot of money on this, because the great competition in the market is a good incentive. In practice, flax straw is transformed into flax trust in the field during laying in strips on the flax field. For quick and high-quality picking of flax straw, roll balers are used, the work of which is provided for in modern roll technologies of picking flax. The quality of the work of roll balers depends to a large extent on the quality of their picking devices, which must be adapted to changes in the parameters of the flax stem tapes. The parameters of the flax stem tapes can change due to the change in the parameters of the flax harvesting machines that form these tapes, as well as due to the change in the yield of flax and the parameters of the roll baler, the performance of tape doubling operations to increase the productivity of forming rolls from flax tapes. Therefore, determining the parameters of the flax stem tape in the process of picking it up with a roll baler with a combined pick-up device is an urgent task, the solution of which will make it possible to improve the quality of the obtained flax raw material in rolls.

**Key words:** combined picking device, roller baler, picking, transportation, flax field, flax tape, flax stem.

**Постановка проблеми.** У світі постійно відбувається вдосконалення відомих та розроблення принципово нових льонозбиральних машин з метою вирішення завдань поліпшення якості льоносировини та підвищення продуктивності технологічних операцій під час збирання льону [1-10]. Відомі у світі виробники льонозбиральної техніки витрачають на це чималі кошти, адже велика конкуренція на ринку є хорошим стимулом [3-6].

На практиці лляна солома перетворюється у лляну тресту в польових умовах під час вилежування у стрічках на льоновищі. Для швидкого та якісного підбирання лляної трести застосовують рулонні прес-підбирачі, робота яких передбачена в сучасних рулонних технологіях збирання льону. Якість роботи рулонних прес-підбирачів у значній мірі залежить від якості роботи їх підбиральних апаратів [1-10], які повинні бути адаптованими до зміни параметрів стеблових стрічок льону. Параметри стеблових стрічок льону можуть змінюватись через зміну параметрів льонозбиральних машин, які формують ці стрічки, а також завдяки зміни врожайності льону та параметрів рулонного прес-підбирача, виконання операцій подвоєння стрічок для підвищення продуктивності формування рулонів зі стрічок льону. Отже, визначення параметрів стеблової стрічки льону в процесі її підбирання рулонним прес-підбирачем з комбінованим підбиральним апаратом є актуальним завданням, вирішення якого уможливить поліпшити якість отриманої льоносировини у рулонах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Над визначенням різноманітних параметрів стеблових стрічок льону працювали багато вчених [1-10], але поряд з цим такі дослідження недостатньо висвітлені в різних джерелах інформації. У багатьох дослідженнях приймалися такі допущення, які не враховували важливі фактори впливу, а значення окремих факторів змінювались у доволі вузьких інтервалах.

**Постановка завдань.** Мета дослідження – визначити параметри стеблової стрічки льону в процесі її підбирання рулонним прес-підбирачем, який обладнаний комбінованим підбиральним апаратом.

**Викладення основного матеріалу.** Встановимо залежності для визначення параметрів стрічки льону в процесі підбирання її рулонним прес-підбирачем з комбінованим підбиральним апаратом (рис. 1).



**Рис. 1. Фото комбінованого підбирального апарата, яким обладнаний рулонний прес-підбирач для збирання стрічки льону**

Кількість стебел  $i_{ст.лв}$  на одному метрі довжини розстеленої стеблової стрічки на поверхні льоновища визначимо з рівності:

$$i_{ст.лв} = B_{з.м} \cdot i_{густ} = n_{з.м} \cdot b_{з.м} \cdot i_{густ} \quad (1)$$

де  $B_{з.м} = n_{з.м} \cdot b_{з.м}$  – ширина захвату льонобрального апарата збиральної машини (тут  $n_{з.м}$  – кількість робочих секцій льонобрального апарата, а  $b_{з.м}$  – ширина захвату однієї секції льонобрального апарата), м;

$i_{густ}$  – густина стеблостою на полі, штук/м<sup>2</sup>.

Вважаємо, що рулонний прес-підбирач здійснює поступальний, прямолінійний та рівномірний рух при збиранні стеблової стрічки льону. Під час руху льонозбирального агрегату зі швидкістю  $v_{агр}$  в м/с вздовж стеблової стрічки кількість стебел  $i_{од.ч}$ , що піднімається пальцями підбирального апарата за одиницю часу, дорівнює  $v_{агр} \cdot i_{ст.лв}$ . У пресувальну камеру прес-підбирача буде надходити за одиницю часу така ж кількість стебел. У такому випадку буде справедлива рівність:

$$i_{од.ч} = v_{агр} \cdot i_{ст.лв} = v_{нал.п} \cdot i_{к.п} \quad (2)$$

де  $v_{нал.п}$  – колова швидкість пальців комбінованого підбирального апарата, м/с;

$i_{к.п}$  – кількість стебел у стебловій стрічці довжиною 1 м, яка перебуває на кожусі підбирального апарата, штук/м.

Якісне підбирання льоносировини відбувається за показника кінематичного режиму роботи машини  $\lambda_n = v_{нал.п} / v_{агр} > 1$ , тобто  $v_{нал.п} > v_{агр}$ , а тому, з урахуванням (2), має місце нерівність  $i_{ст.лв} > i_{к.п}$ . У такому випадку щільність стеблової стрічки буде зменшуватися. Таке явище називається розпушуванням стеблової стрічки.

Маса  $m_{од.ч}$  стебел стрічки льону, що піднімається рулонним прес-підбирачем за одиницю часу, з урахуванням (2), дорівнює:

$$m_{од.ч} = m_{ст} \cdot i_{од.ч} = m_{ст.сеп} \cdot v_{агр} \cdot i_{ст.лв} = m_{ст.сеп} \cdot v_{нал.п} \cdot i_{к.п} \quad (3)$$

де  $m_{ст} = m_{ст.сеп}$  – маса одного стебла, яка рівна середньому значенню маси стебла у стрічці, кг.

Позначимо добутки  $m_{ст.сеп} \cdot i_{ст.лв}$  та  $m_{ст.сеп} \cdot i_{к.п}$ , відповідно, як  $m_{стп.лв}$  та  $m_{стп.к.п}$ , що характеризують маси одиниці довжини стрічки льону, відповідно, на поверхні льоновища та на кожусі підбирача. Як впливає з (3), маса  $m_{стп.к.п}$  одного метра довжини стеблової стрічки на

кожусі підбирача буде залежати від трьох параметрів:  $m_{стр.лв}$ ,  $v_{агр}$  та  $v_{нал.н}$ . Перший з цих параметрів буде залежати від врожайності  $q_{вр}$  льоносировини, другий параметр буде визначатися за максимально можливим значенням продуктивності роботи машини, а третій – залежатиме від характеристик приводу робочих органів комбінованого підбирального апарата рулонного прес-підбирача. Якщо врахувати (1) і залежність  $m_{стр.лв} = q_{вр} \cdot B_{з.м} / 10^2 = q_{вр} \cdot n_{з.м} \cdot b_{з.м} / 10^2$ , де  $m_{стр.лв}$  вимірюється в кг/м,  $q_{вр}$  – в ц/га, а  $B_{з.м}$  – у метрах, тоді з (3) одержимо:

$$\begin{aligned} m_{стр.к.н} &= m_{ст.сер} \cdot i_{суст} \cdot n_{з.м} \cdot b_{з.м} \cdot v_{агр} / v_{нал.н} = m_{стр.лв} \cdot v_{агр} / v_{нал.н} = \\ &= q_{вр} \cdot n_{з.м} \cdot b_{з.м} \cdot v_{агр} / (v_{нал.н} \cdot 10^2). \end{aligned} \quad (4)$$

Врожайність  $q_{вр}$  льонотрести сягає меж від 20 до 50 ц/га [1-3], а при збиранні льону льонозбиральними комбайнами ЛК-4А –  $n_{з.м} = 4$  і  $b_{з.м} = 0,38$  м [1-3], тому маса  $m_{стр.лв} \approx 0,3...1,6$  кг/м з урахуванням можливості здвоювання стеблових стрічок. Швидкість руху  $v_{агр}$  залежатиме від умов роботи агрегату (характеристик розстелених стеблових стрічок та поверхні льоновища) і змінюватиметься приблизно в межах від 5 до 12 км/год (або від 1,39 до 3,33 м/с). Швидкість  $v_{нал.н}$  приблизно дорівнює 3,0 м/с.

**Висновки.** Як бачимо з отриманих результатів аналізу, на кожусі підбирача маса  $m_{стр.к.н}$  одного метра довжини стрічки льону може сягати значень від 0,14 до 1,78 кг/м. З урахуванням цього аналізу будемо досліджувати процес підбирання стеблової стрічки комбінованим підбиральним апаратом. Цьому важливому завданню будуть присвячені наступні дослідження.

#### Список використаних джерел

1. Дідух В. Ф., Ковалишин С. Й., Дударев І. М., Тараймович І. В. Технології вирощування, збирання та переробки льону-довгунця : навч. посіб. Львів : Львівський НАУ, 2013. 324 с.
2. Шейченко В. О., Хайліс Г. А. Теорія і розрахунок апаратів для підбирання та обертання : монографія. Ніжин : Видавець ПП Лисенко М. М., 2014. 240 с.
3. Толстушко Н. О., Хайліс Г. А., Толстушко М. М. Рулонні прес-підбирачі : монографія. Луцьк : ІВВ Луцького НТУ, 2018. 164 с.
4. Dehondt Technologies. La passion le lin. URL: <http://www.dehondt-lin.com/>.
5. Depoortere. Machines de récolte. URL: <https://www.depoortere.be/Machines-de-recolte>.
6. Union. Machines. URL: <https://www.unionmachines.com/nl/machines>.
7. Чайка О. О., Толстушко Н. О., Толстушко М. М., Сацюк В. В., Булік Ю. В. Аналіз конструкцій та роботи підбиральних апаратів машин для збирання льону. Наукові нотатки. Міжвузівський збірник наук. праць. 2021. Вип. 71. С. 348 – 352.
8. Чайка О. О., Толстушко Н. О., Толстушко М. М. Аналіз процесу підбирання стеблової стрічки льону на льоновищі. Наукові нотатки. Міжвузівський збірник наук. праць. 2022. Вип. 73. С. 275 – 278.
9. Чайка О. О. Аналіз взаємодії стеблової стрічки льону з криволінійним пальцем комбінованого підбирача. Наукові нотатки. Міжвузівський збірник наук. праць. 2022. Вип. 74. С. 161 – 164.
10. Чайка О. О., Толстушко Н. О. Дослідження роботи комбінованого підбирача стрічки стебел льону. Інноваційні технології в АПК : зб. тез доп. ІХ Міжнар. наук.-практ. конф., м. Луцьк, 7-8 червня 2023 р. Луцьк, 2023. С. 198–199.

**Рецензент** Дідух Володимир Федорович, доктор технічних наук, професор кафедри аграрної інженерії імені професора Г.А. Хайліса Луцького національного технічного університету, Заслужений діяч науки і техніки України.

## 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 невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; формулювання цілей статті; виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки з даного дослідження і перспективи подальших досліджень у даному напрямку.

1. **Статтю можна подавати українською або англійською мовою.** Стаття повинна бути набрана у текстовому редакторі не нижче MS WORD 97/03 і надрукована тільки на лазерному або струйному принтері на білих листах формату А4 (297x210 мм). Нумерацію сторінок не виконувати. Обсяг статті від 4-9 сторінок.
2. Параметри сторінки: верхнє, нижнє та 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 lane. 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:****ШБ, 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 № 12 від 30 червня 2023 р.

Свідоцтво Міністерства юстиції України про державну реєстрацію:  
Серія КВ №15901-4373ПР від 13.11.2009 р.

**ISSN: 24-15-39-66**

Редакційно-видавничий відділ Луцького національного технічного університету  
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75

© Луцький національний технічний університет, 2023 р.