

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
ІНІ «ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ»

УКРАЇНСЬКИЙ ЖУРНАЛ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

№ 4 (022)
липень – серпень 2024

Дніпро 2024

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Головний редактор Микола САВИЦЬКИЙ, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро
Заступник головного редактора Владислав ДАНИШЕВСЬКИЙ, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро
Відповідальний секретар Олена ТИМОШЕНКО, к-т техн. наук, ПДАБА, Дніпро
Випусковий редактор Олена ТИМОШЕНКО, к-т техн. наук, ПДАБА, Дніпро

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

А. С. Беліков, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. М. М. Біляєв, д-р техн. наук, Український державний університет науки і технологій, Дніпро. В. І. Большаков, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. В. Є. Волкова, д-р техн. наук, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро. В. М. Волчук, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. С. І. Губенко, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. В. М. Дерев'яно, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. Ю. О. Кірічек, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. Т. С. Кравчуновська, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. Ю. І. Криворучко, д-р арх., Національний університет «Львівська політехніка», Львів. О. О. Лапшин, д-р техн. наук, Криворізький національний університет, Кривий Ріг. В. П. Мироненко, д-р арх., Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, Харків. М. М. Налісько, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. Т. Д. Нікіфорова, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. В. І. Проскураков, д-р арх., Національний університет «Львівська політехніка», Львів. В. Л. Седін, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. В. В. Товбич, д-р арх., Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ. О. В. Харлан, к-т арх., ПДАБА, Дніпро. С. В. Шатов, д-р техн. наук, ПДАБА, Дніпро. Едіт Барна, к-т техн. наук, Будапештський технічно-економічний університет, Будапешт (Угорщина). Анна Бач, д-р арх., Вроцлавський університет, Вроцлав (Польща). Александрс Корякінс, д-р техн. наук, Ризький технічний університет, Рига (Латвія). В. І. Куксенко, к-т техн. наук, Управління з атомної енергетики Великобританії, Оксфорд (Великобританія). Богуслав Подхалянський, д-р арх., Краківський політехнічний інститут імені Тадеуша Костюшка, Краків (Польща).

Науково-практичний журнал входить до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б»), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук та архітектури за спеціальностями 132, 191, 192, 194, 263 згідно з наказом Міністерства освіти і науки України від 09.02.2021 № 157 (Додаток 3).

Свідоцтво про Державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації – серія КВ № 24586-14526 ПР – видане Міністерством юстиції України 09 жовтня 2020 р.

Засновник та видавець Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» (код за ЄДРПОУ 02070772).

Виходить 6 разів на рік.

Рекомендовано до друку вченою радою «Українського університету науки та технологій» протокол № 1 від 30.08.2024.

Сайт видання <http://ua|cea.pgasa.dp.ua>

Наукометричні бази та електронні бібліотеки, в яких зареєстрований науково-практичний журнал: Інформаційно-аналітичні системи: InfoBase Index (IBI Factor = 3,96), Universal Impact Factor, Open Academic Journal Index, Directory, Indexing of International Research Journals (CiteFactor). Електронні бібліотеки та пошукові системи: Bielefeld Academic Search Engine (BASE), OCLC WorldCat, Open Journal Systems, Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського.

ISSN 2710-0367 (Print)
2710-0375 (Online)

Художній і технічний редактор Сергій МОЇСЕСНКО
Перекладач Олена ЛЯПЧЕВА
Редактор та коректор Валентина МАЛОВИК

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES
ESI “PRYDNIPROVSKA STATE ACADEMY
OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE”**

UKRAINIAN JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE

SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL

№ 4 (022)
July – August 2024

Dnipro 2024

EDITORIAL STAFF :

<i>Chief Editor</i>	Mykola SAVYTSKYI, Doctor of Engineering Science, <i>PSACEA, Dnipro</i>
<i>Deputy Chief Editor</i>	Vladyslav DANISHEVSKYI, Doctor of Engineering Science, <i>PSACEA, Dnipro</i>
<i>Executive Secretary</i>	Olena TYMOSHENKO, Candidate of Engineering Science, <i>PSACEA, Dnipro</i>
<i>Executive Editor</i>	Olena TYMOSHENKO, Candidate of Engineering Science, <i>PSACEA, Dnipro</i>

MEMBERS OF EDITORIAL STAFF :

A. S. Belikov, Doctor of Engineering Science, *Prydniprovaska State Academy of Civil Engineering and Architecture (PSACEA), Dnipro*. M. M. Biliaiev, Doctor of Engineering Science, *Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro*. V. I. Bolshakov, Doctor of Engineering Science, *PSACEA, Dnipro*. V. Yev. Volkova, Doctor of Engineering Science, *Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro*. V. M. Volchuk, Doctor of Engineering Science, *PSACEA, Dnipro*. S. I. Gubenko, Doctor of Engineering Science, *PSACEA, Dnipro*. V. M. Derevianko, Doctor of Engineering Science, *PSACEA, Dnipro*. Yu. O. Kirichek, Doctor of Engineering Science, *PSACEA, Dnipro*. T. S. Kravchunovska, Doctor of Engineering Science, *PSACEA, Dnipro*. Yu. I. Kryvoruchko, Doctor of Architecture, *National University "Lviv Polytechnic", Lviv*. O. O. Lapshyn, Doctor of Engineering Science, *Kyryvi Rih National University, Kyryvi Rih*. V. P. Myronenko, Doctor of Architecture, *O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv*. M. M. Nalysko, Doctor of Engineering Science, *PSACEA, Dnipro*. T. D. Nikiforova, Doctor of Engineering Science, *PSACEA, Dnipro*. V. I. Proskuriakov, Doctor of Architecture, *National University "Lviv Polytechnic", Lviv*. V. L. Siedin, Doctor of Engineering Science, *PSACEA, Dnipro*. V. V. Tovbych, Doctor of Architecture, *Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kyiv*. O. V. Kharlan, Candidate of Architecture, *PSACEA, Dnipro*. S. V. Shatov, Doctor of Engineering Science, *PSACEA, Dnipro*. Edit Barna, PhD, *Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary*. Anna Bać, Doctor of Architecture, *Wroclaw University of Science and Technology, Wroclaw, Poland*. Aleksandrs Korjakins, Doctor of Engineering Science, *Riga Technical University, Riga, Latvia*. V. I. Kuksenko, PhD, Candidate of Engineering Science, *UK Atomic Energy Authority, Oxford, UK*. Boguslaw Podhalyanski, Doctor of Architecture, *Cracow University of Technology, Cracow (Poland)*.

Scientific-Practical Journal is included in	List of scientific professional publications of Ukraine (category "B"), where the results of dissertations for the degree of Doctor and Candidate of Engineering Sciences and Architecture (by specialty 132, 191, 192, 194, 263) can be published according to the Resolution of the Ministry of Science and Education of Ukraine No. 157 dated 09.02.2021 (Appendix no. 3).
Certificate of State Registration	of the Print Media – Series KB No. 24586-14526 ПІП – issued by the Ministry of Justice of Ukraine dated October 09, 2020.
Founder & Publisher	State Higher Education Institution "Prydniprovaska State Academy of Civil Engineering and Architecture". Issued 6 times a year.
Recommended for publication by	Academic Board of the Ukrainian State University of Science and Technologies, no. 1 from 30.08.2024
Journal website	http://uajcea.pgasa.dp.ua
Placement of the scientific-practical journal in the international scientometric databases and e-libraries	Information and analytical systems: InfoBase Index (IBI Factor = 3.96), Universal Impact Factor, Open Academic Journal Index, Directory Indexing of International Research Journals (CiteFactor). <i>Electronic Libraries and search engines</i> : Bielefeld Academic Search Engine (BASE), OCLC WorldCat, Open Journal Systems, Vernadsky National Library of Ukraine.
ISSN	2710-0367 (Print) 2710-0375 (Online)

Art & Technical Editor Serhii MOISEIENKO
Translator Olena LIAPICHEVA
Editor & Proofreader Valentyna MALOVYK

У ЦЬОМУ НОМЕРІ

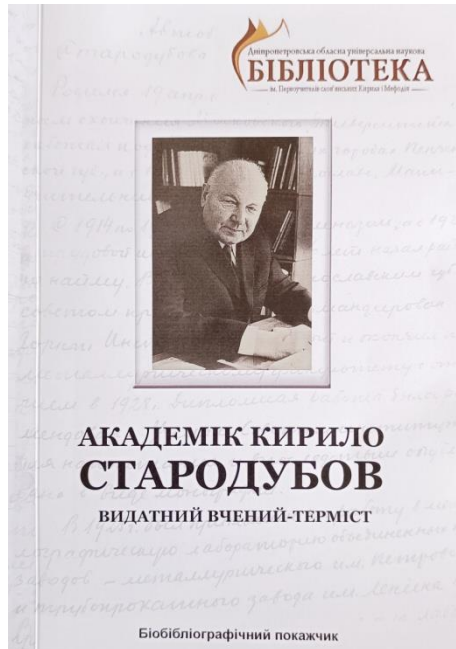
Інформаційний лист.....	7
Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Балаханова Т. В., Сафронова О. А., Дементьева Ж. А. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ СТАЛЕЙ ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ ОСЕЙ НА РІВНОМІРНІСТЬ КІНЦЕВОЇ МІКРОСТРУКТУРИ.....	8
Вахрушева В. С., Грузін Н. В., Тютєрев І. А. ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПЛАСТИЧНОСТІ ВИСОКОБОРИСТОЇ КОРОЗІЙНОСТІЙКОЇ СТАЛІ В ПРОЦЕСІ ГАРЯЧОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ТРУБ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ДЛЯ РОЗМІЩЕННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА.....	15
Губенко С. І., Парусов Е. В., Тютєрев І. А. ОСОБЛИВОСТІ УТВОРЕННЯ ТРІЩИН У ГЕТЕРОФАЗНИХ ВКЛЮЧЕННЯХ ТИПУ «ЕВТЕКТИКА ВКЛЮЧЕННЯ – МАТРИЦЯ».....	26
Дейнеко Л. М., Бутенко А. О., Кабак А. І., Шпортко Ю. В., Пінчук В. Л., Гребьонкіна Л. Г. РОЗРОБКА ІННОВАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ГАРТІВНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗМІЦНЮВАЛЬНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛОВИРОБІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПСЕВДОЗРІДЖЕНИХ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ (ЧАСТИНА 1).....	33
Дрозд А. А., Дехта Т. М. РОЗРОБКА СУХИХ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ НА ОСНОВІ РЕДИСПЕРСІЙНИХ ПОРОШКІВ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГПСОВИХ СУМІШЕЙ.....	48
Живцова Л. І. БЕЗПЛОТНІ ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОБСТЕЖЕННЯ МОСТОВИХ СПОРУД.....	54
Коваленко Є. А., Остапенко Л. С., Харченко К. С., Суворова Т. О., Полюшкін С. С. ПЕТРИКІВКА – ОСЕРЕДОК УКРАЇНСЬКОГО НАРОДНОГО ДЕКОРАТИВНОГО РОЗПИСУ.....	60
Козяр Н. М., Кириченко О. В., Романюк І. П., Ващенко В. А., Бало Я. В., Дядюшенко О. О. НАУКОВО ОБҐРУНТОВАНІ РОЗРАХУНКОВІ МЕТОДИ ТА БАЗИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ ІЗ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ПЕРЕДЧАСНИХ ПОЖЕЖОВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ СПРАЦЬОВУВАНЬ ПІРОТЕХНІЧНИХ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ НІТРАТНО-МЕТАЛІЗОВАНИХ СУМІШЕЙ В УМОВАХ ЗОВНІШНІХ ТЕРМОДІЙ.....	69
Королянчук Д. Г., Овчаренко В. І., Гірін О. Б. СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОПОКРИТТІВ СПЛАВОМ Ni–P ІЗ ПІДВИЩЕНОЮ КОРОЗІЙНОЮ СТІЙКІСТЮ.....	89
Попова К. В. ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ ЗАЛЕЖНО ВІД ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ В СПЛАВІ 40КХНМ.....	94
Рослик І. Г., Носко О. А., Ковзів А. М., Аюпова Т. А., Аюпов О. А. ЕВОЛЮЦІЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕКСТРЕМАЛЬНО ДЕФОРМОВАНИХ СПЕЧЕНИХ МІДНИХ НАНОКОМПЗИТИВ.....	101
Рудін А. А. В'ЯЖУЧІ ІЗ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ ВІДХОДІВ ВУГЛЕЗБАГАЧЕННЯ ДЛЯ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ У ЗВЕДЕННІ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ МЕТОДОМ 3D-ДРУКУ.....	107
Соколан Ю. С. ПРОБЛЕМАТИКА ПРОВЕДЕННЯ АНАЛІЗУ ВИРОБНИЧОГО ТРАВМАТИЗМУ В ГАЛУЗІ ЛЕГКОЇ ТА ТЕКСТИЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ.....	111
Трегуб О. В., Ландо Є. О., Балашова Ю. Б., Ішутіна Г. С., Самко Б. І. МЕТОДИКА БУДІВЕЛЬНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МІСЬКИХ ВУЛИЦЬ ТА ДОРІГ.....	117
Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Калінін О. А., Никитинський А. В. ВПЛИВ ВИДУ ОБРОБКИ РЕЦИКЛІНГОВИХ ЗАПОВНЮВАЧІВ НА МІЦНІСТЬ БЕТОНУ.....	126
Узлов К. І., Кімстач Т. В., Реп'ях С. І., Ковзів А. М., Ремез О. А. ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ЛИВАРНОЇ ТРИБОТЕХНІЧНОЇ БРОНЗИ BrO3A3.....	134
Усов В. В., Шкатуляк Н. М., Іовчев С. І. ПАРАМЕТРИ ТЕКСТУРИ КЕРНСА ТА ВЛАСТИВОСТІ ГЕКСАГОНАЛЬНИХ МОНО- ТА ПОЛІКРИСТАЛІВ.....	142
Юрченко Є. Л., Коваль О. О., Тимофеев В. В., Однобурцев Р. О. ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ОРІЄНТАЦІЇ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ.....	155

CONTENT

Informative letter.....	7
Babachenko O.I., Kononenko G.A., Balakhanova T.V., Safronova O.A., Dementieva Zh.A. STUDY OF THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF RAILWAY AXLE STEEL ON THE UNIFORMITY OF THE FINAL MICROSTRUCTURE.....	8
Vakhrusheva V.S., Grusin N.V., Tiutieriev I.A. EVALUATION OF TECHNOLOGICAL PLASTICITY OF HIGH BORON CORROSION-RESISTANT STEEL DURING HOT DEFORMATION OF PIPES USED FOR SPENT NUCLEAR FUEL STORAGE.....	15
Gubenko S.I., Parusov E.V., Tiutieriev I.A. PECULIARITIES OF CRACK FORMATION IN HETEROPHASE INCLUSIONS OF THE “EUTECTICS OF INCLUSION – MATRIX” TYPE.....	26
Deineko L.M., Butenko A.O., Kabak A.I., Shportko Yu.V., Pinchuk V.L., Hrebonkina L.G. DEVELOPMENT OF INNOVATIVE TECHNOLOGY AND HARDENING EQUIPMENT FOR THE IMPLEMENTATION OF HARDENING HEAT TREATMENT OF METAL PRODUCTS USING FLUIDIZED BULK MATERIALS (PART 1).....	33
Drozd A.A., Dehta T.M. DEVELOPMENT OF DRY BUILDING MIXTURES BASED ON REDISPERSIBLE POWDER FOR REGULATING THE PROPERTIES OF PLASTER MIXTURES.....	48
Zhyvtsova L.I. UNMANNED AERIAL VEHICLES AS AN EFFECTIVE TOOL IN THE INSPECTION OF BRIDGE STRUCTURES.....	54
Kovalenko Ye.A., Ostapenko L.S., Kharchenko K.S., Suvorova T.O., Poliushkin S.S. THE INFLUENCE OF THE DEVELOPMENT OF COMPUTER TECHNOLOGIES ON THE PROCESS OF ARCHITECTURAL DESIGN.....	60
Koziar N.M., Kyrychenko O.V., Romaniuk I.P., Vashchenko V.A., Balo Ya.V., Diadiushenko O.O. SCIENTIFICALLY BASED CALCULATION METHODS AND EXPERIMENTAL DATA BASES FOR THE PREVENTION OF PREMIUM FIRE EXPLOSIONS AND UNSAFE EXPLOSIONS OF PYROTECHNIC MULTICOMPONENT NITRATE-METALLIZED MIXTURES UNDER EXTERNAL THERMAL.....	69
Korolyanchuk D.G., Ovcharenko V.I., Girin O.B. STRUCTURE FORMATION OF Ni–P ALLOY ELECTROCOATINGS WITH INCREASED CORROSION RESISTANCE.....	89
Popova K.V. PREDICTION OF STRENGTH DEPENDING ON THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION IN THE 40KXHM ALLOY.....	94
Roslyk I.G., Nosko O.A., Kovzik A.M., Aiupova T.A., Aiupov O.A. EXTREMELY DEFORMED SINTERED COPPER NANOCOMPOSITES STRUCTURE AND PROPERTIES EVOLUTION.....	101
Rudin A.A. BINDERS FROM SECONDARY RAW MATERIALS OF COAL ENRICHMENT WASTE FOR CONSTRUCTION OBJECT ERECTION USING THE 3D PRINTING METHOD.....	107
Sokolan Yu.S. PROBLEMS OF ANALYZING OCCUPATIONAL INJURIES IN THE LIGHT AND TEXTILE INDUSTRIES.....	111
Tregub O.V., Lando Ye.O., Balashova Yu.B., Ishutina H.S., Samko B.I. METHODOLOGY OF BUILDING INFORMATION MODELING OF URBAN STREETS AND ROADS.....	117
Trykoz L.V., Zinchenko O.S., Kalinin O.A., Nykytynskyi A.V. IMPACT THE TREATMENT TYPES OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATES ON CONCRETE STRENGTH.....	126
Uzlov K.I., Kimstach T.V., Reptyakh S.I., Kovzik A.M., Remez O.A. FOUNDRY TRIBOTECHNICAL BRONZE BrO3A3 CORROSION RESISTANCE INVESTIGATION.....	134
Usov V.V., Shkatulyak N.M., Iovchev S.I. KEARNS TEXTURE PARAMETERS AND PROPERTIES OF HEXAGONAL MONO- AND POLYCRYSTALS.....	142
Yurchenko Ye.L., Koval O.O., Timofeev V.V., Odnoburtsev R.O. SELECTION OF OPTIMAL SOLAR PANEL ORIENTATION PARAMETERS.....	155

Привітання учасників 34-тої науково-практичної конференції «Стародубовські читання-2024», яка присвячена 120-річчю із дня народження академіка НАНУ Кирила Федоровича Стародубова.

На честь ювілею академіка К. Ф. Стародубова Дніпропетровська обласна бібліотека випустила новий бібліопоказчик, присвячений діяльності академіка. У бібліотеці відбулась презентація, в якій взяли участь науковці закладів вищої освіти міста Дніпро.



Шановні колеги! Дорогі друзі!

Вітаю учасників 34-тої конференції «Стародубовські читання-2024», яка присвячена 120-річчю з дня народження видатного українського вченого, великого патріота та громадського діяча, академіка Академії наук України Кирила Федоровича Стародубова. Вважаю символічним, що наше наукове зібрання, незважаючи на всі труднощі та загрози воєнного часу,

відбувається. Ми сильні, незламні і, вирішуючи сучасні наукові проблеми, доводимо нашу віру в Перемогу і світле майбутнє Української держави. Бажаю витримки, терпіння, нових пошуків, нових звершень.

Голова оргкомітету конференції,
д. т. н, проф.
Володимир БОЛЬШАКОВ

УДК 662.326:624.98

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.08.1069

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ СТАЛЕЙ ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ ОСЕЙ НА РІВНОМІРНІСТЬ КІНЦЕВОЇ МІКРОСТРУКТУРИ

БАБАЧЕНКО О. І.¹, докт. техн. наук, с. н. с.,
КОНОНЕНКО Г. А.², докт. техн. наук, ст. досл.,
БАЛАХАНОВА Т. В.³, канд. техн. наук, с. н. с.,
САФРОНОВА О. А.^{4*}, с. н. с.,
ДЕМЕНТЬЄВА Ж. А.⁵, н. с.

¹ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790-05-14, e-mail: a_babachenko@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4710-0343

² Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-7446-4105

³ Відділ термічної обробки металу для машинобудування, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: tatja.balakhanova@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2493-218X

^{4*} Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: safronovaaa77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4032-4275

⁵ Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 790-05-14, e-mail: okc.testcenter@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-02X8-06X1

Анотація. *Актуальність роботи.* Для сучасного залізничного транспорту актуальним завданням стало збільшення міцності та службової надійності деталей рухомого складу, зокрема, залізничних осей. Відомо, що неоднорідність розподілу хімічних елементів у структурі вуглецевих сталей конструкційного класу утворюється переважно під час їх кристалізації та в подальшому може впливати на кінцевий структурний стан та комплекс властивостей. **Мета** – дослідження впливу хімічного складу сталей для залізничних осей на рівномірність структури. **Методика.** В лабораторних умовах виготовлено дослідні зливки різного хімічного складу з різною кількістю та відношенням основних хімічних елементів у межах марки ОС та EA1N. Зеренну структуру досліджували на мікрошліфах після травленням ніталем. Хімічну неоднорідність («сліди» дендритної структури) – розподіл хімічних елементів у мікроструктурі зразків литої заготовки виявляли травленням у гарячому розчині пікрату натрію. Металографічний аналіз виконано на світловому (оптичному) мікроскопі «Axiovert 200 M MAT» виробництва фірми «Carl Zeiss». **Наукові результати.** Визначено вплив зміни хімічного складу вуглецевої сталі, яка призначена для виготовлення залізничних осей, на особливості формування феритно-перлітної неоднорідності та різнозернистості. Показано, що в зразках сталей, які відповідають марці EA1N з меншим вмістом вуглецю, розподіл фаз нерівномірний. Наведено пояснення механізму формування такої структури з погляду двох теорій. У зразках сталей із середнім вмістом вуглецю, що відповідають сталі марки ОС, розподіл перлітної та феритної фази більш рівномірний, встановлено зв'язок розміру та ступінь затемнення перлітних ділянок із порядком колишніх дендритних гілок. За результатами кількісного аналізу кінцевої зеренної структури встановлено, що сталь ОС із середнім вмістом вуглецю за різного відношення Mn/Si має більш рівномірну зеренну структуру. Сталь EA1N із меншим вмістом вуглецю має виражену різнозернистість, у разі збільшення відношення Mn/Si найбільший максимум залежності розподілу зміщується до більшого розміру (меншого номера) зерна. **Практичні результати.** Підвищення однорідності кінцевої мікроструктури сприяє підвищенню показників пластичності та в'язкості сталі, що безпосередньо впливає на надійність та довговічність залізничних осей.

Ключові слова: вуглецева сталь; хімічний склад; неметалеві включення; розмір зерна; перліт; ферит; ліквіація

STUDY OF THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF RAILWAY AXLE STEEL ON THE UNIFORMITY OF THE FINAL MICROSTRUCTURE

BABACHENKO O.I.¹, *Dr Sc. (Tech.), Sen. Res.*,
KONONENKO G.A.², *Dr Sc. (Tech.), Sen. Res.*,
BALAKHANOVA T.V.³, *Cand. Sc. (Tech.), Sen. Res.*,
SAFRONOVA O.A.^{4*}, *Sen. Res.*,
DEMENTIEVA Zh.A.⁵, *Res.*

¹ Department of Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems, Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubov K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: a_babachenko@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-4710-0343

² Department of Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems, Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubov K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: perlit@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-7446-4105

³ Department of Heat Treatment of Metal for Mechanical Engineering, Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubov K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: tatja.balakhanova@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-2493-218X

^{4*} Department of Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems, Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubov K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: safronovaaa77@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-4032-4275

⁵ Department of Structural Steels' Deformation and Heat Treatment Problems, Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine, 1, Ak. Starodubov K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 790-05-14, e-mail: okc.testcenter@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-02X8-06X1

Abstract. The relevance of the work. For modern railway transport, increasing the strength and operational reliability of rolling stock parts, in particular railway axles, is an urgent task. It is known that the inhomogeneity of the distribution of chemical elements in the structure of structural grade carbon steels is formed mainly during their crystallization and may subsequently affect the final structural state and set of properties. **Purpose.** Study of the influence of the chemical composition of steels for railway axles on the uniformity of the structure. **Methodology.** Experimental ingots of different chemical compositions with different amounts and ratios of the main chemical elements within the range of OS and EA1N were produced in laboratory conditions. The grain structure was studied on microsections after etching with nital. Chemical inhomogeneity ("traces" of the dendritic structure) – the distribution of chemical elements in the microstructure of cast samples was detected by etching in a hot solution of sodium picrate. Metallographic analysis was performed on a light (optical) microscope "Axiovert 200 M MAT" manufactured by "Carl Zeiss". **The results.** The effect of changing the chemical composition of carbon steel, which is intended for the manufacture of railway axles, on the peculiarities of the formation of ferrite-pearlite heterogeneity and grain size is determined. It is shown that in samples of steels corresponding to the EA1N brand with a lower carbon content, the distribution of phases is uneven. The mechanism of formation of such a structure is explained from the point of view of two theories. In samples of steels with an average carbon content, which correspond to steel of the OS grade, the distribution of the pearlite and ferrite phases is more uniform, the relationship between the size and the degree of darkening of the pearlite areas with the order of the former dendritic branches has been established. Based on the results of the quantitative analysis of the final grain structure, it was established that OS steel with an average carbon content at different Mn/Si ratios has a more uniform grain structure. EA1N steel with a lower carbon content has a pronounced grain size, with an increase in the Mn/Si ratio, the largest maximum of the dependence of the distribution shifts to a larger grain size (smaller number). **Practical results.** Increasing the homogeneity of the final microstructure contributes to increasing the plasticity and viscosity of steel, which directly affects the reliability and durability of railway axles.

Keywords: *carbon steel; chemical composition; non-metallic inclusions; grain size; pearlite; ferrite; liquation*

Вступ. Для сучасного залізничного транспорту властиве поступове зростання швидкостей руху, перехід на довгі тягові плечі та безупинні пробіги, збільшення ваги потягів і поліпшення використання вагонів. Швидкість руху пасажирських поїздів на магістральних напрямках досягає

120–140 км/год., а на деяких лініях – до 160 км/год., вантажних поїздів – до 80–100 км/год. За рахунок підвищення вантажності вагонів підвищується фактичне навантаження на вісь, а збільшення швидкості спричинює зростання динамічного впливу колії та рухомого

складу, а також числа зміни циклів напружень в одиницю часу, що викликає підвищення напружень у деталях вагонів і локомотивів, а також рейкового шляху. Все це визначає необхідність збільшення міцності та службової надійності вузлів і деталей рухомого складу.

Найважливішими завданнями вчених-металургів сьогодні, в умовах ринкової економіки і жорсткої конкуренції, стали підвищення якості та забезпечення споживачів надійною і довговічною металопродукцією, а також підтримка вітчизняних металургійних підприємств. У рамках цієї науково-дослідницької роботи ці завдання можуть бути вирішені стосовно такої металопродукції відповідального призначення, як осі для рухомого складу залізниць.

Як уже відомо, неоднорідність розподілу хімічних елементів у структурі вуглецевих сталей конструкційного класу утворюється переважно за їх кристалізації, під час твердіння злитка або безперервною заготовки.

Мета роботи – дослідження впливу хімічного складу сталей на рівномірність структури осевих заготовок

Методика. У роботі використовували лабораторну індукційну плавильну піч, як найбільш підходящий для цієї мети агрегат, до складу якої входять плавильний модуль ІПЕ-0.01 і генератор ВТГ-20-22. Її елементи розміщені в умовах лабораторної бази ІЧМ (рис. 1).



Рис. 1. Загальний вигляд експериментальної установки в умовах лабораторної бази ІЧМ

Мікроскопічний аналіз виконано на спеціально підготовленій шліфованій та полірованій до дзеркального блиску поверхні (шліфі) досліджуваних зразків методом хімічного травлення. Шліфування виконували на спеціальній шліфувальній машині, на п'яти номерах шліфувального паперу.

Хімічну неоднорідність («сліди» дендритної структури) – розподіл хімічних елементів у мікроструктурі зразків литої заготовки виявляли травленням у гарячому розчині пікрату натрію. Цей реактив виявляє хімічну мікронеоднорідність кремнію (дендритну ліквіацію, твердофазну сегрегацію), приводячи до потемніння ділянок з підвищеним його вмістом [1–2].

Металографічний аналіз виконано на світловому (оптичному) мікроскопі «Axiovert 200 M MAT» виробництва фірми «Carl Zeiss».

Основні результати досліджень. Існує залежність між відмінностями у швидкостях зароджування фериту/перліту в смугах різного мікрохімічного складу [3]. За різниці швидкості зароджування (перетворення) нижче ніж 6 % утворення феритно-перлітних смуг може бути попередженим [4].

У випадку, коли температура відпалу перевищує мінімальну температуру переходу A_1 , вуглець повинен дифундувати на критичній відстані, більшій, ніж половина ширини зони з високою температурою A_3 .

За температур відпалу нижче мінімальної температури переходу A_1 слід нехтувати фактором зростання фериту при утворенні мікроструктурних смуг. Моделювання сегрегації розчинених речовин на границі зерен і границі розділу аустеніт–ферит у залізі на основі перших принципів підтверджує вплив основних легувальних елементів (наприклад, Nb, Mo і Mn) на зростання зерна, рекристалізацію і фазове перетворення в сталях [5]. У праці [6] вивчали схильність до ліквіації елементів за кристалізації сталі 45. Показано, що середні рівноважні

коефіцієнти розподілу C, Si, Mn, P і S складають 0,307, 0,737, 0,695, 0,18 і 0,021 відповідно. Тобто S має найбільшу тенденцію до сегрегації, за нею послідовно йдуть P і C.

Показано [7], що гетерогенний розподіл кремнію (Si), марганцю (Mn) і хрому (Cr), пов'язаний з мікросегрегацією в процесі лиття, має великий вплив на кінцеву мікроструктуру. Перетворення починається в дендритних зонах, де концентрація Mn нижча, а потім поширюється на міждендритні. Оскільки Mn знижує активність вуглецю, міждендритні області з більш високою концентрацією Mn збагачуються вуглецем (C), і, таким чином, ці зони містять більшу кількість залишкового аустеніту і мартенситу, що викликає неоднорідність мікроструктури.

У статті [8] наведено підхід до проектування сплаву (так званих сталей з «нейтралізованою сегрегацією») для усунення смугастості другої фази шляхом використання спільної сегрегації як аустенітних, так і феритних стабілізаторів для зменшення локальної мінливості стабільності другої фази. Для зменшення впливу локальної стабілізації складу від Mn на аустеніт, що спричинює утворення двофазної структури, рівні Mn були знижені в модифікованій сталевій композиції. Кремній був ідентифікований як відповідне легувальне доповнення для

компенсації більш низьких рівнів Mn для досягнення аналогічного рівня зміцнення твердого розчину.

Відносні рівні Si і Mn, необхідні в модифікованій сталі, були визначені врівноваженням стабілізації фериту із Si і стабілізації аустеніту з Mn. Нова композиція для отримання «нейтралізованих» сталей має нижчий вміст Mn і більш високий вміст Si, зберігаючи при цьому вміст C (для отримання такого ж рівня зміцнення сталей як з перлітною фазою (у разі отримання гарячекатаного матеріалу) і з мартенситом (у кінцевому термообробленому матеріалі).

До того експериментальна сталь містила додатково Cr (для поліпшення прогартовуваності) і Nb для додаткового модифікування композиції. В сталі спостерігали рівномірний розподіл другої фази як у гарячекатаному, так і загартовуваному стані без утворення структурної смугастості. Однак у цій роботі не розглядали ані зміну макроструктури, ані розподіл та тип наявних неметалевих включень.

У процесі лиття поступово виникають такі дефекти як неметалеві включення, усадна порожнина і пористість, макросегрегація. Макронеоднорідність має серйозний вплив на кінцеву якість продукту і стає більш впливовою зі збільшенням розміру зливка.

Таблиця 1

Хімічний склад дослідних плавів

№ п/п	Марка сталі	Вміст хімічних елементів, % ваг.					
		C	Si	Mn	Mn/Si	P	S
1	EA1N	0,36	0,34	0,63	1,85	0,019	0,025
2	(EN 13261)	0,39	0,12	0,6	5	0,021	0,024
3	OC	0,52	0,42	0,69	1,64	0,012	0,006
4	(ДСТУ 31334)	0,49	0,22	0,95	4,32	0,021	0,032

Тому для з'ясування впливу зміни хімічного складу вуглецевої сталі, яка призначена для виготовлення залізничних осей, на особливості формування феритно-перлітної неоднорідності та різнозернистості, а також визначення основних механізмів, були виготовлені

дослідні зливки зі змінюваним хімічним складом у межах марочного з двох марок сталі, призначених для виготовлення залізничних осей. Хімічний склад дослідних зливок наведено в таблиці 1

Від донної частини дослідних зливок відібрали проби висотою 80 мм.

У лабораторних умовах проведено гарячу пластичну деформацію дослідних зливоків шляхом осаджування на величину 50 %. Температура нагрівання проб під гарячу деформацію дорівнювала 1 240 °С.

Наступним етапом проведення експериментальної частини дослідження була реалізація певних режимів металообробки, які б із великою достовірністю моделювали проведення нормалізації чорнових осей з даних марок сталі. Для проведення нормалізації дослідних зливоків важливо було забезпечити їх рівномірний нагрів і рівномірне подальше охолодження на теплому спокійному повітрі. Температуру нагрівання підібрано відповідно до марки сталі і хімічного складу дослідних зливоків (у діапазоні 820–850 °С).

Мікроструктурним аналізом встановлено, що дослідні зразки 1 та 2 (рис. 2) після проведення нормалізації, що відповідають хімічному складу EA1N, розподіл фаз нерівномірний. Такий розподіл фаз можна пояснити з погляду двох теорій. Неметалеві включення у вуглецевих сталях представлені основними двома групами – кисневі та сульфідні. Розташовані вони у міждендритному просторі.

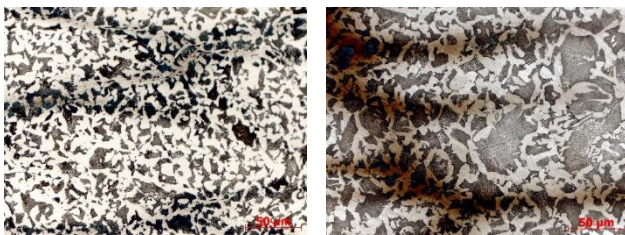


Рис. 2. Структура експериментальних зразків 1 (а) та 2 (б) зі сталі EA1N після гарячого деформування та нормалізації, $\times 200$

Найрозповсюдженішою є теорія про істотне зниження концентрації марганцю навколо сульфідних включень, що викликає зародження фериту навколо них. Вуглець при цьому відтискається далі у колишні дендритні ділянки і там під час подальшого переохолодження формуються колонії перліту. В просторі осі дендриту досить стала концентрація

елементів, і тому зростанню перлітних колоній нічого не перешкоджає і з'являються великі перлітні ділянки.

В експериментальній сталі 3 марки ОС залежності нерівномірності розподілу фаз від вмісту сульфідних включень не виявлено (рис. 3).

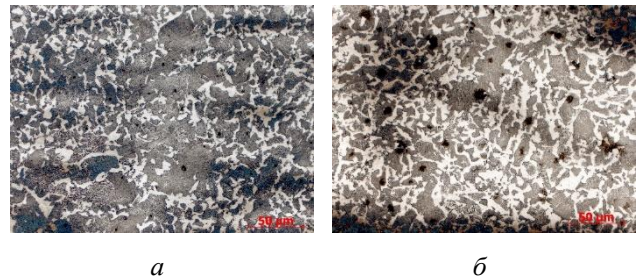


Рис. 3. Структура експериментальних зразків 3 (а) та 4 (б) зі сталі ОС після гарячого деформування та нормалізації, $\times 200$

Навколо них не виявлено жодної зміни структури, розподіл феритно-перлітної фази рівномірний. Сульфідні включення знаходяться у феритній фазі, але характерного феритного облямування навколо них не виявлено. Згущення перлітної фази у міждендритних ділянках також не спостерігаються. У міждендритних ділянках існує тільки темніший колір перліту, що пояснюється більш низькою температурою перетворення аустеніту на ферит та перліт.

У ліквацийних ділянках формуються більш дрібні колонії перліту, при чому спостерігається залежність від порядку колишніх дендритних гілок. У ділянках, що відповідають основним гілкам, формуються найбільші ділянки перліту. Скоріше за все це пов'язано саме з нерівномірним зростанням зерна аустеніту в результаті впливу хімічної неоднорідності, нерівномірного деформування кристалітів аустеніту у дендритних і міждендритних ділянках у зв'язку з різними їх реологічними властивостями.

Оскільки попередньо [9] було встановлено вплив співвідношення вмісту Si/Mn на дендритну структуру сталей для залізничних осей, необхідно було дослідити також зв'язок вмісту вуглецю та

співвідношення інших основних елементів у вуглецевій сталі на зеренну структуру (рис. 4).

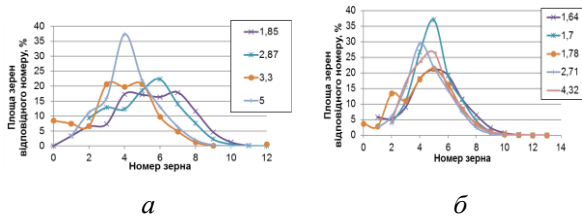


Рис. 4. Розподіл зерен за номерами залежно від відношення Mn/Si: а – в сталі марки EA1N; б – в сталі марки OC

Установлено, що сталь OC із середнім вмістом вуглецю має більш рівномірну кінцеву зеренну структуру: майже за всіх варіантів співвідношення Mn/Si розподіл розміру зерен має один максимум, який орієнтовно відповідає 4–5-му номеру. Для сталі EA1N з меншим умістом вуглецю залежності розподілу зерен за розмірами мають по два чіткі максимуми, що вказує на різнозернистість зі значною кількістю зерен великого розміру. При цьому можна

бачити, що зі збільшенням співвідношення Mn/Si найбільший максимум залежності розподілу зміщується до більшого розміру (меншого номера) зерна.

Висновки

1. Визначено, що в сталях із середнім вмістом вуглецю формується більш рівномірне розподілення структурних складових – фериту та перліту, ніж у сталях з меншим вмістом вуглецю.

2. За результатами кількісного аналізу кінцевої зеренної структури встановлено, що сталь OC з середнім вмістом вуглецю за різного відношення Mn/Si має більш рівномірну зеренну структуру.

Сталь EA1N з меншим вмістом вуглецю має виражену різнозернистість, за збільшення відношення Mn/Si найбільший максимум залежності розподілу зміщується до більшого розміру (меншого номера) зерна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Смирнов А. Н., Куберский С. В., Штефан Е. В. Непрерывная разливка стали. Донецк : ДонНТУ, 2011. 482 с.
- Babachenko O., Balakhanova T., Safronova O., Podolskyi R. Specific features of the formation of structural heterogeneity in carbon steel depending on manufacturing technique. *Science and Innovation*. 2023. № 19 (4). Pp. 47–56.
- Zeng Q., Xiao C., Li J. Analysis of Micro-Segregation of Solute Elements on the Central Cracking of Continuously Cast Bloom. *Metals*. 2021. № 11 (3). Pp. 1–10.
- Tariq Islam, Hossain MMA Rashed. Classification and Application of Plain Carbon Steels. In book : Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Pp. 1–14.
- Hongchun Zhu, Huabing Li, Zhiyu He, Hao Feng, Zhouhua Jiang, Tong He. Effect of Pressure on Dendrite Structure and Characteristics of Carbides during Solidification Process of H13 Die Steel Ingot. *ISIJ International*. 2021. Vol. 61, № 6. Pp. 1889–1898.
- Stead J. E. Some of the ternary alloys of iron, carbon and phosphorous. *J. Soc. Chem. Ind.* 1913. № 33. Pp. 173–184.
- Murugan V. K., Mathews P. K. Effect of Tempering Behavior on Heat Treated Medium Carbon (C 35 Mn 75) Steel. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2013. Vol. 2, № 4. Pp. 945–954.
- Calik A. Effect of cooling rate on hardness and microstructure of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 1060 Steels. *International Journal of Physical Sciences*. 2009. Vol. 4, № 9. Pp. 514–518.
- Бабаченко О. І., Балаханова Т. В., Сафронова О. А., Кононенко Г. А. Дослідження впливу співвідношення вмісту Si/Mn на дендритну структуру сталей для залізничних осей. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2022. № 1. С. 6–12.

REFERENCES

- Smyrnov A.N., Kuberskyj S.V. and Shtefan E.V. *Neprerivnaya razlyvka staly`* [Continuous casting of steel]. Donetsk : DonNTU Publ., 2011, 482 p. (in Russian).
- Babachenko O., Balakhanova T., Safronova O. and Podolskyi R. Specific features of the formation of structural heterogeneity in carbon steel depending on manufacturing technique. *Science and Innovation*. 2023, no. 19 (4), pp. 47–56.
- Zeng Q., Xiao C. and Li J. Analysis of Micro-Segregation of Solute Elements on the Central Cracking of Continuously Cast Bloom. *Metals*. 2021, no. 11 (3), pp. 1–10.

4. Tariq Islam and Hossain MMA Rashed. Classification and Application of Plain Carbon Steels. In book : Reference Module in Materials Science and Materials Engineering. Pp. 1–14.

5. Hongchun Zhu, Huabing Li, Zhiyu He, Hao Feng, Zhouhua Jiang and Tong He. Effect of Pressure on Dendrite Structure and Characteristics of Carbides during Solidification Process of H13 Die Steel Ingot. ISIJ International. 2021, vol. 61, no. 6, pp. 1889–1898.

6. Stead J.E. Some of the ternary alloys of iron, carbon and phosphorous. J. Soc. Chem. Ind. 1913, no. 33, pp. 173–184.

7. Murugan V.K. and Mathews P.K. Effect of Tempering Behavior on Heat Treated Medium Carbon (C 35 Mn 75) Steel. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2013, vol. 2, no. 4, pp. 945–954.

8. Calik A. Effect of cooling rate on hardness and microstructure of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 1060 Steels. International Journal of Physical Sciences. 2009, vol. 4, no. 9, pp. 514–518.

9. Babachenko O.I., Balahanova T.V., Safronova O.A. and Kononenko G.A. *Doslidzhennya vplivu spivvidnoshennya vmistu Si/Mn na dendritnu strukturu stalej dlya zaliznichnih osey* [Investigation of the infusion of alloying instead of Si/Mn on the dendritic structure of steels for sliding axles]. *Novi materiali i tehnologiyi v metalurgiyi ta mashinobuduvanni* [New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering]. 2022, no. 1, pp. 6–12. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 13.04.2024.

УДК 669.295.669.76

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.15.1070

ОЦІНКА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ПЛАСТИЧНОСТІ ВИСОКОБОРИСТОЇ КОРОЗІЙНОСТІЙКОЇ СТАЛІ В ПРОЦЕСІ ГАРЯЧОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ТРУБ, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ ДЛЯ РОЗМІЩЕННЯ ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА

ВАХРУШЕВА В. С.^{1*}, докт. техн. наук, проф.,

ГРУЗИН Н. В.², канд. техн. наук, доц.,

ТЮТЄРСЬВ І. А.³, канд. техн. наук, доц.

^{1*} Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: vs062@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2663-2714

² Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: hruzina.nataliia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-7589-6548

³ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: tiutieriev.ihor@365.pdaba.edu.ua

Анотація. Постановка проблеми. Сталій розвиток світової ядерної енергетики на подальшу перспективу залежить від того наскільки ефективно будуть вирішені пов'язані з нею проблеми радіаційної безпеки та ядерного розповсюдження. Такі проблеми мають місце, у тому числі, і на кінцевому етапі ядерно-паливного циклу – поводження з відпрацьованим ядерним паливом. Це завдання сьогодні стоїть на порядку денному як для світової спільноти, так і для національних урядів країн, які розвивають або мають наміри розвивати атомну енергетику [1–3]. Наразі, у зв'язку із забезпеченням безпеки атомної енергетики, у світовій практиці знаходять широке застосування борумісні сталі як матеріал для забезпечення біологічного захисту та для виготовлення спеціальних деталей обладнання. Це пояснюється тим, що ізотоп В₁₀, який міститься у сталях, забезпечує захоплення нейтронів [4]. Задля екранізації опорного чохла ущільненого сховища відпрацьованого ядерного палива атомних електростанцій знадобилися шестигранні труби з високобористої сталі. Корозійностійкі сталі, леговані бором, широко використовують в атомній енергетиці завдяки їх спеціальним ядерним властивостям. У процесі експлуатації атомних електростанцій тепловидільні збірки, які відслужили свій термін, підлягають зберіганню в спеціальних сховищах із використанням контейнерів – шестигранних труб, які виготовляють із сталі 04X14T3P2Ф. Для зниження витрат під час будівництва та експлуатації АЕС частина робіт із поводження з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП) повинна виконуватися на підприємствах України. Це забезпечить значний імпортозамінний ефект. Для виготовлення шестигранних труб зі сталі 04X14T3P2Ф за схемою: зливки – гаряча деформація – профілювання – термічна обробка потрібна розробка параметрів гарячої деформації і наступних технологічних операцій. Застосування зазначених труб в ущільнених сховищах відпрацьованого палива АЕС дозволить збільшити вдвічі ємність сховищ, що дасть значний народно-господарський економічний ефект. **Матеріал та методи дослідження.** Матеріалом для дослідження обрано сталь 04X14T3P2Ф (ЧС-82), виплавлену за двома варіантами (вакуумно-індукційний – «ВІ» і вакуумно-індукційний з подальшим вакуумно-дуговим переплавом – («ВД»). Сталь марки 04X14T3P2Ф відносять до високолегованих, корозійностійких сталей феритного класу з високим вмістом бору до (2 %). Для дослідження температур фазових перетворень у сталі застосовано метод диференціального термічного аналізу. Для оцінення фазового стану – метод рентгеноструктурного аналізу та мікрорентгеноспектрального аналізу. Зразки сталі випробували на прошивання. Після охолодження прошиті зразки піддавалися рентгенівському просвічуванню [5]. Також проведено випробування на гаряче скручування та механічні випробування за високих температур. **Результати.** Оцінено макро- і мікроструктуру сталі залежно від способу виплавки. Досліджено фазовий склад сталі. Дослідження пластичних властивостей сталі ЧС-82 випробуваннями на прошиваність і гаряче скручування показало, що область температур максимальної пластичності перебуває в широкому діапазоні (від 1 025 до 1 150 °С) за досить незначного опору деформації. За гарячої деформації в температурному інтервалі 1 175 °С і вище спостерігалось руйнування металу по межах зерен у місцях плавлення боридної фази Сг–Fe–В. Слід вважати оптимальним температурний інтервал гарячої деформації сталі ЧС-82 в діапазоні 1 000–1 050 °С. **Наукова новизна.** Для корозійностійкої високобористої сталі, яка використовується для зберігання відпрацьованого ядерного палива, вибрано температурний інтервал гарячої деформації та оцінено структурний та фазовий склад, що дозволить деформувати метал на прошивному стані та виготовляти труби.

Ключові слова: високобориста; корозійностійка сталь; фазовий склад; технологічна пластичність

EVALUATION OF TECHNOLOGICAL PLASTICITY OF HIGH BORON CORROSION-RESISTANT STEEL DURING HOT DEFORMATION OF PIPES USED FOR SPENT NUCLEAR FUEL STORAGE

VAKHRUSHEVA V.S.^{1*}, *Dr Sc. (Tech.), Prof.*,
GRUSIN N.V.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
TIUTIERIEV I.A.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

^{1*} Department of Materials Science and Materials Processing, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: vs062@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-2663-2714

² Department of Materials Science and Materials Processing, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: hruzin.nataliia@pdaba.edu.ua, ORCID ID:0000-0002-7589-6548

³ Department of Materials Science and Materials Processing, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: tiutieriev.ihor@365.pdaba.edu.ua

Abstract. Statement of the problem. The sustainable development of the global nuclear power industry in the future depends on how effectively the problems of radiation safety and nuclear proliferation are addressed. Such problems occur, among other things, at the final stage of the nuclear fuel cycle – spent fuel management. This task is currently on the agenda of both the international community and national governments of countries that develop or intend to develop nuclear energy [1–3]. Today, in connection with ensuring the safety of nuclear energy, boron-containing steels are widely used in the world practice as a material for biological protection and for the manufacture of special equipment parts. This is due to the fact that the B₁₀ isotope in steels provides neutron capture [4]. Hexagonal pipes made of high-boron steel were needed to shield the support cover of the compacted spent fuel storage facility at nuclear power plants. Corrosion-resistant steels alloyed with boron are widely used in the nuclear power industry due to their special nuclear properties. During the operation of nuclear power plants, fuel assemblies that have served their useful life must be stored in special storage facilities using containers – hexagonal tubes made of 04Cr14Ti3B2V steel. To reduce costs during in the construction and operation of NPPs, part of the spent nuclear fuel management should be performed at Ukrainian enterprises. This will provide a significant import substitution effect. To manufacture hexagonal tubes from 04Cr14Ti3B2V steel according to the ingot-hot deformation-profiling-heat treatment scheme, it is necessary to develop the parameters of hot deformation and subsequent technological operations. The use of these pipes in compacted spent fuel storage facilities of NPPs will allow to increase the storage capacity by 2 times, which will give a significant national economic effect **Material and methods of research.** Material used for the study was steel 04Cr14Ti3B2V (CS-82), smelted using two variants (vacuum-induction – “VI” and vacuum-induction followed by vacuum-arc remelting – (“VD”). Steel grade 04Cr14Ti3B2V belongs to high-alloy, corrosion-resistant ferritic steels with a high boron content of up to 2 %. The method of differential thermal analysis was used to study the phase transformation temperatures in the steel. X-ray diffraction and micro-X-ray spectral analysis were used to assess the phase state. The steel samples were tested for weldability After cooling, the welded samples were subjected to X-ray transmission [5]. Hot twisting tests and mechanical tests at high temperatures were also performed. The macro- and microstructure of the metal was studied. **Results.** The macro- and microstructure of steel was evaluated depending on the smelting method. The phase composition of the steel was studied. The study of the plastic properties of steel ChS-82 by means of penetration and hot twisting tests showed that the temperature range of maximum plasticity is in a wide range (from 1 025 to 1 150 °C) with a rather low resistance to deformation. During hot deformation in the temperature range of 1 175 °C and above, metal fracture was observed along the grain boundaries at the melting points of the Cr–Fe–B boride phase. The optimal temperature range for hot deformation of steel ChS-82 is 1 000–1 050 °C. **Scientific novelty.** For corrosion-resistant high boron steel used for spent nuclear fuel storage, the temperature range of hot deformation was selected and the structural and phase composition was estimated, which will allow deforming the metal on the piercing mill and manufacturing pipes.

Keywords: high boron; corrosion-resistant steel; phase composition; technological plasticity

Вступ. Корозійностійкі сталі, леговані бором, широко використовують в атомній енергетиці завдяки їх спеціальним ядерним властивостям. У процесі експлуатації атомних електростанцій тепловиділяючі збірки, які відслужили свій термін,

підлягають зберіганню в спеціальних сховищах із використанням контейнерів – шестигранних труб, які виготовляють із сталі 04X14T3P2Ф.

Використання стелажів з ущільненим кроком розташування шестигранних труб у басейнах дозволяє розмістити і безпечно зберігати значно більшу кількість відпрацьованих паливних збірок (ВПВЗ). Це дає підставу не вивозити ВЯП з України, принаймні, протягом часу до прийняття рішення про подальшу переробку ВПВЗ або їх пряме захоронення. Для зниження витрат під час будівництва та експлуатації АЕС частина робіт із поводження з ВЯП повинна виконуватися на підприємствах України. Це забезпечить значний імпортозамінний ефект.

Для виготовлення шестигранних труб зі сталі 04X14T3P2Ф за схемою: зливки – гаряча деформація – профілювання – термічна обробка потрібне розроблення параметрів гарячої деформації і наступних технологічних операцій.

Наявність бору в сталі сприяє поглинанню нейтронів і тому його вміст має бути не менше 2 %. Такий вміст бору в сталі спричинює її високу крихкість та низьку пластичність. Розроблення технології виготовлення шестигранних труб для зберігання та перевезення ВЯП – важливе та актуальне завдання для України.

Досліджено процес розроблення технології виготовлення шестигранних труб на стадії гарячої деформації. Застосовано сучасні методи визначення технологічної пластичності бористої сталі, включаючи методи гарячого скручування, високотемпературних механічних випробувань та оптичної мікроскопії. З проведених досліджень визначено температурний інтервал гарячої деформації. Визначення режимів деформації для розроблення технології виготовлення шестигранних труб на стадії гарячої деформації як основного процесу виготовлення труб дозволяє в умовах трубних заводів організувати промислове виробництво цього виду труб.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Поводження з відпрацьованим ядерним паливом – один із головних факторів, від яких залежить майбутнє ядерної енергетики. Відпрацьоване ядерне паливо (ВЯП), з одного боку, являє собою цінну енергетичну сировину, яка повторно може бути задіяна в ядерно-паливному циклі, з іншого боку, воно небезпечне для людей та навколишнього середовища.

Складність поводження з ВЯП зумовлюється, у першу чергу, його високою активністю (через наявність у його складі речовин, що діляться), яка після вивантаження палива з реактора сягає мільйонів Кюрі на тонну, та супроводжується значним тепловиділенням. Серйозну небезпеку становить також токсичність деяких радіонуклідів, що присутні в складі ВЯП. Для України, де атомній енергетиці й сьогодні, й у перспективі відведено роль базової складової вітчизняного енергозабезпечення, ця проблема дуже гостра. Від того, наскільки ефективно її буде вирішено, залежить підтримка громадськістю вітчизняних планів з розвитку атомної енергетики [2].

Наразі у світі існують дві основні стратегії поводження з ВЯП, для яких характерна певна завершеність циклу: пряме поховання у стабільних геологічних формаціях (відкритий ядерно-паливний цикл), переробка ВЯП, повторне використання урану, плутонію й інших радіонуклідів, поховання радіоактивних речовин (замкнутий ядерно-паливний цикл).

Українські АЕС із реакторами типу ВВЕР, як і інші АЕС, створювалися виходячи з концепції тимчасового зберігання й подальшої переробки ВЯП.

Для екранізації опорного чохла ущільненого сховища відпрацьованого ядерного палива атомних електростанцій знадобляться шестигранні труби з високобористої сталі [4].

Раніше для виготовлення круглих труб промисловість освоїла сталі аустенітного класу з вмістом бору до 0,6 %. Подальше підвищення вмісту бору в сталях

спричинювало зниження пластичних властивостей, що погіршувало деформованість матеріалу і робило неможливим отримання з нього труб.

Також технологічна пластичність за температур вище 1 250 °С всіх сталей аустенітного типу сильно падає, тоді як для вуглецевої і феритної вона залишається дуже високою.

Отже, сьогодні більш доцільним вважається використання сталей феритного класу для виробництва шестигранних труб.

Для забезпечення експлуатаційних властивостей сталі в неї вводять високий вміст бору (до 2 %). Бор, причому його ізоотоп В₁₀ володіє великим перетином захоплення нейтронів, тому його великий вміст і рівномірний розподіл, що дуже важливо, забезпечить захоплення нейтронів ще активного ядерного палива.

Сталь марки 04X14T3P2Ф належить до високолегованих, корозійностійких сталей феритного класу з високим вмістом бору. Основний тип феритних сталей – це сталі з великим вмістом хрому, що різко підвищує їх жаростійкість.

Для попередження зростання зерен у високохромисті сталі додають титан і ванадій, які, пов'язуючи вуглець, утворюють міцні карбіди. Карбіди, розташовуючись як усередині, так і між зернами, перешкоджають їх росту під час нагрівання.

Із підвищенням вмісту бору крихкість сталі значно збільшується, розчинність бору у фериті дуже низька, тому відбувається його виділення у вигляді фаз різного хімічного складу. Оскільки бор схильний до сегрегації по межах зерен, його присутність у сталі може вплинути на весь комплекс механічних властивостей [5].

Хром найбільш дешевий і поширений феритоутворюючий елемент. Він підвищує твердість і міцність, прожарюваність, опір повзучості (до 2 % без зниження пластичності), незначно зменшуючи пластичність; за вмісту хрому понад 12 % сталь стає корозійностійкою в атмосфері і багатьох промислових середовищах.

Легування титаном надає ефект зменшення розміру зерна сталі, подібно

ванадію. Разом із цим, цей ефект титану значно вищий за ефект ванадію. Титан застосовується для легування і практично не впливає на опір повзучості. Його вводять у сталь для усунення схильності до міжкристалітної корозії.

Будучи сильним карбідоутворюючим елементом, він з'єднується з вуглецем, що міститься в сталі, утворюючи карбіди типу ТіС і тим самим попереджаючи утворення карбідів хрому по межах зерен.

Технологічна пластичність – здатність матеріалу без руйнування отримувати великі залишкові деформації. Властивість пластичності має вирішальне значення для таких технологічних операцій як прокатка, штампування, витяжка, волочіння, вигин тощо.

Технологічна пластичність металу залежить від хімічного складу сталі, її мікроструктури і контролюється параметрами механічних властивостей. Більшість методів технологічних випробувань застосовують для визначення деформованості металевих матеріалів, оскільки схильність до пластичної деформації – це одна з найважливіших властивостей металу з погляду його обробки.

Основні чинники, що обмежують здатність сталі до гарячої деформації, – червоноламкість і схильність до крихкості під час нагрівання, зокрема, до розвитку міжзеренного руйнування [5].

Для побудови технологічного процесу необхідно оцінити властивості і технологічність металу на всіх його переробках. Отож **мета** цієї роботи – оцінення технологічної пластичності сталі 04X14T3P2Ф на стадії гарячої деформації. Вивчення структури і властивостей як заготовки, так і гарячекатаних труб.

Матеріал та методика дослідження. Для виготовлення шестигранних чохлових труб розміром «під ключ» 255×5,5 мм поставлені трубні заготовки зі сталі 04X14T3P2Ф двох способів виплавки.

Хімічний склад сталі за сертифікатними даними заводу виробника і за даними контролю наведено в таблиці 1.

Хімічний склад сталі 04X14T3P2Ф

Спосіб виплавки заготовки	C	Cr	Ni	V	Ti	B
3280445ВІ	0,03...0,031	14,11...13,98	0,19	0,2...0,192	2,95...3,19	1,72...2,15
2980275ВД	0,03...0,034	13,9...14,0	0,20	0,25...0,21	2,93...3,12	1,71...2,21
ТУ 14-1-3689-83	0,02...0,06	13...16	<0,5	0,15...0,30	2,3...3,5	1,1...1,8

Виплавку металу заготовки проводили двома способами: вакуумно-індукційним (ВІ) плавка 3280445ВІ і вакуумно-індукційним з подальшим дуговим переплавом (ВД) – плавка 2980275ВД. Заготовка виготовлена методом вільного кування на пресах з уківом більше 3 і поставлена розміром $\varnothing = 215$ мм. У роботі досліджено макроструктуру згідно з ГОСТ 10243-75, оцінені неметалеві включення за ГОСТ 1778-80. Мікроструктуру сталі досліджували методом оптичної мікроскопії на мікроскопі НЕОРНОТ-21. Для дослідження температур фазових перетворень у сталі застосовано метод диференціального термічного аналізу.

Фазові перетворення в сталі 04X14T3P2Ф досліджували на диференціальному дилатометрі «Шевенар». Для оцінення фазового складу застосували метод рентгено-структурного аналізу, який проводили на рентгенівській установці ДРОН-2 в $\text{Cu K}\alpha$ випромінюванні. Мікрорентгено-спектральний аналіз здійснювали за допомогою електроннозондових приладів типу «Самеса» на травлених зразках.

Механічні властивості металу заготовки визначались на круглих, розривних зразках діаметром 4 мм відповідно до ГОСТ 1497-73.

Для проведення випробування на прошивання виготовили конічні зразки діаметром 30–35 мм, довжиною 100 мм з

периферійної і центральної зон заготовки. Випробування зразків проводилося на лабораторному прошивному стані. Температура випробування зразків становила 1 125–1 250 °С. Нагрівання здійснювали в електричній печі. Після охолодження прошиті зразки піддавали рентгенівському просвічуванню [5].

Для проведення випробувань гарячим скручуванням виготовили укорочені зразки довжиною 110 мм з діаметром робочої частини 8 мм. Температурний інтервал дослідження пластичності гарячим скручуванням визначено виходячи з проведених випробувань на прошивання і перебував у межах 1 025–1 150 °С.

Виклад основного матеріалу.

Результати дослідження макроструктури заготовки, проведеного на поперечних темплетях, представлені на рисунку 1. Оцінення макроструктури відповідно до ГОСТ 10243-75 показало наявність у плавці 3280445 ВІ $\varnothing = 215$ мм точкової неоднорідності центральної пористості (рис. 1).

Контроль неметалевих включень за шкалами ГОСТ 1778-80 (методи «К» і «Ш») показав забруднення металу заготовки оксидами, силікатами, шпінелями. Кількісні дані оцінки наведено в таблиці 2.

Для неметалевих включень характерне рівномірне розташування їх по діаметру заготовки. Разом із тим, зустрічаються ділянки рядкового розташування (рис. 2).

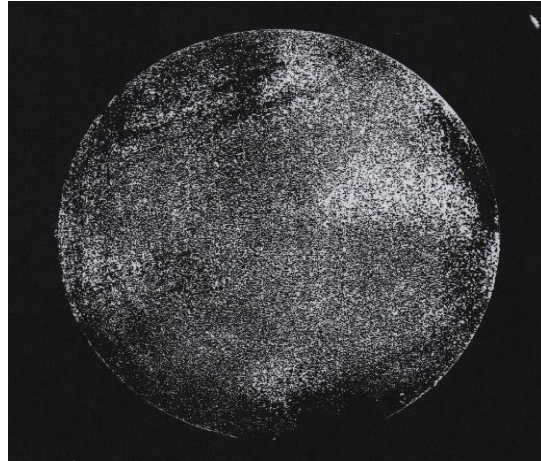
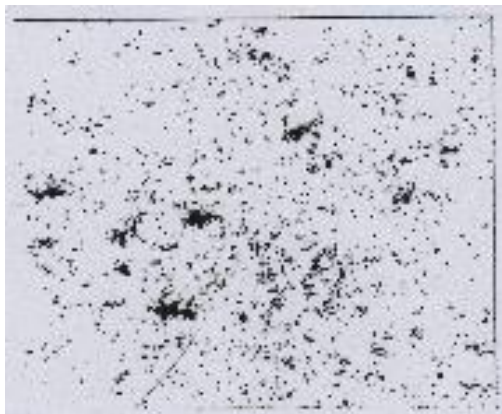


Рис. 1. Макроструктура заготовки діаметром 215 мм, плавка 3280445 VI

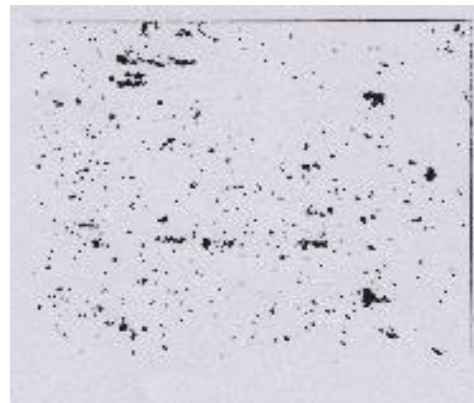
Таблиця 2

Результати контролю макроструктури і неметалевих включень у заготовці

№ плавки	Діаметр заготовки	Макроструктура, в балах			Неметалеві включення, в балах			
		точкова неоднорідність	лікваційний квадрат	центр. пористість	окисли	сульфіди	силікати	нітриди, карбоніди
2980275ВД	215	1,0	0	0,5	2,0	0	0,5	1,0
3280445VI	215	3,0	1,5	1,5	4,0	0	1,5	1,0



a



б

Рис. 2. Неметалеві включення в заготовці діаметром 215 мм плавка 2980275VI:

a – рівномірне розташування; *б* – рядкове розташування

Дослідження мікроструктури заготовки сталі свідчить про складний фазовий склад: основа – ферит із величиною зерна 1–3 бали і виділення вторинних боридних фаз різного виду і складу, що показано на рисунку 3.

Різний вигляд і забарвлення (травлення) пов'язані з різним хімічним складом фаз. З літературних даних відомо, що розчинність бору в сталі складає менш ніж 0,004 % за 710 °С до 0,0082 % за 906 °С,

тому практично весь бор знаходиться, ймовірно, у сполуках складу Ti–B, Ti–Cr–B, (Fe, Cr)₂B, Cr–B та інших. В результаті досліджень фазових перетворень в сталі 04X14T3P2Ф встановлено, що феритна основа і боридна фаза в температурному інтервалі до 1100 °С не зазнає фазових перетворень.

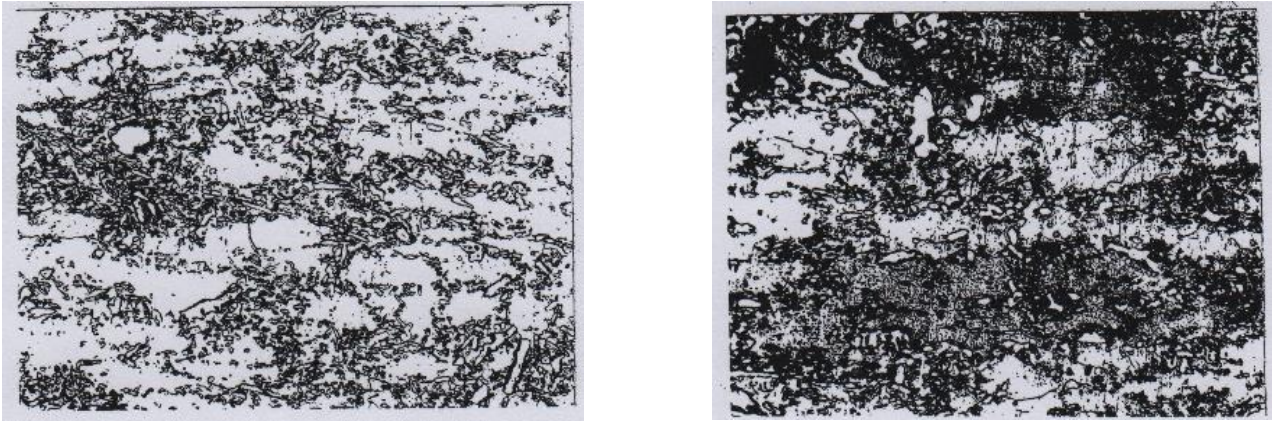


Рис. 3. Мікроструктура заготовки сталі 04X14T3P2Ф

Рентгеноструктурні дослідження фазового складу, проведені на рентгенівській установці ДРОН-4 із записом повної рентгенограми, підтвердили, що основні фази в сталі – це ферит і бориди. Ідентифікація рентгенівських ліній показала наявність у структурі великого вмісту боридів титану. Слід зазначити, що на рентгенограмі присутні лінії, близькі до ліній Ti–B, що, ймовірно, пов'язано з легуванням боридів Ti елементами, присутніми в сталі (Fe, Cr, V, Al).

Мікрорентгеноспектральний аналіз, проведений за допомогою електронно-зондових приладів типу «Самеса» на

травлених зразках ідентифікували фази Ti–B та Cr–B–Fe. Проаналізовано наявність «чорної фази» і встановлено, що вона містить елементи матриці, а саме Cr та Fe. Під зондом світиться, що побічно вказує на окисну фазу, ймовірно $(FeCr)_xO_y$.

Слід зазначити, що розподіл боридних фаз у заготовці дуже нерівномірний: у центральній зоні зливка після дугового переплаву кількість боридних фаз значно менша, ніж на периферії. Крім того, бориди в кованій заготовці $\varnothing = 215$ мм (пл. 2980275ВД) орієнтовані в напрямку закінчення металу при куванні (рис. 4).

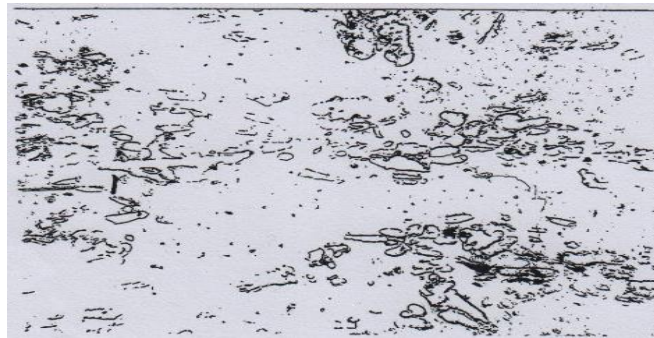


Рис. 4. Нерівномірне розташування боридів у заготовці зі сталі 04X14T3P2Ф, плавка 3280445ВІ

Механічні властивості металу заготовки визначені на круглих розривних зразках діаметром 4 мм відповідно до ГОСТ 1497-73 (табл. 3).

Для оцінення пластичності сталі 04X14T3P2Ф (ЧС-82) проведено лабораторні дослідження на прошивання і гаряче скручування.

Для випробування на прошивання виготовлено конічні зразки діаметром

30–35 мм, довжиною 100 мм. Зразки виготовлені з периферійної і центральної зон заготовки. Випробування зразків проводили на лабораторному прошивному стані при обтисненні. Температура випробування зразків перебувала в межах 1 125–1 250 °С. Досліджували 6 варіантів температур через кожні 25 °С.

Механічні властивості заготовки

№ плавок і розмір заготовки	Механічні властивості			
	межа міцності σ_B , МПа	межа плинності $\sigma_{0,2}$, МПа	відносне видовження $\delta\%$	ударна в'язкість KCV кДж/м ²
2980275ВД Ø 215 мм	$\frac{535-555}{548}$	$\frac{380-395}{385}$	$\frac{7,5-13,5}{9,6}$	25–37
3280445ВІ Ø 215 мм	550	$\frac{365-380}{370}$	13,5	24–37

За температури випробування 1 125 °С порожнини на зразках візуальним обстеженням не виявлено. За температури випробування 1 150 °С на передньому кінці прошитих зразків помічалось руйнування металу. Аналогічна картина мала місце за температури випробування 1 175 °С. За температур 1 025–1 100 °С руйнування металу не спостерігалось. Розтин порожнини при обтисненні до 14,3 % в інтервалі температур 1 025–1 125 °С на зразках, виготовлених із сталі 04Х14ТЗР2Ф (ВІ) і 04Х14ТЗР2Ф (ВД), не виявлено, що вказує на досить високу пластичність боровмісної сталі в досліджуваному інтервалі температур.

Пластичні властивості металу досліджували також методом гарячого скручування. Для випробувань гарячим скручуванням виготовили укорочені зразки довжиною 110 мм з діаметром робочої частини 8 мм. Температурний інтервал дослідження пластичності гарячим скручуванням, визначили виходячи з випробувань на прошивання, він складав 1 025–1 150 °С.

На рисунку 5 наведено криві, що відображають залежність середніх чисел скручування і середніх зусиль скручування сталі 04Х14ТЗР2Ф (ВІ і ВД) від температури. Для порівняння наведено число скручувань за температур 1 100 °С і 1 150 °С для сталі Х18Н10Т.

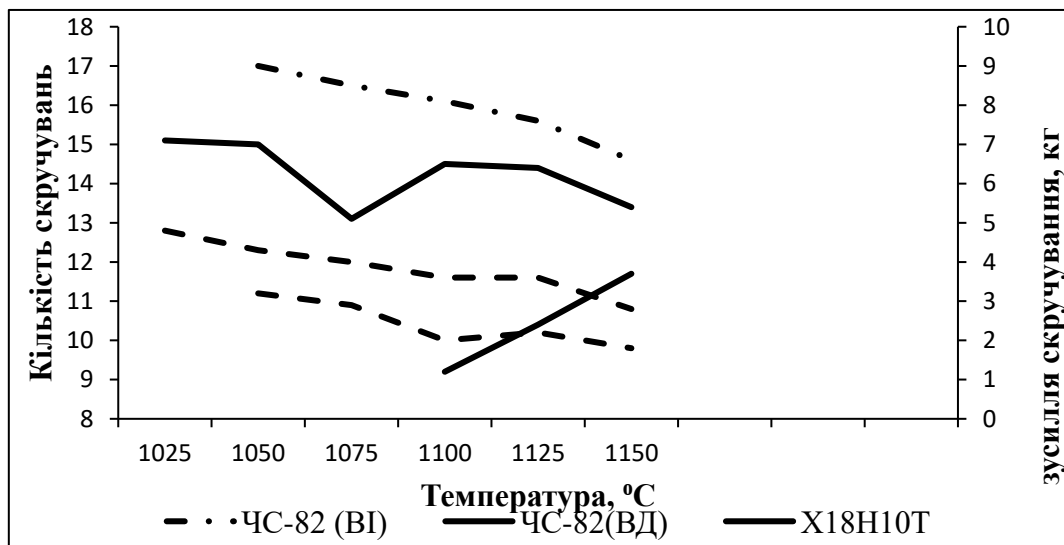


Рис. 5. Залежність середніх чисел скручування і зусиль скручування сталі від температури

Наведені дані показують, що пластичні властивості сталі ЧС-82 приблизно в 1,5 раза вищі, ніж у сталі аустенітного класу Х18Н10Т (за 1 100 °С), що говорить про її досить високу пластичність. За підвищених

температур пластичні властивості сталі ЧС-82 (ВІ і ВД) з підвищенням температури від 1 025 °С до 1 150 °С незначно зменшуються. Слід зазначити дещо підвищені (10–15 %) пластичні властивості

металу подвійного переплаву (ВД) порівняно з металом вакуумно-індукційної виплавки.

Дослідження пластичних властивостей сталі ЧС-82 показало, що область температур максимальної пластичності перебуває в широкому діапазоні (від 1 025 до 1 150 °С) за досить незначного опору деформації.

Виходячи з отриманих результатів досліджень пластичних властивостей сталі ЧС-82 (ВІ і ВД), слід вважати оптимальним температурний інтервал гарячої деформації сталі 04X14T3P2Ф в діапазоні 1 025–1 100 °С.

Вибір температурного інтервалу гарячої деформації сталі 04X14T3P2Ф багато в чому

зумовлений чутливістю сталей феритного класу до зростання зерна з підвищенням температури деформації, а також можливістю утворення легкоплавкої евтектики Cr–В за температур близько 1 200 °С. Як показали дослідження температура плавлення фази, ідентифікованої як Cr–Fe–В в сталі 04X14T3P2Ф становить $1\,200 \pm 25$ °С.

На рисунку 6 наведено результати дослідження мікроструктури сталі за загартування її в інтервалі температур 1 100–1 250 °С. Ці результати узгоджуються з результатами дослідження прошивання зі сталі 04X14T3P2Ф за температурі 1 150–1 175 °С [6].

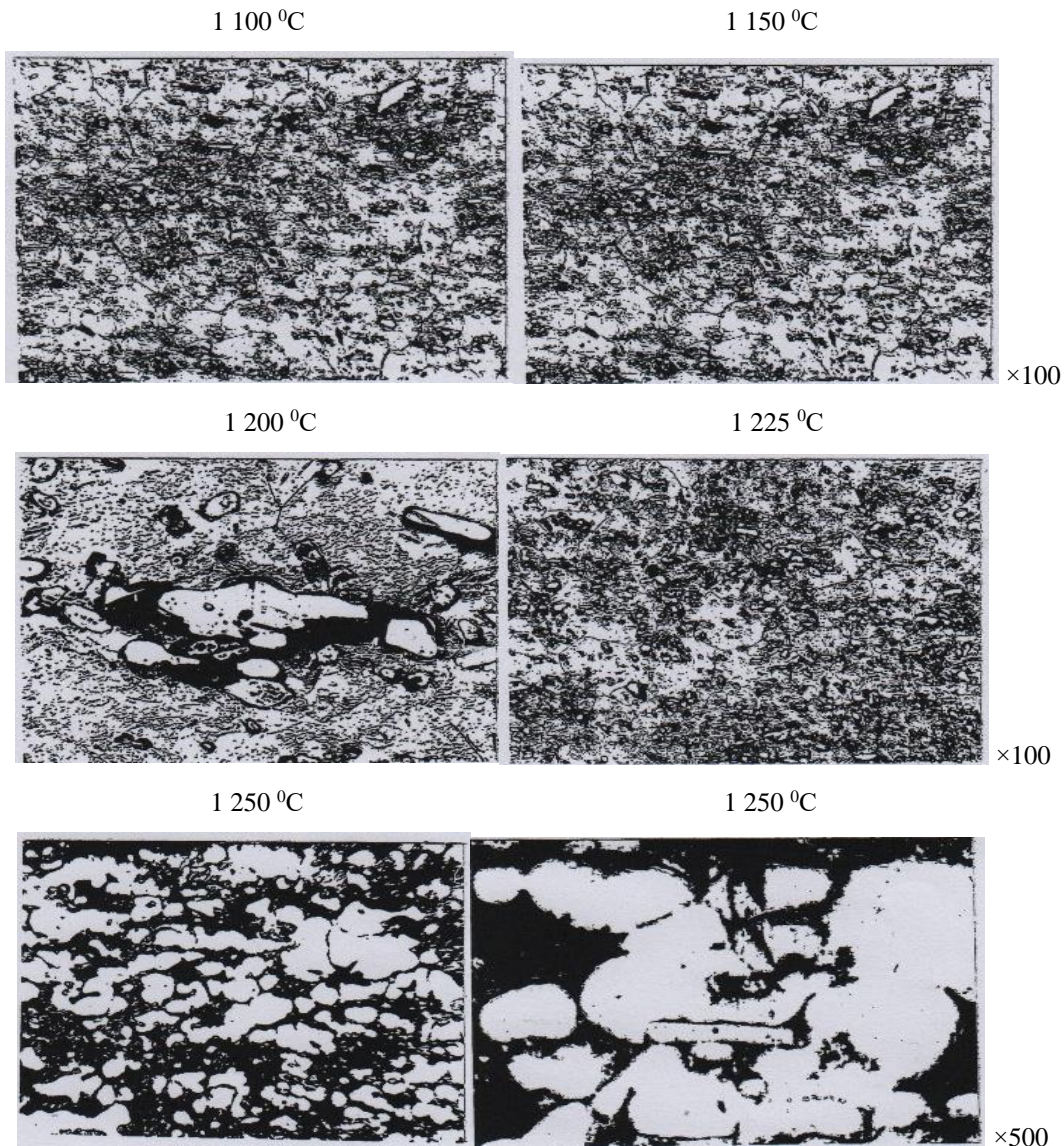


Рис. 6. Мікроструктура сталі 04X14T3P2Ф після загартування від температур 1 100–1 250 °С

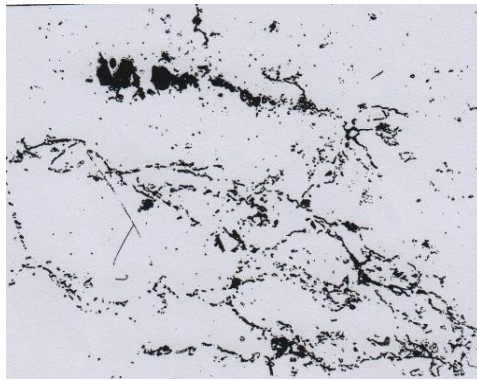


Рис. 7. Руйнування сталі 04X14T3P2Ф при прошиванні зразків за температури 1175 °С

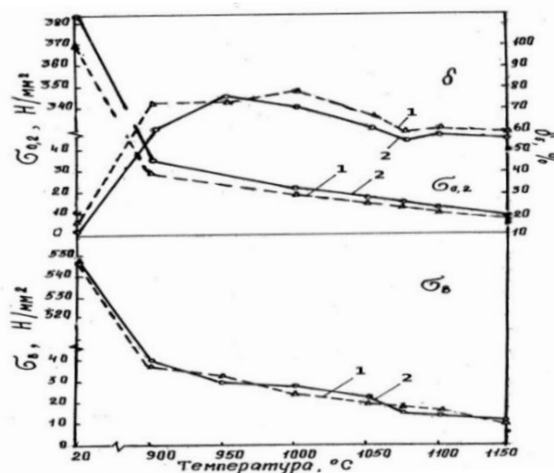


Рис. 8. Зміна механічних властивостей сталі 04X14T3P2Ф залежно від температури випробувань
1 – ø 215 мм пл. 3280445; 2 – ø 215 мм пл. 2980275

На рисунку 7 показано, що метал в процесі гарячої деформації в цьому температурному інтервалі руйнується по межах зерен у місцях плавлення боридної фази Cr-Fe-B.

Пластичність сталі за температур гарячої деформації оцінювали шляхом випробування металу заготовки скручуванням, а також розтягуванням зразків діаметром 4 мм в температурному інтервалі 900–1150 °С.

Рівень пластичних властивостей сталі 04X14T3P2Ф в гарячому стані досить високий, про що свідчать дані результатів як гарячого скручування, так і розтягування (рис. 8).

Виходячи з наведених даних, інтервал максимальної пластичності, в якому сталь повинна задовільно деформуватися, становить 1000–1050 °С.

Подальша прокатка заготовки ø = 215 мм на розмір 325 × 12 мм і 288 × 11 мм в умовах Нікопольського заводу відбулась успішно,

що підтвердило правильність вибору температурного інтервалу деформації.

Висновки

1. Досліджено два способи виплавки трубних заготовок зі сталі 04X14T3P2Ф: вакуумно-індукційний переплав та вакуумно-індукційний з подальшим вакуумно-дуговим переплавом.

2. Оцінення макроструктури відповідно до ГОСТ 10243-75 показало наявність у плавці 3280445ВІ ø = 215 мм точкової неоднорідності центральної пористості, чого не виявлено в плавці 2980275ВД.

3. Контроль неметалевих включень за шкалами ГОСТ 1778-80 (методи «К» і «Ш») показав забруднення металу заготовки оксидами, силікатами, шпінелями на рівні 1–3 балів.

4. Рентгеноструктурні дослідження фазового складу підтвердили, що основні фази в сталі – це ферит і бориди.

Ідентифікація рентгенівських ліній показала наявність у структурі великого вмісту боридів титану. Слід зазначити, що на рентгенограмі присутні лінії, близькі до ліній Ti–B, що, ймовірно, пов'язано з легуванням боридів Ti елементами, присутніми в сталі (Fe, Cr, V, Al).

5. Мікрорентгеноспектральний аналіз ідентифікував фази Ti–B та Cr–B–Fe. Проаналізовано наявність «чорної фази» в структурі сталі і встановлено, що вона містить елементи матриці, а саме Cr та Fe.

6. Дослідження пластичних властивостей сталі ЧС-82 випробуваннями на прошивання і гаряче скручування показало, що область температур максимальної пластичності перебуває в

широкому діапазоні (від 1 025 до 1 150 °С) за досить незначного опору деформації.

7. За гарячої деформації в температурному інтервалі 1 175 °С і вище спостерігалось руйнування металу по межах зерен у місцях плавлення боридної фази Cr–Fe–B.

8. Визначено температурний інтервал гарячої деформації сталі 04X14T3P2Ф (ЧС-82) ВІ та ВД. На підставі дослідження пластичних властивостей сталі ЧС-82 методами прошивання та гарячого скручування слід вважати оптимальним температурний інтервал гарячої деформації сталі ЧС-82 в діапазоні 1 000–1 050 °С, який також узгоджується з випробуваннями сталі за підвищених температур.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Чернов А. П. Перспективы развития ядерно-топливного комплекса в Украине. *Проблемы в атомной энергетике : тр.конф.* (14–19 июня). Алушта–Харьков, 1999. С. 3–5.
2. Красноруцкий В. С. Ядерный топливный цикл Украины. *Вопросы атомной науки и техники.* 2005. № 5. С. 66–69.
3. Поводження з ВЯП ректорів типу ВВЕР. UAtom: сайт з питань ядерної безпеки, радіаційного захисту та нерозповсюдження ядерної зброї. URL: <https://www.uatom.org/ru/ekspluatatsyya-shoyat-na-zaporozhskoj-aes>
4. Палеха В. А., Гетьман А. А. Бор. Свойства и применение в ядерной энергетике. *Литье и металлургия.* № 3. (86). 2017. С. 91–94.
5. Дзугутов М. Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов. Москва : Металлургия, 1977. 479 с.
6. Вахрушева В. С., Дорахов А. И., Павлов А. А. Технологические особенности изготовления шестигранных труб из бористой стали для хранения отработанного ядерного топлива в бассейнах выдержки АЭС. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение.* Вып. № 1 (3). 1988. С. 35–42.

REFERENCES

1. Chernov A.P. *Perspektivu razvitiy yaderno- toplivnogo kompleksa v Ukraini* [Prospects for the development of the nuclear fuel complex in Ukraine]. *Problemi v atomnoy energetike : trydu konferenzii* [Problems in Nuclear Energy : Proceedings of the conference]. June 14–19, Alushta–Khar'kov, 1999, pp. 3–5. (in Russian).
2. Krasnoruzkiy V.S. *Yaderno-toplivnuy zukl Ukrainu* [Nuclear fuel cycle of Ukraine]. *Voprosu atomnoy nauki i tekhniki* [Issues of atomic science and technology]. Kharkov, 2005, no. 5, pp. 66–69. (in Russian).
3. *Povodzhennya z VYAP rektoriv typu VVER* [Handling of VNP of VVER-type reactors]. *UAtom : sayt z pytan' yadernoy bezpeky, radiatsiynoho zakhystu ta nerozpovsyudzhennya yadernoyi zbroyi* [Uatom : site on nuclear safety, radiation protection and non-proliferation of nuclear weapons]. URL: <https://www.uatom.org/ru/ekspluatatsyya-shoyat-na-zaporozhskoj-aes> (in Ukrainian).
4. Palekha V.A. and Getman A.A. *Bor. Svoystva i primenenie v yadernoy energetike* [Bor. Properties and applications in nuclear energy]. *Litie i metallurgiya* [Casting and Metallurgy]. 2017, no. 3 (86), pp. 91–94. (in Russian).
5. Dzugutov M.Ya. *Plasticheskay deformaziy vucokolegirovanukh staley i splavov* [Plastic deformation of high-alloy steels and alloys]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1977, 479 p.(in Russian).
6. Vakhrusheva V.S., Dorochov A.I. and Pavlov A.A. *Technologicheskie osobennosti izgotovleniya shestigrannukh trub iz boristoy stali dlya khraneniya otrabotannogo yadernogo topliva v baseynakh vuderzhki AES* [Technological features of manufacturing hexagonal tubes made of boron steel for storing spent nuclear fuel in cooling pools of nuclear power plants]. *Voprosu atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiazionnykh povrezhdeniy i radiacionnoe materialovedenie* [Issues of Atomic Science and Technology. Series : Physics of Radiation Damage and Radiation Materials Science]. 1988, no. 1 (3), pp. 35–42. (in Russian).

Надійшла до редакції: 03.04.2024.

УДК 621.774.35

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.26.1071

ОСОБЛИВОСТІ УТВОРЕННЯ ТРІЩИН У ГЕТЕРОФАЗНИХ ВКЛЮЧЕННЯХ ТИПУ «ЕВТЕКТИКА ВКЛЮЧЕННЯ – МАТРИЦЯ»

ГУБЕНКО С. І.^{1,2*}, *докт. техн. наук, проф.*,
ПАРУСОВ Е. В.³, *докт. техн. наук, с. н. с.*,
ТЮТЕРЄВ І. А.⁴, *канд. техн. наук, доц.*

^{1*} Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 630-01-65, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6626-3979

^{2*} Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 630-01-65, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6626-3979

³ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України, пл. Академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 776-82-28, e-mail: tometal@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

⁴ Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 474-33-55, e-mail: tiutieriev.igor@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5472-0706

Анотація. *Мета роботи* – вивчення особливостей зародження тріщин у гетерофазних включеннях типу «евтектика включення–матриця» за деформації сталей. *Методика.* Дослідження проводили після деформації зразків зі сталей 08Ю, 12ГС, 08кп, 09Г2С, НБ-57, 08ГСЮТФ в інтервалі температур 20...1 200 °С зі швидкістю переміщення захватів 1 680 мм/хв. Застосовано методи дослідження – петрографія, мікрорентгеноспектральний аналіз («Cameca MS-4, Nanolab-7»), оптична мікроскопія (Neophot-21). *Результати.* Встановлено, що різноманітність фаз, що становлять гетерофазні включення типу «евтектика включення–матриця», зумовлює їх різну поведінку за пластичної деформації. Показано, що зародження крихких чи в'язких мікротріщин відбувається уздовж внутрішніх міжфазних границь між металеву матрицею і другою неметалевою фазою евтектики. З'ясовано, що характер тріщин визначається рівнем пластичності фаз включень і температурою деформації. Показано, що критичні ступені деформації зразків, за досягнення яких виникали помітні мікротріщини уздовж внутрішніх міжфазних границь, залежать від температури та природи фаз включень «евтектика включення – матриця». Встановлено, що показники критичних ступенів деформації визначають рівень когезивної міцності внутрішніх міжфазних границь в гетерофазних включеннях «евтектика включення – матриця». *Наукова новизна.* З'ясовано особливості зародження мікротріщин в гетерофазних включеннях типу «евтектика включення – матриця». Показано, що характер мікротріщин, які утворилися уздовж міжфазних границь, залежить від температури, рівня пластичності та умов поєднання крихких та пластичних фаз у включеннях типу «евтектика включення – матриця», а також від температури деформації. Критичні ступені деформації сталей, коли виникали мікротріщини уздовж внутрішніх міжфазних границь, визначають когезивну міцність цих границь і залежать від температури та природи фаз включень типу «евтектика включення – матриця». *Практична значимість.* Використання отриманих результатів дозволить розробити технології отримання сталей з регламентованими видами гетерофазних неметалевих включень, що допоможе суттєво підвищити їх технологічні та експлуатаційні характеристики, а також запобігти утворенню різноманітних дефектів під час обробки сталей тиском та експлуатації виробів.

Ключові слова: *сталь; гетерофазні неметалеві включення; тріщини; фази; міжфазні границі*

PECULIARITIES OF CRACK FORMATION IN HETEROPHASE INCLUSIONS OF THE “EUTECTICS OF INCLUSION – MATRIX” TYPE

GUBENKO S.I.^{1,2*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
PARUSOV E.V.³, *Dr. Sc. (Tech.), Sen. Res.*,
TIUTIERIEV I.A.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

^{1*} Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Science of Ukraine, 1, Ak. Starodubov K.F. Sq, Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (067) 630-01-65, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6626-3979

^{2*} Department of Materials Science and Materials Processing, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 630-01-65, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6626-3979

³ Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov National Academy of Science of Ukraine, 1, Ak. Starodubov K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (056) 776-82-28, e-mail: tometal@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4560-2043

⁴ Department of Materials Science and Materials Processing, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 474-33-55, e-mail: tiutieriev.igor@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-5472-0706

Abstract. Purpose. The goal of the work was to study the peculiarities of crack nucleation in heterophase inclusions of the “eutectic inclusion – matrix” type during steel deformation. **Methods.** The research was carried out after deformation of samples from steels 08Yu, 12GS, 08kp, 09G2S, NB-57, 08GSYUTF in the temperature range of 20...1 200 °C with the speed of movement of grips 1 680 mm/min. The research methods were used – petrography, micro-X-ray spectral analysis (Cameca MS-4, Nanolab-7), optical microscopy (Neophot-21). **Results.** It is established that the variety of phases that make up heterophase inclusions of the type “eutectic of inclusion – matrix” leads to their different behavior under conditions of plastic deformation. It is shown that the nucleation of brittle or viscous microcracks occurs along the internal interfacial boundaries between the metal matrix and the second phase of the eutectic. It is determined that the nature of cracks is determined by the level of plasticity of the inclusion phases and the deformation temperature. It is shown that the critical degrees of deformation of the samples, at the achievement of which there were noticeable microcracks along the internal interfacial boundaries, depend on the temperature and nature of the phases of inclusions “eutectic of inclusion – matrix”. It is established that the values of critical degrees of deformation determine the level of cohesive strength of the internal interfacial boundaries in heterophase inclusions “inclusion – matrix eutectic”. **Scientific novelty.** Peculiarities of microcracking nucleation in heterophase inclusions of the “inclusion – matrix eutectic” type have been established. It is shown that the nature of microcracks formed along the interfacial boundaries depends on the temperature, level of plasticity and conditions of combination of brittle and plastic phases in inclusions of the “eutectic of inclusion – matrix” type, as well as on the deformation temperature. It is shown that the critical degrees of deformation of steels, when microcracks occurred along the inner interfacial boundaries, determine the cohesive strength of these boundaries and depend on the temperature and nature of the phases of inclusions such as “inclusion – matrix eutectic”. **Practical significance.** The use of the results obtained will make it possible to develop technologies for producing steels with regulated types of heterophase nonmetallic inclusions, which will significantly increase their technological and operational characteristics, as well as prevent the formation of various kinds of defects during the processing of steels by pressure and the operation of products.

Keywords: steel; heterophase non-metallic inclusions; cracks; phases; interphase boundaries

Вступ. Відомо, що сталі містять різні типи гетерофазних включень різних типів, частка яких може становити до 10...30 % від загального вмісту неметалевих включень [1–7]. Ці включення містять фази, що мають різну пластичність [5; 8–10], вони мають неоднорідну будову міжфазних границь зі сталевою матрицею [11–13]. Усе це створює неоднорідності та концентрації напружень у структурі сталей і сприяє зародженню руйнування поблизу включень [14–20], а також суттєво знижує механічні, технологічні та експлуатаційні властивості сталей та виробів з них [21–25]. Вплив неметалевих включень, у тому числі гетерофазних, на руйнування сталей вивчався в працях [5; 6; 11; 20], де показано вплив типу включення на зазначені процеси.

Мета роботи – вивчення особливостей зародження тріщин у гетерофазних включеннях типу «евтектика включення – матриця» при деформації сталей.

Матеріали та методики. Дослідження проводили після деформації зразків зі сталей 08Ю, 12ГС, 08кп, 09Г2С, НБ-57, 08ГСЮТФ в інтервалі температур 20...1 200 °C зі швидкістю переміщення захватів 1 680 мм/хв. [6; 20]. Застосовували методи дослідження: петрографія [5; 6; 20], мікрорентгеноспектральний аналіз («Cameca MS-4, Nanolab-7»), оптична мікроскопія (Neophot-21).

Результати. У гетерофазних включеннях типу «евтектика включення – матриця» однією з фаз є матриця сталі «м», іншою – фаза нв: сульфід, оксид, силікат, фосфід і т. п. [5; 7], тому розрізняють евтектики сульфід-матриця, силікат-матриця, оксид-матриця, фосфід-матриця. У таких включеннях присутня розгалужена мережа внутрішніх міжфазних границь нв ↔ м. У той же час для них характерна наявність міжфазних границь включення – матриця, які позначимо (нв + м) ↔ м; вони

включають мікроділянки, що чергуються, а саме $нв \leftrightarrow м \text{ і } м \leftrightarrow м$. Таким чином, ці міжфазні границі ($нв + м$) $\leftrightarrow м$ не є суцільними (у традиційному розумінні міжфазної границі), оскільки наявність мікроділянок $м \leftrightarrow м$, де одна з фаз таких евтектик ($м$) має безперервний зв'язок з основною структурою сталі без будь-яких міжфазних границь розділу (крім границь зерен), що дозволяє вважати їх уривчастими.

У цьому відмінність включень типу «евтектика включення – матриця» від гетерофазних включень інших типів [5–7; 11; 12], які мають чітко виражені суцільні міжфазні границі включення – матриця. По суті, включення, що вивчаються в цій роботі, – це мікрокомполітні утворення, в яких сталева матриця армована фазою включення.

Неметалеві включення типу «евтектика включення – матриця» містять фази $нв$, які, у разі їх непластичної поведінки під час деформації, можуть руйнуватися (рис. а),

або пластичні фази $нв$, що деформуються (рис. б), проте стислість деформації в такому композиті також може спричинити їх руйнування.

У включеннях зі структурою евтектичних колоній, що являють собою композитні формування різного виду, фази евтектики $нв \text{ і } м$ розділені міжфазними границями $нв \leftrightarrow м$, які являють собою розгалужену мережу поверхневих дефектів і утворюють множинні вигини і повороти, а також складні стики із зовнішньою міжфазною границею ($нв-м$) $\leftrightarrow м$.

Різноманітність фаз $нв$ у включеннях, що мають різну пластичність за різних температур, неминуче вносить свої особливості в процеси руйнування міжфазних границь $нв \leftrightarrow м$. Очевидно, механізм і кінетика руйнування границь $нв \leftrightarrow м$ визначаються також їх когезивною міцністю, яка залежить від структури евтектик та умов сполучення кристалічних ґраток фаз $нв \text{ і } м$ [11; 12].

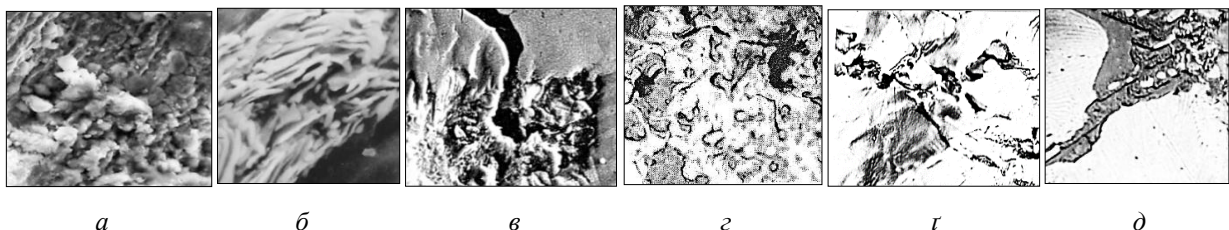


Рис. Тріщини в гетерофазних включеннях типу «евтектика включення–матриця» після деформації за температур 25 (а, д), 600 (б), 900 (в), 1100 (з), 1250 °С (г); $\times 1500$

Для гетерофазних включень, що вивчаються, характерне утворення тріщин по міжфазних границях $нв \leftrightarrow м$ (рис. в, з, д) за різних температур деформації, оскільки фази включень $нв \text{ і } м$ виявляють різну пластичність, що сприяє концентрації напружень поблизу цих границь і в самих границях.

Очевидно, проявляється вплив граничних стиків на утворення тріщин уздовж внутрішніх міжфазних границь $нв \leftrightarrow м$. Концентрація міжфазних напружень у граничних стиках може спровокувати релаксацію напружень та утворення тріщин уздовж міжфазних границь $нв \leftrightarrow м$ за будь-якої температури деформації. У той же час пластична поведінка сталєвої матриці за

різних температур, а також проковзування вздовж мікроділянок границь включення – матриця за високих температур деформації викликає часткову релаксацію напружень поблизу включення і вздовж границь $нв \leftrightarrow м$ [6; 8]. Крім того, проковзування вздовж внутрішніх границь евтектик $нв \leftrightarrow м$ за високотемпературної деформації також сприяє частковій релаксації напружень у граничних стиках.

Якщо фаза включення $нв$ не деформована, в границях $нв \leftrightarrow м$ виникають значні напруження, які є розклинювальними, що спричинює їх крихке руйнування. За наявності пластичних фаз $нв$ зсувні напруження поблизу границі $нв \leftrightarrow м$ сприяють відділенню фаз включення

в результаті виходу дислокацій з пластичних фаз нв і м на міжфазну границю, утворення дислокацій орієнтаційної невідповідності та зародження мікротріщин. Очевидно, величина критичного розміру мікротріщини залежить від когезивної міцності міжфазної границі нв↔м, а розкриття тріщини в цій міжфазній границі має супроводжуватися релаксаційними процесами, пов'язаними з трансформацією самої тріщини в процесі її розвитку в складній системі досліджуваних границь у включеннях евтектик.

За температур деформації 25...800 °С у включеннях евтектик сульфід – матриця, фази яких нв і м є пластичними, внаслідок неоднорідності деформації, пов'язаної з різною деформованістю цих фаз, а також із гальмуванням деформації міжфазними границями нв↔м, спостерігали появу крихких тріщин здебільшого вздовж границь нв↔м, а також у стиках цих границь із зовнішніми границями включення–матриця.

За підвищенням температури деформації до 850 °С і вище у зв'язку з розвитком проковзування вздовж границь нв↔м характер мікротріщин поступово змінюється: поряд із крихкими тріщинами з'являються в'язкі тріщини (мікропорожнини). У включеннях силікатних евтектик, які за температур 25...600 °С непластичні, спостерігали виникнення крихких тріщин на міжфазних границях нв↔м, а також у місцях безлічі стиків цих границь із зовнішніми границями включення–матриця.

За температур вище 600 °С силікатні фази евтектик пластичні, проте у зв'язку зі стисненням деформації вздовж границь нв↔м поблизу цих границь з'являються крихкі тріщини. В результаті збільшення

пластичності силікатних евтектик за підвищенням температури деформації до 900 °С, а також із розвитком проковзування вздовж границь нв↔м, яке починається за температури 950 °С [5; 6; 8], уздовж цих границь виникали крихкі та в'язкі тріщини, причому за підвищенням температури деформації до 1 200 °С поступово збільшувалася частка в'язких тріщин на досліджуваних границях.

Включення фосфідних евтектик містять фази нв, які за температур 25...1 200 °С пластично не деформуються і крихко руйнуються. Крихкі тріщини формуються на границях розділу фаз евтектики нв↔м і поширюються через ці границі. Крім того, за всіх температур деформації фосфідна фаза крихко руйнується.

Таким чином, характер руйнування міжфазних границь нв↔м у гетерофазних включеннях типу «евтектика включення – матриця» залежить від ступеня пластичності фази нв включення, яка визначається температурою деформації, а також від ймовірності пластичної поведінки цих границь. Крім того, проявляється вплив високого ступеня дисперсності структури евтектичних колоній, численних вигинів границь нв↔м, а також стиків міжфазних границь включення – матриця (нв-в)↔м і внутрішніх границь включень нв↔м, що створюють складний напружений стан у цих ділянках, характер якого залежить від рівня пластичної поведінки всіх зазначених міжфазних границь.

У досліджуваних включеннях за різних температур спостерігали зародження як крихких тріщин уздовж міжфазних границь нв↔м, так і в'язких тріщин за пластичної поведінки фази нв, а також у разі реалізації проковзування вздовж границь, що вивчається за високих температур.

Таблиця

Вплив температури на критичний ступінь деформації ($\epsilon_{кр}$, %), за досягнення якої руйнуються міжфазні границі у включеннях типу «евтектика включення – матриця»

Включення, сталь	Температура деформації, °С					
	25	600	900	1 100	1 200	1 250
(Mn,Fe)S-м, 08ГСЮТФ	10,3	14,3	19,2	28,2	оплавлено	оплавлено
FeO·SiO ₂ -м, 08кп	4,5	7,3	15,2	19,4	22,0	оплавлено
MnO-м, 08кп	5,7	9,9	17,8	22,3	24,0	25,1

Застосовуючи методики, викладені в працях [6; 20], визначали критичні ступені деформації зразків розтягуванням $\epsilon_{кр}$, за досягнення яких виникали помітні мікротріщини вздовж міжфазних границь нв \leftrightarrow м. Аналіз результатів досліджень показав, що $\epsilon_{кр}$ істотно залежить від температури деформації, що визначає рівень пластичності фази включення нв і границі нв \leftrightarrow м, пов'язаний з можливістю проковзування (табл.). Що температура деформації і рівень пластичності фази нв, то більша величина $\epsilon_{кр}$ для усіх вивчених включень.

Тріщини в гетерофазних включеннях типу «евтектика включення – матриця» у ході розвитку пластичної деформації розвиваються за три стадії.

Перша стадія включає локалізацію деформації і зародження крихких або в'язких тріщин шляхом розшарування вздовж міжфазних границь нв \leftrightarrow м, або поблизу цих границь і в численних їх згинах, також у численних стиках границь нв \leftrightarrow м із зовнішніми границями включення–матриця.

На другій стадії відбувається зростання тріщин у межах включень.

На третій відбувається поширення мікроруйнувань у металеву матрицю (рис. в, г).

Висновки

Результати досліджень показали, що різноманітність фаз, які становлять гетерофазні включення «евтектика включення – матриця», зумовлює їх різну поведінку за пластичної деформації. У той самий час, зародження крихких чи в'язких мікротріщин відбувається уздовж внутрішніх міжфазних границь між металевою матрицею і другою неметалевою фазою евтектики. Характер тріщин визначається рівнем пластичності фаз включень, і температурою деформації.

Критичні ступені деформації зразків, за досягнення яких виникали помітні мікротріщини уздовж внутрішніх міжфазних границь, залежать від температури та природи фаз включень «евтектика включення – матриця». Значення критичних ступенів деформації показують рівень когезивної міцності внутрішніх міжфазних границь у гетерофазних включеннях «евтектика включення – матриця».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zhe Rong, Hongbo Liu, Peng Zhang, Feng Wang, Geoff Wang, Baojun Zhao, Fengqiu Tang, Xiaodong Ma. The Formation Mechanisms and Evolution of Multi-Phase Inclusions in Ti-Ca Deoxidized Offshore Structural Steel. *Metals*. 2022. № 12. Pp. 511. URL: <https://www.mdpi.com/journal/metals>
2. Yan Wang, Li-guang Zhu, Jin-xia Huo. Relationship between crystallographic structure of complex inclusions MgAl₂O₄/Ti₂O₃/MnS and improved toughness of heat-affected zone in shipbuilding steel. *Journal of Iron and Steel Research International* (IF1.263).
3. Miao Z., Long H., Cheng G., Qiu W., Zhong S., Yu D. Agglomeration and Clustering of CaO–Al₂O₃–MgO Leading to Super Large-Size Line-Shape Inclusions in High Carbon Chromium Bearing Steel. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2022. Vol. 53, iss. 1, pp. 512–525.
4. Ahmad H., Zhao B., Lyu S., Huang Z. Formation of Complex Inclusions in Gear Steels for Modification of Manganese Sulphide. *Metals*. 2021. № 11. Pp. 2051.
5. Губенко С. И. Гетерофазные микрокомпонитные включения в сталях. Germany–Mauritius, Beau Bassin : Palmarium academic publishing, 2019. 330 с.
6. Губенко С. И., Ошкадеров С. П. Неметаллические включения в стали. Киев : Наукова думка, 2016. 528 с.
7. Губенко С. И., Беспалько В. Н. Виды и структура гетерофазных включений в сталях. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2019. № 1 (84). С. 30–35.
8. Губенко С. И. Неметаллические включения и пластичность сталей. Физические основы пластичности сталей. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2016. 549 с.
9. Gubenko S. I.. Plasticity Origin of Heterophase Inclusions at Steel Forming. *Steel in Translation*. 2020. Vol. 50, № 10. Pp. 730–739.
10. Belchenko G. I., Gubenko S. I. Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling. *Izvestiya AN SSSR. Metallurgy*. 1983. № 4. Pp. 80–84.

11. Губенко С. И. Межфазные границы включение – матрица в сталях. Межфазные границы неметаллическое включение-матрица и свойства сталей. Germany–Mauritius, Beau Bassin: Palmarium academic publishing, 2017. 506 с.
12. Губенко С. И. Структура многофазных неметаллических включений в сталях. *Теория и практика металлургии*. 1999. № 1. С. 22–27.
13. Губенко С. И. К вопросу о строении межфазных границ неметаллическое включение – матрица в стали. *Известия АН СССР. Металлы*. 1994. № 6. С. 105–112.
14. Губенко С. И., Иськов М. В. Структура и сопротивление разрушению межфазных границ неметаллическое включение – матрица стали. *Теория и практика металлургии*. 2004. № 5. С. 30–38.
15. Gubenko S. I. Team dislocation effects or phase transformations in “nonmetallic inclusion – matrix” boundaries in steel. *Physics of Metals and Metal Science*. 1990. Vol. 6. Pp. 184–188.
16. Губенко С. И. Локальные пики параметров и процессов на границах неметаллическое включение – матрица стали. *Сталь*. 1999. № 8. С. 64–67.
17. Gubenko S. I., Parusov E. V., Parusov O. V. The role of inclusion-matrix boundaries in steels fracture processes. *Chernye Metally*. 2021. № 6. Pp. 42–47.
18. Gubenko S. I. Relaxation Processes near Inclusions and at Inclusion/Matrix Interfaces. *Russian Metallurgy (Metally)*. Vol. 2021, № 5. Pp. 611–620.
19. Gubenko S. I. Role of Inclusion – Matrix Steel Interphase Boundaries in the Development of Relaxation Processes near Nonmetallic Inclusions. *Metal Science and Heat Treatment*. 2020. Vol. 62, № 5. Pp. 299–305.
20. Губенко С. И. Физика разрушения сталей вблизи неметаллических включений. Днепро : НМетАУ, ІІЦ Системные технологи, 2014. 301 с.
21. Pinchuk S. I., Gubenko S. I., Belaya E. V. The influence of non-metallic inclusions on the corrosion and strength properties of wheel steel. *Metallurgical & Mining Industry*. 2015. № 9. Pp. 89–95.
22. Gubenko S. I. Influence of Nonmetallic Inclusions and Corrosion Products on the Wear Resistance of Railroad Wheels. *Steel in Translation*. 2019. Vol. 49, № 6. Pp. 427–431.
23. Губенко С. И., Иванов И. А., Кононов Д. П. Влияние качества стали на усталостную прочность цельнокатаных колес. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2018. Т. 84, № 3. С. 52–60.
24. Губенко С. И., Иванов И. А., Соболев А. А. Особенности износа поверхности катания цельнокатаных колес. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. СПб. : Изд-во ГУПС, 2013. С. 73–84.
25. Кушнер В. С., Кутько А. А., Воробьев А. А., Губенко С. И., Иванов И. А. Влияние структуры и механических характеристик колесных сталей на изнашивание и режимы восстановления профиля колесных пар. Омск : изд-во ОмSTU, 2015. 221 с.

REFERENCES

1. Zhe Rong, Hongbo Liu , Peng Zhang , Feng Wang , Geoff Wang , Baojun Zhao, Fengqiu Tang and Xiaodong Ma. The Formation Mechanisms and Evolution of Multi-Phase Inclusions in Ti–Ca Deoxidized Offshore Structural Steel. *Metals*. 2022, no. 12, pp. 511. URL: <https://www.mdpi.com/journal/metals>
2. Yan Wang, Li-guang Zhu and Jin-xia Huo. Relationship between crystallographic structure of complex inclusions $MgAl_2O_4/Ti_2O_3/MnS$ and improved toughness of heat-affected zone in shipbuilding steel. *Journal of Iron and Steel Research International (IF1.263)*.
3. Miao Z., Long H., Cheng G., Qiu W., Zhong S. and Yu D. Agglomeration and Clustering of $CaO-Al_2O_3-MgO$ Leading to Super Large-Size Line-Shape Inclusions in High Carbon Chromium Bearing Steel. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2022, vol. 53, iss. 1, pp. 512–525.
4. Ahmad H., Zhao B., Lyu S. and Huang Z. Formation of Complex Inclusions in Gear Steels for Modification of Manganese Sulphide. *Metals*. 2021, no. 11, pp. 2051.
5. Gubenko S. *Geterofaznyke mikrokompozitnyye vklyucheniya v stalyakh* [Heterophase microcomposite inclusions in steels]. Germany–Mauritius, Beau Bassin, Palmarium academic publishing, 2019, 330 p. (in Russian).
6. Gubenko S.I. and Oshkadepov S.P. *Nemetallicheskie vkluchenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 2016, 528 p. (in Russian).
7. Gubenko S.I. and Bepalko V.N. *Vidy i struktura geterofaznykh vklyucheniy v stalyakh* [Types and structure of heterophase inclusions in steels]. *Metal Science and Heat Treatment of Metals*. 2019, no. 1 (84), pp. 30–35. (in Russian).
8. Gubenko S.I. *Nemetallicheskiye vklyucheniya i plastichnost' staley* [Non-metallic inclusions and ductility of steels. The physical basis of the ductility of steels]. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium academic publishing, 2016, 549 p. (in Russian).
9. Gubenko S.I. Plasticity Origin of Heterophase Inclusions at Steel Forming. *Steel in Translation*. 2020, vol. 50, no. 10, pp. 730–739.
10. Belchenko G.I. and Gubenko S.I. Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling. *Izvestiya AN SSSR. Metally*. 1983, no. 4, pp. 80–84.

11. Gubenko S.I. *Mezhfaznyye granitsy vklyucheniye-matritsa v stalyakh. Mezhfaznyye granitsy nemetallicheskoye vklyucheniye – matritsa i svoystva staley* [Inclusion – matrix interfaces in steels. Non-metallic inclusion – matrix interface and properties of steels]. Germany–Mauritius, Beau Bassin : Palmarium academic publishing, 2017, 506 p. (in Russian).
12. Gubenko S.I. *Struktura mnogofaznykh nemetallicheskikh vklyucheniy v stalyakh* [The structure of multiphase nonmetallic inclusions in steels]. *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and Practice of Metallurgy]. 1999, no. 1, pp. 22–27. (in Russian).
13. Gubenko S.I. *K voprosu o stroyenii mezhfaznykh granits nemetallicheskoye vklyucheniye – matritsa v stali* [To the question of the structure of interphase boundaries non-metallic inclusion-matrix in steel]. *Izvestiya AN SSSR. Metallurgiya* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1994, no. 6, pp. 105–112. (in Russian).
14. Gubenko S.I. and Iskov M.V. *K voprosu o stroyenii mezhfaznykh granits nemetallicheskoye vklyucheniye – matritsa v stali* [On the question of the structure of interphase boundaries non-metallic inclusion – matrix in steel]. *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and Practice of Metallurgy]. 2004, no. 5, pp. 30–38. (in Russian).
15. Gubenko S.I. *Team dislocation effects or phase transformations in “nonmetallic inclusion – matrix” boundaries in steel*. *Physics of Metals and Metal Science*. 1990, vol. 6, pp. 184–188.
16. Gubenko S.I. *Lokal'nyye piki parametrov i protsessov na granitsakh nemetallicheskoye vklyucheniye – matritsa stali* [Local peaks of parameters and processes at the non-metallic inclusion – matrix boundaries of steel]. *Stal'* [Steel]. 1999, no. 8, pp. 64–67. (in Russian).
17. Gubenko S.I., Parusov E.V. and Parusov O.V. *The role of inclusion – matrix boundaries in steels fracture processes*. *Chernye Metally*. 2021, no. 6, pp. 42–47.
18. Gubenko S.I. *Relaxation Processes near Inclusions and at Inclusion/Matrix Interfaces*. *Russian Metallurgy (Metally)*. Vol. 2021, no. 5, pp. 611–620.
19. Gubenko S.I. *Role of Inclusion – Matrix Steel Interphase Boundaries in the Development of Relaxation Processes near Nonmetallic Inclusions*. *Metal Science and Heat Treatment*. 2020, vol. 62, no. 5, pp. 299–305.
20. Gubenko S.I. *Fizika razrusheniya staley vblizi nemetallicheskikh vklyucheniy* [Physics of steel fracture near non-metallic inclusions]. Dnipro, NMetAU, Information Technology Systems Technologies, 2014, 301 p. (in Russian).
21. Pinchuk S.I., Gubenko S.I. and Belaya E.V. *The influence of non-metallic inclusions on the corrosion and strength properties of wheel steel*. *Metallurgical & Mining Industry*. 2015, no. 9, pp. 89–95.
22. Gubenko S.I. *Influence of Nonmetallic Inclusions and Corrosion Products on the Wear Resistance of Railroad Wheels*. *Steel in Translation*. 2019, vol. 49, no. 6, pp. 427–431.
23. Gubenko S.I., Ivanov I.A. and Kononov D.P. *Vliyaniye kachestva stali na ustalostnuyu prochnost' tsel'nokatanykh koles* [Influence of the quality of steel on the fatigue strength of solid-rolled wheels]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Factory Laboratory. Material Diagnostics]. 2018, vol. 84, no. 3, pp. 52–60. (in Russian).
24. Gubenko S.I., Ivanov I.A. and Sobolev A.A. *Osobennosti iznosa poverkhnosti kataniya tsel'nokatanykh koles* [Features of wear of the rolling surface of solid-rolled wheels]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of the St. Petersburg University of Railway Engineering]. St. Petersburg : Publishing House of State University of Railway Transport, 2013, pp. 73–84. (in Russian).
25. Kushner V.S., Kutko A.A., Vorobyov A.A., Gubenko S.I. and Ivanov I.A. *Vliyaniye struktury i mekhanicheskikh kharakteristik kolesnykh staley na iznashivaniye i rezhimy vosstanovleniya profilya kolesnykh par* [The influence of the structure and mechanical characteristics of wheel steels on wear and restoration modes of the wheelset profile]. Omsk : OmSTU Publ., 2015, 221 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 24.03.2024.

УДК 621.78.084:66.096.5

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.33.1072

РОЗРОБКА ІННОВАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ГАРТІВНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗМІЦНЮВАЛЬНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛОВИРОБІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПСЕВДОЗРІДЖЕНИХ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ (частина 1)

ДЕЙНЕКО Л. М.¹, докт. техн. наук, проф.,

БУТЕНКО А. О.²,

КАБАК А. І.³,

ШПОРТЬКО Ю. В.^{4*}, асп.,

ПІНЧУК В. Л.⁵, асп.,

ГРЕБЬОНКІНА Л. Г.⁶

¹ Кафедра матеріалознавства і термічної обробки металів, ННІ «Інститут промислових та бізнес-технологій» Українського державного університету науки і технологій, пр. Гагаріна, 4, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 333-13-25, e-mail: leonid.deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

² Товариство з обмеженою відповідальністю «ТЕРМАШ», пр. Богдана Хмельницького, 147, 49033, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 785-99-02, e-mail: 7859907@gmail.com

³ Товариство з обмеженою відповідальністю «ТЕРМАШ», пр. Богдана Хмельницького, 147, 49033, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 785-99-02, e-mail: 7859907@gmail.com

^{4*} Кафедра матеріалознавства і термічної обробки металів, ННІ «Інститут промислових та бізнес-технологій» Українського державного університету науки і технологій, пр. Гагаріна, 4, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 448-14-65, e-mail: yurijshportko86@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-8644-9733

⁵ Кафедра матеріалознавства і термічної обробки металів, ННІ «Інститут промислових та бізнес-технологій» Українського державного університету науки і технологій, пр. Гагаріна, 4, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 044-17-39, e-mail: v.l.pinchuk9@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8257-9252

⁶ Державне підприємство «Дніпропетровський регіональний науково-технічний центр стандартизації, метрології та сертифікації», вул. Барикадна, 23, 49044, Дніпро, Україна, тел. +38 (098) 419-42-34, e-mail: ligr@i.ua, ORCID ID: 0009-0002-9712-5557

Анотація. *Постановка проблеми.* Одна з основних проблем, з якими стикається сучасне підприємство – це пошук шляхів підвищення ефективності його діяльності. Для ефективного функціонування термічних підрозділів інструментальних виробництв потрібна одночасна наявність нагрівальних та гартувальних пристроїв із різними середовищами для нагрівання та охолодження. Цим пояснюється прагнення виробників і вчених до пошуку технологічних, дешевих, екологічно чистих середовищ для нагрівання та охолодження, які здатні забезпечити необхідні параметри термічної обробки і високу якість оброблюваних деталей. *Мета статті* – аналіз стану методів зміцнювальної термічної (комбінованої) обробки з використанням сипучих матеріалів як середовищ для об'ємного нагрівання і примусового охолодження металовиробів та конструктивно-технологічних особливостей гартівних пристроїв, які в змозі забезпечити раціональний структурний стан металу деталей складної геометричної форми за мінімального рівня їх жолоблення та деформації на прикладі використання віброзріджених сипучих матеріалів (в технічній літературі використовується термін «віброгравітаційні частки теплоносія»). **Висновок.** Досліджено використання у промисловості псевдозріджених сипучих матеріалів як середовищ для об'ємного нагрівання та гартування металовиробів і конструкцій пристроїв для їх використання. Визначено переваги способу охолодження в киплячому шарі для ефективного реалізації режимів зміцнювальної термічної обробки. Показано, що такий спосіб примусового об'ємного охолодження виробів інструментальних виробництв раціональний за різними показниками. Проаналізовано конструктивно-технологічні параметри пристроїв для його реалізації, які можуть стабільно забезпечити необхідний рівень властивостей легованих та високолегованих інструментальних сталей за мінімального рівня їх жолоблення і деформації.

Ключові слова: киплячий шар; псевдозрідження; псевдозріджені сипучі матеріали; інструментальні сталі; зміцнювальна термічна обробка; гартівний пристрій; охолоджувальне середовище

DEVELOPMENT OF INNOVATIVE TECHNOLOGY AND HARDENING EQUIPMENT FOR THE IMPLEMENTATION OF HARDENING HEAT TREATMENT OF METAL PRODUCTS USING FLUIDIZED BULK MATERIALS (part 1)

DEINEKO L.M.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BUTENKO A.O.²,
KABAK A.I.³,
SHPORTKO Yu.V.^{4*}, *Postgrad. Stud.*,
PINCHUK V.L.⁵, *Postgrad. Stud.*,
HREBONKINA L.G.⁶

¹ Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, ESI “Institute of Industrial and Business Technologies” of the Ukrainian State University of Science and Technologies, 4, Haharin Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (095) 333-13-25, e-mail: leonid_deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

² Termash Limited Liability Company, 147, Bohdan Khmelnytskyi Ave., Dnipro, 49033, Ukraine, tel. +38 (056) 785-99-02, e-mail: 7859907@gmail.com

³ Termash Limited Liability Company, 147, Bohdan Khmelnytskyi Ave., Dnipro, 49033, Ukraine, tel. +38 (056) 785-99-02, e-mail: 7859907@gmail.com

⁴ Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, ESI “Institute of Industrial and Business Technologies” of the Ukrainian State University of Science and Technologies, 4, Haharin Ave., 4, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 448-14-65, e-mail: yurijshportko86@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-8644-9733

⁵ Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, ESI “Institute of Industrial and Business Technologies” of the Ukrainian State University of Science and Technologies, 4, Haharin Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (066) 044-17-39, e-mail: v.l.pinchuk9@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8257-9252

⁶ State Enterprise “Dnipro Regional Scientific and Technical Center for Standardization, Metrology and Certification”, 23, Barikadna St., Dnipro, 49044, Ukraine, tel. +38 (098) 419-42-34, e-mail: ligr@i.ua, ORCID ID: 0009-0002-9712-5557

Abstract. Statement of the problem. One of the main problems faced by a modern enterprise is the search for ways to improve the efficiency of its activities. For the effective functioning of the thermal units of toolmaking industries, the simultaneous availability of heating and quenching devices with different heating and cooling media is required. This explains the desire of manufacturers and scientists to find technological, cheap, environmentally friendly heating and cooling media that can provide the required heat treatment parameters and high quality of the processed parts. **The purpose of the article** is to analyze the state-of-the-art of hardening thermal (combined) treatment methods using bulk materials as media for volumetric heating and forced cooling of metal products and the design and technological features of hardening devices that can ensure a rational structural state of metal parts of complex geometric shapes with a minimum level of their warping and deformation on the example of using vibro-fluidized bulk materials (in the technical literature, the term vibro-gravity particles of heat is used). **Research results.** To analyze the results of tests of bulk materials as quenching media for high-alloy steel grades and their effect on the structure and properties of the metal in comparison with the traditional oil quenching regime. To consider the features of quenching devices that use mechanical vibration to produce vibro-s bulk material and the possibility of their use in the implementation of quenching modes (including isothermal) of steel products of complex geometric shapes. **Conclusion.** The use of fluidized bulk materials in industry as media for volumetric heating and hardening of metal products and the design of devices for their use has been investigated. The advantages of the fluidized bed cooling method for the effective implementation of hardening heat treatment regimes are determined. It is shown that this method of forced volumetric cooling of toolmaking products is rational in terms of various indicators. The structural and technological parameters of devices for its implementation are analyzed, which can consistently provide the required level of properties of alloyed and high-alloy tool steels with a minimum level of warping and deformation.

Keywords: *fluidized bed; fluidization; fluidized bulk materials; tool steels; hardening heat treatment; heating furnace for hardening; cooling environment*

Постановка проблеми. Відомо, що інструментальні виробництва піддають різним режимам термічної та хіміко-термічної обробки велику кількість деталей складної форми, різної товщини та з різних марок сталей, що потребує індивідуального

підходу до вибору параметрів обробки та виду середовища для гартування. Тому для ефективного функціонування термічних підрозділів інструментальних виробництв потрібна одночасна наявність гартувальних пристроїв із різними охолоджувальними

середовищами. Цим пояснюється прагнення виробників і вчених до пошуку технологічних, дешевих, екологічно чистих середовищ для нагрівання та охолодження, здатних забезпечити необхідні параметри гартувального охолодження і високу якість оброблених деталей.

Аналіз публікацій. Проведено аналіз технічної та патентної літератури [1–12] з метою ознайомлення зі станом питання – використання у промисловості псевдозріджених сипучих матеріалів як середовищ для нагрівання та гартування металовиробів і конструкцій пристроїв для їх використання. Установлено, що в різних галузях промисловості за останні роки досить широко використовують зріджені різними методами сипучі матеріали. Також визначено основні конструктивно-технологічні параметри пристроїв для нагрівання та гартування різноманітних металовиробів і види сипучих матеріалів, які використовуються як середовища для нагрівання та охолодження, і основні переваги й недоліки вказаних середовищ та методів реалізації процесу гартування металовиробів у псевдозріджених сипучих матеріалах.

Мета статті – аналіз методів зміцнювальної термічної (комбінованої) обробки з використанням сипучих матеріалів як середовищ для об'ємного нагрівання і примусового охолодження металовиробів та конструктивно-технологічних особливостей гартівних пристроїв, які в змозі забезпечити раціональний структурний стан металу деталей складної геометричної форми за мінімального рівня їх жолоблення та деформації на прикладі використання віброзріджених сипучих матеріалів (у технічній літературі використовується термін «віброгравітаційні частки теплоносія»).

Результати досліджень. Киплячий шар (використовують також термін «псевдокиплячий шар») являє собою гетерогенну систему, яка складається із шару дрібних частинок (0,6–1,5 мм) вогнетривкого сипучого матеріалу і потоку

газоповітряної суміші, що проходить крізь шар частинок і створює інтенсивне їх перемішування та нагадує в'язку киплячу рідину.

У промисловості киплячий шар використовується також як однорідне щільне середовище для поділу (збагачення, класифікації) мінеральної сировини, в печах із киплячим шаром проводять окисний випал сульфідних руд, відновлювальний випал концентратів і тощо. Є широкі перспективи та діючі пристрої, де киплячий шар застосовується як середовище для спалювання твердих палив, зокрема, низькосортних, у топках енергетичних котлів.

Такі середовища використовуються в різних галузях промисловості також для забезпечення інтенсивного тепло-масообміну під час термічної обробки металовиробів (як нагрівальні середовища у спеціальних конструкціях нагрівальних пристроїв (печей) або як охолоджувальні середовища в гартувальних пристроях). Пристрої з киплячим шаром використовуються, наприклад, для проведення цементації, нітроцементації сталевих заготовок.

У процесі використання таких середовищ для нагрівання деталі занурюють у псевдозріджений шар, який працює в інтервалі від 150 °С до 1 200 °С. За відповідних температур і газових складових киплячий або псевдозріджений шар імітує теплопровідні, ізотермічні та дифузійні властивості рідких середовищ, створюючи в пристроях шахтного типу умови для отримання рівномірного прогріву і, наприклад, насичення оброблених виробів вуглецем та/або азотом (для цементації та нітроцементації).

Основна особливість киплячого шару – це його велика теплоємність та теплопровідність. Інтенсивна циркуляція частинок, об'ємна теплоємність яких приблизно на три порядки перевищує об'ємну теплоємність газів, дозволяє отримати в печах однакову у всіх точках шару температуру з точністю до декількох градусів (від ±2 до ±5 °С) від номіналу. За

інтенсивністю теплообміну та умовами роботи піч із киплячим шаром аналогічна ваннам із розплавами солей.

В умовах дрібносерійного виробництва добре зарекомендували себе пристрої з киплячим шаром, які можна використовувати для нагрівання (до 1 200 °С) та охолодження різних деталей. У літературі описані конструкції подібних нагрівальних та охолоджувальних пристроїв дрібногабаритних деталей, інструменту, але вони можуть використовуватися і для гартування довговимірних виробів, наприклад, труб нафтового сортаменту, рейок тощо.

Спосіб обігрівання шару визначається, перш за все, його температурою і вимогами, що пред'являються до стану поверхні металу, який нагрівається. Печі та ванни з температурою менше 800–750 °С можна обігрівати або електричними нагрівачами через стінки, або за допомогою занурювальних пальників, або спалюючи газ у затопленій киплячим шаром насадці, або, нарешті, подаючи під решітку розведені продукти згоряння або нагріте повітря.

У всіх випадках гріюче середовище є окисним для сплавів заліза. В електротермічному шарі, який продувається повітрям, середовище за цих температур також виходить окиснювальним. Безокиснювальне середовище можна отримати лише використовуючи захисний газ як псевдозріджувальне середовище, що найчастіше є неекономічним через велику його витрату.

Практика показує, що нагрівання сталевих деталей до температур (≤ 750 °С) не потребує захисних атмосфер. Інтенсивне утворення оксидного шару на поверхні деталей з вуглецевих сталей починається з ~650–700 °С, швидкорізальних – з 850 °С, а високохромистих навіть з 950 °С. У цих умовах швидко нагрівання будь-яких сталей і кольорових металів (наприклад, на основі міді) до ~600–700 °С в окисному середовищі цілком допустиме, якщо не потрібна світла поверхня. Для отримання світлої поверхні слід застосовувати муфелі, що обігриваються киплячим шаром, з подачею в них захисного

газу. У літературі зазначається, що слід віддавати перевагу електричному обігріву перед газовим.

Установлено, що в разі нагрівання металу в киплячому шарі за нагрівальною здатністю він близький до соляних розплавів. При цьому в киплячому шарі можна створювати різні контрольовані атмосфери, в т. ч. для хіміко-термічної обробки деталей.

Матеріал псевдозріджуваних частинок вибирають виходячи з його доступності, міцності на стирання, вогнетривкості, здатності взаємодіяти з поверхнею металу, що нагрівається, вартості тощо. Перелік матеріалів для низькотемпературних печей і ванн досить широкий (корунд, пісок, шамот, окис магнію і т. п.). Матеріалом киплячого шару є частинки електрокорунду діаметром 0,12 мм (ДСТУ 3647-71). Зазвичай прагнуть вибирати більш важкі частинки, оскільки їх застосування гарантує отримання більш високих коефіцієнтів тепловіддачі, вимагаючи, щоправда, великих швидкостей псевдозрідження.

Для експлуатації у високотемпературних (> 1 100 °С) пристроях, коли суттєвими стають ефекти спікання частинок одна з одною і налипання їх на метал, частіше використовують два матеріали: чистий Al_2O_3 (електрокорунд білий або чорний) та кесонна маса (досить чистий MgO). Перший промисловість випускає у вигляді фракцій (від 0,04 до 1,6 мм), але його вартість досить висока (залежно від фракції). Другий матеріал приблизно в 10 разів дешевший, але випускається у нефракціонованому вигляді. Фракціонований окис магнію, що випускається промисловістю, дорожчий за корунд. Можливе застосування інших оксидів, проте вони не повинні містити помітної кількості домішок.

Розмір псевдозріджуваних частинок визначається необхідністю зв'язати швидкість нагрівання виробів та час витримки з питомою продуктивністю печі. Чим дрібніші частинки, тим більший коефіцієнт тепловіддачі, а значить, і швидкість нагрівання, але тим менша і швидкість псевдозріджувальної газо-

повітряної суміші (a_v), тобто менша кількість тепла, що виділяється під час її спалюванні.

З літературних даних випливає, якщо обраний розмір частинок виявиться меншим за оптимальний для даних умов, габарити печі будуть визначатися необхідністю введення в її простір потрібної кількості тепла з газоповітряною сумішшю: за умовами теплообміну між деталлю і киплячим шаром можна було б забезпечити прогрів деталі в печі із значно меншою площею поду. Навпаки, якщо розмір частинок занадто великий, то площа поду печі визначатиметься інтенсивністю прогріву деталей у шарі (тобто часом, необхідним для нагрівання, витримки деталей) та швидкістю їх руху.

У цьому випадку кількість тепла, що вводиться з газоповітряною сумішшю за оптимального її складу (тобто за сумарного $a_v = 1,05-1,2$) буде занадто великою для підтримки заданої температури в печі. При подачі під решітку всього необхідного для горіння повітря для зменшення кількості тепла, що виділяється, доводиться в таких випадках збільшувати a_v . Аналогічний прийом використовують і у двозонних печах. Зрозуміло, що при цьому відповідно зменшується ККД печі.

Слід зауважити, що в разі вибору занадто великих частинок збільшення ефективності роботи печі (наприклад, рекуперацією тепла газів, які йдуть) утруднене, тому що всяке зменшення витрати палива викликає необхідність підвищення a_v (для підтримання в шарі потрібної швидкості), тобто відносних втрат із газами, що йдуть. Тому прагнення створити високоефективну піч завжди зумовлює вибір дрібніших частинок.

Велика кількість розрахунків, виконаних у різних експериментальних роботах для печей різного призначення, показує, що в промислових с найбільше економічне застосування частинок діаметром не більше 0,32–0,4 (рідко 0,5) мм. Використовуючи такі частинки, легко отримати питому продуктивність 1–1,5 т/год. і більше з 1 м² поду печі. Чим дрібніші псевдозріджувані

частинки, тим коротша і ширша виходить піч за тієї ж швидкості руху деталей. Найчастіше оптимальними виявляються частинки діаметром 0,1–0,16 мм і навіть менші.

У ваннах з електричним обігрівом, де підведення тепла не пов'язане зі швидкістю псевдозріджувального агенту, вибір дрібніших частинок гарантує відповідне зменшення втрат тепла на нагрівання псевдозріджувального агенту з одночасним збільшенням інтенсивності теплообміну. На жаль, застосування частинок діаметром менше 0,1–0,16 мм, особливо в печах із високим шаром, пов'язане з необхідністю збільшувати висоту відстійної зони та з небезпекою віднесення частинок. З огляду на це слід рекомендувати частинки діаметром не менше 0,2 мм.

Якщо за розрахунком оптимальними є дрібніші частинки, бажано за допомогою конструктивних і технологічних прийомів або за рахунок зниження економічності процесу знайти шлях застосування частинок діаметром $\sim 0,2$ мм. В охолодних ваннах застосування дрібніших частинок гарантує збільшення швидкості охолодження. Іноді цей фактор стає вирішальним, якщо, наприклад, потрібні властивості можна отримати у киплячому шарі корунду з діаметром частинок 0,1 мм і не отримати за діаметра частинок 0,2 мм. Висоту відстійної зони можна в цьому випадку дещо зменшити упорскуванням води та встановленням відбійних сепараторів.

Швидкість руху псевдозріджувального середовища визначається, перш за все, розміром та матеріалом частинок. Насправді зазвичай вибирається швидкість у 2–5 разів більша критичної, причому менші цифри відносять до шару великих частинок, а великі – до дрібних. Зі збільшенням швидкості псевдозріджувального середовища понад вказані значення підвищується інтенсивність руху частинок, дещо зростає (наближаючись до оптимальної швидкості) коефіцієнт тепловіддачі, але збільшується й інтенсивність викиду частинок.

Це викликає необхідність збільшення

висоти відстійної зони. За дуже малих швидкостей руху частинок псевдозрідження стає нерівномірним (особливо в апаратах із великою площею решітки), коефіцієнт тепловіддачі знижується і може відрізнятись для різних ділянок печі. За малих швидкостей прийнятне псевдозрідження матеріалу можна отримати лише в разі великого відносного опору газорозподільної решітки.

Так, наприклад, у працях проф. Г. А. Околовича зазначаються головні переваги печей з киплячим шаром – висока швидкість і рівномірність нагріву, така ж, як у солоних та селітрових ваннах. Деталі, що пройшли термічну обробку в печах із киплячим шаром, мають незначне викривлення, чисту поверхню, а отвори в оброблюваних деталях не закупорюються.

Печам із киплячим шаром властива і технологічна гнучкість, оскільки одна й та сама піч може бути використана для роботи як зі звичайною, так і з будь-якою контрольованою атмосферою (тобто для ХТО – цементації, азотування, карбонітрації), а також для охолодження при гартуванні. Замість елементів опору за зовнішнього підведення тепла в киплячий шар може бути використане безпосереднє нагрівання стін реторти. Для створення псевдозрідженого шару використовуються частинки електрокорунду розміром 120–300 мкм. Висота шару ~ 600 мм, що забезпечує нагрівання деталей завдовжки ~ 400–500 мм. За робочого режиму 900–1 000 °С перепад температури за перерізом печі становить ± 7 °С.

Порівняння техніко-економічних показників процесу нагрівання деталей у печах із киплячим шаром і в електропечах показує, що за рівної продуктивності обладнання енерговитрати на тонну вироблених у киплячому шарі виробів утричі менші, ККД в 1,6 раза вищий, виробнича площа, займана піччю киплячому шарі, у 20 разів менша.

У технічній літературі наводяться дані, які показують, що використання печі з киплячим шаром як відпускної, дозволяє вдвічі скоротити тривалість операції (з

урахуванням часу нагрівання) порівняно з відпуском за використання конвективної печі. Як приклад, за низькотемпературного відпуску циліндричних виробів діаметром 42 мм і довжиною 380 мм (температура відпуску 180 °С) використання киплячого шару для обробки дозволило скоротити час відпуску порівняно з часом відпуску в маслі з 6 до 4 год.

До недоліків використання киплячого шару для нагрівання металовиробів у серійному виробництві належать невисокі техніко-економічні характеристики процесу. Насамперед це пов'язано з відносно невеликими садками, порівняно з газовими процесами нагрівання, додатковими, суттєвими витратами на каталізатор та носій, підвищеними (в 7–10 разів більшими) витратами газів на псевдозрідження та великими витратами електроенергії на обробку 1 кг садки.

До недоліків способу нагрівання металовиробів у киплячому шарі при продуванні його продуктами спалювання газових сумішей відносять також і фактор налипання частинок, що не задовольняє вимогам отримання світлої поверхні деталей, при цьому одержання температур у печі нижче ~600 °С за рахунок спалювання палива в киплячому шарі деякі автори вважають взагалі неможливим.

Під час досліджень автори ставили завдання створення раціонального способу примусового об'ємного охолодження виробів інструментальних виробництв та конструктивно-технологічних параметрів пристрою для його реалізації, які можуть стабільно забезпечити необхідний рівень властивостей металу за мінімального рівня його жолоблення і деформації.

Відносно процесів гартувального охолодження металовиробів можна зазначити, що для ефективної реалізації режимів зміцнювальної термічної обробки використовуються охолоджувальні середовища, кожне з яких має тільки йому притаманні властивості. Відомо, що для отримання в металі мартенситної структури у процесі примусового охолодження металовиробів необхідно забезпечити

швидкість охолодження $\geq V_{кр}$. Збільшення інтенсивності охолодження металу деталей у процесі гартового охолодження спричинює зростання рівня термічної та структурної напруги, і відповідно, підвищення ймовірності жолоблення, деформації та тріщиноутворення.

Пошук найбільш раціональних охолоджувальних середовищ і способів охолодження, які задовольняли б явно протилежні по суті вимоги (з одного боку – підвищення інтенсивності охолодження та забезпечення мартенситного прогартування, з іншого – зростання рівня термічних і структурних напружень, ймовірності жолоблення, деформації та тріщино утворення), ведеться безперервно протягом історії розвитку способів термічного зміцнення металовиробів.

Одним з таких напрямків стало використання киплячого шару як охолоджувального середовища. Такі середовища та способи організації гартувального охолодження мають свої переваги та недоліки перед традиційними способами об'ємного охолодження в рідких середовищах. Як приклад можна навести результати досліджень, опубліковані в працях проф. В. К. Заблоцького та ін. [6; 7].

Аналіз даних, які наводяться в технічній і патентній літературі, показав, що для розроблення конкурентоспроможних тепломасообмінних апаратів доцільно використовувати інший підхід (порівняно з апаратами з псевдозрідженим шаром, який одержують під час продування сипучого матеріалу повітряним або газовим середовищем) зі створенням умов взаємодії контактуючих фаз, які сприяють більш інтенсивному оновленню міжфазної поверхні.

Цей напрямок пов'язаний з освоєнням прогресивних процесів тепло- та масопереносу, для проведення яких найбільш перспективні апарати з циркуляційним шаром частинок сипучих матеріалів.

Результатами низки досліджень визначено, що характерну особливість апаратів із теплоносієм у вигляді частинок

твердих матеріалів становлять пристрої, в яких частинки сипучого матеріалу здійснюють циркуляційний рух по замкнутій траєкторії. У літературі такі пристрої, що використовують як охолоджувальне середовище частки сипких матеріалів, називають «віброгравітаційними».

Термін «віброгравітаційний» означає, що частинки теплоносія за рахунок вібрації елементів охолоджувальних пристроїв піднімаються до певного верхнього положення і за рахунок сил гравітації вільно зсипаються на дно ванни, звідки за рахунок вібраційних сил знову переміщуються вгору, і процес повторюється. Оброблювані деталі після їх нагрівання до заданої температури викидаються в таке віброзріджене середовище і охолоджуються в ньому в пригніченому або вільному стані.

Для перемішування сипких (а також пастоподібних та рідких) продуктів у промисловості застосовують в основному два способи – гравітаційний та примусовий (механічний). Перший здійснюється за дії сил тяжіння в барабанних, лоткових та бункерних змішувачах, другий – у шнекових та лопатевих. Практика показала, що у разі використання статичних способів перемішування не досягається однорідність середовища, не забезпечується підвищення активності компонентів, відбувається зміна гранулометричного складу суміші. Задовільна якість перемішування спостерігається лише за малих ступенів заповнення камери, що спричинює збільшення габаритів і маси змішувача, та для добре сипких, малозв'язкових матеріалів.

Вібраційний вплив на матеріали, що перемішуються, і на робочі органи змішувача значно збільшує продуктивність процесу, знижує енергоємність і поліпшує якість суміші. При цьому вібрація в одних випадках може лише інтенсифікувати основний процес (наприклад, вібрування шнека в у шнековому змішувачі), в інших – викликати специфічні вібраційні ефекти, які використовуються для перемішування (наприклад, циркуляційне вібро-

транспортування суміші всередині циліндричної або тороподібної судини).

Процес перемішування з накладенням вібрацій супроводжується, крім того, додатковими ефектами руйнування зерен, оголенням додаткових поверхонь, руйнуванням когуляційних структур, збільшенням диспергування твердих частинок та газу, тобто активізацією суміші.

Процес перемішування органічно властивий сипучому матеріалу, який піддається вібрації. Вібраційні імпульси викликають хаотичні зіткнення частинок матеріалу, поділ їх за формою, щільністю і розмірами, руйнування конгломератів, що склалися, зменшення тертя між частинками. Перемішування відбувається практично в будь-якому процесі, де використовується вібрація, проте якісне перемішування можливе тільки у спеціальних пристроях із цілеспрямованою вібрацією. Дослідження перемішування в судинах, що піддаються вертикальній вібрації, показали, що інтенсивний процес починається лише тоді, коли прискорення дна судини перевищує земне прискорення. Ступінь інтенсивності залежить від параметрів вібрації, розміру та щільності частинок, повітропроникності шару, висоти шару, вологості, коефіцієнта тертя, розмірів та форми робочої камери.

Створити інтенсивне перемішування тонкодисперсних порошоків із розміром частинок менше 10 мкм практично не вдається за всіх реально досяжних параметрів вібрації. Це пояснюється агрегуванням частинок та сильним проявом насосного ефекту, який перешкоджає відриву частинок від дна судини. Для більшості сипких матеріалів із частинками розміром 50–1 500 мкм існує певне поєднання частоти та амплітуди, за яких починається інтенсивне перемішування. Наприклад, для кварцового піску з частинками розміром 100 мкм за висоти шару 70 мм процес перемішування за частотою 50 Гц починає інтенсивно відбуватися, коли амплітуда досягає 1 мм.

Інтенсивність перемішування за вертикальних коливань різко знижується у вакуумі, оскільки не виникає насосного

ефекту. Для перемішування у вакуумі використовують установки, в яких процес відбувається в результаті вібро-транспортування (наприклад, по лотку зі східцями). Вакуум сприяє хорошему переміщенню та перемішуванню багатьох тонкодисперсних порошоків за значно менших прискорень, ніж за атмосферного тиску. Цей спосіб знаходить застосування для сушіння барвників, солей та інших матеріалів.

У рідкому середовищі сипкий матеріал перемішується значно гірше, ніж у повітрі. На рух частинок рідини істотно впливають їх розміри, в'язкість рідини і концентрація в ній твердої фази, при цьому інтенсивний рух спостерігається у верхній частині при відносно спокійній нижній. Частота коливань частинок значно (в 2–2,5 раза) менша, ніж частота коливань дна апарата. Активним переносником частинок стають потоки рідини, що виникають під час вібрації. Так, в умовах стисненого руху крупнодисперсних частинок при циркуляції води, навколо частинок створюється шар, який добре перемішується.

Інтенсивність перемішування сипучих матеріалів збільшується за додаткового продування шару газом (наприклад, для порошку поліпропілену розміром 0,1–0,15 мкм – удвічі), однак рівномірне перемішування можна отримати тільки в разі оптимального поєднання вібраційного впливу та швидкості газового потоку.

Перемішування в умовах вертикальної вібрації відбувається недостатньо інтенсивно і не знаходить промислового застосування. У промислових змішувачах робочий орган піддається круговим (у вертикальній площині) або просторовим (об'ємним) коливанням, а змішувальну камеру виконують циліндричною, коритоподібною або тороїдальною. У цьому випадку при вібрації камери виникає транспортувальний ефект, який, накладаючись на вібраційний, створює кращі умови для перемішування середовища.

Інтенсивність циркуляції суміші залежить від параметрів вібрації,

властивостей сипучого матеріалу, розмірів та форми камери, ступеня її заповнення, розташування віброзбудника та інших конструктивних особливостей пристроїв. При цьому основне, превалююче значення на теплоперенесення між сипучим матеріалом і матеріалом деталі мають відносний рух частинок суміші і мікротурбулентність шарів, що становить необхідну передумову швидкого перебігу процесу перемішування, та є основними особливостями, які відрізняють вібраційний спосіб від інших способів перемішування.

Одна з важливих властивостей киплячого та віброзрідженого шару – це високий коефіцієнт теплообміну (200–1 000 ккал/м²·ч·град. і більше), що дає можливість регулювання швидкості нагрівання та охолодження металовиробів (порівняно із гартуванням у маслі) в області високих температур металу деталі за відсутності стадії парової плівки на поверхні деталей, а також відсутність на кривій охолодження металу температурних інтервалів, у яких відбувається зміна криз кипіння (характерно для середовищ, що змінюють свій агрегатний стан на межі метал – холодоагент).

Наслідком таких теплотехнічних особливостей процесу гартового охолодження в киплячому шарі стало суттєве зменшення жолоблення, деформації та ймовірності розтріскування металовиробів під час гартування. Відомо, що максимальний перепад температур між центром і поверхнею деталей, що спостерігається в процесі гартування в киплячому шарі ($\Delta t = 130$ °C), виявляється значно меншим, ніж за гартування в маслі ($\Delta t = 250$ °C), а тим більше у воді ($\Delta t = 700$ °C). Це зменшує рівень напруги в металі деталі в процесі її охолодження, що є однією з причин зниження жолоблення та деформації.

У разі використання псевдорідких охолоджувальних середовищ існує реальна можливість забезпечити умови ізотермічного $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення переохолодженого аустеніту за бейнітним механізмом, у процесі якого рівень

термічної та структурної напруги в металі істотно нижчий порівняно із гартуванням на мартенситну структуру.

У термічних виробництвах різних галузей промисловості помічається поширене використання способів термічного зміцнення з реалізацією бейнітного перетворення (в т. ч. і різні види ізотермічного гартування) в металі інструменту в разі використання псевдозріджених сипучих середовищ (за рахунок продування ванни із сипучим матеріалом) або віброзріджених сипучих матеріалів (у технічній літературі використовується термін «віброгравітаційні частки теплоносія»).

Отримання віброзріджених обсягів сипучих матеріалів часто організується за рахунок вібрацій жорсткої конструкції бака для гартування, яка здійснює рух замкнутим контуром, часто знизу вгору.

До основних недоліків віброгравітаційних охолоджувальних середовищ можна віднести:

- складність досягнення критичної швидкості охолодження (для отримання мартенситного прогартування в сталях із низькою стійкістю аустеніту до розпаду) для багатьох марок сталей, що стримує широке використання їх у промисловості;

- складність використання принципу псевдозрідження сипучих середовищ у промислових умовах під час термічної обробки великогабаритних виробів.

Тому в дослідженнях основну увагу приділяли створенню умов для підвищення швидкості охолодження виробів інструментальних виробництв у ванні з віброгравітаційним шаром сипучого матеріалу і можливості організації ізотермічної витримки для $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення переохолодженого аустеніту в необхідному температурному інтервалі (наприклад, створення умов, характерних для Q-p-R технологій [8]).

Відомо, що швидкість охолодження виробів зростає за зниження температури киплячого охолоджувального шару. Таким чином, залежно від марки сталі та перерізу

(маси) виробів, які охолоджуються, для отримання в металі заданих механічних властивостей, які забезпечуються утворенням сорбітно-трооститної структури, може використовуватися як киплячий шар, що підігрівається, так і «холодний» (нижче 100 °С).

При цьому швидкість охолодження в «холодному» киплячому шарі (його температура нижче 100 °С) у всьому інтервалі температур металу деталі практично не змінюється, а розігріву середовища вище 100 °С (за рахунок внесення тепла від охолоджуваних виробів) можна уникнути, обладнавши охолоджувальний бак змійовиками з проточною водою або влаштувавши охолодження стінок пристрою, в якому міститься сипкий матеріал.

Можлива також організація більш високої швидкості охолодження за рахунок впорскування порцій води в киплячий шар, на випаровування яких буде використовуватися зайве тепло, або за рахунок попереднього охолодження до мінусових температур повітря для продування шару або переохолодження до низьких температур сипучого матеріалу в разі використання його у віброгравітаційному шарі.

У технічній літературі наголошується, що найбільш прийнятний матеріал для киплячого шару – це електрокорунд. Він має досить високу твердість і щільність, що визначає тривалий термін служби. За охолоджувальною здатністю він займає проміжне положення між повітрям і маслом, тому питання заміни масла на охолодження в киплячому шарі вирішується індивідуально, залежно від марки сталі, розмірів деталей та необхідного структурного стану металу деталі.

Аналіз літературних даних показує, що киплячий шар являє собою ефективне середовище для гартованого охолодження деталей з легованих інструментальних сталей, таких як 9ХС, ХВГ, ХБВФ, Х12Ф1, Х12М, Р9, Р18 і т. п. Цікаво більш детально розглянути результати дослідження охолоджувальної здатності киплячого шару

порівняно з водою, маслом та розплавленою селітрою (при 300 °С), наведені, наприклад, у працях В. П. Курбатова та В. І. Муравйова.

Досліди проводили на циліндричному зразку із сталі Х18Н9Г1. Температуру в центрі та на поверхні зразка вимірювали хромель-алюмелевою термопарою. З кривих охолодження зразка в різних середовищах (рис. 1, 2) видно, що інтенсивність охолодження в киплячому шарі наближається до інтенсивності охолодження у маслі.

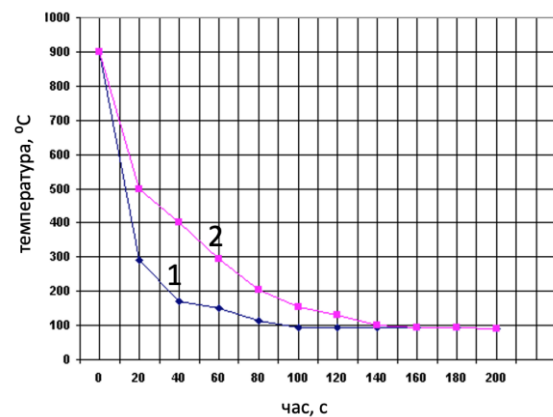


Рис. 1. Швидкість охолодження поверхні зразка діаметром 20 мм: 1 – у маслі; 2 – в киплячому шарі електрокорунду

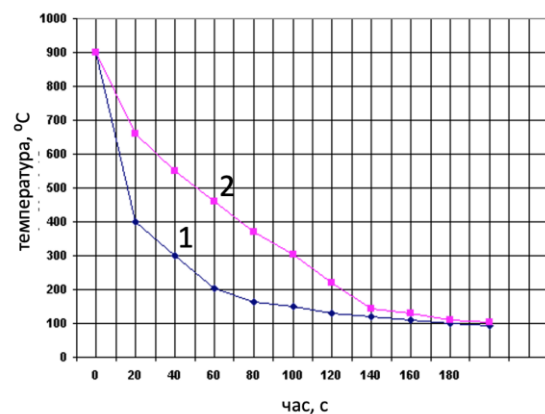


Рис. 2. Швидкість охолодження поверхні зразка діаметром 40 мм: графік 1 – у маслі; графік 2 – в киплячому шарі електрокорунду

Аналіз температурних перепадів за перерізом зразка, охолодженого в різних середовищах (рис. 3, 4), показав, що в разі використання киплячого шару за всіх температур охолодження перепад значно менший, ніж під час охолодження в холодних рідких середовищах.

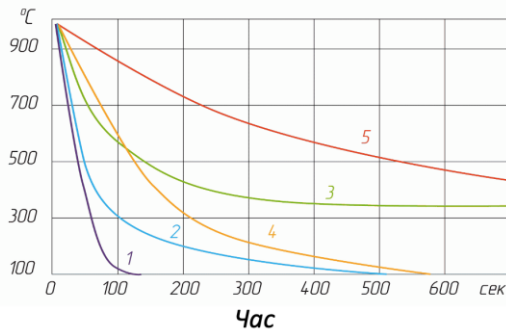


Рис. 3. Криві охолодження центра зразка: 1 – у воді; 2 – у трансформаторному маслі; 3 – у селітрі (300 °С); 4 – в киплячому шарі; 5 – на повітрі

Для прикладу наведено результати термічної обробки зразків діаметром 8 мм і довжиною 150 мм зі сталей P18 та X12M, які гартували в киплячому шарі, а також на повітрі, у маслі та розплавленій селітрі за 300 °С. Твердість, мікроструктуру та деформацію визначали після гартування та після відпуску. За деформацію зразків приймали прогин у середній частині, який заміряли індикатором під час установлення

зразків у центрах.

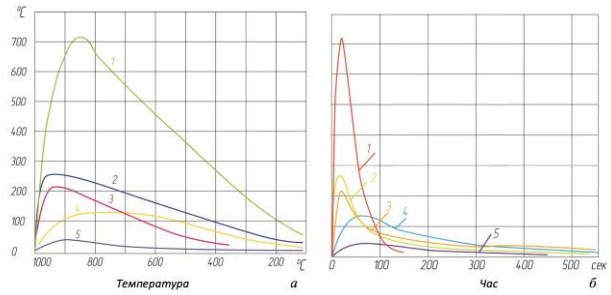


Рис. 4. Температурний перепад за перерізом зразка: а – залежно від температури центру зразка; б – залежно від часу охолодження зразка; 1 – охолодження у воді; 2 – у маслі; 3 – у селітрі (300 °С); 4 – в киплячому шарі; 5 – на повітрі

Результати вимірювань твердості та деформації показали, що твердість зразків, загартованих у киплячому шарі, не відрізняється від твердості зразків, загартованих в інших середовищах (табл. 1).

Таблиця 1

Результати вимірювань твердості та деформації зразків зі сталей P18 і X12M

Марка сталі	Гартування				Відпуск	
	Температура, °С	Охолоджувальне середовище	HRC	Деформація, мм	Температура, °С	HRC
P18	1270	Повітря	61–61,5	0,18–0,28	560 (триразовий)	61–62,5
		Масло	60–61	0,30–0,37		62–62,5
		Селітра за 300 °С	59,5–61	0,60–0,70		62–63,0
		Киплячий шар	61–61,5	0,20–0,28		62–63,5
X12M	1120	Повітря	46–48	0,06–0,13	500 (п'ятиразовий)	60–61,5
		Масло	46,5–48	0,15–0,20		61–61,5
		Селітра за 300 °С	45,5–47	0,05–0,12		61–61,5
		Киплячий шар	47–48	0,08–0,10		60–61,5
	1000	Масло	62–63,5	0,07–0,17	150	62–63,5
		Селітра за 300 °С	62,5–63	0,08–0,15		62,5–63,5
		Киплячий шар	62–63	0,03–0,07		62–63

Максимальна деформація зразків із сталі P18 спостерігається під час ізотермічного гартування в селітрі за 300 °С з отриманням бейнітної структури, що ймовірно пов'язано з перерозподілом вуглецю в залишковому аустеніті і його перетворенням на мартенсит. Зразки, загартовані в киплячому шарі та на повітрі, мають меншу деформацію, ніж після гартування в маслі. Зразки зі сталі X12M, загартовані з 1 120 °С і 1 000 °С, також мають меншу деформацію після охолодження в киплячому шарі та на

повітрі, ніж після гартування в маслі.

Експерименти з гартування різних інструментів у киплячому шарі показали, що вони піддаються жолобленню і деформації при цьому значно менше, ніж у разі гартування в маслі. Працездатність інструменту після гартування в киплячому шарі така, як і після гартування в маслі. Після відпуску загартованих зразків деформація у всіх випадках не змінювалася.

У мікроструктурі загартованих і відпущених зразків відмінності не виявили.

Результати випробувань зразків із сталі P18 на червоністькість після нагрівання за 600, 625, 650 і 675 °С протягом 4 год. (табл. 2) показують, що червоністькість зразків, загартованих у киплячому шарі, маслі та селітрі, однакова, а зразків, загартованих на повітрі нижча.

Аналіз літературних даних показує також, що в разі гартування в киплячому

шарі і з гартуванням у маслі та селітрі різних видів інструменту зі сталей P18, P9, P18K5Ф2, X12M і X12Ф1 (свердла, протяжки, фрези, мітчики, різці та ін.) деформація інструменту, загартованого в киплячому шарі, значно менша, ніж після гартування в інших середовищах за однакової твердості.

Таблиця 2

Дослідження червоністькості сталі P18 після однакових обробок із використанням різних середовищ для гартування

Охолоджувальне середовище	Твердість після термічної обробки, HRC	HRC після нагрівання 4 ч за температури, °С			
		600	625	650	675
Киплячий шар	62...63,5	60...61	58,5...59	57...58	47,5...48
Масло	62...62,5	60...61	58...59	56...57	47...48
Селітра при 300 °С	62...63	60...61	58...59	57...58	46...48
Повітря	61,5...62	58...59	56...57	49...50	45,5...46

Випробування на прогартуваність сталей P18 і X12M на зразках перетином 25×25 мм і довжиною 150 мм за методом торцевого гартування [13] показали, що зразки прогартувалися на всю довжину за гартування в маслі і киплячому шарі.

У таблиці 3 наведено властивості киплячого шару за охолодження деталей залежно від властивостей зернистого

матеріалу, який використовується як теплоносій.

У таблиці 4 наведено порівняльні дані щодо охолоджувальної здатності різних охолоджувальних середовищ, у т. ч. і для киплячого шару (срібний термозонд – кулька) за температур поверхні кульки близько 600 та 200 °С.

Таблиця 3

Властивості киплячого шару залежно від властивостей твердого теплоносія (дослідні дані)

Характеристика зернистих матеріалів			Температура в апараті, °С	Швидкість повітря, м/с	Максимальний коефіцієнт тепловіддачі	
найменування	щільність, кг/м ³	середній діаметр, мк				
Феросиліцій	6 800	82,5	30	0,30	721	620
Карборунд	3 500	137	25	0,22	500	430
Кварцовий пісок	2 590	140	30	0,20	495	426
	2 600	428	30	0,36	361	310
	2 600	1 100	20	0,68	209	180

Таблиця 4

Швидкість охолодження срібної кульки діаметром 20 мм в різних середовищах

Охолоджувальне середовище	Швидкість охолодження град/с, за температур поверхні кульки °С	
	600	200
Киплячий шар	Від 2 до 60	Від 0,5 до 20
Розплавлена сіль за 250 °С за 550 °С	90	-
	18	-
Масло	60	15
Повітря	5	1,5

Грунтуючись на інформації, отриманій з технічних джерел, і використовуючи власні напрацювання, в умовах кафедри матеріалознавства та термічної обробки металів ННІ «ІПБТ» УДУНТ та ТОВ «ТЕХМАШ», автори ведуть дослідження з визначення конструктивно-технологічних параметрів вібраційного охолоджувального пристрою та способу термічної обробки сталевих виробів із використанням віброзрідженого сипучого матеріалу, як охолоджувального середовища [14; 15]. Дослідження показують, що за рахунок зміни температури, виду та розмірів частинок сипучого матеріалу, а також параметрів вібрації та режиму охолодження можна змінювати швидкість охолодження оброблюваного металу для отримання необхідного структурного стану та властивостей виробів.

На базі ТОВ «ТЕХМАШ» виготовлено дослідно-промисловий варіант установки для гартування деталей у віброгравітаційному шарі сипучого матеріалу та проводиться відпрацювання різних режимів охолодження деталей різноманітної форми, розмірів та різнотовщинності з вуглецевих та легованих сталей.

Висновки

До основних висновків, які можна зробити на підставі аналізу різних джерел

інформації, належать:

1. Охолоджувальна здатність киплячого шару для гартування металовиробів наближається до охолоджувальної здатності масла.

2. Температурний перепад по перерізу деталей, які охолоджуються в киплячому шарі, та їх деформація значно менші, ніж за використання традиційних рідких середовищ (вода, масло та ін.).

3. Киплячий шар може бути використаний як гартувальне середовище для легованих та високолегованих інструментальних сталей.

Переваги способу охолодження в киплячому шарі:

1. Можливість регулювання швидкості охолодження у процес гартування виробів без заміни середовища.

2. Можливість організації ізотермічної витримки деталі за певної температури (ізотермічний режим гартування) за рахунок конструктивно-технологічних параметрів охолоджувального пристрою.

3. Мінімальне викривлення (жолоблення) та деформація деталей під час гартування.

4. Відсутність шкідливих виділень під час гартування.

5. Стабільні властивості гартувального середовища у часі.

6. Пожежна безпека та екологічна безпека гартувального середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Davidson J. F., Harrison D. Fluidization. Academic Press, 1971. 847 с.
2. Драгобецкий В. В., Коноваленко А. Д., Загорянский В. Г. Новые и высокоэффективные технологии в машиностроении : уч. пособ. Харьков : «Точка», 2012. 238 с.
3. Дорошенко В. С., Каложный П. Б. Концепции охлаждения отливок с помощью криотехнологии, новых сыпучих материалов и способов литья. *Металл и литье Украины*. 2019. № 5–6. С. 312–313.
4. Bed Material. *ScienceDirect*. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bed-material> (дата звернення: 05.06.2024).
5. Fluidized Bed. *ScienceDirect*. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/fluidized-bed> (дата звернення: 05.06.2024).
6. Спосіб термічної обробки сталі : Пат. 43690 U 2009 03360 Україна : C21D9/22 ; заявл. 08.04.2009; опубл. 25.08.2009, Бюл. № 16.
7. Шимко В. И. Усовершенствование режимов термической обработки сталей и чугунов с применением охлаждения в сыпучем графите : автореф. дис. на соискание науч. ст. канд. техн. наук : 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов»; ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». Мариуполь, 2013. 23 с.
8. Шпортько Ю. В., Дейнеко Л. М. Сучасна технологія ізотермічного гартування. Молоді вчені 2024 – від теорії до практики : матер. XIV Всеукр. наук.-практ. конф. здоб. вищ. осв. і мол. уч. Електронне видання. Дніпро : Журфонд, 2024. С. 88–90.

9. Спосіб виготовлення виливків : патент 131907 Україна : МПК B22D 7/00, B22D 23/00, B22D 27/04, C21D 1/20; опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3.
10. Спосіб виготовлення виливків з бейнітного або аусферитного чавуну : патент 131968 Україна : МПК B22 D7/00, B22 D23/00, C21D 1/20, C21D 5/02; опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3.
11. Спосіб виготовлення виливків з ізотермічно загартованого бейнітного чавуну : патент 133701 Україна : МПК B22D 7/00, B22D 23/00, B22D 27/04, C21D 5/02, C21D 1/20; опубл. 25.04.2019, Бюл. № 8.
12. Спосіб виготовлення виливків з ізотермічно загартованого чавуну : патент 133701 Україна : МПК B22D23/00, B22D 23/00, B22D27/04, C21D 5/02; опубл. 25.01.2019, Бюл. № 8.
13. ISO 642:1999. Steel – Hardenability test by end quenching (Jominy test). ULR: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/1228/aaaec2f19f6740c7b0aee0e75ecc9b59/ISO-642-1999.pdf> (дата звернення: 05.06.2024).
14. Спосіб термічної обробки сталевих виробів : патент України на корисну модель № 151859 від 22.09.2022. МПК (2006) C21D 9/00 (2006:01); C21D 9/22 (2006:01); заявка № u 2022 01529 від 12.05.2022 р.; опубл. 21.09.2022, Бюл. № 33.
15. Пристрій для загартування сталевих виробів : патент України на корисну модель UA 151425 U від 21.07.2022. C21D 1/62 (2006:01); C21D 1/60 (2006:01); заявка № u2022 00049 від 05.01.2022 р.; опубл. 20.07.2022, Бюл. № 29.

REFERENCES

1. Davidson J.F. and Harrison D. Fluidization. Academic Press Publ., 1971, 847 p.
2. Dragobetsky V.V., Konovalenko A.D. and Zagoryansky V.G. *Novye i vysokoeffektivnye tekhnologii v mashinostroenii : uch. posob.* [New and highly efficient technologies in mechanical engineering : textbook guide]. Kharjiv : “Tochka” Publ., 2012, 238 p. (in Russian).
3. Doroshenko V.S. and Kalyuzhny P.B. *Kontseptsii okhlazhdeniya otlivok s pomoshch'yu kriotekhnologii, novykh sypuchikh materialov i sposobov lit'ya* [Concepts for cooling castings using cryotechnology, new bulk materials and casting methods]. *Metall i lit'e Ukrainy* [Metal and Casting of Ukraine]. 2019, no. 5–6, pp. 312–313. (in Russian).
4. Bed Material. ScienceDirect. ULR: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bed-material> (accessed : 05 June 2024).
5. Fluidized Bed. ScienceDirect. ULR: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/fluidized-bed> (accessed: 05 June 2024).
6. Zablotsky V.C., Feldman V.Ye., Fesenko A.M., Fedorinov V.A., Shimko A.I. et al. *Sposib termichnoyi obrobki stali* [Method of heat treatment of steel]. Ukrainian patent no. 43690 U 2009 03360, C21D9/22; statement 04/08/2009; published 25.08.2009, Bull. no. 16, 2009. (in Ukrainian).
7. Shimko V.I. *Usovershenstvovanie rezhimov termicheskoy obrabotki staley i chugunov s primeneniem okhlazhdeniya v sypuchem grafite* : avtoref. dis. na soiskaniye nauch. st. kand. tekhn. nauk : 05.16.01 “Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov” [Improvement of heat treatment regimes for steels and cast irons using cooling in bulk graphite: abstract of a PhD dissertation in engineering : 05.16.01 “Metal Science and Heat Treatment of Metals”]. Mariupol' : Priazovsky State Technical University, 2013, 23 p. (in Russian).
8. Shportko Yu.V. and Deineko L.M. *Suchasna tekhnologhija izotermichnogo ghartuvannja* [Modern isothermal hardening technology]. *Molodi vcheni 2024 – vid teorii do praktyky : Materialy XIV Vseukraïnsjka naukovo-praktychna konferencija здобувачив вищої освіти і молодих учених* [Young Scientists 2024 – from Theory to Practice : Materials of the XIV All-Ukrainian scientific and practical conference of higher education graduates and young scientists]. 21 March 2024, Dnipro : Zhurfond Publ., 2024, pp. 88–90. (in Ukrainian).
9. Doroshenko V.S. and Shinsky V.O. *Sposib vyghotovlennja vylyvkiv* [Method of production of castings]. Patent 131907 Ukraine: IPC B22D 7/00, B22D 23/00, B22D 27/04, C21D 1/20; published 11.02.2019, Bul. no. 3. (in Ukrainian).
10. Doroshenko V.S. and Shinsky V.O. *Sposib vyghotovlennja vylyvkiv z bejnitnogo abo ausferytnogo chavunu* [The method of making castings from bainite or ausferite cast iron]. Patent 131968 Ukraine: IPC B22 D7/00, B22 D23/00, C21D 1/20, C21D 5/02; published 11.02.2019, Bul. no. 3. (in Ukrainian).
11. Doroshenko V.S., Kalyuzhny P.B. and Shinsky V.O. *Sposib vyghotovlennja vylyvkiv z izotermichno zaghartovanogo bejnitnogo chavunu* [The method of manufacturing castings from isothermally hardened bainite cast iron]. Patent 133701 Ukraine: IPC B22D 7/00, B22D 23/00, B22D 27/04, C21D 5/02, C21D 1/20; published 04/25/2019, Bul. no. 8. (in Ukrainian).
12. Doroshenko V.S., Kalyuzhny P.B. and Shinsky V.O. *Sposib vyghotovlennja vylyvkiv z izotermichno zaghartovanogo chavunu* [Method of manufacturing castings from isothermally hardened cast iron]. Patent 133701 Ukraine: IPC B22D23/00, B22D 23/00, B22D27/04, C21D 5/02; published 25.01.2019, Bul. no. 8. (in Ukrainian).
13. ISO 642:1999. Steel – Hardenability test by end quenching (Jominy test). ULR: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/1228/aaaec2f19f6740c7b0aee0e75ecc9b59/ISO-642-1999.pdf> (accessed: 05 June 2024).

14. Deineko L.M., Butenko A.A., Kabak A.I. et al. *Sposib termichnoji obrobky stalevykh vyrobiv* [Method of heat treatment of steel products]. Ukrainian utility model patent no. 151859 dated 09/22/2022. IPC (2006) C21D 9/00 (2006:01); C21D 9/22 (2006:01); application no. u 2022 01529 dated May 12, 2022; published 09/21/2022, Bul. no. 33. (in Ukrainian).

15. Deineko L.M., Butenko A.A., Kabak A.I. et al. *Prystrij dlja zaghartuvannja stalevykh vyrobiv* [The device for hardening steel products]. Patent of Ukraine for utility model UA 151425 U dated 07/21/2022. C21D 1/62 (2006:01); C21D 1/60 (2006:01); application no. u2022 00049 dated January 5, 2022; published 07/20/2022, Bul. no. 29. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 12.04.2024.

УДК 691.23-027.45.666.9

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.48.1073

РОЗРОБКА СУХИХ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ НА ОСНОВІ РЕДИСПЕРСІЙНИХ ПОРОШКІВ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІПСОВИХ СУМІШЕЙ

ДРОЗД А. А.¹, канд. техн. наук,

ДЕХТА Т. М.^{2*}, канд. техн. наук, доц.

¹ ТОВ «Тадалс-буд», пров. Біологічний, 2, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 631-92-92, e-mail: Li2kondik@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-7588-5569

^{2*} Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (096) 242-64-41, e-mail: dehta.tatyana75@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5023-3070

Анотація. *Актуальність роботи.* Теоретично обґрунтовано та експериментально доведено можливість отримання сухої добавки-сповільнювача утворення гіпсу на основі негашеного вапна і полівінілацетатної дисперсії внаслідок утворення полівінілового спирту і солей ацетату кальцію в результаті лужного гідролізу дисперсії (ПВАД) полівінілацетату під час гасіння вапна в гідратну вапно-пушонку. Результати роботи реалізовано у виробництві сухих гіпсових сумішей. *Мета дослідження* – розроблення сухих будівельних сумішей на основі гіпсу і збільшення терміну їх придатності за рахунок введення складних добавок на основі негашеного вапна та дисперсії [ПВАД] полівінілацетату. *Методика.* ЗАСТОСОВАНО стандартні методи дослідження для визначення фізико-механічних властивостей гіпсових в'язучих і якості комплексних добавок згідно з ДСТУ Б В.2.7-82:2010, ДСТУ Б В.2.7-23-95, ДСТУ Б В.2.7-171:2008. Дослідження фазового складу матеріалів, мікро- та макроструктури проводились за допомогою рентгенофазового аналізу, електронної і світлової мікроскопії. *Результати.* Досліджено вплив основних складових добавки (дисперсії полівінілацетату та вапна) на властивості напівводного гіпсу. Запропоновано та встановлено хімізм взаємодії компонентів складової добавки, згідно з яким лужний гідроліз полівінілацетату зумовлює утворення полівінілового спирту, особливістю структури, молекули якої – наявність гідрофільних ОН- груп і гідрофобний компонент – вуглеводневий радикал. Гідрофільна частина молекули, будучи іонною, адсорбується на поверхні частинок в'язучого, утворює мономолекулярну плівку, орієнтовану гідрофобною частиною від частинок гіпсу. Можливе також утворення ацетату кальцію $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, що підвищує концентрацію іонів кальцію в розчині. Комбінована дія продуктів гідролізу значно знижує розчинність напівгідрату, швидкість утворення центрів кристалізації, тим самим забезпечуючи ефект сповільнення.

Ключові слова: суха гіпсова суміш; добавка; міцність; час придатності; строки захоплення; розчинність

DEVELOPMENT OF DRY BUILDING MIXTURES BASED ON REDISPERSIBLE POWDER FOR REGULATING THE PROPERTIES OF PLASTER MIXTURES

DROZD A.A.¹, Cand. Sc. (Tech.),

DEHTA T.M.^{2*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

¹ Limited Liability Company “Tadals-bud”, 2, Biological Alley, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 631-92-92, e-mail: Li2kondik@ukr.net, ORCID ID: 0000-0001-7588-5569

^{2*} Department of Technology of Building Materials, Products and Constructions, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (096) 242-64-41, e-mail: dehta.tatyana75@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5023-3070

Abstract. *The relevance of the work.* The results is theoretically substantiated and experimentally confirmed the possibility of obtaining a dry additive-retarder of gypsum setting based on lime and polyvinyl acetate dispersions due to the formation of polyvinyl alcohol and salts of calcium acetate in the result of alkaline hydrolysis of polyvinyl acetate dispersion (PVAD) with the slaked lime in hydrated lime. The results of the work implemented in the production of dry gypsum mixes. *Purpose.* The development of dry building mixes based on gypsum and time increase of time of their conformance through adding of complex additives on the basis of burnt lime and polyvinyl acetate dispersions [PVAD].

Methodology. The study used standard research techniques to determine physical and mechanical properties of gypsum binders and quality of complex additives according to ДСТУ Б В.2.7-82:2010, ДСТУ Б В.2.7-23-95, ДСТУ Б В.2.7-171:2008. Study of phase composition of materials, micro – and macrostructure was carried out by x-ray diffraction, electron and light microscopy. **The results.** The influence of the main components of the additive (polyvinyl acetate dispersion and lime) on the properties of hemihydrate gypsum is investigated. The chemistry of the interaction of components of the complex additive, according to which the result of alkaline hydrolysis of polyvinyl acetate is formed: polyvinyl alcohol, a feature of its molecules structure is the presence of hydrophilic OH-groups and the hydrophobic component – a hydrocarbon radical. The hydrophilic part of the molecule being ion adsorbed on the surface of the particles of the binder, forms a monomolecular layer that is oriented with the hydrophobic part of the gypsum particles. It is also possible the formation of calcium acetate $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, which increases the concentration of calcium ions in solution. The combined effect of hydrolysis products significantly reduce the solubility of hemihydrate, the rate of formation of crystallization centers, due to the slowing effect of these supplements.

Keywords: *dry gypsum mixture; additive; strength; availability time; setting time; solubility*

Вступ. Для регулювання термінів схоплювання у гіпсові суміші вводять різні добавки. Аналіз показує, що в Україні недостатньо розвинене виробництво сухих будівельних сумішей на основі гіпсу із застосуванням добавок вітчизняного виробництва, внаслідок чого доводиться використовувати імпортні, досить дорогі, що не дозволяє зробити вітчизняну продукцію конкурентоспроможною. Тому питання дослідження та розроблення нових сухих будівельних сумішей на основі добавок вітчизняного виробництва досить актуальні [1; 2].

У 1960-х роках було розпочато промислове перетворення дисперсій полімерів на дисперсійні порошки методом розпилювального сушіння. Сьогодні ця галузь інтенсивно розвивається, неухильно збільшуючи номенклатуру дисперсійних порошків.

Дисперсійні порошки отримують шляхом висушування полімерної емульсії, стабілізованої у воді разом із водорозчинним агентом. У процесі висушування чистої полімерної емульсії відбувається злипання та полімеризація її частинок. Додавання захисних колоїдів і агентів, що протизлипаються, забезпечує отримання сипкого порошку, здатного диспергуватися у воді. Водорозчинний агент утворює аморфне скло на поверхні кожної частинки емульсії і не допускає полімеризації під час сушіння. Висохлий порошок має розмір гранул близько декількох мікронів. За взаємодії порошку з водою водорозчинний агент активізується, відновлюючи таким чином емульсію в її

вихідному вигляді. Однак полімери мають відносно високу вартість.

Мета дослідження. Застосовуючи відомий прийом отримання редисперсійних порошків, спробували використовувати як вихідний компонент вторинний продукт цукрового виробництва кормову патоку (мелясу).

Методика. Бурякова меляса – це в'язка речовина темно-коричневого кольору, добре розчинна у воді. Вона є речовиною органічного походження, а не полімером, і тому в процесі сушіння полімеризується. Однак звичайним способом висушити мелясу дуже важко, оскільки вона має високу гігроскопічність і протягом деякого часу знову перетворюється на початковий стан. Вплив патоки на властивості будівельного гіпсу було досліджено раніше. За використання бурякової меляси в кількості 3 % від маси гіпсу терміни схоплювання збільшуються приблизно втричі [3–5].

Основні результати досліджень. Як водорозчинний агент обрано карбідний мул, це відходить від виробництва ацетилену карбідним способом. Він є масою вологістю $W = 42...45\%$ [6].

Спільне використання добавок, тобто комплексної добавки на основі бурякової меляси та карбідного мулу (у сирому стані), дозволило значно прискорити початок схоплювання будівельного гіпсу від 0,25 до 1,5 год.

Проведені дослідження показали можливість створення комплексної добавки, що дозволяє збільшити живучість суміші та зменшити водопотребу.

Пропонований спосіб заснований на загальній методиці одержання дисперсійних порошоків. У зв'язку з тим, що спосіб отримання дисперсійних порошоків у розпилювальній сушарці характеризується складністю, високою вартістю, запропоновано дещо іншу схему (рис. 1). Уповільнювач твердіння (меляса) диспергується в розчині водорозчинного агента, і після сушіння проводиться додаткове подрібнення.

Важливий фактор, що впливає на розміри частинок, – ступінь диспергації меляси, розміри частинок при цьому повинні досягати мікрона, що дозволяє знизити витрати на сушіння та подрібнення. Тому для отримання дисперсії з такими розмірами

частинок застосовували високооборотний змішувач турбінного типу.

Відповідно до цієї технології, меляса і карбідний мул (водорозчинний агент) в природному стані дозуються і змішуються в диспергаторі.

Потім комплексна добавка направляється на сушіння та подрібнення. Час перемішування меляси – в межах 2...5 хв., залежно від вологості компонентів. Максимальну температуру сушіння 90 °С визначено на основі результатів досліджень. За підвищення температури понад 90 °С відбувалося оплавлення маси та утворення важкорозчинної речовини. Отримані гранули розміром 3...6 мм подрібнювалися у кульовому млині протягом 10...12 хв. до проходження через сито 008.

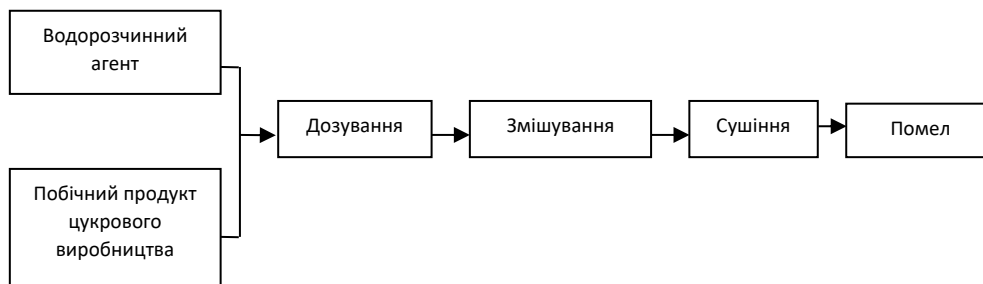


Рис. 1. Технологічна схема отримання сухої добавки

У розробленні технології отримання добавки (меляса + карбідний мул) основними критеріями були: максимальний вміст меляси та мінімальна тривалість сушіння t_c , фактори, що впливають на якість добавки та її вартість. Для визначення

оптимального режиму сушіння були підготовлені добавки із співвідношенням за масою (меляса – карбідний мул) 60/40, 70/30, 80/20. Режими сушіння наведені на рисунку 2.

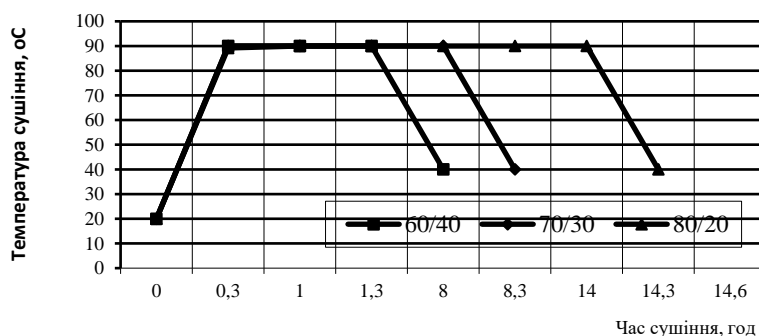


Рис. 2. Режими сушіння

У результаті сушіння та подрібнення отримано добавки із співвідношенням за масою 60/40, 70/30, 80/20. Таким чином, найбільша ефективність сушіння досягається за використання добавки у співвідношенні

компонентів меляса – карбідний мул (60 : 40). У разі збільшення вмісту меляси час сушіння теж значно збільшується. Так, за співвідношення компонентів 80 : 20 час сушіння досягає приблизно 24 год, а за

вмісту 90 : 10 суміш практично неможливо висушити. У зв'язку з цим оптимальним співвідношенням компонентів (меляса – карбідний мул) було прийнято співвідношення 60 : 40. З режимом сушіння $0,3 \times 2 \times 0,3$ год температура сушіння становила $t = 90$ °С.

Таким чином, технологія одержання добавки підтверджена експериментально, що доводить можливість використання меляси у виробництві сухих будівельних сумішей.

Введення добавки в межах від 0,5 до 2,0 % масою дозволяє знизити водогіпсове відношення від 0,63 до 0,53...0,56, при цьому час початку схоплювання збільшується до 1,5 год.

Механічні випробування міцності зразків на основі гіпсу з різним вмістом розробленої добавки показали, що за вмісту добавки до 1 % масою зниження міцності незначне і становить не більше 6–8 %. За

подальшого збільшення кількості добавки міцність різко падає.

Отже, спочатку можна зробити висновок, що вміст добавки має бути в межах 0,3...1,0 %.

Тепловиділення в разі гідратації будівельного гіпсу з добавкою значно відрізняється від тепловиділення напівводного гіпсу, і з добавкою меляси і напівводного гіпсу з карбідним мулом (рис. 3).

Температурний пік термодинамічного процесу гідратації будівельного гіпсу з добавкою на 5...7 °С нижчий, ніж чистого гіпсу, і становить 36...38 °С. Пов'язано це з повільнішою швидкістю гідратації, період розігріву суміші становить більше 1 год, тоді як будівельного гіпсу з добавкою карбідного мулу – 20...25 хв. Ймовірно, зменшується розчинність напівгідрату і час утворення насиченого розчину збільшується.

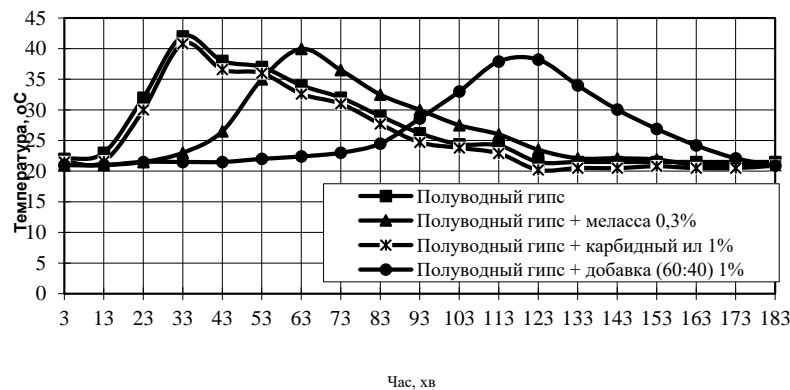


Рис. 3. Зміни температури процесу гідратації напівводного гіпсу за присутності різних добавок

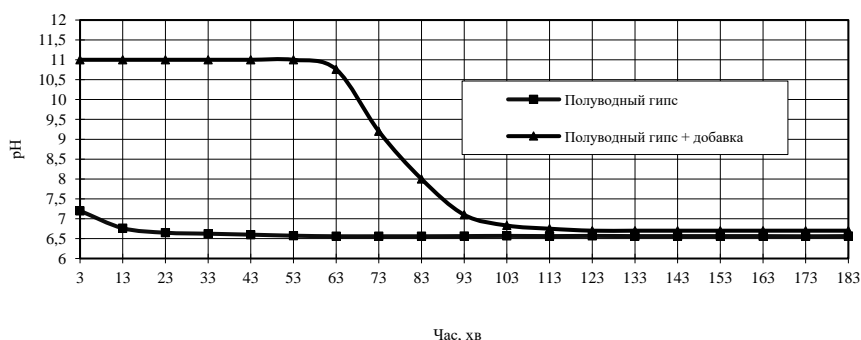


Рис. 4. Графік зміни рН розчину за гідратації чистого будівельного гіпсу та будівельного гіпсу з добавкою

Зміна величини рН розчину (рис. 4) становить 7,3, і після проміжку часу відповідного розчинення напівгідрату і зниження рН розчину нижче 6,8 настає

насичення розчину, і реакція утворення двоводного гіпсу інтенсифікується, на що вказує підвищення температури (рис. 3).

Аналогічне відбувається і за введення добавки, але за рахунок того, що меляса гальмує процес розчинення, а карбідний мул підвищив лужність до $pH = 11$, реакція гідратації настає приблизно через 1 год, що підтверджується зниженням pH розчину (рис. 4).

Тобто можна зазначити, що інтенсивність реакції гідратації настає за зменшення pH розчину нижче 7.

Висновки

Спільне використання меляси та карбідного мулу дозволяє отримати добавку у вигляді сухого порошку. Встановлено, що розроблена добавка дозволяє регулювати терміни схоплювання в межах 25–90 хв., крім того, водогіпсове відношення знижується на 5...8 %, тобто добавка має пластифікувальні властивості. Одна з істотних переваг добавок даного класу – це ефективність застосування, яка виражається в порівняно низьких дозах 0,3...1,0 % за масою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гонтарь Ю. В., Чалова А. І., Бурьянов А. Ф. Сухі будівельні суміші на основі гіпсу та ангідриду. Київ : МАПО, 2010. 214 с. ISBN: 5-93536-076-4.
2. Троян В. В. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Чернігів : Аспект-Поліграф, 2010. 228 с. ISBN: 978-966-340-401-1.
3. Дворкін Л. Й. Модифіковані гіпсові і сульфатно-шлакові в'язучі та матеріали на їх основі. Рівне, 2011. 228 с. ISBN: 978-966-327-190-3.
4. Іващенко С. І. Модифіковані сульфатовані клінкери та цементи на їх основі. Київ : Інфра-М, 2016. 192 с. ISBN: 978-5-00091-129-7.
5. Рунова Р. Ф., Гоц В. І. Основи виробництва стінових та оздоблювальних матеріалів. Київ : Основа, 2016. 528 с. ISBN: 978-966-699-884-5.
6. ДСТУ Б В.2.7-126:2011. Суміші будівельні сухі модифіковані. Загальні технічні умови. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 55 с. (Національний стандарт України).
7. Зоткин А. Г. Бетони з ефективними добавками. Київ : Інфра-Іженерія, 2021. 160 с.
8. Захарченко П. В., Гавриш О. М., Півень Н. М., Іващенко Ю. В. Тенденції розвитку ринку сухих будівельних сумішей України. Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів : матер. III Всеукр. наук.-техн. конф. Львів, 2016. С. 76–79.
9. Рунова Р. Ф., Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Носовський Ю. Л. В'язучі речовини : підруч. Київ : Основа, 2012. 446 с.
10. Putzoberflächen im Innenbereich. Merkblatt 3 : Qualitätsstufen. Bundesverband der Gipsindustrie e.V. Berlin, 2016. 14 p.
11. Sachatschenko P., Gavrish A., Iwastchenko J. Die Faktoren, die die Formierung des Marktes von Gipstrockengemischen in der Ukraine beeinflussen. 3. Weimarer Gipstagung. Tagungsbericht. Bauhaus Universität Weimar, 2017. Pp. 269–274.

REFERENCES

1. Gontar Yu.V., Chalova A.I. and Buryanov A.F. *Sukhi budivel'ni sumishi na osnovi hipsu ta anhidrytu* [Dry construction mixtures based on gypsum and anhydrite]. Kyiv : MAPO Publ., 2010, 214 p. ISBN: 5-93536-076-4. (in Ukrainian).
2. Troyan V.V. *Dobavky dlya betoniv i budivel'nykh rozchyniv* [Additives for concrete and building solutions]. Chernihi v: Aspect-Polygraph Publ., 2010, 228 p. ISBN: 978-966-340-401-1. (in Ukrainian).
3. Dworkin L.Yo. *Modyfikovani hipsovi i sul'fatno-shlakovi v'yazhuchi ta materialy na yikh osnovi* [Modified gypsum and sulfate-slag binders and materials based on them]. Rivne, 2011, 228 p. ISBN: 978-966-327-190-3. (in Ukrainian).
4. Ivashchenko S.I. *Modyfikovani sul'fatovani klinkery ta tsementy na yikh osnovi* [Modified sulfated clinkers and cements based on them]. Kyiv : Infra-M Publ., 2016, 192 p. ISBN: 978-5-00091-129-7. (in Ukrainian).
5. Runova R.F. and Gots V.I. *Osnovy vyrobnystva stinovykh ta ozdobyval'nykh materialiv* [Fundamentals of production of wall and finishing materials]. Kyiv : Osнова Publ., 2016, 528 p. ISBN: 978-966-699-884-5. (in Ukrainian).
6. *DSTU B V.2.7-126:2011. Sumishi budivel'ni sukhi modyfikovani. Zahal'ni tekhnichni umovy* [DSTU B V.2.7-126:2011. Dry modified construction mixtures. General technical conditions]. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2011, 55 p. (National Standard of Ukraine). (in Ukrainian).

7. Zotkin A.G. *Betony z efektyvnymy dobavkamy* [Concretes with effective additives]. Kyiv : Infra-Izheneriya Publ., 2021, 160 p. (in Ukrainian).

8. Zakharchenko P.V., Havrysh O.M., Piven N.M. and Ivashchenko Yu.V. *Tendentsiyi rozvytku rynku sukhykh budivel'nykh sumishey Ukrayiny* [Trends in the development of the market of dry construction mixtures of Ukraine]. *Suchasni tendentsiyi rozvytku i vyrobnytstva sylikatnykh materialiv : materialy III Vseukrayins'koyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi* [Modern trends in the development and production of silicate materials : materials of the 3rd All-Ukrainian scientific and technical conference]. Lviv, 2016, pp. 76–79. (in Ukrainian).

9. Runova R.F., Dvorkin L.Yo., Dvorkin O.L. and Nosovsky Yu.L. *V'yazhuchi rechovyny : pidruchnyk* [Binders : textbook]. Kyiv : Osnova Publ., 2012, 446 p. (in Ukrainian).

10. Putzoberflächen im Innenbereich. Merkblatt 3 : Qualitätsstufen. Bundesverband der Gipsindustrie e.V. Berlin, 2016, 14 p. (in German).

11. Sachatschenko P., Gavrisch A. and Iwastschenko J. Die Faktoren, die die Formierung des Marktes von Gipstrockengemischen in der Ukraine beeinflussen. 3. Weimarer Gipstagung. Tagungsbericht. Bauhaus Universität Weimar, 2017, pp. 269–274. (in German).

Надійшла до редакції: 20.05.2024.

УДК 624:629.7

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.54.1074

БЕЗПЛОТНІ ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОБСТЕЖЕННЯ МОСТОВИХ СПОРУД

ЖИВЦОВА Л. І., канд. техн. наук., доц.

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 756-33-19, e-mail: zhyvtsova.liudmyla@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6176-1781

Анотація. Постановка проблеми. У сучасному світі технології швидко впроваджуються в різні сфери нашого життя, надаючи нові можливості і підвищуючи ефективність різних процесів. Однією з таких технологій стали безпілотні літальні апарати, які здобувають все більшу популярність у сфері інженерії та будівництва. Безпілотні літальні апарати виявляються надзвичайно корисними в обстеженні мостових споруд, де безпека та ефективність є критичними чинниками. **Мета статті** полягає у розгляді переваг використання безпілотних літальних апаратів у процесі обстеження мостових споруд та їх впливу на підвищення безпеки та продуктивності цього процесу; наведено фотоматеріали стану деяких мостових споруд на території України. **Висновки.** В сучасному світі одним з актуальних способів отримання інформації стали безпілотні літальні апарати. Їх використання з технологіями штучного інтелекту – це один з ефективних інструментів для обстеження мостових споруд. Разом вони можуть значно швидше обстежити об'єкт та точно визначити можливі габарити пошкоджень за побудованою тривимірною моделлю. Отримані дані з об'єкта обстеження дозволяють керувати ресурсами та раціонально планувати технічне обслуговування і ремонт мостових споруд. Підвищуються якість та темпи обстеження як підводної, так і наземної частини мостових опор. Безпілотні літальні апарати – дуже ефективний інструмент для обстеження мостових споруд, але важливо бути свідомими їх обмежень і вирішувати відповідні проблеми з урахуванням конкретних умов і вимог проекту. Аналіз та оцінювання пошкоджених споруд простіше вести, якщо є реальна картина обстеження, знята з висоти кількох метрів.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати; дрони; мостові споруди; гібридні літальні апарати; штучний інтелект; обстеження; конструкції; пошкодження

UNMANNED AERIAL VEHICLES AS AN EFFECTIVE TOOL IN THE INSPECTION OF BRIDGE STRUCTURES

ZHYVTSOVA L.I., *Cand. Sc. (Tech.), Sen. Lect.*

Automation and Computer-Integrated Technology Department, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 756-33-19, e-mail: zhyvtsova.liudmyla@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-6176-1781

Abstract. Statement of the problem. In today's world, technologies are rapidly being introduced into various spheres of our lives, providing new opportunities and increasing the efficiency of various processes. One such technology is unmanned aerial vehicles, which are gaining more and more popularity in the field of engineering and construction. Drones prove to be extremely useful in surveying bridge structures, where safety and efficiency are critical factors. **The purpose of the article** is to consider the advantages of using unmanned aerial vehicles in the process of inspecting bridge structures and their impact on improving the safety and productivity of this process, photo materials of the state of some bridge structures on the territory of Ukraine are given. **Conclusions.** In the modern world, one of the most relevant ways to obtain information is unmanned aerial vehicles. Their use, with artificial intelligence technologies, is one of the most effective tools in the inspection of bridge structures. Together, they can quickly inspect the object and accurately determine the possible dimensions of damage according to the built three-dimensional model. The data obtained from the object of inspection allow you to manage resources and rationally plan the maintenance and repair of bridge structures. The quality and pace of inspection of both underwater and ground parts of bridge supports are improving. The UAV is capable of inspecting more than 70 km of the flight route in an hour. Drones are a very effective tool for surveying bridge structures, but it is important to be aware of their limitations and solve related problems based on the specific conditions and requirements of the project. It is easier to analyze and evaluate damaged structures as there is a real picture of the survey, taken from a height of some meters.

Keywords: unmanned aerial vehicles; drones; bridge structures; hybrid aircraft; artificial intelligence; inspection; structures; damage

Постановка проблеми. У сучасному світі нові технології швидко впроваджуються в різні сфери нашого життя, надаючи нові можливості і підвищуючи ефективність різних процесів. Однією з таких технологій стали безпілотні літальні апарати (БПЛА), які здобувають все більшу популярність у сфері інженерії та будівництва. Безпілотні літальні апарати виявляються надзвичайно корисними для обстеження мостових споруд, де безпека та ефективність є критичними чинниками.

Аналіз публікацій. Питаннями розроблення та використання безпілотних літальних апаратів займаються як вітчизняні, так і зарубіжні дослідники [1–8].

Так, квадрокоптер Elios, у Міннесоті, США, задіяний для перевірки потенційних проблем у важкодоступних просторах між балками в обмежених коробчастих балках мостів [1], зекономив компанії час, ресурси, кошти та сприяв безпечному обстеженню споруд. Зібрані фото- та відеоматеріали дозволили спеціалістам оцінити реальний стан мостових споруд [1].

Дрон-трансформер DRAGON, розроблений японськими інженерами, має конструкцію, що складається з декількох сегментів. Він може змінювати форму у польоті, здійснювати захват предмета та повертати вентиля [4].

Дрон Dahua здійснює огляд усього периметра моста, фіксує дані для аналізу руйнувань, наявні вимивання тощо. Здатен працювати за швидкості вітру 7.0 [5].

Інтелектуальний БПЛА – Leica Aibot – простий у використанні, робить якісні фото, відеозйомку, там де не зможе побачити та дістатися людина. Leica Aibot здатний передавати дані аеровізуального спостереження одразу до офісу [6].

Використання гібридних літальних апаратів, що ефективно функціонують як на землі, так і в повітрі, дозволяє розширити область спостереження споруд.

За допомогою октокоптера Naviator спеціалісти оглянули стан Меморіального моста, що з'єднує штати Делавер та Нью-Джерсі, включаючи підводну частину його опор. Його розробниками стали Ратгерський університет спільно зі стартапом SubUAS [4].

В інституті Джорджії (США) розроблено дрон – GTO-Cormorant, що здатен літати, сідати на воду, занурюватися на задану глибину, а потім спливати і злітати [4; 7].

В Україні відомі розробки Придніпровської державної академії будівництва та архітектури [8].

Мета статті полягає у розгляді переваг використання безпілотних літальних апаратів у процесі обстеження мостових споруд та їх впливу на підвищення безпеки та продуктивності цього процесу. Наведені фотоматеріали стану деяких мостових споруд на території України.

Основний матеріал. На території України є понад ніж 24 тис. мостових споруд [9], більшість із яких збудовані давно, тож не перебувають в задовільному технічному стані.

На рисунку 1 наведено загальний вигляд одного з мостів на території України.



Рис. 1. Загальний вигляд моста

Подальша їх експлуатація потребує обстеження, виявлення дефектів та пошкоджень, що знижують їх довговічність та вантажопідйомність. Неналежна експлуатація мостових споруд може спричинити небезпечні ситуації.

Найбільш уразливі мости обстежуються щороку, але більшість мостових споруд перевіряються кожні два роки. Обстеження виконують організації, випробувальні лабораторії, які мають ліцензію на виконання цих видів робіт [10]. Мета – виявлення тріщин у бетоні, проблеми з підшипниками або рух мосту, що свідчить про необхідність детального обстеження.

Технічний стан мостових споруд визначається візуальним і візуально-інструментальним методами [11–13]. На

рисунку 2, 3 наведено деякі дефекти та пошкодження мостових споруд.



Рис. 2. Виявлені дефекти опор мостових споруд



Рис. 3. Виявлені дефекти мостових споруд

Залучаються спеціально навчені працівники, обладнання та спецтехніка. А саме, спеціальний оглядовий візок, що здатен підніматися на 3 м від поверхні та долати ухили 45° , або ж спеціальний автомобіль з маніпулятором. Вартість такого обладнання понад 600 000 доларів, а оренда на день складає більше 2 500 доларів [1]. При цьому необхідно витратити багато часу та дотримуватися техніки безпеки.

Наявність спеціального обладнання та техніки не гарантує обстеження всього важкодоступного обмеженого простору під мостом, його несних конструкцій та опор.

Крім того, застосування трапів і риштовань для візуального контролю залізобетонних плит проїжджої частини мосту, які спираються на коробчасті балки, небезпечно в цих умовах роботи.



Рис. 4. БПЛА – гексакоптер Leica Aibot (фото [6])

Отже, використання БПЛА різного роду та конструкції більш ефективно та актуальне порівняно з традиційними методами обстеження мостових споруд. Вчасне обстеження та наступний ремонт збільшить термін служби мостів та відновить їх вантажопідйомність [7; 14]. Один з таких БПЛА [6] показано на рисунку 4.

БПЛА полегшують та поліпшують процес визначення стану і безпеки мостових споруд а саме:

- усувають необхідність для працівників обстежувати мостові споруди на висоті або в ускладнених умовах, що знижує ризик нещасних випадків і травм, забезпечуючи можливість виконання робіт із землі;

- безпілотні літальні апарати швидко проникають у важкодоступні місця і здійснюють детальну зйомку з різних кутів огляду, здатні зависати над об'єктами, віддалятися, наближатися до об'єкта, рухаючись будь-якою траєкторією;

- безпілотні літальні апарати оснащені високоякісними камерами та сенсорами, які забезпечують високороздільні зображення та відео, що дозволяє отримувати детальну інформацію про будь-які дефекти, пошкодження або зношення мостової конструкції для подальшого аналізу та планування ремонтних робіт;

- використання безпілотних літальних апаратів може знизити витрати на персонал та обладнання;

- автоматизовані дрон-програми дозволяють планувати маршрути обстеження мостових споруд, що значно спрощує процес і забезпечує більш системний підхід до оцінювання стану інфраструктури.

Під час обстеження споруд безпілотні літальні апарати збирають величезні обсяги

даних. Їх переглядають та аналізують фахівці. Але через велике навантаження вони можуть упустити важливі деталі обстеження мостових споруд. З цієї причини розглядаються деякі можливості створення системи штучного інтелекту, яка могла б автоматично аналізувати зібрану інформацію.

Саме тому створено технологію дистанційної діагностики пошкоджених об'єктів за допомогою БПЛА та фотограмметрії. Її розробниками стали вчені Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона Національної академії наук України [15; 16].

Створено спеціальну комп'ютерну програму аналізу фотозйомки, за допомогою якої можна визначити можливі пошкодження та що потрібно зробити, щоб їх виправити. Тривимірна модель моста дає можливість вимірювати розміри можливих пошкоджень. Також планується створення нейронної мережі для розпізнавання пошкоджень об'єкта [15; 16].

Використання безпілотних літальних апаратів має безліч переваг в обстеженні мостових споруд. Та є і недоліки в їх використанні:

– дрони мають обмежений час польоту, через обмежену ємність акумулятора, що вимагає перерви для підзарядки за час тривалого обстеження;

– для безпілотних літальних апаратів небезпеку становлять погодні умови, такі як сильний вітер, дощ або туман, що можуть обмежити їх ефективність або спричинити втрату зв'язку з оператором;

– обмежена видимість безпілотних літальних апаратів може ускладнити навігацію та збір даних;

– робота з дроном вимагає наявності кваліфікованих операторів, які володіють не

лише навичками польоту, а й знаннями з технічного обслуговування та аналізу отриманих даних;

– деякі безпілотні літальні апарати передають дані через бездротові мережі, тож існує ризик злому або перехоплення цих даних, що може порушити конфіденційність інформації про обстежувану інфраструктуру.

Висновок

У сучасному світі одним з актуальних способів отримання інформації, стали безпілотні літальні апарати. Їх використання разом із технологіями штучного інтелекту – це один з ефективних інструментів для обстеження мостових споруд.

Разом вони можуть значно швидше та точніше визначити можливі габарити пошкоджень за побудованою тривимірною моделлю.

Отримані дані з об'єкта обстеження дозволяють керувати ресурсами та раціонально планувати технічне обслуговування і ремонт мостових споруд.

Підвищується якість та темпи обстеження як підводної, так і наземної частини мостових опор. БПЛА здатен за годину обстежити понад 70 км льотного маршруту [8].

Зменшуються витрати на використання людських ресурсів, їх безпеку під час роботи у важкодоступних просторах між балками.

Безпілотні літальні апарати – дуже ефективний інструмент для обстеження мостових споруд, але важливо бути свідомими їх обмежень і вирішувати відповідні проблеми з урахуванням конкретних умов і вимог проекту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Обследование промышленным противодарным квадрокоптером Elios мостов и путепроводов. URL: <http://surl.li/skmgc>
2. Дрон DJI Matrice 210. URL: <http://surl.li/skmhm>
3. Поддержка с воздуха. URL: <http://surl.li/skmib>
4. Сычов В. Дрона впервые использовали для осмотра моста. И под водой тоже. URL: <http://surl.li/skmg0>
5. Дрон Dahua X820 гарантирует общественную безопасность. URL: <http://surl.li/skmhd>
6. БПЛА – гексакоптер Leica Aibot. URL: <http://surl.li/skmht>

7. Судас М. И. Обследование моста с помощью дрона. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/52852/OBSLEDOVANIE_MOSTA_S_POMOSHCHYU_DRONA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
8. Bulat A. F., Bunko T. V., Shatov S. V., Kokoulin I. Ye., Yashchenko I. O., Papirnyk R. B. Using the uav for inspecting accident sites and threatened areas in case of emergency situations occurred in coal mines and on build objects. *Геотехнічна механіка*. 2018. № 14. С. 27–40. URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2018.141.027>
9. Комісія з перевірки стану мостів: представлено попередні висновки. *Урядовий портал.gov.ua*. URL: <http://surl.li/skmfo>
10. Мосты и трубы. обследование и испытание. ДБН В.2.3-6-2002. Государственный комитет Украины по строительству и архитектуре. Киев : Госстрой Украины, 2002
11. Гураль О., Ясний В. П. Використання безпілотних літальних апаратів для обстеження будівель і споруд. Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання : матер. V Міжнар. студ. наук.-техн. конф. 28–29 квітня 2022 р. С. 139–140.
12. Якименко О. В., Кіктьова К. О. Технічна експлуатація будівель та споруд. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 247 с.
13. Iasnii V., Havryshko S. Unmanned aerial vehicles as an effective tool for determining damages to buildings and structures. Воєнні конфлікти та техногенні катастрофи: історичні та психологічні наслідки : III Міжнар. наук. конф. С. 165–166.
14. Макаров А. В., Крошнева Е. В., Файзалиев А. Ф., Павлова М. А., Лепехина Д. М. Обследование мостовых сооружений с помощью современного оборудования. *Инженерный вестник Дона : электр. науч. журнал*. № 7. 2021. URL: <http://surl.li/skl1f>
15. Галата С. Критична інфраструктура: діагностувати пошкодження за допомогою БПЛА та штучного інтелекту. Національний фонд досліджень України. 27 жовтня 2023. URL: <http://surl.li/tqpsl>
16. В Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона розробляють технології діагностики інфраструктурних об'єктів за допомогою БПЛА та фотограмметрії. НАН України. 05.09.2023. URL: <http://surl.li/tqpsb>

REFERENCES

1. *Obsledovanye promyshlennym protyvoudarnym kvadropterom Elios mostov y puteprovodov* [Elios industrial shockproof quadcopter survey of bridges and overpasses]. URL : <http://surl.li/skmgc> (in Russian).
2. *Dron DJI Matrice 210* [Dron DJI Matrice 210]. URL : <http://surl.li/skmhm> (in Russian).
3. *Podderzhka s vozdukh*. [Air support]. URL : <http://surl.li/skmib> (in Russian).
4. Sychev V. *Drona v pervye yspolzovaly dlia osmotra mosta. Y pod vodoi tozhe* [This is the first time a drone has been used to inspect a bridge. And underwater, too]. URL : <http://surl.li/skmg0> (in Russian).
5. *Dron Dahua X820 harantyruiet obshchestvennuiu bezopasnost* [Dahua X820 drone ensures public safety]. URL: <http://surl.li/skmhd> (in Russian).
6. *BPLA – heksakopter Leica Aibot*. [UAV – hexacopter Leica Aibot]. URL : <http://surl.li/skmht> (in Russian).
7. Sudas M.I. *Obsledovanye mosta s pomoshchiu drona* [A drone survey of the bridge]. URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/52852/OBSLEDOVANIE_MOSTA_S_POMOSHCHYU_DRONA.pdf?sequence=1&isAllowed=y (in Russian).
8. Bulat A.F., Bunko T.V., Shatov S.V., Kokoulin I.Ye., Yashchenko I.O. and Papirnyk R.B. *Vykorystannia bezpilotnykh litalnykh aparativ dlia obstezhennia avariinykh ta zahrozlyvykh dilnyts pry vynyknenni avariinykh sytuatsii u vuhilnykh shakhtakh i na budivelnykh ob'iektakh* [Using the uav for inspecting accident sites and threatened areas in case of emergency situations occurred in coal mines and on build objects]. *Heotekhnichna mekhanika* [Geotechnical Mechanics]. 2018, no. 14, pp. 27–40. URL: <https://doi.org/10.15407/geotm2018.141.027> (in Ukrainian).
9. *Komisiia z perevirky stanu mostiv: predstavleno poperedni vysnovky*. [Bridge inspection commission: preliminary findings presented]. *Uriadovi portal gov.ua*. [Government portal.gov.ua]. URL : <http://surl.li/skmfo> (in Ukrainian).
10. *Mosty i truby. obstezhennia ta vyprobuvannia. DBN V.2.3-6-2002. Derzhavnyi komitet Ukrainy z budivnytstva ta arkhitektury*. [Bridges and pipes. Inspection and testing. DBN V.2.3-6-2002. State Committee of Ukraine for Construction and Architecture]. Kyiv : Gosstroy of Ukraine, 2002. (in Ukrainian).
11. Hural O. and Iasnii V. *Vykorystannia bezpilotnykh litalnykh aparativ dlia obstezhennia budivel i sporud* [Using unmanned aerial vehicle for inspection of buildings and structures]. *Pryrodnychi ta humanitarni nauky. Aktual'ni pytannya : mater. V Mizhnar. stud. nauk.-tekh. konf.* [Natural Sciences and Humanities. Current Issues : proceedings of the V International student scientific and technical conference]. 28–29 April 2022, pp. 139–140 (in Ukrainian).
12. Yakymenko O.V. and Kiktova K.O. *Tekhnichna ekspluatatsiia budivel ta sporud* [Maintenance of buildings and structures]. Kharkiv : KhNUMH A.M. Beketov, 2019, 247 p. (in Ukrainian).
13. Iasnii V. and Havryshko S. *Bezpilotni litalni aparaty yak efektyvnyi instrument dlia otsiniuvannia poskodzhen ob'iektiv* [Unmanned aerial vehicles as an effective tool for determining damages to buildings and structures]. *Voyenni konflikty ta tekhnohenni katastrofy: istorychni ta psykholohichni naslidky : III Mizhnar. nauk. konf.* [Military conflicts and man-made disasters: historical and psychological consequences : III International scientific conference]. Pp. 165–166. (in Ukrainian).

14. Makarov A.V., Kroshneva E.V., Faizaliev A.F., Pavlova M.A. and Lepekhina D.M. *Obsledovanye mostovykh sooruzheniy s pomoshchyu sovremennoho oborudovaniya* [Inspection of bridge structures using modern equipment]. *Inzhenernyy vestnik Dona : elektr. nauch. Zhurnal* [Engineering Vestnik Don : electronic scientific journal]. No. 7, 2021. URL: <http://surl.li/skl1f> (in Ukrainian).

15. Halata S. *Krytychna infrastruktura : diahnostuvaty poskodzhennia za dopomohoiu BPLA ta shtuchnoho intelektu* [Critical infrastructure : diagnose damage using UAVs and artificial intelligence. National research foundation of Ukraine]. 27 October 2023. URL: <http://surl.li/tqpsl> (in Ukrainian).

16. *V Instytuti elektrozvariuvannia im. Ye. O. Patona rozrobliaiut tekhnologii diahnostyky infrastrukturykh ob'ektiv za dopomohoiu BPLA ta fotohrammetrii* [E.O. Paton Institute of Electric Welding is developing technologies for diagnosing infrastructure facilities using UAVs and photogrammetry]. National Academy of Sciences of Ukraine, 05.09.2023. URL: <http://surl.li/tqpsb> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 13.04.2024.

УДК 74/75

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.60.1075

ПЕТРИКІВКА – ОСЕРЕДОК УКРАЇНСЬКОГО НАРОДНОГО ДЕКОРАТИВНОГО РОЗПИСУ

КОВАЛЕНКО Є.¹, *здоб.*,

ОСТАПЕНКО Л. С.^{2*}, *ст. викл.*,

ХАРЧЕНКО К. С.³, *канд. техн. наук, доц.*,

СУВорова Т. О.⁴, *ст. викл.*,

ПОЛЮШКІН С. С.⁵, *канд. техн. наук, доц.*

¹ Кафедра дизайну та реконструкції архітектурного середовища, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-93-37, e-mail: 19039.kovalenko@365.pdaba.edu.ua

^{2*} Кафедра дизайну та реконструкції архітектурного середовища, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-93-37, e-mail: Ludmillaostapenko945@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6295-3080

³ Кафедра дизайну та реконструкції архітектурного середовища, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-93-37, e-mail: katerinaharchenko75@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1908-4852

⁴ Кафедра дизайну та реконструкції архітектурного середовища, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-93-37, e-mail: suvorova0873@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4112-6390

⁵ Кафедра дизайну та реконструкції архітектурного середовища, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-93-37, e-mail: poliushkin.serhii@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-4740-7652

Анотація. *Постановка проблеми.* Історія розвитку Петриківського розпису, потребує вивчення творчості народних майстрів та їх послідовників, їхніх робіт. *Мета статті* – дослідити історію виникнення та розвитку мистецтва Петриківського розпису. Визначити етапи розвитку та особливості в різні його періоди. *Висновок.* Мистецтво Петриківського розпису являє собою унікальний релікт національної художньої традиції, який делегує в сучасний світ самобутню культуру історичної колиски запорізького козацтва, його могутній дух, своєрідність поетичного світосприйняття та глибинного етнічного народного художнього мислення. Петриківський декоративний розпис має у потенціалі народного мистецтва приховані нескінченні можливості, здатні збагатити культуру країни та світу. Під час війни художня творчість стає особливо гострою та активною. Завдяки зусиллям майстрів-художників Петриківського розпису це мистецтво живе, розвивається та дивує своїм унікальним орнаментом та технікою. У зв'язку зі значними економічними труднощами, що накопичувалися впродовж останніх десятиліть, до критичної межі виживання дійшла важлива галузь національної культури. Забезпечити збереження історичних осередків народного мистецтва та народних художніх промислів України – необхідна складова формування національної свідомості. Наступні найважливіші стратегічні напрямки: державна підтримка та захист центральної постаті галузі – її виробника, носія народних художніх традицій, народних майстрів та підприємств, історичних осередків народних художніх промислів; підготовка майбутньої зміни народних майстрів у творчому середовищі історичних осередків народного мистецтва шляхом охоплення різних вікових категорій учнів, включно зі створенням спеціалізованих середніх навчальних закладів (училищ), які поступово розширювати в міру розвитку галузі; створення музеїв в історичних центрах народних художніх промислів з метою їх популяризації, наукового дослідження, сприяння у вихованні майбутньої зміни, розвитку осередків та туристичної галузі в Україні. Петриківське малювання виживе, якщо віднайде нову органічну «ужитковість», чи то художниками декоративного мистецтва, чи то майстрами народного мистецтва.

Ключові слова: *Петриківський розпис; народне мистецтво; національна культура; традиційний розпис; народні майстри; етнодизайн*

THE INFLUENCE OF THE DEVELOPMENT OF COMPUTER TECHNOLOGIES ON THE PROCESS OF ARCHITECTURAL DESIGN

KOVALENKO Ye.A.¹, *Applicant*,
OSTAPENKO L.S.^{2*}, *Ass. Prof.*,
KHARCHENKO K.S.³, *Cand. Sc. (Tech.)*, *Assoc. Prof.*,
SUVOROVA T.O.⁴, *Ass. Prof.*,
POLIUSHKIN S.S.⁵, *Cand. Sc. (Tech.)*, *Assoc. Prof.*

¹ Department of Design and Reconstruction of the Architectural Environment, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-93-37, e-mail: 19039.kovalenko@365.pdaba.edu.ua

^{2*} Department of Design and Reconstruction of the Architectural Environment, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-93-37, e-mail: Ludmillaostapenko945@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6295-3080

³ Department of Design and Reconstruction of the Architectural Environment, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-93-37, e-mail: katerinaharchenko75@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-1908-4852

⁴ Department of Design and Reconstruction of the Architectural Environment, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-93-37, e-mail: suvorova0873@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4112-6390

⁵ Department of Design and Reconstruction of the Architectural Environment, P Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-93-37, e-mail: poliushkin.serhii@365.pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-4740-7652

Abstract. Problem statement. The history of the development of Petrykiv painting, including the study of the work of folk masters and their followers, their works, as well as consideration of problems and their solutions. **The purpose of the article.** To study the history of the origin and development of the art of Petrykivka painting. Determination of the stages of development and features in its different periods. **Conclusion.** The art of Petrykovsky painting is a unique relic of the national artistic tradition, which delegates to the modern world the original culture of the historical cradle of the Zaporizhia Cossacks. His powerful spirit, originality of poetic worldview and profound ethnic folk artistic thinking. Petrykiv decorative painting has in its potential immeasurable possibilities of ancient and eternally young folk art, for entering the sphere of modern life, enrichment of national and world culture. The war situation exacerbates and activates artistic creativity as much as possible. Thanks to the enthusiasm of Petrykiv masters-artists, their desire to support and develop our art, to pass on their skills to descendants, to show the beauty of Petrykiv painting to the whole world, this art form continues to live, improve and surprise with its unique ornament. Due to the significant economic difficulties accumulated during the last decades, an important branch of national culture has reached the critical limit of survival. Ensuring the preservation of historical centers of folk art and folk art crafts of Ukraine is a necessary component of the formation of national consciousness. The following most important strategic directions: state support and protection of the central figure of the industry – its producer, bearer of folk artistic traditions, folk craftsmen and enterprises of historical centers of folk artistic industries; preparation of the future change of folk masters in the creative environment of historical centers of folk art, by reaching different age categories of students, including the creation of specialized secondary educational institutions (schools), which will be gradually expanded as the industry develops; creation of museums in historical centers of folk arts and crafts for the purpose of their popularization, scientific research, assistance in education of future change, development of centers and tourism industry in Ukraine; Petrykiv painting will survive if it finds a new organic “usability”, either by artists of decorative art or by masters of folk art.

Keywords: *Petrykiv painting; folk art; national culture; traditional painting; folk craftsman; ethnodesign*

Постановка проблеми. Петриківський розпис – справді унікальне явище в національній культурі України. Він не лише передає давні традиції та самобутність козацького духу, а й інтегрує їх у сучасний світ. Ця мистецька техніка стала своєрідним реліктом, що

втілює в собі глибоке етнічне мислення та поетичний спосіб сприйняття світу.

Петриківський розпис відзначається особливою своєрідністю, але водночас органічно продовжує народні традиції Придніпров'я. Цей вид мистецтва, який виник у регіоні запорізьких козаків, став

важливим елементом національної культури та спадщиною, яка зберігає і розвиває багату культурну спадщину України [1].

П'ятого грудня 2013 року Петриківському розпису було надано статус нематеріальної культурної спадщини людства ЮНЕСКО. Для України це історична подія, яка відіграє важливу роль у визнанні та захисті унікального мистецтва Петриківського розпису, що може бути справді потужним стимулом для зміцнення міжнародного іміджу України [2].

Мета статті – вивчення значення мистецтва Петриківського розпису, його історії розвитку, культури та традиції, дослідження його феноменальної стійкості та життєздатності, незважаючи на драматичні обставини історії.

Результати досліджень.

Історія виникнення та розвитку мистецтва Петриківки. Село Петриківку (рис. 1, 2.) заснував у XVII столітті уродженець Полтави козак Петрик. Починаючи від 1772 року село бурхливо розбудовувалося внаслідок переселення жителів зі старовинного козацького поселення Курилівки, яке на той час уже мало понад 500 років історії.

Петро Калнишевський, останній кошовий війська запорізького, та його ініціатива щодо перетворення Петриківки на центр Протовчанської військової паланки, значно вплинули на розвиток цього мистецтва.



Рис. 1. Ситуаційна схема

Перші дослідження мистецтва Петриківського розпису розпочалися ще у XIX столітті завдяки зусиллям відомого вченого Д. І. Яворницького, що говорить про значущість цієї культурної традиції.



Рис. 2. Петриківка

Петриківський розпис створює унікальний ансамбль селянської садиби, що охоплює як інтер'єри будинків, так і клуні та господарські будівлі, гармонійно поєднуючись із природною складовою Наддніпрянщини. Поєднання унікального житлового середовища з природною автентичністю формувало характер людини як яскравої, творчої особистості.

Зміни у настінних розписах у селі Петриківка з 1950-х років свідчать про динаміку та живучість цієї культурної традиції.

На цей період зменшилася кількість хат, розмальованих власноруч самими господарями (рис. 3).



Рис. 3. Петриківський розпис. Інтер'єр хати.
Фото А. А. Пікуш

Прикрашати інтер'єри орнаментами стало явищем звичайним і мало не

обов'язковим. Орнаменти, як розписи, так і нанесені на паперові стрічки, мальовані петриківськими майстринями, склалися з повторених у ритмічному чергуванні рослинних мотивів.

Наразі Петриківські настінні розписи вийшли вже далеко за межі сільського інтер'єру.

Протягом 1950–1970 років, на думку мистецтвознавця Юлії Смолій, петриківське малювання набуло офіційно організованої виробничої форми.

Особистість майстра впливала на різноманітність художніх проявів у пошуках власного «я», що характерно для мистецтва Петриківського розпису [4].

У 1958 році засновано цех підлакового розпису на основі художньо-виробничої артілі «Вільна селянка», який через три роки був реорганізований, перетворившись на фабрику сувенірних виробів «Дружба». 1970 року також створено експериментальний цех Петриківського розпису Художнього фонду УРСР, що стало відправною точкою для об'єднання творчих художніх сил Петриківки.

«Петриківський дивоцвіт» – етнографічно-фольклорний фестиваль, який проводиться щороку на початку вересня в селищі Петриківка починаючи з 2008 року. Започаткований з метою популяризації зеленого туризму в Україні та українського народного мистецтва [1; 4; 11].

Основні прийоми та палітра Петриківського розпису. Петриківський розпис відбиває ідею циклічності життя та духовну єдність людини з природою.

У палітрі Петриківського розпису, заснованого на особливому поєднанні та гармонії базових кольорів, закодовано образ сонячного світла. Колірна гама насичена та активна (рис. 4).

Цікава символіка мотивів розпису:

- ✓ композиція «букет-вазон» – образ квітучого дерева життя (одвічний образ, який зустрічається у багатьох культурах);
- ✓ листя (фриз) – символ нескінченності;
- ✓ мальва – символ козацької доблесті;

- ✓ квітка – втілення краси природи, її апогей;
- ✓ калина – символ дівочої краси;
- ✓ дуб – прояв сили та мужності;
- ✓ зображення птаха – символ гармонії, світла, щастя;
- ✓ півень – символ пробудження, відродження;
- ✓ зозуля – втілення таємниці вічного перебігу часу [4–7].

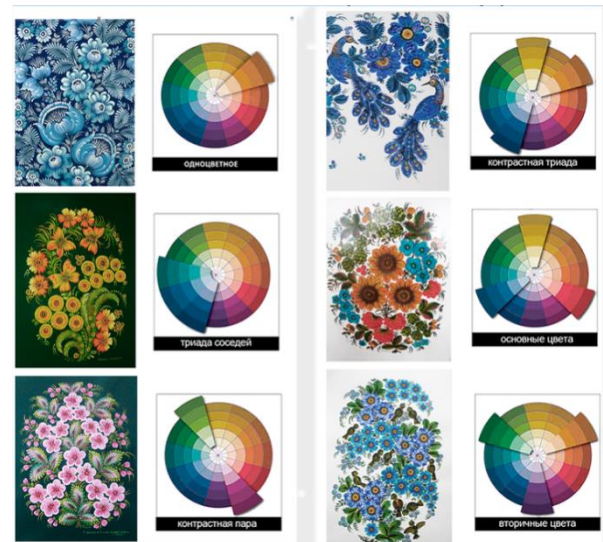


Рис. 4. Кольорові поєднання у Петриківському розписі

Петриківка – осередок творчого та виробничого потенціалу талановитих майстрів народного мистецтва.

Представники Школи декоративного малювання: Ф. Панко, Т. Пата (рис. 5.) Я. Клюпа, В. Соколенко, О. Пікуш, Г. Прудникова, М. Шимацька, І. Завгородній, Н. Шулик, Ф. Панко, В. Соколенко, Л. Кипсан, Т. Кудиш, В. Глуценко, Л. Штаній та інші. Засвоєні майстрами технології зі специфічними засобами, що виникли в процесі опанування техніки підлакового розпису, змогли зумовити загальний характер нового Петриківського малювання. Відомі митці Петриківського розпису народжені 1940-ми роками: А. Чернуських, Н. Чернуських, Г. Самарська, В. Тезик, Н. Турчин; 1950-ми роками: В. Статива, Л. Статив, А. Пікушів і М. Пікушів, Н. Рибак, О. Зінчук, Н. Коваленко, Т. Самець, Н. Васильківська, Н. Калюга;

1960-ми роками: М. Статива, І. Назаренко, Т. Лапшин, В. Панко; 1970-ми роками: В. Карпець та інші [1; 4–6].

У безперервному синтезі формувалася творчий метод Петриківського розпису, пов'язаний з досвідом поколінь, навчанням у народних майстрів, формуванням особистості митця.



Рис. 5. Тетяна Якимівна Пата (1884–1976)

Творчий метод Петриківського розпису оснований на народному баченні світу, який забезпечував вільне виявлення творчої особистості народного майстра. Тетяна Якимівна Пата – талановита художниця, народилася в селі Петриківка на Катеринославщині 4 березня 1884 року. Її тонкий художній смак і живописна майстерність вражають. Вона віртуозно творила загадкові райські кущі з простих польових і садових квітів. (рис. 6–7).



Рис. 6. «Зозуля на калині» (1960)
Рис. 7. «Павичі серед квітів» (1949)



Рис. 8. Федір Савич Панко (1924–2007)

Працювала викладачем в Петриківській школі декоративного розпису у 1936–1941

роках. Під творчим та чуйним керівництвом Т. Пати з цієї школи вийшло ціле покоління талановитих майстрів, серед яких був Федір Панко [4].

Увібравши усе найкраще з творчості своєї наставниці, Федір Савич (рис. 8) йшов далі у пошуках авторського стилю. В композиційних рішеннях додавав динаміки. Обізнаний з традиційними засобами Петриківського декору, заснованими на прекрасному знанні місцевої флори, митець вводив нові рослинні мотиви (хміль, дубове листя, жолуді, колоски злаків, квіти соняшника, горох, кукурудза). Збагачував і зооморфні та орнітоморфні мотиви (сови, кабани, ведмеді, олені) (рис. 9, 10).



Рис. 9. «Сови» (1977)
Рис. 10. Панно «Білий танок» (1976)

Працював над сюжетними композиціями. Але мав характерний індивідуальний художній почерк. Федір Панко – сильний колорист, його твори соковиті. Завдяки прекрасному володінню техніки «перехідного мазка», його малюнки багатші не тільки в кольорі, а й у діапазоні тону. Більшість його робіт – це тематичні композиції. Наприклад, «Зозуля й півень» (1963) і «Півні б'ються» (1965). Навіть у композиціях, які побудовані на симетрії, відчуваються динаміка, рух, дія.

Знакове панно «Курчата та бджоли» (69×99), написане яєчною темперою можна віднести до числа знахідок Ф. С. Панка. Майстерність автора підкреслюється сміливим застосуванням технічних засобів «перехідного мазка» і заміною пензля на зрізане стебло очерету.

Відродження та введення в практику декоративного розпису на поверхні стіни та в інтер'єрі завдячує творчості Федора Савича. Він виступає першовідкривачем в освоєнні різноманітних матеріалів для розташування Петриківського розпису

(пластик, порцеляна, керамічна плитка, деревина). Федір Савич зміг об'єднати самостійних петриківських художників у цех підлакового розпису, а пізніше в експериментальну художню майстерню (1970 р.).

Цех підлакового розпису діяв при Петриківській фабриці художніх виробів «Дружба». Фабрика відкрилась 1958 року за його активної участі. Федір Панко розповсюджував, популяризував Петриківський розпис, став наставником багатьох майстрів. Нові покоління й нині продовжують привносити славу самобутньому мистецтву Петриківки [4; 5].

Один із представників сучасної школи мистецтва Петриківського розпису – Андрій Андрійович Пікуш (рис. 11).



Рис. 11. Андрій Андрійович Пікуш
(Народ. 1950 р.)

Член Національної спілки художників України, Голова Дніпропетровської обласної спілки художників України, він має звання Народний художник України, заслужений майстер народної творчості України. Андрій Пікуш створює розписи на різних виробах (папір, полотно, дерево, кераміка, гутне скло), а також впроваджує Петриківський розпис в техніках батика та настінного розпису (рис. 12–14).



Рис. 12. «Півник»

Рис. 13. «Птахи на калині»

Складні економічні умови спричинили

зупинення підприємств народних промислів Петриківського розпису. Андрій Андрійович зберіг та згуртував творчий актив Петриківки, організувавши у 1991 році перше в Україні колективне підприємство Центр народного мистецтва «Петриківка». У Центрі згуртувалося 40 провідних майстрів осередку, серед них 20 членів НСХУ, шість заслужених майстрів народної творчості України.

Майстри представляють Петриківський розпис на регіональних, всеукраїнських та міжнародних виставках. Для залучення відвідувачів та популяризації народного мистецтва в Центрі постійно діє свій виставковий зал із різними експозиціями. Адміністрація закладу проводить активну виставкову діяльність в Україні та за її межами.



Рис. 14. Роботи майстра, виконані на склі та по дереву



Рис. 16. «Веселка» (1978)

Марія Іванівна Пікуш – заслужена майстриня народної творчості України, член Національної спілки художників України, нагороджена державною відзнакою «Орден княгині Ольги III ступеня». Понад 30 років працює в Петриківській дитячій художній школі ім. Т. Я. Пати. Основні твори: «Древо миру» (1975), «Садочок» (1976), «Жоржини» (1977), «Веселка» (1978)

(рис. 16), «Кущ квітів» (1982).

Подружжя Пікушів виховало цілу плеяду молодих талановитих художників всесвітньо відомого Петриківського розпису. Кожен майстер має власний творчий стиль, працює за своїми задумами, створює унікальні твори, використовуючи різноманітні матеріали для розпису. В даний час для Петриківського розпису найчастіше використовуються вироби з дерева на токарному, столярному та ручному різьбленні. Вироби виготовляються з екологічно чистих матеріалів на основі народних традицій регіону. Створюються розписи на деревині, папері, полотні, кераміці, металі, а також настінні розписи інтер'єрів та фасадів будівель.

Майстри колективу формують перспективи подальшого розвитку Петриківського розпису, дбайливо зберігаючи та розвиваючи найкращі досягнення народних мистецьких традицій та технологій.

Стан галузі та шляхи вирішення існуючих проблем. У другій половині ХХ-го століття в історичних осередках народного мистецтва України розвивалося понад 350 підприємств галузі, 30 — державного концерну «Укрхудожпром», які виготовляли художні вироби в промислових обсягах; 30 підприємств Художнього фонду Співки художників України, що спеціалізувалися на створенні авторських виробів. Понад 300 підприємств, що діяли у міністерствах лісового та сільського господарства. Діючи на основі самоокупності, вони успішно реалізовували продукцію на внутрішньому та зовнішньому ринках, здійснюючи експорт у понад 35 країн світу. У творчому середовищі їх колективів виростили та формувалися покоління талановитих майстрів, накопичувалися та розвивалися Великі народні художні традиції.

За останні 20 років в Україні, не витримавши економічних труднощів, зупинилося понад 95 % підприємств

народних художніх промислів. Вони розвивалися в історичних осередках народного мистецтва, а також були основою їх збереження та розвитку в сучасних умовах (в тому числі на Дніпропетровщині — фабрика «Петриківський розпис» державного концерну «Укрхудожпром» (діяла з 1958 по 2005 р.), а також «Експериментальний цех» Художнього фонду Співки художників України, (діяв з 1971 по 1998 р.) та низку інших приватних структур.

Війна також внесла корективи — складнощі диктують свої «тренди», змінилися і «полотна» для розпису. Місцеві майстри розмальовують використане озброєння, яке під їхніми пензлями перетворюється на витвори мистецтва. Гільзи та тубуси, оздоблені Петриківським розписом, продаються на аукціонах, а зібрані кошти передають на потреби ЗСУ.

Вплив війни, масштабна руйнація економічної та матеріально-технічної бази цієї важливої галузі національної культури України, супроводжуються втратою спадкоємності унікального фахового досвіду народних художніх традицій, особливостей технологій історичних осередків народного мистецтва, втратою робочих місць та соціального захисту народних майстрів.

Висновки

Мистецтво Петриківського розпису являє собою унікальний релікт національної художньої традиції, який делегує в сучасний світ самобутню культуру історичної колиски Запорізького козацтва, його могутній дух, своєрідність поетичного світосприйняття та глибинного етнічного народного художнього мислення. Петриківський декоративний розпис має у своєму потенціалі незліченні можливості стародавнього та вічно молодого народного мистецтва та можливість трансформації й адаптації у сферу сучасного життя, збагачення вітчизняної

та світової культури.

Ситуація війни максимально загострює та активізує художню творчість. У зв'язку зі значними економічними труднощами, що накопичувалися впродовж останніх десятиліть, до критичної межі виживання дійшла важлива галузь національної культури. Забезпечити збереження історичних осередків народного мистецтва та народних художніх промислів України – необхідна складова формування національної свідомості. Потрібно розвивати такі найважливіші стратегічні напрямки:

✓ державна підтримка та захист центральної постаті галузі – її виробника, носія народних художніх традицій, народних майстрів та підприємств історичних осередків народних художніх промислів;

✓ підготовка майбутньої зміни народних майстрів у творчому середовищі історичних осередків народного мистецтва шляхом охоплення різних вікових категорій учнів, включно зі створенням спеціалізованих середніх навчальних закладів (училищ), які поступово розширювати у міру розвитку галузі;

✓ створення музеїв в історичних центрах народних художніх промислів із метою їх популяризації, наукового дослідження, сприяння у вихованні майбутньої зміни, розвитку осередків та туристичної галузі в Україні;

✓ Петриківське мистецтво виживе, якщо віднайде нову органічну «ужитковість», чи то художниками декоративного мистецтва, чи то майстрами народного мистецтва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Антонович Є. А. Декоративно-прикладне мистецтво. Львів : Світ, 2018. 272 с.
2. Конвенція про охорону нематеріальної культурної спадщини. URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/995_d69 (дата звернення: 12.10.2018 р.).
3. Петриківка – серце Дніпропетровщини, візитівка України. URL: [http://petrykivsel.dp.gov.ua/selrada/petrikivskij/petrikivskaselrada.nsf/\(search\)/](http://petrykivsel.dp.gov.ua/selrada/petrikivskij/petrikivskaselrada.nsf/(search)/). (Дата звернення 12.10.2018 р.).
4. Гарькава Т. Петриківський розпис: теорія та методика : підруч. Дніпро : Ліра, 2019. 404 с.
5. Даниленко В. Дизайн : підручн. Харків : ХДАДМ, 2018. 320 с.
6. Михайлеко В. Є., Яковлев М. І. Основи композиції (геометричні аспекти). Київ : Каравелла, 2018. 304 с.
7. Прищенко С. Кольорознавство : навч. посіб. Київ : ДАКККиМ, 2019. 376 с.
8. Твердохлібова Я. М. Художня графіка : навч.-метод. матер. Одеса : ПУНУ ім. К. Д. Ушинського, 2018. Ч. II. 187 с.
9. Удріс-Бородавко Н. Графічний дизайн з українським обличчям. Київ : ArtHuss, 2023. 204 с.
10. URL: <http://www.navigator-ukraine.com.ua/uk/tury-po-yuzhnoj-ukraine/tour/217.html>
11. URL: <https://petrykivka.dp.ua>
12. URL: <https://petrykivka.jimdofree.com/історія-петриківського-розпису/>
13. URL: <https://petrukivsky.blogspot.com/2015/05/normal-0-false-false-false-ru-x-none-x.html>

REFERENCES

1. Antonovych E.A. *Dekoratyvno-prykladne mystetstvo* [Decorative and applied art]. Lviv : Svit Publ., 2018, 272 p. (in Ukrainian).
2. *Konventsiiia pro okhoronu nematerialnoi kulturnoi spadshchyny* [Convention on the Protection of Intangible Cultural Heritage]. URL: http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/995_d69 (date of application: 12.10.2018). (in Ukrainian).
3. *Petrykivka – sertse Dnipropetrovshchyny, vizytivka Ukrainy* [Petrykivka – the heart of Dnipropetrovsk region, a visiting card of Ukraine]. URL: [http://petrykivsel.dp.gov.ua/selrada/petrikivskij/petrikivskaselrada.nsf/\(search\)/](http://petrykivsel.dp.gov.ua/selrada/petrikivskij/petrikivskaselrada.nsf/(search)/). (Date of application: 12.10.2018).
4. Garkava T. *Petrykivskiy rozpys: teoriia ta metodyka : pidruchnyk* [Petrykivsky painting : theory and technique : textbook]. Dnipro : Lira Publ., 2019, 404 p. (in Ukrainian).
5. Danylenko V. *Dyzain : pidruchnyk* [Design : textbook]. Kharkiv : KhDADM Publ., 2018, 320 p. (in Ukrainian).

6. Mykhaileko V.E. and Yakovlev M.I. *Osnovy kompozytsii (heometrychni aspekty)* [Basics of composition (geometric aspects)]. Kyiv : Caravella Publ., 2018. 304 p. (in Ukrainian).
7. Pryshchenko S. *Osnovy kompozytsii (heometrychni aspekty)* [Color science : study guide]. Kyiv : DAKKKiM Publ., 2019, 376 p. (in Ukrainian).
8. Tverdokhlibova Ya.M. *Khudozhnya hrafika: navchal'no-metodychni materialy* [Art graphics : educational and methodical materials]. Odesa : PUNU named after K. D. Ushynskiy, 2018, part II, 187 p. (in Ukrainian).
9. Udris-Borodavko N. *Hrafichnyy dyzayn z ukrayins'kym oblychchiam* [Graphic design with a Ukrainian face]. Kyiv : ArtHuss Publ., 2023, 204 p. (in Ukrainian).
10. URL: <http://www.navigator-ukraina.com.ua/uk/tury-po-yuzhnoj-ukraine/tour/217.html> (in Ukrainian).
11. URL: <https://petrykivka.dp.ua> (in Ukrainian).
12. URL: <https://petrykivka.jimdofree.com/історія-петриківського-розпису/> (in Ukrainian).
13. URL: <https://petrukivsky.blogspot.com/2015/05/normal-0-false-false-false-ru-x-none-x.html> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 21.04.2024.

УДК 614.841:536.46

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.69.1076

НАУКОВО ОБҐРУНТОВАНІ РОЗРАХУНКОВІ МЕТОДИ ТА БАЗИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДАНИХ ІЗ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ПЕРЕДЧАСНИХ ПОЖЕЖОВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ СПРАЦЬОВУВАНЬ ПІРОТЕХНІЧНИХ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ НІТРАТНО-МЕТАЛІЗОВАНИХ СУМІШЕЙ В УМОВАХ ЗОВНІШНІХ ТЕРМОДІЙ

КОЗЯР Н. М.¹, канд. техн. наук,
КИРИЧЕНКО О. В.², докт. техн. наук, проф.,
РОМАНЮК І. П.³,
ВАЩЕНКО В. А.⁴, докт. техн. наук, проф.,
БАЛО Я. В.⁵, канд. техн. наук, ст. досл.,
ДЯДЮШЕНКО О. О.^{6*}, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра пожежно-профілактичної роботи, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, вул. Онопрієнка, 8, 18000, Черкаси, Україна, тел. +38 (067) 944-15-79, e-mail: koziar_nazarii@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0001-9082-0771

² Кафедра пожежно-профілактичної роботи, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, вул. Онопрієнка, 8, 18000, Черкаси, Україна, тел. +38 (093) 225-07-78, e-mail: kyrychenko_oksana@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0002-0240-1807

³ Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, вул. Онопрієнка, 8, 18000, Черкаси, Україна, тел. +38 (067) 563-58-95, e-mail: romaniuk_igor@chipb.org.in, ORCID ID: 0009-0003-7721-9107

⁴ Кафедра фізико-хімічних основ розвитку та гасіння пожеж, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, вул. Онопрієнка, 8, 18000, Черкаси, Україна, тел. +38 (063) 710-43-90, e-mail: vashchenko_viacheslav@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0003-0722-9353

⁵ Відділ нормативно-технічного забезпечення науково-дослідного центру протипожежного захисту, Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, вул. Вишгородська, 21, 02000, Київ, Україна, тел. +38 (093) 165-69-91, e-mail: 2801397@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9044-1293

^{6*} Кафедра пожежно-профілактичної роботи, Черкаський інститут пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, вул. Онопрієнка, 8, 18000, Черкаси, Україна, тел. +38 (093) 407-19-83, e-mail: diadiushenko_oleksandr@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0003-0797-2251

Анотація. Постановка проблеми. Велике практичне значення мають способи попередження виникнення вимушених пожежонебезпечних руйнувань виробів у випадку впливу зовнішніх термічних дій. При цьому вони повинні ґрунтуватись на науково обґрунтованих методах визначення критичних параметрів термічних дій на виробі та технологічних параметрів зарядів сумішей, перевищення яких спричинює передчасні пожежонебезпечні руйнування виробів. Для розроблення таких методів необхідно мати результати теоретичних та експериментальних досліджень процесів нагрівання оболонки зарядів сумішей для різних зовнішніх теплових потоків та часу їх термодії, а також процесів займання та розвитку їх горіння за різних зовнішніх умов. **Мета статті** – формування результатів теоретичних досліджень у вигляді науково обґрунтованих методів, які дозволяють попереджати та контролювати передчасне займання зарядів сумішей, вибухонебезпечний розвиток процесу їх горіння та пожежонебезпечне руйнування виробів в умовах зовнішніх термічних дій, а також зведення результатів експериментальних досліджень у єдину базу даних із визначення впливу технологічних параметрів сумішей на характеристики процесів їх займання та розвитку горіння, використання якої дозволяє знижувати кількість пожежовибухонебезпечних руйнувань виробів в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків **Висновок.** Розроблено науково обґрунтовані методи визначення критичних параметрів зовнішніх термічних дій для кількісної оцінки рівня пожежної безпеки піротехнічних виробів на основі багатоконпонентних нітратно-металізованих сумішей. Створено науково-технічну базу експериментальних даних із визначення закономірностей впливу широкого класу технологічних параметрів сумішей на основні характеристики процесів займання та розвитку горіння сумішей (температуру займання, час індукції, швидкість розвитку горіння) в умовах зовнішніх термічних дій (підвищених температур нагріву, зовнішніх тисків та ін.), що дозволяє визначати ймовірність виникнення пожеж на об'єктах, де зберігаються виробі.

Ключові слова: *пожежна безпека; піротехнічні вироби на основі багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей; процеси займання та розвитку горіння*

SCIENTIFICALLY BASED CALCULATION METHODS AND EXPERIMENTAL DATA BASES FOR THE PREVENTION OF PREMIUM FIRE EXPLOSIONS AND UNSAFE EXPLOSIONS OF PYROTECHNIC MULTICOMPONENT NITRATE-METALLIZED MIXTURES UNDER EXTERNAL THERMAL

KOZIAR N.M.¹, *Cand. Sc. (Tech.)*,
KYRYCHENKO O.V.², *Dr. Sc. (Tech.)*, *Prof.*,
ROMANIUK I.P.³,
VASHCHENKO V.A.⁴, *Dr. Sc. (Tech.)*, *Prof.*,
BALO Ya.V.⁵, *Cand. Sc. (Tech.)*, *Sen. Res.*,
DIADIUSHENKO O.O.^{6*}, *Cand. Sc. (Tech.)*, *Assoc. Prof.*

¹ Department of Fire Prevention Work, Cherkasy Institute of Fire Safety named after of Chernobyl Heroes, 8, Onoprienka St., Cherkasy, 18000, Ukraine, tel. +38 (067) 944-15-79, e-mail: koziar_nazarii@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0001-9082-0771

² Department of Fire Prevention Work, Cherkasy Institute of Fire Safety named after of Chernobyl Heroes, 8, Onoprienka St., Cherkasy, 18000, Ukraine, tel. +38 (093) 225-07-78, e-mail: kyrychenko_oksana@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0002-0240-1807

³ Cherkasy Institute of Fire Safety named after of Chernobyl Heroes, 8, Onoprienka St., Cherkasy, 18000, Ukraine, tel. +38 (067) 563-58-95, e-mail: romaniuk_ihor@chipb.org.in, ORCID ID: 0009-0003-7721-9107

⁴ Department of Physico-Chemical Foundations of Fire Development and Extinguishing, Cherkasy Institute of Fire Safety named after of Chernobyl Heroes, 8, Onoprienka St., Cherkasy, 18000, Ukraine, tel. +38 (063) 710-43-90, e-mail: vashchenko_viacheslav@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0003-0722-9353

⁵ Department of Regulatory and Technical Support of the Research Center of Fire Protection, Institute of Public Administration and Scientific Research on Civil Protection, 21, Vyshhorodska St., Kyiv, 02000, Ukraine, tel. +38 (093) 165-69-91, e-mail: 2801397@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-9044-1293

^{6*} Department of Fire Prevention Work, Cherkasy Institute of Fire Safety named after of Chernobyl Heroes, 8, Onoprienka St., Cherkasy, 18000, Ukraine, tel. +38 (093) 407-19-83, e-mail: diadiushenko_oleksandr@chipb.org.in, ORCID ID: 0000-0003-0797-2251

Abstract. Problem statement. Methods of preventing the occurrence of forced fire-hazardous destruction of products in the event of exposure to external thermal actions are of great practical importance. At the same time, they should be based on scientifically based methods for determining the critical values of parameters of thermal effects on products and technological parameters of mixture charges, the excess of which leads to premature fire-hazardous destruction of products. To develop such methods, it is necessary to have the results of theoretical and experimental studies of the processes of heating the shells of mixture charges for various external heat flows and their thermoreaction times, as well as the processes of ignition and development of their combustion under different external conditions. **Purpose of the article.** To form the results of theoretical studies in the form of scientifically based methods that allow preventing and controlling the premature ignition of mixture charges, the explosive development of their combustion process and the fire-hazardous destruction of products under conditions of external thermal effects, as well as the compilation of the results of experimental studies into a single database with determination of the influence of the technological parameters of the mixtures on the characteristics of their ignition processes and the development of combustion, the use of which allows reducing the number of fire-explosive destruction of products in conditions of elevated heating temperatures and external pressures. **Conclusion.** Scientifically based methods of determining the critical values of the parameters of external thermal actions for the quantitative assessment of the level of fire safety of pyrotechnic products based on multi-component nitrate-metallized mixtures have been developed. A scientific and technical base of experimental data was created to determine the regularities of the influence of a wide class of technological parameters of mixtures on the main characteristics of the processes of ignition and development of combustion of mixtures (ignition temperature, induction time, speed of combustion development) under conditions of external thermal actions (elevated heating temperatures, external pressures, etc.), which makes it possible to determine the probability of fires occurring at facilities where products are stored.

Keywords: *fire safety; pyrotechnic products based on multi-component nitrate-metallized mixtures; processes of ignition and development of combustion*

Вступ. З кожним роком у народному господарстві та військовій техніці України все більшого застосування набувають піротехнічні вироби різного призначення (феєрверкові зірки та петарди, спалахувальні та займисті засоби, трасувальні патрони та снаряди, піротехнічні ІЧ-випромінювачі, пристрої ракетно-космічної техніки та ін.) для отримання спеціальних ефектів (світлових, кольорово-полум'яних, звукових, теплових, реактивних тощо) [1–16].

Основа цих виробів складають заряди з багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей: ущільнених сумішей з порошків металевих палих (Mg, Al, Ti, Zr та ін.), нітратовмісних окиснювачів (NaNO_3 , KNO_3 , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ та ін.), добавок органічних (парафіну, стеарину, нафталіну, антрацену, уротропіну, метальдегіду, каніфолі, ідитоду та ін.) та неорганічних речовин (фториди металів (LiF , NaF , BaF_2 , SrF_2 , SiF_2 , AlF_3) та ін.), які під час зберігання та транспортування або застосування виробів можуть піддаватись різним зовнішнім термічним впливам (наприклад, інтенсивному нагріву під час пожежі у складських приміщеннях, де зберігаються вироби, або під час їх транспортування, а також термоударним впливам під час запуску та польоті виробів тощо) [17–28].

У результаті відбувається передчасне спрацьовування зарядів сумішей, що входять до складу виробів, та прискорення процесу їх горіння в умовах замкненого об'єму у разі зростання температури нагрівання та зовнішнього тиску аж до пожежо-вибухонебезпечних режимів його перебігу. Відбуваються руйнування корпусів виробів, які супроводжуються проявом різних чинників пожежі (полум'я або високотемпературний струмінь продуктів згорання, дисперговані продукти (уламки корпусів, розжарені частини зарядів, іскри тощо)).

При цьому у багатьох випадках передчасні вибухонебезпечні спрацьовування піротехнічних виробів мали катастрофічні наслідки, оскільки практично непереборні складності виникали під час гасіння зарядів сумішей, що спалахнули,

внаслідок того, що процес їх горіння здійснюється за рахунок власного окиснювача без участі кисню навколишнього повітря, а температури продуктів згорання вельми високі.

Тому велике практичне значення мають способи попередження виникнення вимушених пожежонебезпечних руйнувань виробів у випадку впливу зовнішніх термічних дій. При цьому вони повинні ґрунтуватись на науково обґрунтованих методах визначення критичних значень параметрів термічних дій на вироби та технологічних параметрів зарядів сумішей, перевищення яких викликає передчасні пожежонебезпечні руйнування виробів.

Для розроблення таких методів необхідно мати результати теоретичних та експериментальних досліджень процесів нагрівання оболонок зарядів сумішей для різних зовнішніх теплових потоків та часів їх термодії, а також процесів займання та розвитку їх горіння за різних зовнішніх умов (підвищені температури нагріву, зовнішні тиски тощо).

Аналіз публікацій. Нині дослідження впливу технологічних параметрів зарядів сумішей (співвідношення компонентів та їх дисперсності, коефіцієнта ущільнення, діаметра заряду та матеріалу його оболонки, вологості окиснювача тощо) та зовнішніх умов (температури нагріву, зовнішніх тисків, вологості та складу навколишнього середовища тощо) на основні характеристики процесів їх займання та розвитку горіння (температуру та склад продуктів згорання, швидкість горіння та вибухонебезпечні режими його розвитку тощо) висвітлені у окремих статтях, монографіях та наукових роботах [29–51].

Однак їх систематизація та аналіз із погляду практичного застосування на підприємствах України для підвищення ефективності в організації систем протипожежної охорони на об'єктах із наявністю піротехнічних виробів, особливо в умовах зовнішніх термічних впливів, відсутні.

Мета статті – формування результатів теоретичних досліджень у вигляді науково

обґрунтованих методів, які дозволяють попереджати та контролювати передчасне займання зарядів сумішей, вибухонебезпечний розвиток процесу їх горіння та пожежонебезпечне руйнування виробів в умовах зовнішніх термічних дій, а також зведення результатів експериментальних досліджень у єдину базу даних із визначення впливу технологічних параметрів сумішей на характеристики процесів їх займання та розвитку горіння, використання якої дозволяє знижувати кількість пожежовибухонебезпечних руйнувань виробів в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків.

Результати досліджень. 1. Науково обґрунтовано розрахункові методи визначення критичних значень параметрів

зовнішніх термічних дій на заряди піротехнічних багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей, перевищення яких спричинює пожежовибухонебезпечні руйнування виробів на їх основі.

В основу методів покладено комплекс розроблених математичних моделей (табл. 1), розрахунки за якими проводяться в режимі діалогу та реального часу на ПК з використанням спеціального програмного комплексу (СПК1) у вигляді пакетів прикладних програм (ППП1 – ППП3) за основними чисельними методами розв’язування обчислювальних задач, а також чисельного розв’язування газодинамічних, теплових та дифузійних задач.

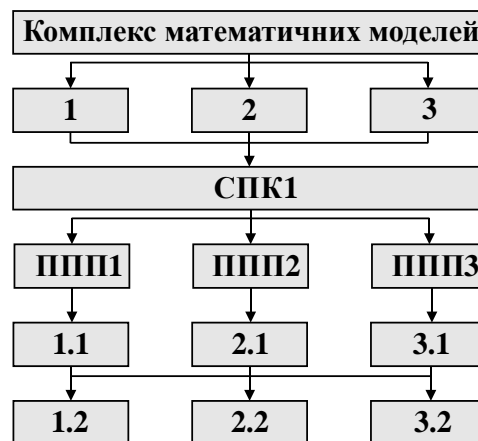


Рис. 1. Комплекс розроблених математичних моделей [2; 5; 30; 32; 35; 38; 41; 43; 45; 51] та спеціалізований програмний комплекс (СПК1) зі стандартних пакетів прикладних програм ППП1 – ППП3 [2; 5; 18] для проведення розрахунків на ПК в режимі діалогу та реального часу для визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних дій та вибухонебезпечних режимів розвитку горіння зарядів сумішей

Позначення на рисунку 1:

1 – Математичні моделі нагріву нерухомих виробів із зарядами сумішей різної геометричної форми та розмірів в умовах зберігання та транспортування.

2 – Математичні моделі зовнішніх термоударних впливів на вироби із зарядами сумішей з металевими оболонками циліндричної та півсферичної форми в умовах запуску та польоту.

3 – Математичні моделі розвитку процесу горіння багатокомпонентних ущільнених сумішей металеве пальне + нітратовмісний окиснювач + добавки органічних та неорганічних речовин в умовах підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків.

1.1 – Методи чисельного розв’язування лінійних та нелінійних рівнянь.

2.1 – Методи чисельного розв’язування диференційних рівнянь.

3.1 – Метод чисельного інтегрування функцій.

1.2 – Визначення критичних значень зовнішніх теплових потоків та часу їх впливу на поверхню виробів, перевищення яких спричинює пожежонебезпечні руйнування.

2.2 – Визначення критичних значень швидкостей надзвукового обдуву потоком повітря виробів для ламінарного та турбулентного режимів обтікання, формування критичних значень теплових

потоків з приграничних шарів у виробі та часів їх впливу, перевищення яких спричинює руйнування виробів.

3.2 – Визначення діапазонів максимальної та мінімальної зміни температури продуктів згоряння, вмісту у них високотемпературного конденсату та критичних діапазонів зміни швидкостей горіння сумішей, перевищення яких викликає їх різке збільшення та вибухонебезпечний розвиток процесу горіння.

Кількісна оцінка рівня пожежної безпеки піротехнічних виробів зі спалахувачами на основі багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей. Розроблені методи дозволяють в автоматизованому режимі з використанням сучасних ПК для широкого класу серійних виробів зі спалахувачами на основі розглядуваних сумішей (табл. 1) визначати критичні діапазони зміни основних параметрів зовнішніх термодій (теплових потоків від джерел займання

різних палих матеріалів та часів їх впливу) на металеві корпуси виробів, наприклад, під час можливих пожеж із відкритим полум'ям у складських приміщеннях, де зберігаються виробі, або під час їх транспортування, перевищення яких спричинює вибухонебезпечне займання зарядів спалахувачів під металевими корпусами виробів, передчасне спрацювання основних зарядів піротехнічних сумішей та пожежовибухонебезпечне для навколишніх об'єктів руйнування виробів на їх основі.

При цьому пожежна небезпека полум'я (ДСТУ 8828: 2019. Пожежна безпека. Загальні положення) зумовлена інтенсивністю теплового впливу (густиною теплового потоку), площею впливу, орієнтацією (взаємним розташуванням), періодичністю та часом його впливу на горючі речовини. Густина теплового потоку дифузійного полум'я (сірники, свічки, газовий палик) становить $18...40 \cdot 10^3$ Вт/м², а попередньо змішаних (паяльні лампи, газові палики) – $60...140 \cdot 10^3$ Вт/м².

Таблиця 1

Серійні піротехнічні виробі зі спалахувачами на основі розглядуваних сумішей, які використовуються у народному господарстві та військовій техніці [2; 5; 29; 35]

№ п/п	Призначення	Рецептура основного заряду піротехнічної суміші	Відносний масовий вміст компонентів суміші, %
1	Освітлювальні патрони	NaNO ₃	11,0
		Al – Mg	41,0
		CaSO ₄ ·0,5H ₂ O	32,0
		H ₂ O	1,0
		CaCO ₃	15,0
2	Освітлювальні снаряди	Ba(NO ₃) ₂	76,0
		Al-пудра	10,0
		Al-порошок	8,0
		Рицинова олія	2,0
		Сірка	4,0
3	Освітлювальні артснаряди	Ba(NO ₃) ₂	55,0
		Sr(NO ₃) ₂	5,0
		Al	15,0
		Mg	17,0
		Льняна олія	3,0
4	Фотоосвітлювальні авіабомби (ФТАБ)	Асфальт	5,0
		Ba(NO ₃) ₂	30,0
		KClO ₄	30,0
5	Сигнальні патрони (зелений вогонь)	Al-пудра	40,0
		Ba(NO ₃) ₂	45,0
		Mg	26,0
		C ₆ Cl ₆	7,0
		CuO	2,0
		Гільсоніт	2,0
Нафта	2,0		

Закінчення таблиці 1

		KClO ₄	16,0
6	Сигнальні патрони (жовтий вогонь)	Mg	26,0
		Гільсоніт	2,0
		Ba(NO ₃) ₂	29,0
		Na ₂ C ₂ O ₄	13,0
		KClO ₄	23,0
		C ₆ Cl ₆	5,0
		Нафта	2,0
7	Трасери для патронів (трасери зеленого вогню)	Ba(NO ₃) ₂	16,0
		Mg	38,0
		Гільсоніт	3,0
		C ₆ Cl ₆	6,0
		Cu-порошок	2,0
8	Трасери для артилерійських снарядів (трасери білого вогню)	KClO ₄	25,0
		Ba(NO ₃) ₂	60,0
		Mg	34,0
9	Сигнальні патрони (червоний вогонь)	Фенол-формальдегідна смола	6,0
		Sr(NO ₃) ₂	34,0
		Гільсоніт	2,0
		Нафта	2,0
		C ₆ Cl ₆	4,0
		KClO ₄	29,0
10	Трасери для патронів (трасери червоного вогню)	Mg	29,0
		Sr(NO ₃) ₂	33,3
		Mg	26,7
		SrO ₂	26,7
		SrC ₂ O ₄	5,0
11	Піротехнічні ІЧ-снаряди (ПІЧС) для створення хибних цілей	Резинат Ca	8,3
		NaNO ₃	60,0
		Mg	32,0
		Нафталін	8,0

Таблиця 2

Деякі температурні характеристики полум'я та низькокалорійних джерел теплоти

Назва речовини (виробу), що горить, або пожежонебезпечної операції	Температура полум'я (тіління або нагрівання), К	Час горіння (тіління), хв.
Легкозаймісті та горючі рідини	1 153	–
Деревина та лісопиломатеріали	1 273	–
Природні та зріджені гази	1 473	–
Газове зварювання металу	3 423	–
Газове різання металу	1 623	–
Тліюча цигарка	593...683	2...2,5
Тліюча сигара	693...733	26...30
Сірник, що горить	893...1 108	0,33

У таблиці 2 наведено деякі температурні характеристики полум'я та низькокалорійних джерел теплоти.

Відкрите полум'я небезпечно не тільки під час безпосереднього контакту з піротехнічними виробами, а й за його опромінення. Інтенсивність опромінення (g_p , Вт/м²) обчислюють за формулою:

$$g_p = 5,7 \cdot \varepsilon_{36} \cdot \left(\left(\frac{T_\phi}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{zp}}{100} \right)^4 \right) \cdot \varphi_{1\phi}, \quad (1)$$

де 5,7 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/м²·К⁴; ε_{36} – зведено ступінь чорноти системи:

$$\varepsilon_{36} = \frac{1}{\varepsilon_\phi} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1, \quad (2)$$

де ε_ϕ – ступінь чорноти факелу (під час горіння дерева дорівнює 0,7, нафтопродуктів – 0,85); ε_p – ступінь чорноти речовини, що опромінюється.

Приймають згідно з чинними нормативними документами; T_{ϕ} – температура факела полум'я, К; T_{gr} – температура горючої речовини, К; $\phi_{1\phi}$ – коефіцієнт опромінення між випромінювальною та опроміненою поверхнями. Критичні значення інтенсивності опромінення залежно від його тривалості для деяких речовин наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Критичні значення інтенсивності опромінення залежно від тривалості опромінення для деяких речовин

Назва матеріалу	Мінімальна інтенсивність опромінення, Вт/м ² , за тривалості опромінення, хв.		
	3	5	15
Деревина (сосна вологістю 12 %)	18 800	16 900	13 900
Дерев'яно-стружкові плити (густина 417 кг/м ³)	13 900	11 900	8 300
Торф брикетний	31 500	24 400	13 200
Торф кусковий	16 600	14 350	9 800
Бавовна-волокно	11 000	9 700	7 500
Шорсткий пластик	21 600	19 100	15 400
Склопластик	19 400	18 600	17 400
Пергамін	22 000	19 750	17 400
Гума	22 600	19 200	14 800
Вугілля	–	35 000	35 000

Таким чином, залежно від природи осередку пожежі (виду відкритого полум'я) та тривалості його дії, зовнішній тепловий нагрів зарядів піротехнічних спалахувачів може досягати значних величин: тепловий потік, що надходить на поверхню спалахувачів – до $2,5 \cdot 10^4 \dots 3,5 \cdot 10^5$ Вт/м²; час його дії – до 2...5 хв. При цьому ці діапазони зміни вказаних параметрів зовнішніх термічних впливів можуть перевищувати їх критичні значення, які спричинюють передчасне пожежонебезпечне руйнування піротехнічних виробів із розглядуваними спалахувачами.

Із застосуванням розроблених методів для циліндричних зарядів піротехнічних спалахувачів на основі Mg + NaNO₃ + парафін + NaF та Al + NaNO₃ + парафін + NaF проведено розрахунки залежностей $q_n^*(t^*)$ (q_n^* , t^* – критичні значення зовнішнього теплового потоку та часу його дії) для різних технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача α , відносного вмісту добавки органічної ε_n та неорганічної речовини ε_{ϕ} , середнього розміру частинок металевого пального d_m та окиснювача d_N , коефіцієнта ущільнення

суміші K_u , діаметра заряду D , матеріалу оболонки та її товщини h) (рис. 2–4), які були зіставлені з отриманими експериментальними даними.

Усі експериментальні дослідження проводились на зразках сумішей, які виготовлялись за стандартними методиками, прийнятими у піротехнічному виробництві [2; 5]. Ініціювання процесів займання зразків сумішей здійснювалось за нормальних умов ($T = 293$ К, $P = 10^5$ Па) за допомогою керованого ІЧ-нагріву кварцовими лампами типу КГМ-220-1000-1 із застосуванням термодатчиків РИФ-101 для контролю температури на поверхні зразків сумішей в діапазоні 300...1900 К та зовнішніх теплових потоків у діапазоні $2 \cdot 10^4 \dots 2,5 \cdot 10^5$ Вт/м² [2; 5].

Із даних, наведених на рисунках 2–4, випливає, що теплові потоки q_{ni} ($i = 1, 2, \dots$), які реалізуються на практиці, від різних осередків пожежі можуть перевищувати критичні значення для розглядуваних зарядів сумішей за тривалості їх дії $t^* > t_j^*$ ($j = 1, 2, \dots$), які суттєво залежать від технологічних параметрів сумішей (табл. 4).

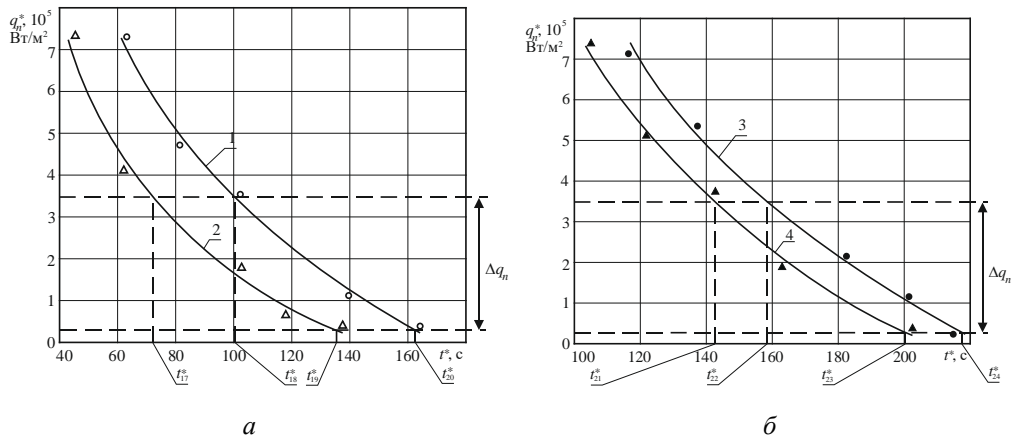


Рис. 2. Залежності $q_n^*(t^*)$ циліндричних зарядів сумішею на основі $Mg + NaNO_3 + \text{парафін} + NaF$ (а) та $Al + NaNO_3 + \text{парафін} + NaF$ (б) для коефіцієнта надлишку окиснювача $\alpha = 0,6$ ($\epsilon_n = 0,2$; $\epsilon_\phi = 0,1$; $d_N = 106 \text{ мкм}$; $K_Y = 0,95 \dots 0,96$; $D = 2 \dots 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; оболонка сталева (сталь 12X18H10T [2]); $h = 2 \dots 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $T_0 = 293 \text{ К}$; $P = 10^5 \text{ Па}$): 1 – $d_m = 54 \text{ мкм}$ (Mg); 2 – $d_m = 305 \text{ мкм}$ (Mg); 3 – $d_m = 56 \text{ мкм}$ (Al); 4 – $d_m = 310 \text{ мкм}$ (Al); — розрахункова крива; $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle$ – експериментальні дані; $\Delta q_n = 2,5 \cdot 10^4 \dots 3,5 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$

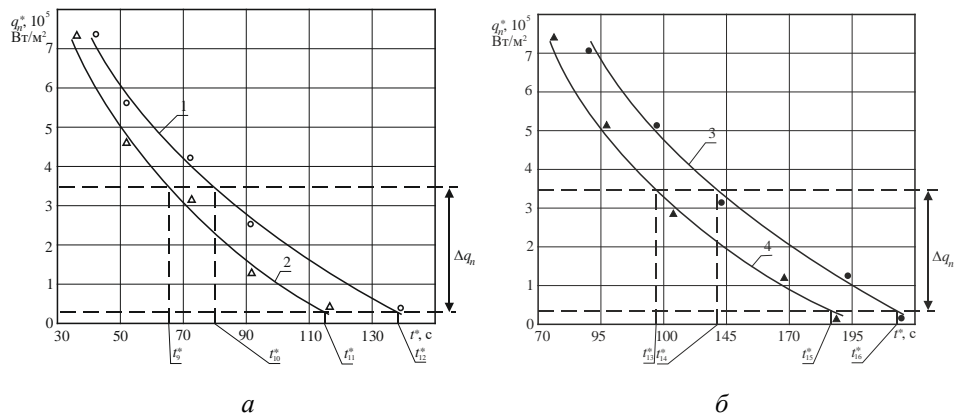


Рис. 3. Залежності $q_n^*(t^*)$ циліндричних зарядів сумішею на основі $Mg + NaNO_3 + \text{парафін} + NaF$ (а) та $Al + NaNO_3 + \text{парафін} + NaF$ (б) для коефіцієнта надлишку окиснювача $\alpha = 1,0$ ($\epsilon_n = 0,2$; $\epsilon_\phi = 0,1$; $d_N = 106 \text{ мкм}$; $K_Y = 0,95 \dots 0,96$; $D = 2 \dots 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; оболонка сталева (сталь 12X18H10T [2]); $h = 2 \dots 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $T_0 = 293 \text{ К}$; $P = 10^5 \text{ Па}$): 1 – $d_m = 54 \text{ мкм}$ (Mg); 2 – $d_m = 305 \text{ мкм}$ (Mg); 3 – $d_m = 56 \text{ мкм}$ (Al); 4 – $d_m = 310 \text{ мкм}$ (Al); — розрахункова крива; $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle$ – експериментальні дані; $\Delta q_n = 2,5 \cdot 10^4 \dots 3,5 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$

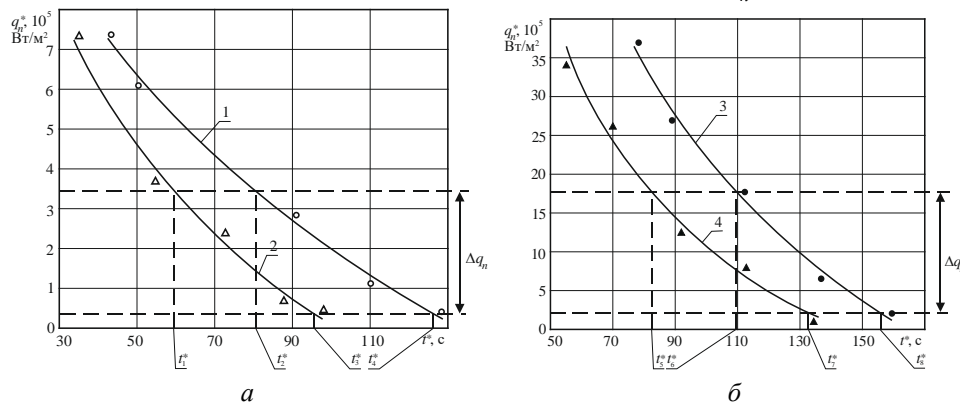


Рис. 4. Залежності $q_n^*(t^*)$ циліндричних зарядів сумішею на основі $Mg + NaNO_3 + \text{парафін} + NaF$ (а) та $Al + NaNO_3 + \text{парафін} + NaF$ (б) для коефіцієнта надлишку окиснювача $\alpha = 1,5$ ($\epsilon_n = 0,2$; $\epsilon_\phi = 0,1$; $d_N = 106 \text{ мкм}$; $K_Y = 0,95 \dots 0,96$; $D = 2 \dots 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; оболонка сталева (сталь 12X18H10T [2]); $h = 2 \dots 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $T_0 = 293 \text{ К}$; $P = 10^5 \text{ Па}$): 1 – $d_m = 54 \text{ мкм}$ (Mg); 2 – $d_m = 305 \text{ мкм}$ (Mg); 3 – $d_m = 56 \text{ мкм}$ (Al); 4 – $d_m = 310 \text{ мкм}$ (Al); — розрахункова крива; $\circ, \bullet, \Delta, \blacktriangle$ – експериментальні дані; $\Delta q_n = 2,5 \cdot 10^4 \dots 3,5 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$

Таблиця 4

Діапазони зміни критичних значень часів дії t_j^* ($j = 1, 2, \dots$) зовнішніх теплових потоків q_{ni} ($i = 1, 2, \dots$) для різних значень технологічних параметрів суміші

Параметр Суміш	q_{ni} , Вт/м ²	t_j^* , с
Суміш на основі Mg + NaNO ₃ + парафін + NaF	$q_{n1} = 3,5 \cdot 10^5$	$\alpha = 1,5$ $t_1^* > 63$ при $d_m = 305$ мкм; $t_2^* > 81$ при $d_m = 54$ мкм
		$\alpha = 1,0$ $t_9^* > 68$ при $d_m = 305$ мкм; $t_{10}^* > 83$ при $d_m = 54$ мкм
		$\alpha = 0,6$ $t_{17}^* > 73$ при $d_m = 305$ мкм; $t_{18}^* > 101$ при $d_m = 54$ мкм
	$q_{n2} = 2,5 \cdot 10^4$	$\alpha = 1,5$ $t_3^* > 97$ при $d_m = 305$ мкм; $t_4^* > 125$ при $d_m = 54$ мкм
		$\alpha = 1,0$ $t_{11}^* > 115$ при $d_m = 305$ мкм; $t_{12}^* > 139$ при $d_m = 54$ мкм
		$\alpha = 0,6$ $t_{19}^* > 136$ при $d_m = 305$ мкм; $t_{29}^* > 163$ при $d_m = 54$ мкм
Суміш на основі Al + NaNO ₃ + парафін + NaF	$q_{n1} = 3,5 \cdot 10^5$	$\alpha = 1,5$ $t_5^* > 85$ при $d_m = 310$ мкм; $t_6^* > 98$ при $d_m = 56$ мкм
		$\alpha = 1,0$ $t_{13}^* > 98$ при $d_m = 310$ мкм; $t_{14}^* > 143$ при $d_m = 56$ мкм
		$\alpha = 0,6$ $t_{21}^* > 144$ при $d_m = 310$ мкм; $t_{22}^* > 152$ при $d_m = 56$ мкм
	$q_{n2} = 2,5 \cdot 10^4$	$\alpha = 1,5$ $t_7^* > 137$ при $d_m = 310$ мкм; $t_8^* > 158$ при $d_m = 56$ мкм
		$\alpha = 1,0$ $t_{15}^* > 188$ при $d_m = 310$ мкм; $t_{16}^* > 213$ при $d_m = 56$ мкм
		$\alpha = 0,6$ $t_{23}^* > 201$ при $d_m = 310$ мкм; $t_{24}^* > 218$ при $d_m = 56$ мкм

Таким чином, шляхом збільшення вмісту металевого пального у суміші та зменшення середнього розміру його частинок значення t_j^* ($j = 1, 2, \dots$) можна збільшити у 1,5...2 рази, це вказує, що заряди сумішей стають більш стійкими до зовнішніх теплових впливів.

Науково-технічна база експериментальних даних із визначення нестійких режимів процесів займання та розвитку горіння піротехнічних багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей для зниження кількості пожежовибухонебезпечних руйнувань виробів в умовах зовнішніх термодій. В основу бази даних (рис. 5) покладено спеціалізований програмний комплекс (СПК2), що складається із двох стандартних пакетів прикладних програм (ППП4, ППП5) за методами первинної математичної обробки отриманих даних та

методами регресії для побудови експериментальних кривих на ПК в режимі діалогу та реального часу, що дозволяють визначати закономірності впливу широкого класу технологічних параметрів сумішей (коефіцієнта надлишку окиснювача, величини та природи добавки органічної та неорганічної речовини, вологості окиснювача, природи та дисперсності металевого пального, коефіцієнта ущільнення сумішей, діаметра їх зарядів, матеріалу та товщини оболонки), складу та вологості навколишнього середовища на характеристики процесів займання та розвитку горіння сумішей (температуру та час затримки займання, швидкість розвитку горіння) та встановлювати нестійкі вибухонебезпечні режими розвитку їх горіння за підвищених температур нагріву та зовнішніх тисків, контроль за якими

дозволяє зменшувати кількість пожежонебезпечних руйнувань виробів.

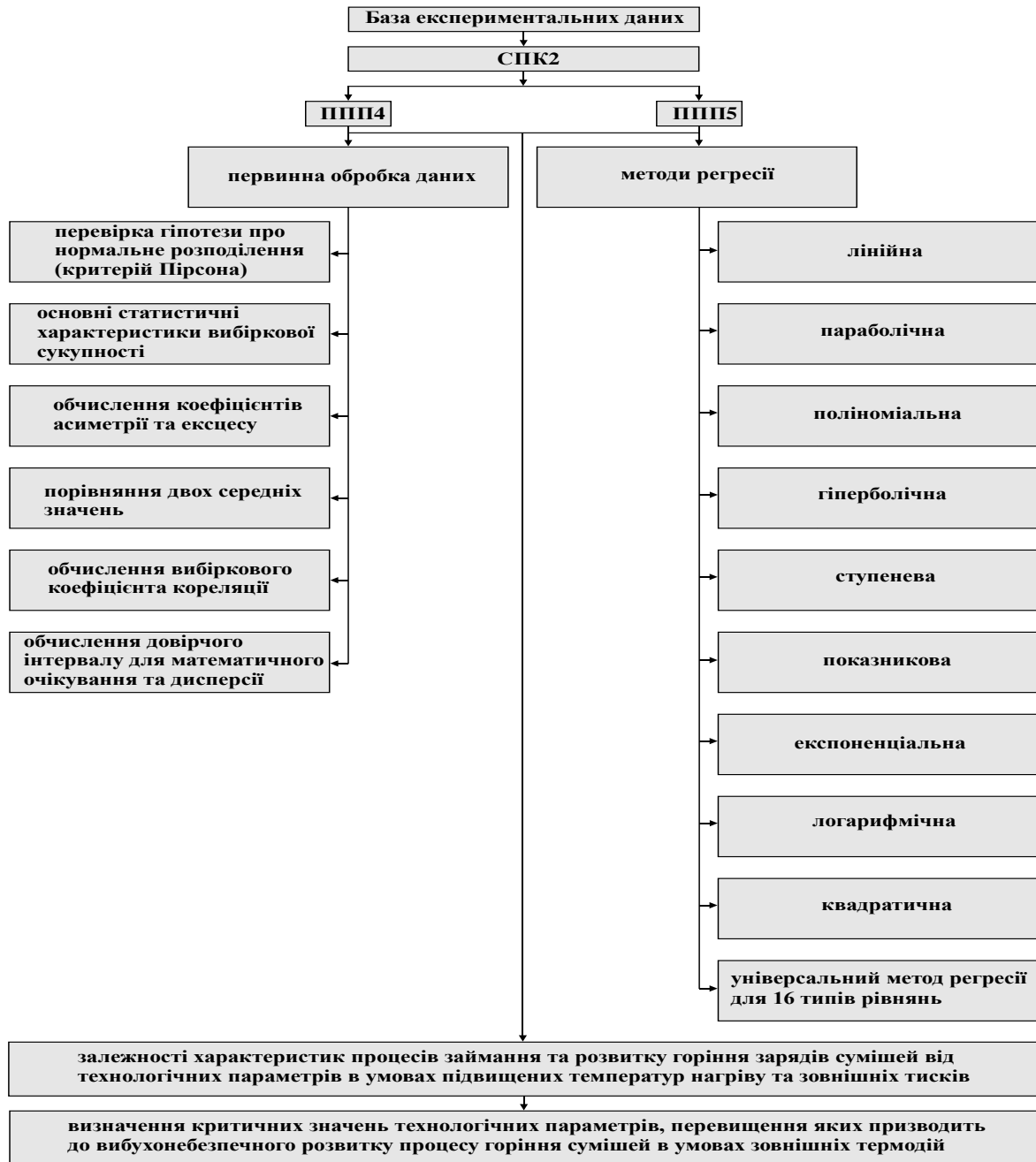


Рис 5. База отриманих експериментальних даних [2, 5, 29, 31, 34, 36, 37, 39, 40, 42, 44, 46, 47 – 51] та спеціалізований програмний комплекс (СПК2) зі стандартних пакетів прикладних програм ППП4 – ППП5 [2; 5; 18] для отримання залежностей характеристик займання та розвитку горіння зарядів сумішей від технологічних параметрів, визначення їх критичних значень, що спричинює пожежовибухонебезпечне руйнування виробів в умовах зовнішніх термічних впливів

Кількісна оцінка ймовірності виникнення пожежі на об'єкті, де зберігаються вироби з піротехнічними спалахувачами. Для запобігання передчасному займанню та подальшому пожежонебезпечному руйнуванню виробів із

піротехнічними спалахувачами на основі багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей з добавками органічних та неорганічних речовин в умовах зовнішньої термічної дії (наприклад, за виникнення пожежі у складських приміщеннях, де

зберігаються вироби, під час їх транспортування тощо) необхідно запобігати утворенню у горючому середовищі осередків екзотермічного окиснення частинок металевих пального в продуктах розкладання окиснювача, добавок органічних та неорганічних речовин, що забезпечується максимально можливим застосуванням порошків компонентів у вказаних зарядах зі зниженою горючістю, яка досягається шляхом варіювання їх технологічних параметрів (співвідношення та дисперсності компонентів, їх коефіцієнта ущільнення, розмірів їх заряду (діаметра, висоти, геометричної форми тощо)) (згідно з ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні вимоги. п. 7. Вимоги до способів забезпечення пожежної безпеки комплексом протипожежного захисту). Для кількісної оцінки рівня забезпечення пожежної безпеки піротехнічних виробів в умовах зовнішніх термічних дій (див. ДСТУ 8828:2019 п. Б. Метод визначення ймовірності виникнення пожежі на об'єкті. п. Б.3.4. Розрахунок ймовірності появи джерела запалювання (ініціювання горіння та вибуху)) використовується методика розрахунку ймовірності $P_1(ДЗ)$ появи джерела запалювання в одному піротехнічному виробі, що ініціює процес передчасного виникнення горіння основного заряду багатоконпонентної суміші виробу.

При цьому враховується, що при зберіганні або транспортуванні піротехнічних виробів заздалегідь неможливо передбачити конкретні умови, за яких можуть виникнути зовнішні дії на поверхню цих виробів, які можуть викликати появу в заряді нітратно-металевих джерел запалювання осередків екзотермічного окиснення частинок металів у продуктах розкладання інших компонентів, що спричинюють спалахування та ініціювання джерел запалювання та, у кінцевому підсумку, пожежонебезпечне руйнування виробів.

Тому згідно з ДСТУ 8828:2019 (див. Б.3.4, формула (Б.30)) для розрахунку $P_1(ДЗ)$ використовується вираз:

$$P_1(ДЗ) = 1 - e^{-\tau/\tau_{0.3}}, \quad (3)$$

де τ – час зберігання (транспортування) піротехнічного виробу протягом аналізованого періоду часу, год.; $\tau_{0.3} = 3,03 \cdot 10^4 \cdot E_0^{1,2}$ – середній час зберігання (транспортування) до появи (ініціювання) джерела запалювання, год.; E_0 – мінімальна енергія запалювання ущільненої суміші розглядуваних компонентів (утворення осередків екзотермічного окиснення), Дж.

Величина E_0 визначається як мінімальна енергія, яка необхідна для нагрівання об'єму реакційної зони κ -фази заряду суміші від початкової температури (T_0 , К) до температури її займання (T_z , К) в умовах зовнішньої термодії:

$$E_0 = \rho_c \cdot c_c \cdot \Delta V_c (T_z - T_0), \quad (4)$$

де ρ_c , c_c – густина (кг/м³) та питома теплоємність (Дж/кг·К) заряду суміші; ΔV_c – об'єм реакційної зони κ -фази суміші, в межах якої відбувається повне термічне розкладання окиснювача, добавок органічних та неорганічних речовин, а також екзотермічне окиснення частинок металів, що викликають, у кінцевому підсумку, займання суміші, м³.

При цьому, враховуючи, що заряд має діаметр D , а товщина реакційної зони κ -фази складає δ_1 , у першому наближенні, можна вважати:

$$\Delta V_c = \frac{\pi D^2 \delta_1}{4}. \quad (5)$$

Підставляючи (5) у (4), отримуємо:

$$E_0 = \frac{\pi D^2 \delta_1 \cdot \rho_c \cdot c_c}{4} \cdot (T_z - T_0). \quad (6)$$

Згідно зі встановленим механізмом горіння розглядуваних піротехнічних багатоконпонентних нітратно-металізованих сумішей з добавками органічних та неорганічних речовин [2; 5] величина, в першому наближенні, визначається співвідношенням:

$$\delta_1 = \frac{2R \cdot T_n \cdot a_c}{E_1 \cdot u}, \quad (7)$$

де R – газова стала, Дж/моль·К; T_n – температура поверхні горіння суміші, К; a_c – коефіцієнт температуропровідності суміші, м²/с; u – швидкість горіння суміші, м/с; E_1 – енергія активації процесу повного

термічного розкладання NaNO_3 за $T = T_n$, як основного джерела активних газоподібних продуктів ($E_1 \gg RT$), кДж/моль.

Згідно з отриманими експериментальними даними (для $\alpha = 0,4 \dots 0,5$ та $K_V = 0,95 \dots 0,96$) [2, 29]: $T_n = 1100 \dots 1300$ К; $u = 1,5 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ м/с; $E_1 = 139,2$ кДж/моль; $a_c = 4,2 \cdot 10^{-6} \dots 12,3 \cdot 10^{-6}$ м²/с, величина $\delta_1 = 70 \dots 350$ мкм, тобто по порядку величини відповідає середньому розміру частинок використуваних порошків Mg ($d_m = 54 \dots 305$ мкм) та Al ($d_m = 56 \dots 310$ мкм).

Для знаходження T_3 проведено експериментальні дослідження процесів займання зарядів сумішей Mg + NaNO_3 + парафін + NaF та Al + NaNO_3 + парафін + NaF в умовах зовнішніх термічних впливів

для різних технологічних параметрів (коефіцієнта надлишку окиснювача α , відносного вмісту добавки органічної ε_n та неорганічної ε_ϕ речовини, середнього розміру частинок металевго пального d_m та окиснювача d_N , коефіцієнта ущільнення суміші K_V , діаметра заряду D , матеріалу оболонки та її товщини h) (рис. 6, 7).

Усі дослідження проводились за допомогою відомих методів фізико-хімічного аналізу (методи швидкісної мікрозйомки, термопарні та безконтактні методи вимірювання температури, методи рентгеноструктурного аналізу та ін.) та стандартного піротехнічного обладнання [2; 5; 33].

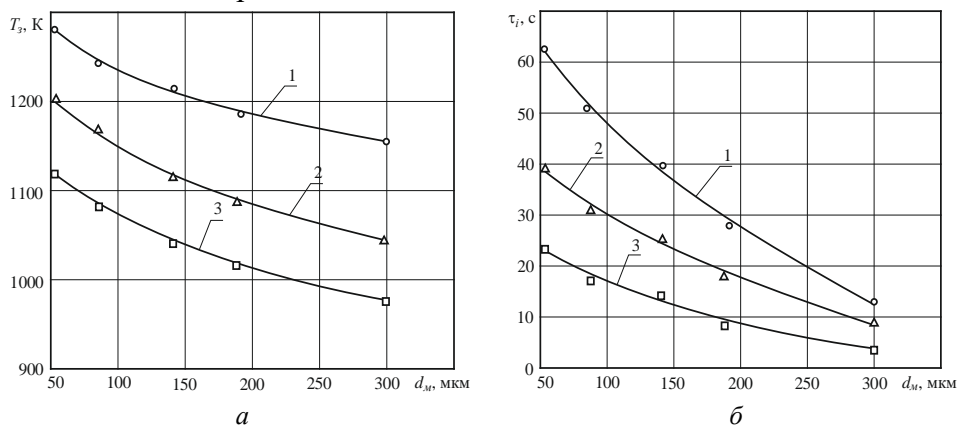


Рис. 6. Залежності температури займання (а) та часу індукції (б) циліндричних зарядів сумішей на основі Mg + NaNO_3 + парафін + NaF від середнього розміру частинок металевго пального для значень коефіцієнта надлишку окиснювача $\alpha = 0,4$ (1); 1,0 (2); 1,5 (3) ($\varepsilon_n = 0,2$; $\varepsilon_\phi = 0,1$; $d_N = 106$ мкм; $K_V = 0,95 \dots 0,96$; $D = 2 \dots 3 \cdot 10^{-2}$ м; оболонка сталева (сталь 12Х18Н10Т [2]); $h = 2 \dots 2,5 \cdot 10^{-3}$ м; $T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па):
○, Δ, □ – експериментальні дані

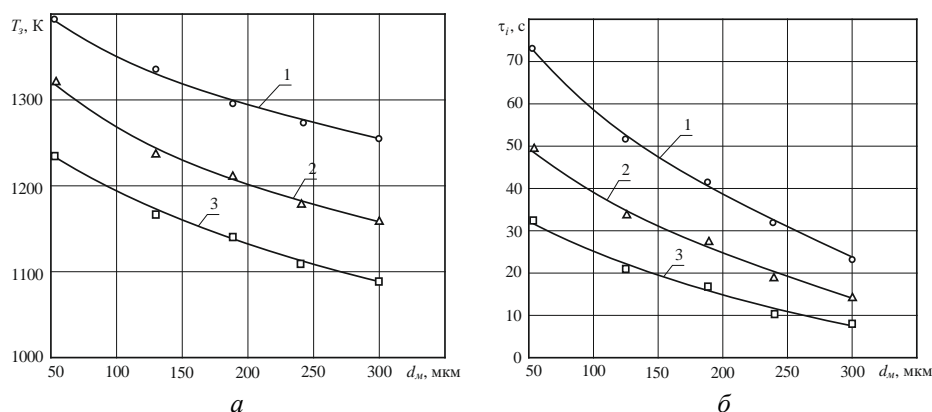


Рис. 7. Залежності температури займання (а) та часу індукції (б) циліндричних зарядів сумішей на основі Al + NaNO_3 + парафін + NaF від середнього розміру частинок металевго пального для значень коефіцієнта надлишку окиснювача $\alpha = 0,4$ (1); 1,0 (2); 1,5 (3) ($\varepsilon_n = 0,2$; $\varepsilon_\phi = 0,1$; $d_N = 106$ мкм; $K_V = 0,95 \dots 0,96$; $D = 2 \dots 3 \cdot 10^{-2}$ м; оболонка сталева (сталь 12Х18Н10Т [2]); $h = 2 \dots 2,5 \cdot 10^{-3}$ м; $T_0 = 293$ К; $P = 10^5$ Па):
○, Δ, □ – експериментальні дані

При цьому ініціювання процесу займання зарядів сумішей в умовах зовнішніх термічних дій також здійснювалось за допомогою вказаного вище контрольованого ІЧ-нагріву їх поверхонь. Отримані експериментальні дані оброблялись в режимі діалогу та реального часу з використанням стандартних пакетів прикладних програм за методами первинної математичної обробки (ППП4) та методами регресії (ППП5) [2; 5; 18]. Відносна похибка визначення основних характеристик процесу займання суміші (температури займання T_z , К; часу індукції (затримки займання) τ_i , с) не перевищувала 6...8 %.

З даних, наведених на рисунках 6, 7, випливає, що величини T_z та τ_i суттєво залежать від вмісту окиснювача у суміші та дисперсності металевого пального: при зменшенні α від $\alpha = 1,5$ до $\alpha = 0,4$; d_m від $d_m = 305$ мкм до $d_m = 56$ мкм (для частинок Mg) та від $d_m = 310$ мкм до $d_m = 54$ мкм (для частинок Al) значення T_z зростають у 1,5... 2 рази, а τ_i – у 2,5...3 рази.

Таким чином, використання дрібнодисперсних металевих порошоків на стадії виготовлення зарядів піротехнічних багатокомпонентних нітратно-металевих сумішей з надлишком металевого пального дозволить збільшити час їх передчасного спрацьовування в умовах зовнішньої термічної дії і, тим самим, підвищити

пожежну безпеку піротехнічних виробів на їх основі.

Для кількісної оцінки сказаного вище розраховуємо ймовірність $P_1(DЗ)$ ініціювання джерела запалювання за термічної дії, тобто ймовірність пожежонебезпечного руйнування піротехнічних виробів у цих умовах. Розраховуючи за формулами (3)–(7) на прикладі двох серійних піротехнічних виробів із різними нітратно-металізованими спалахувачами (табл. 5), використовуючи отримані дані (рис. 6, 7), а також відомі фізико-хімічні характеристики розглянутих сумішей, отримуємо, що ймовірність $P_1(DЗ)$ зі зменшенням α та d_m може суттєво зменшуватися (рис. 8): для виробу 1 – в 2,3...2,8 рази; для виробу 2 – в 1,7...2,1 рази.

Отже, шляхом зміни вмісту порошкоподібних металевих пальных та їх дисперсності, що використовуються у піротехнічних нітратно-металевих спалахувачах виробів, можна підвищити їх пожежну безпеку в умовах зовнішньої термічної дії більше ніж у 1,5...2,5 рази.

Крім цього, замінюючи одне металеве пальне іншим, також можна суттєво підвищити пожежну безпеку піротехнічних виробів у вказаних умовах: наприклад, заміна магнієвого порошку алюмінієвим може посолити пожежну безпеку виробу в 1,8 рази.

Таблиця 5

Перелік піротехнічних виробів загальнопромислового призначення, на прикладі яких апробувалась методика розрахунку ймовірності $P_1(DЗ)$ [2; 5]

№ п/п	Призначення	Склад заряду піротехнічного спалахувача	Рецептура основного заряду піротехнічної суміші	відносний масовий вміст компонентів суміші, %
1	Трасери для артснарядів (трасери білого вогню)	Суміш на основі Al + NaNO ₃ + парафін + NaF	Ba(NO ₃) ₂	60
			Mg	34
			Фенол-формальдегідна смола	6
2	Освітлювальні снаряди	Суміші на основі Mg + NaNO ₃ + парафін + NaF	Ba(NO ₃) ₂	76,0
			Al – пудра	10,0
			Al – порошок	8,0
			Рицинова олія	2,0
			Сірка	4,0

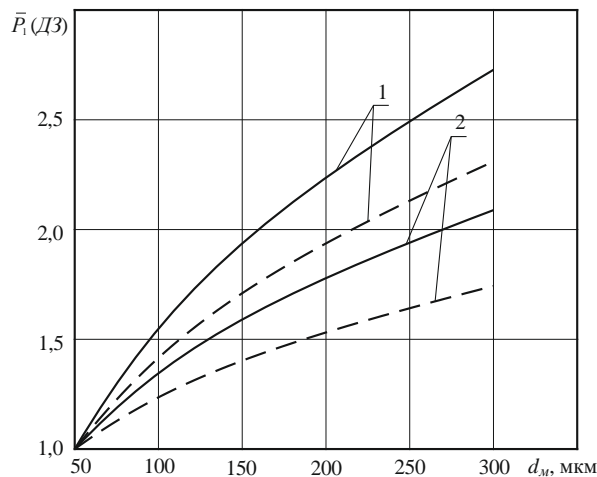


Рис. 8. Залежність відносної ймовірності $\bar{P}_1(ДЗ)$ ($\bar{P}_1(ДЗ) = \frac{P_1(ДЗ)}{P_1^*(ДЗ)}$, де $P_1^*(ДЗ)$ – значення ймовірності для мінімального розміру частинок металевого пального з використанням на практиці діапазонів його зміни [2, 5] пожежонебезпечної руйнування піротехнічних виробів за зовнішньої термічної дії від дисперсності порошків металевих палих та їх вмісту у сумішах, що використовуються у зарядах піротехнічних спалахувачів: 1 – перший виріб із нітратно-алюмінієвим спалахувачем; 2 – другий виріб із нітратно-магнієвим спалахувачем (див. табл. 5); ———— – суміші з $\alpha = 0,4$; - - - - - – суміші з $\alpha = 1,5$

Розроблені науково обґрунтовані методи та науково-технічна база експериментальних даних знайшли практичне використання та впровадження (підтверджено актами впровадження) на підприємствах України, що дозволило:

- підвищити рівень пожежної безпеки об'єктів із наявністю піротехнічних виробів шляхом мінімізації часів спрацьовування різних типів пожежних сповіщувачів у разі пожежі у складських приміщеннях, де зберігаються вироби та боєприпаси, залежно від природи горючого матеріалу, а також відстані та висоти їх розміщення від потенційного осередку пожежі;

- знизити ймовірність пожежовибухонебезпечних руйнувань виробів в умовах їх зберігання та транспортування за наявності зовнішніх термічних дій у 1,5...2,5 рази;

- попереджати передчасні вибухонебезпечні руйнування виробів в умовах їх застосування.

Висновки

В результаті застосування розроблених методів та бази експериментальних даних на підприємствах України в нормативних документах отримано такі результати.

1. На стадії виготовлення виробів шляхом регулювання технологічних

параметрів зарядів сумішей (коефіцієнта надлишку окиснювача, величини та природи добавки органічних та неорганічних речовин, природи та дисперсності металевого пального та ін.) в результаті збільшення температури їх займання у 1,5...2 рази та часу індукції у 2,5...3 рази, підвищено рівень пожежної безпеки об'єктів із наявністю піротехнічних виробів у результаті мінімізації часів спрацьовування різних типів пожежних сповіщувачів у разі пожежі у складських приміщеннях, де зберігаються вироби, а також знижено пожежну ймовірність пожежовибухонебезпечних руйнувань виробів в умовах їх зберігання та транспортування з урахуванням впливу зовнішніх термічних дій у 1,5...2,5 рази.

2. В умовах застосування виробів з урахуванням впливу зовнішніх термоударних впливів шляхом керування режимами їх запуску (корекцією швидкості та кутів, під якими вони вистрілюються) можна знижувати температуру нагріву металевих корпусів виробів (більше, ніж у 2...2,5 рази) і, тим самим, попереджати передчасні вибухонебезпечні руйнування виробів під час пострілу та польоту.

3. Сформульовано пропозиції щодо внесення змін та доповнень до Національних

стандартів України щодо піротехнічних виробів побутового призначення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Диринга Х., Майер П., Фехнер Д., Болен Я., Кайнер К. У. Настоящее и будущее магниевых сплавов в нашей цивилизации. *Литейное производство*. 2006. № 1. С. 4–7.
2. Ващенко В. А., Кириченко О. В., Лега Ю. Г., Заика П. И., Яценко И. В., Цыбулин В. В. Процессы горения металлизированных конденсированных систем. Київ : Наукова думка, 2008. 745 с.
3. Arkhipov V. A., Bondarchuk S. S., Korotkikh A. G. Nonstationary burning rate of solid propellants. *Nonequilibrium Phenomena: Plasma, Combustion, Atmosphere*. Edited by G. D. Roy, S. M. Frolov and A. M. Starik. Moscow : TORUS PRESS Publ., 2009. Pp. 257–263.
4. Arkhipov V. A., Bondarchuk S. S., Korotkikh A. G. Comparative analysis of methods for measuring the transient burning rate. II. Research results. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2010. Vol. 46, № 5. Pp. 570–577.
5. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Лега Ю. Г., Яценко И. В. Основи пожежної безпеки піротехнічних нітратомісних виробів в умовах зовнішніх термовпливів : монографія. Київ : Наукова думка, 2012. 318 с.
6. Filzen M. Feuerwehr löscht Magnesium-Brand im Essener Hafen mit Sand. *Feuerwehr Essen. Pressemitteilung* (дата звернення: 20.10.2015).
7. Filzen M. Feuer in Essener Hafentmühle, brennt gelagertes Aluminiumgranulat. *Feuerwehr Essen. Pressemitteilung* (дата звернення: 23.01.2016).
8. Arbeitskreis V. Evaluierung neuer Löschverfahren bei Metallbränden: Ständige Konferenz der Innenminister und Senatoren der Länder. Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung. Heyrothsberge, 2017.
9. Tepper F., Kaledin L. Combustion characteristics of kerosene containing Alex nano-aluminum. *Unsteady Combustion and Interior Ballistics : Lectures of the 3rd International Workshop*. Saint Petersburg, 2000. Pp. 320–325.
10. ДСТУ 4105-2002. Вироби піротехнічні побутові. Загальні вимоги безпеки [чинні від 2022-06-12]. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 2002.
11. ДСТУ 4316-2004. Вироби піротехнічні побутового призначення. Вимоги пожежної безпеки і методи випробувань [чинні від 2004-07-05]. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 2004.
12. Arkhipov V. A., Korotkikh A. G., Kuznetsov V. T. Ignition modes of heterogeneous systems containing nanopowders of metals. Pulsed and Continuous Detonation. Edited by G. Roy, S. Frolov, J. Sinibaldi. Moscow : TORUS PRESS Ltd., 2006. Pp. 84–90.
13. Jayaraman K., Anand K. V., Chakravarthy S. R., Sarathi R. Effect of nano-aluminium in plateauburning and catalyzed composite solid propellant combustion. *Combustion and Flame*. 2009. Vol. 156. Pp. 1662–1673.
14. Makoto Kohga, Kayoko Okamoto. Thermal decomposition behaviors and burning characteristics of ammonium nitrate /polytetrahydrofuran/ glycerin composite propellant. *Combustion and Flame*. 2011. Vol. 158. Pp. 573–582.
15. Gromov A. A., Pautova Yu. I., Korotkikh A. G. et al. Interaction of powdery Al, Zr and Ti with atmospheric nitrogen subsequent nitride formation under the metal powder combustion in air. *Powder Technology*. 2011. Vol. 214. Pp. 229–236.
16. Ohkura Yuma, Pratap M. Rao, Xiaolin Zheng. Flash ignition Al nanoparticles : mechanism and applications. *Combustion and Flame*. 2011. Vol. 158. Pp. 2544–2548.
17. Ващенко В. А., Антонюк В. С., Тимчик Г. С., Яценко И. В., Бондаренко М. О., Кириченко О. В., Рудь М. П. Основи теплоперенесення в елементах оптичного приладобудування : навч. посіб. Київ : НТУУ “КПР”, 2012. 412 с.
18. Ковалишин В. В., Марич В. М., Лозинський Р. Я. Проблеми гасіння магнію та його сплавів. *Пожежна безпека*. 2016. № 28. С. 58–63.
19. Ковалишин В. В., Марич В. М., Кирилів Я. Б. Дослідження хімічних речовин як складників вогнегасних порошків для гасіння легких металів. *Пожежна безпека*. 2016. № 29. С. 46–56.
20. Ковалишин В. В., Марич В. М. Проблеми гасіння магнію та його сплавів. *Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації : матер. Міжнар. наук.-практ. конф.* Львів : ЛДУ БЖД, 2016. С. 304–305.
21. Марич В. М., Ревуцький А. В., Гук Р. І. Забезпечення безпеки у виробництвах, де використовується магній та його сплави. *Пожежна та техногенна безпека. Теорія, практика, інновації : матер. Міжнар. наук.-практ. конф.* Львів : ЛДУ БЖД, 2016. С. 316–318.
22. Schlüsselmayr Ch. Druckgießerei in Flammen – Feuerwehr kämpft vier Tage gegen Magnesiumbrand. *Ch. Schlüsselmayr. Blaulicht*. 2016. № 3. Pp. 4–8.
23. Schmalfuß H. Magnesium erschwert Löscharbeiten an Pkw. *Feuerwehr-Magazin*. 2016. № 5. P. 8.
24. Tsapko Y., Guzii S., Remenets M., Kravchenko A., Tsapko O. Evaluation of effectiveness of wood fire protection upon exposure to flame of magnesium. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 4, № 10 (82). Pp. 31–33.

25. Kovalyshyn V. V., Marych V. M., Novitskiy Y. M., Gusar B. M., Chemetskiy V. V., Minis O. L. Improvement of a discharge nozzle damping attachment to oppress fires of class D. *Eastern-European Journal of Enterprise Technogies*. 2018. Vol. 5, № 5 (95). Pp. 68–76.
26. Ващенко В. А., Заїка П. І., Стащенко С. І., Яценко І. В. Основні властивості компонентів системи магній + нітрат натрію в умовах горіння : навч. посіб. Під ред. д. т. н., проф. В. А. Ващенко. Черкаси : ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля МВС України, 2003. 189 с.
27. Кириченко О. В., Цыбулин В. В., Яценко И. В., Ващенко В. А. Моделирование пожаровзрывоопасных режимов горения нитратных систем при применении пиротехнических изделий. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2008. № 4. С. 35–41.
28. Кириченко О. В. Определение участков на поверхности металлических корпусов пиротехнических изделий, подвергающихся разрушениям в условиях эксплуатации. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2008. № 1. С. 149–154.
29. Кириченко О. В. Моделирование предельных, неустойчивых режимов горения пиротехнических нитратных систем с учетом агломерации металлического горючего. *Науковий вісник УкрНДЦПБ*. 2008. № 1 (17). С. 78–86.
30. Ващенко В. А., Кириченко О. В., Акиншин В. Д., Цыбулин В. В., Яценко И. В. Комплекс испытательных установок, моделирующих реальные условия применения пиротехнических нитратосодержащих изделий. *Науковий вісник УкрНДЦПБ*. 2009. № 1 (19). С. 127–137.
31. Кириченко О. В., Заика П. И., Цыбулин В. В., Яценко И. В., Ващенко В. А. Влияние повышенных температур нагрева и внешних давлений на режимы горения пиротехнических нитратных систем. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2008. № 3. С. 172–176.
32. Кириченко О. В., Цыбулин В. В., Яценко И. В., Ващенко В. А. Моделирование пожаровзрывоопасных режимов горения нитратных систем при применении пиротехнических изделий. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2008. № 4. С. 35–41.
33. Кириченко О. В. Повышение эффективности пиротехнических нитратосодержащих изделий в условиях их применения. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2009. № 2. С. 89–94.
34. Кириченко О. В. Дослідження впливу температури нагріву та зовнішнього тиску на залежності швидкості горіння ПНС від співвідношення компонентів та концентраційні межі горіння. *Труди Одеського національного політехнічного університету*. 2010. Вып. 2 (6). С. 191–196.
35. Кириченко О. В., Акиншин В. Д., Ващенко В. А., Цыбулин В. В. Термодинамичні методи прогнозування пожежонебезпечних властивостей високометалізованих піротехнічних нітратно-металічних сумішей в умовах зовнішніх термовпливів. *Проблемы пожарной безопасности*. 2011. № 30. С. 104–106.
36. Кириченко О. В., Налева Г. В. Вплив температури нагріву на швидкість та вибухонебезпечні режими горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей. *Труди Одеського національного політехнічного університету*. 2012. Вып. 2 (39). С. 143–147.
37. Кириченко О. В. Створення бази даних по швидкостям та вибухонебезпечним режимам горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2012. № 3. С. 88–90.
38. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цыбулин В. В. Пожежонебезпечні термовпливи на поверхню металевих корпусів піротехнічних виробів в умовах пострілу та польоту. *Проблемы пожарной безопасности*. 2012. № 32. С. 98–112.
39. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цыбулин В. В., Тупицкий В. М. Экспериментально-статистичні моделі для отримання бази даних по швидкості та вибухонебезпечним режимам горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термовпливів. *Актуальні проблеми управління у сфері цивільного захисту : матер. І Всеукр. наук.-практ. конф.* Харків : Національний університет цивільного захисту України, 2012. С. 122–126.
40. Кириченко О. В. Математичне моделювання процесу нагріву металевих корпусів піротехнічних виробів в умовах пострілу та польоту. *Науковий вісник УкрНДЦПБ*. 2013. № 1 (27). С. 173–186.
41. Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цыбулин В. В., Тупицкий В. М. Швидкість та межі горіння піротехнічних нітратно-магнієвих сумішей в умовах зовнішніх термовпливів. *Проблемы пожарной безопасности*. 2013. № 34. С. 73–95.
42. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Тищенко Є. О. Визначення допустимих режимів нагріву піротехнічних сумішей при їх експлуатації. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2018. № 2. С. 5–11.
43. Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Кириченко О. В. Пожежна безпека піротехнічних виробів при відповідному впливі міцності зарядів піротехнічних сумішей. *Надзвичайні ситуації: безпека та захист : матер. ІХ Всеукр. наук.-практ. конф. з міжнар. уч.* Черкаси, 2019. С. 48–49.
44. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А., Колінько С. О., Цыбулин В. В. Дослідження впливу міцності зарядів піротехнічних нітратно-металевих сумішей на пожежну безпеку виробів на їх основі. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2019. № 3. С. 56–67.

45. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А., Колінько С. О., Бутенко Т. І., Цибулін В. В. Визначення критичних режимів розвитку процесів горіння піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2020. № 2. С. 123–133.

46. Козяр Н. М. Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на швидкість та вибухонебезпечні режими горіння піротехнічних нітратно-металізованих сумішей з добавками органічних речовин. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2023. № 2. С. 89–99.

47. Козяр Н. М. Визначення критичних значень параметрів зовнішніх термоударних впливів надзвукового потоку повітря на поверхню циліндричних металевих оболонок зарядів піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах їх застосування. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. Т. 7, № 1. С. 33–44.

48. Козяр Н. М. Запобігання передчасного пожежовибухонебезпечного спрацьовування піротехнічних сумішей в умовах пострілу та польоту. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2023. Т. 7, № 2. С. 133–151.

49. Козяр Н. М., Кириченко О. В., Ковбаса В. О., Кириченко Є. П., Ващенко В. А., Колінько С. О., Цибулін В. В. Закономірності впливу чинників на швидкість розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей на основі кисневмісних окиснювачів та металевих пальних. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2023. № 1. С. 72–81.

50. Козяр Н. М., Кириченко О. В., Ковбаса В. О., Дядюшенко О. О., Ващенко В. А., Колінько С. О. Визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних впливів на піротехнічні вироби на основі нітратно-металевих сумішей в умовах їх зберігання та транспортування. *Науковий вісник "Цивільний захист та пожежна безпека"*. 2023. № 2 (16). С. 42–56.

51. Козяр Н., Кириченко О., Ващенко В., Кириченко Є., Ковбаса В., Колінько С., Томенко М. Запобігання пожежовибухонебезпечним займанням піротехнічних металізованих сумішей з добавками неорганічних речовин. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2022. Т. 6, № 2. С. 15–26.

REFERENCES

1. Dyrynha X., Mayer P., Fechner D., Bolen Iy. and Kainer K. *Nastoyashcheye i budushcheye magniyevykh splavov v nashey tsivilizatsii* [The present and future of magnesium alloys in our civilization]. *Liteynoye proizvodstvo* [Foundry Production]. 2006., no. 1, pp. 4–7. (in Russian).

2. Vashchenko V.A., Kyrychenko O.V., Lega Yu.G., Zaika P.I., Yatsenko I.V. and Tsybulin V.V. *Protsessy gorennya metallizirovannykh kondensirovannykh sistem* [Combustion processes of metallized condensed systems]. Kyiv: Naukova dumka, 2008, 745 p. (in Russian).

3. Arkhipov V.A., Bondarcbluk S.S. and Korotkikh A.G. Nonstationary burning rate of solid propellants. *Nonequilibrium Phenomena : Plasma, Combustion, Atmosphere*. Edited by G.D. Roy, S.M. Frolov and A.M. Starik. Moscow : TORUS PRESS Publ., 2009, pp. 257–263.

4. Arkhipov V.A., Bondarchuk S.S. and Korotkikh A.G. Comparative analysis of methods for measuring the transient burning rate. II. Research results. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2010, vol. 46, no. 5, pp. 570–577.

5. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Lega Y.G. and Yatsenko I.V. *Osnovy pozhezhnoyi bezpeky pirotekhnichnykh nitratovmisnykh vyrobiv v umovakh zovnishnykh termovplyviv* [Fundamentals of fire safety of pyrotechnic nitrate-containing products under conditions of external thermal effects: monograph]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 2012, 318 p. (in Ukrainian).

6. Filzen M. Feuerwehr löscht Magnesium-Brand im Essener Hafen mit Sand. *Feuerwehr Essen. Pressemitteilung* (data access: 20.10.2015). (in German).

7. Filzen M. Feuer in Essener Hafenschiff, brennt gelagertes Aluminiumgranulat. *Feuerwehr Essen. Pressemitteilung* (dat access: 23.01.2016). (in German).

8. Arbeitskreis V. Evaluierung neuer Löschverfahren bei Metallbränden : Ständige Konferenz der Innenminister und Senatoren der Länder. Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung. Heyrothsberge, 2017. (in German).

9. Tepper F. and Kaledin L. Combustion characteristics of kerosene containing Alex nano-aluminum. *Unsteady Combustion and Interior Ballistics : Lectures of the 3rd International Workshop*. Saint Petersburg, 2000, pp. 320–325.

10. DSTU 4105-2002. *Vyrobny pirotekhnichni pobutovi. Zahal'ni vymohy bezpeky* [Household pyrotechnic products. General security requirements]. [Valid from 2022-06-12]. Official edition. Kyiv : State Standard of Ukraine, 2002. (State Standard of Ukraine). (in Ukrainian).

11. DSTU 4316-2004. *Vyrobny pirotekhnichni pobutovoho pryznachennya. Vymohy pozhezhnoyi bezpeky i metody vyprobuvan* [Household pyrotechnic products. Fire safety requirements and test methods]. [Valid from 2004-07-05]. Official edition. Kyiv : State Standard of Ukraine, 2004. (State Standard of Ukraine). (in Ukrainian).

12. Arkhipov V.A., Korotkikh A.G. and Kuznetsov V.T. Ignition modes of heterogeneous systems containing nanopowders of metals. *Pulsed and Continuous Detonation*. Edited by G. Roy, S. Frolov, J. Sinibaldi. Moscow : TORUS PRESS Ltd Publ., 2006, pp. 84–90.

13. Jayaraman K., Anand K.V., Chakravarthy S.R. and Sarathi R. Effect of nano-aluminium in plateaubuming and catalyzed composite solid propellant combustion. *Combustion and Flame*. 2009, vol. 156, pp. 1662–1673.
14. Makoto Kohga and Kayoko Okamoto. Thermal decomposition behaviors and burning characteristics of ammonium nitrate /polytetrahydrofuran/ glycerin composite propellant. *Combustion and Flame*. 2011, vol. 158, pp. 573–582.
15. Gromov A.A., Pautova Yu.I., Korotkikh A.G. et al. Interaction of powdery Al, Zr and Ti with atmospheric nitrogen subsequent nitride formation under the metal powder combustion in air. *Powder Technology*. 2011, vol. 214, pp. 229–236.
16. Ohkura Yuma, Pratap M. Rao and Xiaolin Zheng. Flash ignition Al nanoparticles : mechanism and applications. *Combustion and Flame*. 2011, vol. 158, pp. 2544–2548.
17. Vashchenko V.A., Antonyuk V.S., Tymchuk G.S., Yatsenko I.V., Bondarenko M.O., Kyrychenko O.V. and Rud M.P. *Osnovy teploperenesennya v elementakh optychnoho pryladobuduvannya* [Fundamentals of heat transfer in elements of optical instrumentation : tutorial]. Kyiv : NTUU “KPI”, 2012, 412 p. (in Ukrainian).
18. Kovalishyn V.V., Marych V.M. and Lozinsky R.Ya. *Problemy hasynnya mahniyu ta yoho splaviv. Pozhezhna bezpeka* [Problems of quenching magnesium and its alloys]. *Pozhezhna bezpeka* [Fire Security]. 2016, no. 28, pp. 58–63. (in Ukrainian).
19. Kovalishyn V.V., Marych V.M. and Kyryliv Ya.B. *Doslidzhennya khimichnykh rehovyn yak skladnykiv vohnehasnykh poroshkiv dlya hasynnya lehkykh metaliv* [Research of chemical substances as components of fire-extinguishing powders for extinguishing light metals]. *Pozhezhna bezpeka* [Fire Security]. 2016, no. 29, pp. 46–56. (in Ukrainian).
20. Kovalishyn V.V. and Marych V.M. *Problemy hasynnya mahniyu ta yoho splaviv*. [Problems of quenching magnesium and its alloys]. *Pozhezhna ta tekhnohenna bezpeka. Teoriya, praktyka, innovatsiyi : mater. Mizhmar. nauk.-prakt. konf.* [Fire and Technological Safety. Theory, practice, innovations : materials of the International scientific and practical conference]. Lviv : LSU BZD Publ., 2016, pp. 304–305. (in Ukrainian).
21. Marych V.M., Revutskyi A.V. and Huk R.I. *Zabezpechennya bezpeky u vyrobnytstvakh, de vykorystovuyet'sya mahniyu ta yoho splavy* [Ensuring safety in industries where magnesium and its alloys are used]. *Pozhezhna ta tekhnohenna bezpeka* [Fire and Technological Safety. Theory, practice, innovations : materials of the International scientific and practical conference]. Lviv : LSU BZD Publ., 2016, pp. 316–318. (in Ukrainian).
22. Schlüsslmayr Ch. Druckgießerei in Flammen – Feuerwehr kämpft vier Tage gegen Magnesiumbrand. *Ch. Schlüsslmayr. Blaulicht*. 2016, no. 3, pp. 4–8. (in German).
23. Schmalfuß H. Magnesium erschwert Löscharbeiten an Pkw. *Feuerwehr- Magazin*. 2016, no. 5, p. 8. (in German).
24. Tsapko Y., Guzii S., Remenets M., Kravchenko A. and Tsapko O. Evaluation of effectiveness of wood fire protection upon exposure to flame of magnesium. *Eastern-European Journal Enterprise Technologies*. 2016, vol. 4, no. 10 (82), pp. 31–33.
25. Kovalyshyn V.V., Marych V.M., Novitskyi Y.M., Gusar B.M., Chemetskiy V.V. and Minis O.L. Improvement of a discharge nozzle damping attachment to oppress fires of class D. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, vol. 5, no. 5 (95), pp. 68–76.
26. Vashchenko V.A., Zayka P.I., Stashenko S.I. and Yatsenko I.V. *Osnovni vlastyvoli komponentiv systemy mahniyu + nitrata natriyu v umovakh horinnya : navch. posib.* [The main properties of the components of the magnesium + sodium nitrate system under combustion conditions: academic : manual]. Under the editorship Ph.D., prof. V.A. Vashchenko. Cherkasy : CHIPB named after Heroes of Chernobyl Publ., Ministry of Internal Affairs of Ukraine, 2003, 189 p. (in Ukrainian).
27. Kyrychenko O.V., Tsybulin V.V., Yatsenko I.V. and Vashchenko V.A. *Modelirovaniye pozharovzryvoopasnykh rezhimov gorennya nitratsnykh sistem pri primenenii pirotekhnicheskikh izdeliy* [Modeling of fire and explosion hazardous combustion modes of nitrate systems when using pyrotechnic products]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of Cherkasy State Technological University]. 2008, no. 4, pp. 35–41. (in Russian).
28. Kyrychenko O.V. *Opreddeniye uchastkov na poverkhnosti metallicheskikh korpusov pirotekhnicheskikh izdeliy, podvergayushchikhsya razrusheniyam v usloviyakh ekspluatatsii* [Determination of areas on the surface of metal bodies of pyrotechnic products that are subject to destruction under operating conditions]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of Cherkasy State Technological University]. 2008, no. 1, pp. 149–154. (in Russian).
29. Kyrychenko O.V. *Modelirovaniye predel'nykh, neustoychivykh rezhimov gorennya pirotekhnicheskikh nitratsnykh sistem s uchetom aglomeratsii metallicheskogo goryuchego* [Modeling of limiting, unstable combustion modes of pyrotechnic nitrate systems taking into account the agglomeration of metal fuel]. *Naukovyy visnyk UkrNDIPB* [Scientific Bulletin of UkrNDIPB]. 2008, no. 1 (17), pp. 78–86. (in Russian).
30. Vashchenko V.A., Kyrychenko O.V., Akinshin V.D., Tsybulin V.V. and Yatsenko I.V. *Kompleks ispytatel'nykh ustanovok, modeliruyushchikh real'nyye usloviya primeneniya pirotekhnicheskikh nitratosoderzhashchikh*

izdeliy [A set of testing facilities that simulate real conditions for the use of pyrotechnic nitrate-containing products]. 2009, no. 1 (19), pp. 127–137. (in Russian).

31. Kyrychenko O.V., Zaika P.I., Tsybulin V.V., Yatsenko I.V. and Vashchenko V.A. *Vliyaniye povyshennykh temperatur nagreva i vneshnikh davleniy na rezhimy gorennya pirotekhnicheskikh nitratnykh sistem* [The influence of elevated heating temperatures and external pressures on the combustion modes of pyrotechnic nitrate systems]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of Cherkasy State Technological University]. 2008, no. 3, pp. 172–176. (in Russian).

32. Kyrychenko O.V., Tsybulin V.V., Yatsenko I.V. and Vashchenko V.A. *Modelirovaniye pozharovzryvoopasnykh rezhimov gorennya nitratnykh sistem pri primenenii pirotekhnicheskikh izdeliy* [Modeling of fire and explosion hazardous combustion modes of nitrate systems when using pyrotechnic products]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of Cherkasy State Technological University]. 2008, no. 4, pp. 35–41. (in Russian).

33. Kyrychenko O.V. *Povysheniye effektivnosti pirotekhnicheskikh nitratosoderzhashchikh izdeliy v usloviyakh ikh primeneniya* [Increasing the efficiency of pyrotechnic nitrate-containing products under the conditions of their use]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of Cherkasy State Technological University]. 2009, no. 2, pp. 89–94. (in Ukrainian).

34. Kyrychenko O.V. *Doslidzhennya vplyvu temperatury nahrivu ta zovnishn'oho tysku na zalezhnosti shvydkosti horinnya PNS vid spivvidnoshennya komponentiv ta kontsentratsiyni mezhi horinnya* [Study of the influence of heating temperature and external pressure on the dependence of the combustion speed of Polymer Nanocomposites on the ratio of components and concentration limits of combustion]. *Trudy Odesskogo natsional'nogo politekhnicheskogo universytetu* [Proceedings of the Odessa National Polytechnic University]. 2010, iss. 2 (6), pp. 191–196. (in Ukrainian).

35. Kyrychenko O.V., Akinshin V.D., Vashchenko V.A. and Tsybulin V.V. *Termodinamichni metody prohozuvannya pozhezhonebezpechnykh vlastyivostey vysokometalizovanykh pirotekhnichnykh nitratno-metalichnykh sumishey v umovakh zovnishnikh termovplyviv* [Thermodynamic methods of predicting the fire-hazardous properties of highly metallized pyrotechnic nitrate-metallic mixtures under conditions of external thermal influences]. *Problemy pozharnoy bezopasnosti* [Problems of Fire Safety]. 2011, no. 30, pp. 104–106. (in Ukrainian).

36. Kyrychenko O.V. and Naleva G.V. *Vplyv temperatury nahrivu na shvydkist' ta vybukhonebezpechni rezhimy horinnya pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishey* [Influence of the heating temperature on the speed and explosive modes of combustion of pyrotechnic nitrate-metal mixtures]. *Trudy Odesskogo natsional'nogo politekhnicheskogo universytetu* [Proceedings of the Odessa National Polytechnic University]. 2012, iss. 2 (39), pp. 143–147. (in Ukrainian).

37. Kyrychenko O.V. *Stvorenniya bazy danykh po shvydkostyam ta vybukhonebezpechnym rezhymam horinnya pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishey* [Creation of a database on velocities and explosive modes of combustion of pyrotechnic nitrate-metal mixtures]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2012, no. 3, pp. 88–90. (in Ukrainian).

38. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A. and Tsybulin V.V. *Pozhezhonebezpechni termovplyvy na poverkhnnyu metalevykh korpusiv pirotekhnichnykh vyrobiv v umovakh postrilu ta pol'otu* [Fire-hazardous thermal effects on the surface of metal casings of pyrotechnic products under conditions of shot and flight]. *Problemy pozharnoy bezopasnosti* [Problems of Fire Safety]. 2012, no. 32, pp. 98–112. (in Ukrainian).

39. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Tsybulin V.V. and Tupytskyi V.M. *Ekspyrymental'no-statystychni modeli dlya otrymannya bazy danykh po shvydkosti ta vybukhonebezpechnym rezhymam horinnya pirotekhnichnykh nitratno-metalevykh sumishey v umovakh zovnishnikh termovplyviv* [Experimental and statistical models for obtaining a database on the speed and explosive modes of combustion of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under conditions of external thermal influences]. *Aktual'ni problemy upravlinnya u sferi tsyvil'noho zakhystu : mater. I Vseukr. nauk.-prakt. konf.* [Actual Management Problems in the Field of Civil Protection : materials of the 1st All-Ukrainian scientific and practical conference]. Kharkiv : National University of Civil Defense of Ukraine, 2012, pp. 122–126. (in Ukrainian).

40. Kyrychenko O.V. *Matematychni modelyuvannya protsesu nahrivu metalevykh korpusiv pirotekhnichnykh vyrobiv v umovakh postrilu ta pol'otu* [Mathematical modeling of the process of heating metal bodies of pyrotechnic products under the conditions of a shot and flight]. *Naukovyy visnyk UkrNDIPB* [Scientific Bulletin of UkrNDICZ]. 2013, no. 1 (27), pp. 173–186. (in Ukrainian).

41. Kyrychenko O.V., Vashchenko V.A., Tsybulin V.V. and Tupytskyi V.M. *Shvydkist' ta mezhi horinnya pirotekhnichnykh nitratno-mahniyevykh sumishey v umovakh zovnishnikh termovplyviv* [Speed and limits of combustion of pyrotechnic nitrate-magnesium mixtures under conditions of external thermal influences]. *Problemy pozharnoy bezopasnosti* [Problems of Fire Safety]. 2013, no. 34, pp. 73–95. (in Ukrainian).

42. Kyrychenko O.V., Dibrova O.S., Motrichuk R.B. and Tyshchenko E.O. *Vyznachennya dopustymykh rezhymiv nahrivu pirotekhnichnykh sumishey pry yikh ekspluatatsiyi* [Determination of permissible modes of heating of pyrotechnic mixtures during their operation]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2018, no. 2, pp. 5–11. (in Ukrainian).

43. Dibrova O.S., Motrichuk R.B. and Kyrychenko O.V. *Pozhezhna nebezpeka pirotekhnichnykh vyrobiv pry vidpovidnomu vplyvi mitsnosti zaryadiv pirotekhnichnykh sumishey* [Fire hazard of pyrotechnic products under the

corresponding influence of strength of charges of pyrotechnic mixtures]. *Nadzvychny sytuatsiyi: bezpeka ta zakhyst : mater. IX Vseukr. nauk.-prakt. konf. z mizhnar. uch.* [Emergency Situations : Security and Protection : materials of the IX All-Ukrainian scientific and practical conference with international participation]. Cherkasy, 2019, pp. 48–49. (in Ukrainian).

44. Kyrychenko O.V., Dibrova O.S., Motrichuk R.B., Vashchenko V.A., Kolinko S.O. and Tsybulin V.V. *Doslidzhennya vplyvu mitsnosti zaryadiv pirotekhnichnykh nitrato-metalevykh sumishey na pozhezhnu bezpeku vyrobiv na yikh osnovi* [Study of the impact of the strength of charges of pyrotechnic nitrate-metal mixtures on the fire safety of products on their basis]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2019, no. 3, pp. 56–67. (in Ukrainian).

45. Kyrychenko O.V., Dibrova O.S., Motrichuk R.B., Vashchenko V.A., Kolinko S.O., Butenko T.I. and Tsybulin V.V. *Vyznachennya krytychnykh rezhymiv rozvytku protsesiv horinnya pirotekhnichnykh nitrato-metalevykh sumishey v umovakh zovnishnikh termichnykh diy* [Determination of critical modes of development of pyrotechnic combustion processes of nitrate-metal mixtures under conditions of external thermal effects]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2020, no. 2, pp. 123–133. (in Ukrainian).

46. Kozyar N.M. *Zakonomirnosti vplyvu tekhnolohichnykh parametriv ta zovnishnikh chynnykiv na shvydkist' ta vybukhonebezpechni rezhymy horinnya pirotekhnichnykh nitrato-metalizovanykh sumishey z dobavkamy orhanichnykh rehovyn* [Patterns of influence of technological parameters and external factors on the speed and explosive modes of combustion of pyrotechnic nitrate-metalized mixtures with additives of organic substances]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2023, no. 2, pp. 89–99. (in Ukrainian).

47. Kozyar N.M. *Vyznachennya krytychnykh znachen' parametriv zovnishnikh termoudarnykh vplyviv nadzvukovoho potoku povitrya na poverkhnuyu tsylindrychnykh metalevykh obolonok zaryadiv pirotekhnichnykh nitrato-metalevykh sumishey v umovakh yikh zastosuvannya.* [Determination of critical values of parameters of external thermal shock effects of supersonic air flow on the surface of cylindrical metal shells of charges of pyrotechnic nitrate-metal mixtures under the conditions of their use]. *Nadzvychny sytuatsiyi : poperedzhennya ta likvidatsiya* [Emergency Situations : Prevention and Elimination]. 2023, vol. 7, no. 1, pp. 33–44. (in Ukrainian).

48. Kozyar N.M. *Zapobihannya peredchasnoho pozhezhovybukhonebezpechnoho sprats'ovuvannya pirotekhnichnykh sumishey v umovakh postrilu ta pol'otu.* *Nadzvychny sytuatsiyi: poperedzhennya ta likvidatsiya* [Prevention of premature fire-explosive triggering of pyrotechnic mixtures under conditions of shot and flight]. *Nadzvychny sytuatsiyi : poperedzhennya ta likvidatsiya* [Emergency Situations : Prevention and Elimination]. 2023, vol. 7, no. 2, pp. 133–151. (in Ukrainian).

49. Kozyar N.M., Kyrychenko O.V., Kovbasa V.O., Kyrychenko E.P., Vashchenko V.A., Kolinko S.O. and Tsybulin V.V. *Zakonomirnosti vplyvu chynnykiv na shvydkist' rozvytku protsesu horinnya pirotekhnichnykh sumishey na osnovi kysnevnisnykh oksyenyuvachiv ta metalevykh pal'nykh* [Patterns of influence of factors on the speed of process development combustion of pyrotechnic mixtures based on oxygen-containing oxidizers and metal fuels]. *Visnyk Cherkas'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu* [Bulletin of the Cherkasy State Technological University]. 2023, no. 1, pp. 72–81. (in Ukrainian).

50. Kozyar N.M., Kyrychenko O.V., Kovbasa V.O., Dyadyushenko O.O., Vashchenko B.A. and Kolinko S.O. *Vyznachennya krytychnykh znachen' parametriv zovnishnikh termichnykh vplyviv na pirotekhnichni vyroby na osnovi nitrato-metalevykh sumishey v umovakh yikh zberihannya ta transportuvannya* [Determination of critical values of parameters of external thermal effects on pyrotechnic products based on nitrate-metal mixtures in the conditions of their storage and transportation]. *Naukovyy visnyk "Tsyvil'nyy zakhyst ta pozhezhna bezpeka"* [Scientific Bulletin "Civil Defense and Fire Safety"]. 2023, no. 2 (16), pp. 42–56. (in Ukrainian).

51. Kozyar N., Kyrychenko O., Vashchenko V., Kyrychenko E., Kovbasa V., Kolinko C. and Tomenko M. *Zapobihannya pozhezhovybukhonebezpechnym zaymannyam pirotekhnichnykh metalizovanykh sumishey z dobavkamy neorhanichnykh rehovyn* [Prevention of fire-explosive ignition of pyrotechnic metalized mixtures with additives of inorganic substances]. *Nadzvychny sytuatsiyi : poperedzhennya ta likvidatsiya* [Emergency Situations : Prevention and Elimination]. 2022, vol. 6, no. 2, pp. 15–26. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 11.04.2024.

УДК 621.357.7

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.89.1077

СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРОПОКРИТТІВ СПЛАВОМ Ni–P ІЗ ПІДВИЩЕНОЮ КОРОЗІЙНОЮ СТІЙКІСТЮ

КОРОЛЯНЧУК Д. Г.^{1*}, *н. с., ст. викл.*,
ОВЧАРЕНКО В. І.², *канд. техн. наук, доц.*,
ГІРІН О. Б.³, *докт. техн. наук, проф.*

^{1*} Кафедра матеріалознавства, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Науки, 8, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 753-58-29, e-mail: kafmat@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-5530-080X

² Кафедра матеріалознавства, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Науки, 8, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 753-58-29, e-mail: kafmat@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-5343-7554

³ Кафедра матеріалознавства, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет», пр. Науки, 8, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 753-58-29, e-mail: girin@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-7712-2290

Анотація. *Вступ.* Основні фактори, що знижують захисні властивості електрокристалізованих покриттів, – це утворення об'ємних дефектів – пор, а також виникнення мікрогальванічних пар на межах зерен, тобто на поверхневих дефектах кристалічної будови. Створення в електропокриттях безпористої структури, уникнення формування в шарах металу/сплаву поверхневих дефектів, а також можливість заміни хромових покриттів, що одержуються з токсичних електролітів, постає актуальним завданням. *Матеріали та методика.* Запропоновано використовувати як захисні шари на виробках, що підвищують корозійну стійкість, електропокриття сплавом Ni–P. Проведено рентгенографічне визначення фазового складу електрохімічних осадів Ni–P. Досліджено морфологію поверхні та корозійну стійкість покриттів. *Результати.* Досліджено зразки електрохімічних покриттів чистим нікелем та сплавом нікель – фосфор. Установлено, що у процесі формування покриттів нікелем із додаванням іонів фосфору морфологія поверхні практично не має пор, відбувається аморфізація осадів, за рахунок чого поліпшуються захисні властивості, а саме – корозійна стійкість. *Наукова новизна.* Встановлено фактори, які впливають на підвищення корозійної стійкості покриттів, – відсутність пористої структури та формування аморфного стану. *Висновки.* Вивчено вплив факторів на структуру та властивості електрохімічних покриттів сплавом нікель – фосфор. Установлено, що додавання в електроліт нікелювання іонів фосфору сприяє формуванню аморфної структури у покриттях, при цьому утворюються шари сплаву Ni–P практично без наявності пор. Вивчено ефект підвищення корозійної стійкості електрохімічного покриття сплавом нікель – фосфор (на 30 %), за рахунок формування аморфної структури затверділої металеві рідини із запобіганням процесу кристалізації під час електрохімічного осадження.

Ключові слова: електропокриття; сплав; аморфна структура; пористість; корозійна стійкість

STRUCTURE FORMATION OF Ni–P ALLOY ELECTROCOATINGS WITH INCREASED CORROSION RESISTANCE

KOROLYANCHUK D.G.^{1*}, *Res. Ass., Senior Lecturer*,
OVCHARENKO V.I.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
GIRIN O.B.³, *Dr Sc. (Tech.), Prof.*

^{1*} Department of Materials Science, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Ukrainian State University of Chemical Technology”, 8, Nauky Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 753-58-29, e-mail: kafmat@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-5530-080X

² Department of Materials Science, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Ukrainian State University of Chemical Technology”, 8, Nauky Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 753-58-29, e-mail: kafmat@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-5343-7554

³ Department of Materials Science, ESI “Ukrainian State University of Chemical Technology”, 8, Nauky Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 753-58-29, e-mail: girin@ua.fm, ORCID ID: 0000-0001-7712-2290

Abstract. *Purpose of research.* The main factors that reduce the protective properties of electrocrystallized coatings are the formation of volumetric defects – pores, as well as the occurrence of microgalvanic couples at grain

boundaries, that is, on surface defects of the crystalline structure. Creating a non-porous structure in electrocoatings, eliminating the formation of surface defects in metal/alloy layers, as well as the possibility of replacing chromium coatings, which are obtained from toxic electrolytes, are urgent tasks. **Materials and methodology.** In the work, it was proposed to use electrocoatings with Ni–P alloy as protective layers on products that increase corrosion resistance. An X-ray determination of the phase composition of Ni–P electrochemical deposits was carried out. The surface morphology and corrosion resistance of coatings were studied. **Results.** Samples of electrochemical coatings of pure nickel and nickel-phosphorus alloy were studied. It has been established that during the formation of nickel coatings with the addition of phosphorus ions, the surface morphology has practically no pores, amorphization of deposits occurs, due to which the protective properties, namely, corrosion resistance, are improved. **Scientific novelty.** Factors have been identified that influence the increase in corrosion resistance of coatings – the absence of a porous structure and the formation of an amorphous state. **Conclusions.** The influence on the structure and properties of electrochemical coatings of a nickel-phosphorus alloy has been studied. It has been established that the addition of phosphorus ions to the nickel plating electrolyte leads to the formation of an amorphous structure in the coatings, and layers of the Ni–P alloy appear practically without the presence of pores. It has been established that the effect of increasing the corrosion resistance of the electrochemical coating with a nickel-phosphorus alloy (by 30 %) is due to the formation of an amorphous structure of the solidifying metal liquid while preventing the crystallization process during electrochemical deposition.

Keywords: *electrocoating; alloy; amorphous structure; porosity; corrosion resistance*

Вступ. Електрохімічне осадження (або електроосадження) металів та сплавів – одна з основних технологій отримання функціональних покриттів для захисту виробів, що працюють в агресивних середовищах в різних галузях промисловості: машинобудуванні, енергетиці, оборонній та ракетно-космічній галузі. Найбільш поширеними захисними покриттями стали хромові осади, а також покриття на основі сплавів інших металів підгрупи заліза, а саме: нікель-кобальтові, нікель-фосфорні та кобальт-вуглецеві [1].

Основними факторами, що знижують захисні властивості електрокристалізованих покриттів, виступають утворення об'ємних дефектів – пор, а також виникнення мікрогальванічних пар на межах зерен, тобто на поверхневих дефектах кристалічної будови.

Створення в електропокриттях безпористої структури, уникнення формування в шарах металу/сплаву поверхневих дефектів кристалічної будови, а також можливість заміни хромових покриттів, що одержуються з токсичних електролітів, стало актуальним завданням. Наприклад, у покриттях хрому, що наносяться на медичні інструменти, через наявність пор можливе існування бактерій та вірусів, які не гинуть під час стерилізації [2].

Останнім часом, з метою відмови від високотоксичних електролітів хромування, все частіше в техніці використовуються електропокриття сплавом Ni–P. Легування нікелю фосфором, крім поліпшення механічних властивостей, магнітних характеристик і зносостійкості, сприяє підвищенню корозійної стійкості [3; 4].

Мета роботи. Із застосуванням концепції електрохімічного фазоутворення металів та сплавів через стадію переохолодженого рідкого стану [5; 6] отримати електропокриття сплавом Ni–P з аморфною структурою, що забезпечить підвищену корозійну стійкість.

Враховуючи, що електрохімічне фазоутворення сплаву відбувається через стадію переохолодженого рідкого стану, слід запобігти процесу кристалізації металеві рідини, що твердіє, легуванням неметалом за надшвидкого затвердіння та одержати сплав з аморфною структурою. При цьому утворення аморфної структури в процесі електроосадження сплаву відбуватиметься за рахунок пригнічення зародкоутворення кристалічної фази внаслідок входження до атомних кластерів металу, що твердіє, атомів неметалу.

Матеріали та методи досліджень. Електрохімічні покриття сплавом Ni–P отримували із розробленого нами електроліту [7] такого складу, г/л: сульфатат нікелю 250–300, хлорид нікелю

25–30, борна кислота 20–30, ортофосфорна кислота 40–55, гіпофосфіт натрію 5–10, сахарин 0,5–1,5. Основним постачальником іонів фосфору до зростаючого осаду сплаву Ni–P був гіпофосфіт натрію.

Електроосадження проводили у гальваностатичному режимі в температурному інтервалі 20–80 °С, катодна густина струму перебувала в межах 5–20 А/дм². Нанесення покриттів здійснювалося за стабільної температури у термостаті ВБ-4.

Для дослідження фазового складу одержаних осадів використовували автоматизований та комп'ютеризований рентгенівський дифрактометр ДРОН-2, для вивчення морфології поверхні – растровий електронний мікроскоп РЕМ-106И. Корозійну стійкість визначали потенціостатичними методами за величиною корозійного струму. Як корозійноактивного середовища застосовували 3 % розчин хлориду натрію.

Зразки покриттів чистого нікелю та сплаву нікель–фосфор одержували одночасно у двох послідовно підключених комірках. Для осадження чистого нікелевого покриття використовували електроліт такого складу, г/л: сульфат нікелю 250–300, хлорид нікелю 25–30, борна кислота 20–30, ортофосфорна кислота 40–55, сахарин 0,5–1,5.

Результати та обговорення. у результаті виконаних рентгеноструктурних досліджень виявили, що нікель, електрокристалізований в електроліті без додавання гіпофосфіту натрію, має кристалічну структуру з гранецентрованою кубічною (ГЦК) ґраткою. Так, на рисунку 1, а чітко видно, що дифракційні максимуми (111), (200), (220), (311) та (222) нікелю, отриманого в електроліті без додавання іонів фосфору, відповідають кристалічній фазі з ГЦК ґраткою.

Додавання ж в електроліт іонів фосфору викликає аморфізацію нікелевих сплавів у процесі їх електроосадження. Так, дифрактограма, наведена на рисунку 1, б, характеризується наявністю гало під кутами 2θ , близькими до 45°, що свідчить про

виникнення в сплавах аморфної структури. При цьому аморфізація структури відбувається в досить широкому температурному інтервалі (від 50 до 80 °С), що відповідає масовій концентрації фосфору від 6,1 до 6,4 %.

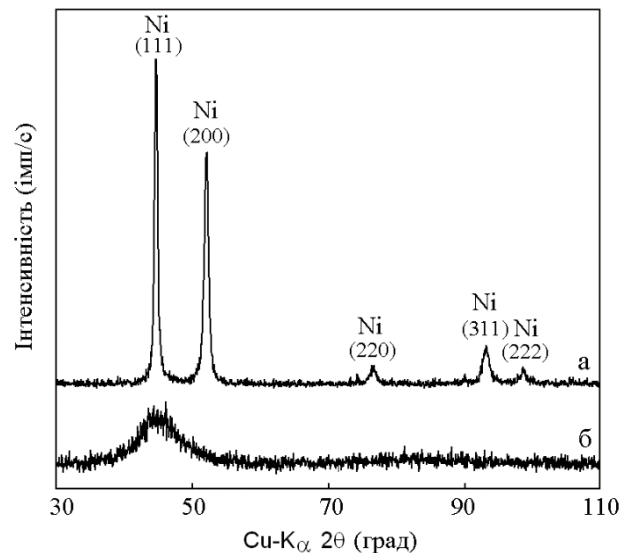


Рис. 1. Дифрактограми покриттів нікелем (а) та сплавом нікель – фосфор (б), одержаних за температури електроліту 50 °С та густини струму 10 А/дм²

Як свідчать дані електронно-мікроскопічного аналізу одержаних зразків, поверхня нікелевих сплавів з аморфною структурою характеризується більш згладженим рельєфом порівнянно з поверхнею нікелю, який має кристалічну структуру (рис. 2). Крім того, аморфні нікелеві покриття мають значно менше пор порівняно з кристалічними нікелевими покриттями.

Одержані експериментальні результати цілком узгоджуються з даними роботи [8], виконаної нами раніше, в якій цілеспрямовано одержували електроосаджені метали/сплави у вигляді фаз з аморфною структурою затверділої металеві рідини із запобіганням процесу кристалізації.

Дослідження швидкості корозії отриманих покриттів у взаємозв'язку з їх структурою (рис. 3) дозволило виявити ефект підвищення корозійної стійкості покриттів за рахунок формування в них аморфної структури. При цьому корозійна стійкість покриття аморфним сплавом Ni–P

зростає на 30 % порівняно з аналогічним

показником чистого нікелевого покриття.

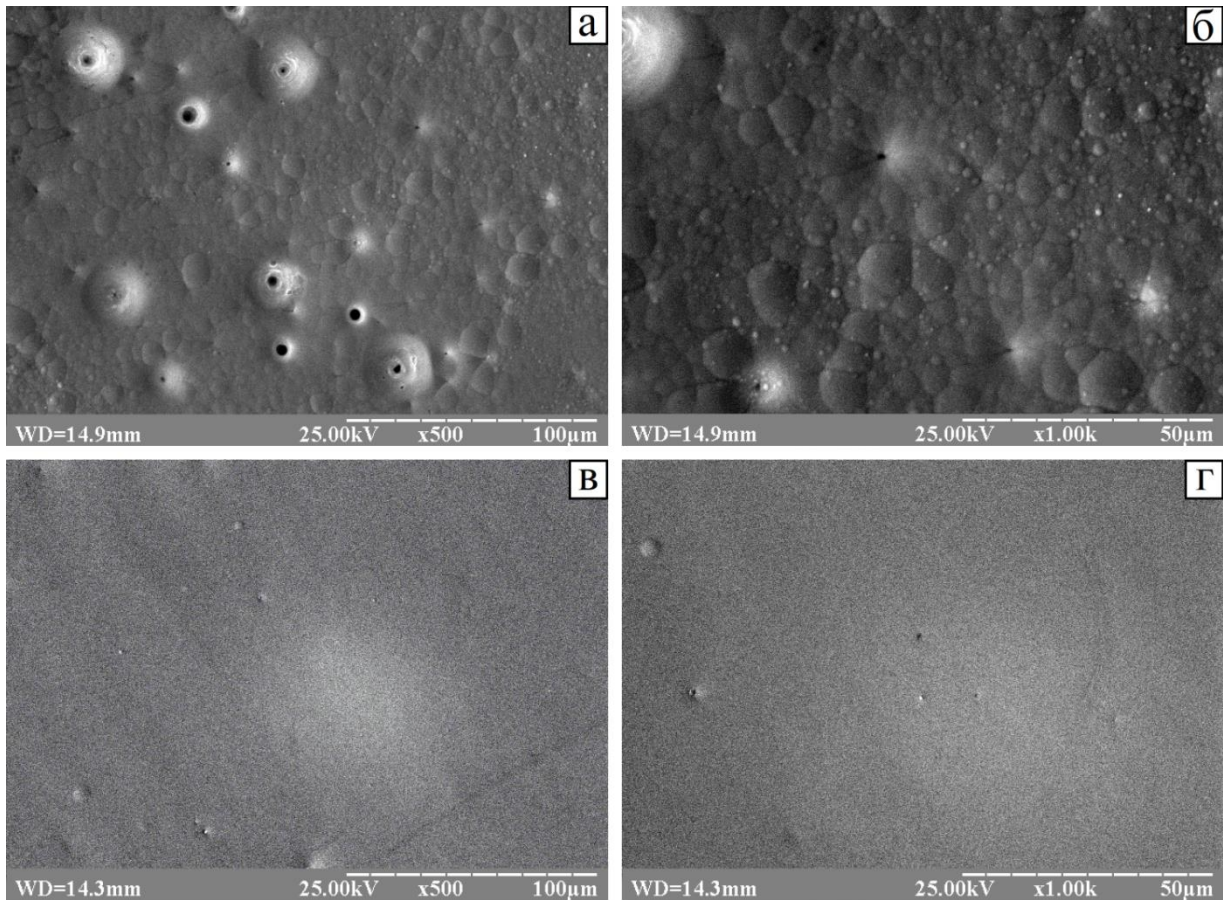


Рис. 2. Електронномікроскопічне зображення морфології поверхні нікелевих покриттів (а, б) та покриттів сплавом Ni-P (в, г), одержаних за температур електроліту 20 °C (а, б), 60 °C (в, г), і густини струму 15 A/дм², (а, в – ×500, б, г – ×1000)

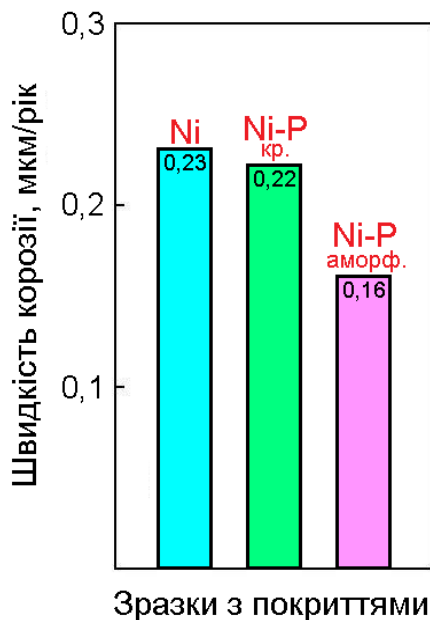


Рис. 3. Швидкість корозії нікелевих покриттів із різною структурою

Формування аморфної структури в нікелевих сплавах, легованих фосфором, під

час їх електроосадження можна пояснити на основі концепції електрохімічного фазоутворення металів та сплавів через стадію переохолодженого рідкого стану.

Справді, якщо прийняти, що фазоутворення електроосаджуваних сплавів відбувається шляхом виникнення переохолодженої рідкої фази і подальшого її затвердіння, то входження до кластерів атомів металу, що перебувають у рідкому стані, атомів неметалу, що значно відрізняються від них за розміром, будуть пригнічувати зародкоутворення під час формування кристалічної структури. І в результаті такого запобігання процесу кристалізації металевій рідині, що твердіє, за надшвидкого електрохімічного утворення атомів сформується аморфна структура, яка не матиме дальнього порядку в розташуванні атомів.

Отже, цілеспрямоване одержання аморфної структури в нікелевих електропокриттях шляхом легування їх фосфором для пригнічення зародкоутворення під час електроосадження – це один із перспективних напрямків одержання покриттів із підвищеною корозійною стійкістю.

Висновки

1. Вивчено вплив факторів на структуру та властивості електрохімічних покриттів сплавом нікель – фосфор. Установлено, що

додавання в електроліт нікелювання іонів фосфору викликає формування аморфної структури у покриттях, при цьому утворюються шари сплаву Ni–P практично без наявності пор.

2. Установлено ефект підвищення корозійної стійкості електрохімічного покриття сплавом нікель – фосфор (на 30 %) за рахунок формування аморфної структури затверділої металевої рідини із запобіганням процесу кристалізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Антропов Л. И. Теоретическая электрохимия : учеб., 4-е изд., испр. и перераб. Москва : Высшая школа, 1984. 519 с.
2. Agarwala R. C., Agarwala V. Electroless Alloy/Composite Coatings : a review. *Sadhana*. 2003. Vol. 28, p. 3&4. Pp. 475–493.
3. Lekmine F., Ben Temam H., Naoun M., Hadjadj M. Mechanical Characterization of Electrodeposition of Ni–P Alloy Coating. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2020. Vol. 12, № 1. Pp. 01001–01005.
4. Короляничук Д. Г., Овчаренко В. І. Структура та фізико-механічні властивості електрокристалізованих покриттів сплавом Ni–P. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2022. № 4 (99). С. 40–46.
5. Girin O. B. Electrochemical Phase Formation via a Supercooled Liquid State Stage : Phenomenon Description and Applications. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2024. Vol. 28, № 5. Pp. 1427–1461.
6. Girin O. B. Review – Electrochemical Phase Formation via a Supercooled Liquid State Stage : Metastable Structures and Intermediate Phases. *Journal of The Electrochemical Society*. 2022. Vol. 169, № 9. Pp. 092511.
7. Короляничук Д. Г., Овчаренко В. І., Коломієць О. В., Гірін О. Б. Патент України на корисну модель № 141090 МПК C25D 3/12. Україна. Електроліт для електроосадження Ni–P покриттів; заявник та патентовласник : ДВНЗ «Укр. держ. хім.-технол. ун-т», опубл. 25.03.2020. Бюл. № 6. 2 с.
8. Girin O. B. Electrochemical Amorphous Phase Formation in Metals. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2019. Vol. 54, № 2. Pp. 391–396.

REFERENCES

1. Antropov L.I. *Teoreticheskaya elektrokimiya : ucheb., 4-ye izd., ispr. i pererab* [Theoretical electrochemistry : textbook, 4th ed., rev. and rework]. Moscow : Vysshaya Shkola Publ., 1984, 519 p. (in Russian).
2. Agarwala R.C. and Agarwala V. Electroless Alloy/Composite Coatings : a review. *Sadhana*. 2003, vol. 28, parts 3&4, pp. 475–493.
3. Lekmine F., Ben Temam H., Naoun M. and Hadjadj M. Mechanical Characterization of Electrodeposition of Ni–P Alloy Coating. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2020, vol. 12, no. 1, pp. 01001–01005.
4. Korolianchuk D.H. and Ovcharenko V.I. *Struktura ta fizyko-mekhanichni vlastyvoli elektrokrystalizovanykh pokryttiv splavom Ni–P* [Structure and physical and mechanical properties of electrocrystallized Ni–P alloy coatings]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2022, no. 4 (99), pp. 40–46. (in Ukrainian).
5. Girin O.B. Electrochemical Phase Formation via a Supercooled Liquid State Stage : Phenomenon Description and Applications. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2024, vol. 28, no. 5, pp. 1427–1461.
6. Girin O.B. Review – Electrochemical Phase Formation via a Supercooled Liquid State Stage : Metastable Structures and Intermediate Phases. *Journal of The Electrochemical Society*. 2022, vol. 169, no. 9, pp. 092511.
7. Korolianchuk D.H., Ovcharenko V.I., Kolomiiets O.V. and Hirin O.B. *Patent Ukrainy na korysnu model № 141090 MPK S25D 3/12. Ukraina. Elektrolit dlia elektroosadzhenia Ni–P pokryttiv; zaiavnyk ta patentovlasnyk DVNZ “Ukr. derzh. khim.-tekhno. un-t”, opubl. 25.03.2020, biul. № 6* [Patent of Ukraine for a utility model no. 141090 IPC C25D 3/12. Ukraine. Electrolyte for electrodeposition of Ni–P coatings; the applicant and patent holder of the SHEI “Ukrainian State Chemical and Technological University”, publ. 25.03.2020, biul. no. 6]. 2 p. (in Ukrainian).
8. Girin O.B. Electrochemical Amorphous Phase Formation in Metals. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 2019, vol. 54, no. 2, pp. 391–396.

Надійшла до редакції: 12.04.2024.

УДК 669.017:519.21

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.94.1078

ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНОСТІ ЗАЛЕЖНО ВІД ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ В СПЛАВІ 40КХНМ

ПОПОВА К. В., *бакалавр*

Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 409-89-05, e-mail: 21447.popova@365.pdaba.edu.ua

Анотація. Вступ. Дослідження присвячене аналізу впливу хімічного складу сплаву 40КХНМ на його твердість. Механічні іспити вимагають значних матеріально-часових витрат. Для оперативного оцінення критеріїв якості металів у роботі запропоновано застосувати математичне моделювання. **Матеріали та методика.** Досліджено вплив хімічного складу на твердість у сплаві 40КХНМ, який відповідає вимогам державного стандарту 51397. **Результати експерименту.** У ході досліджень виявлено, що зміни хімічного складу сплаву 40КХНМ значно впливають на його механічні властивості, включаючи твердість і стійкість до ударних навантажень. Збільшення вмісту вуглецю, молібдену та хрому у сплаві сприяє підвищенню його твердості. Це з формуванням більш міцних карбідних і молібденових фаз у структурі сплаву, що поліпшує його механічні властивості. Підвищена твердість робить сплав більш стійким до зношування та підвищує його довговічність в умовах експлуатації. Збільшення вмісту нікелю у сплаві посилює його стійкість до ударних навантажень. Це зумовлено збільшенням пластичності та ударної в'язкості сплаву за підвищеного вмісту нікелю. Більш висока стійкість до ударних навантажень робить сплав придатним для застосування в умовах, що вимагають високої стійкості до ударів, наприклад, у виробництві частин машин і обладнання. Побудовано математичну модель залежності міцності сплаву від процентного вмісту компонентів хімічного складу, що дозволяє керувати показниками міцності сплаву в процесі його виготовлення. **Висновки.** Результати досліджень підтверджують, що зміни у хімічному складі сплаву 40КХНМ суттєво впливають на його механічні властивості. В результаті проведених експериментів встановлено, що хімічний склад металу значно впливає на твердість матеріалу. Шляхом зміни складу металу вдалося досягти значного підвищення твердості до рівнів, що відповідають вимогам стандартів якості. Ці результати – важливий крок до оптимізації процесів виробництва та поліпшенню властивостей кінцевої продукції зі сплаву 40КХНМ.

Ключові слова: сплав 40КХНМ; хімічний склад; твердість; пластичність; ударна в'язкість

PREDICTION OF STRENGTH DEPENDING ON THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION IN THE 40KXHM ALLOY

POPOVA K.V., *bachelor*

Department of Materials Science and Treatment of Materials, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (066) 409-89-05, e-mail: 21447.popova@365.pdaba.edu.ua

Abstract. Introduction. The study is devoted to the analysis of the influence of the chemical composition of the 40KXHM alloy on its hardness. The relevance of the work lies in the fact that mechanical tests require significant material and time costs. For the operational assessment of metal quality criteria, it is proposed to apply mathematical modeling in the work. **Materials and methods.** A study of the effect of the chemical composition on the hardness of the 40KXHM alloy, which meets the requirements of the state standard 51397, was carried out. **The results of the experiment.** In the course of research, it was found that changes in the chemical composition of the 40KXHM alloy significantly affect its mechanical properties, including hardness and resistance to shock loads. An increase in the content of carbon, molybdenum and chromium in the alloy leads to an increase in its hardness. This is with the formation of stronger carbide and molybdenum phases in the structure of the alloy, which leads to an improvement in its mechanical properties. Increased hardness makes the alloy more resistant to wear and increases its durability in operating conditions. An increase in the nickel content in the alloy leads to an increase in its resistance to shock loads. This is caused by an increase in plasticity and impact toughness of the alloy with an increased nickel content. Higher resistance to shock loads makes the alloy suitable for use in conditions that require high resistance to shocks, for example, in the production of machine parts and equipment. A mathematical model of the dependence of the strength of

the alloy on the percentage content of the components of the chemical composition was built, which allows to control the indicators of the strength of the alloy in the process of its manufacture. **Conclusions.** The research results confirm that changes in the chemical composition of the 40KXHM alloy have a significant impact on its mechanical properties. As a result of the experiments, it was established that the chemical composition of the metal significantly affects the hardness of the material. By changing the composition of the metal, it was possible to achieve a significant increase in hardness to levels that meet the requirements of quality standards. These results are an important step in optimizing the production processes and improving the properties of the final products from the 40KXHM alloy.

Keywords: alloy 40KXHM; chemical composition; hardness; plasticity; impact toughness

Вступ. Прецизійні сплави – спеціальні матеріали, які мають певні фізичні та фізико-механічні характеристики. Ці властивості залежать від точного хімічного складу, ступеня чистоти сплаву від включень та небажаних домішок, структури матеріалу, а також високої точності процесу виготовлення [1].

Сплав на основі системи Co–Cr–Ni (40KXHM) відносять до деформаційно твердіючих сплавів. Деформаційно твердіючі сплави мають високі пружні та характеристики міцності, втомної міцності, твердості, опору зносу, немагнітності і корозійної стійкості в різних середовищах. Високих характеристик міцності та пружності сплав набуває після гартування на γ -твердий розчин із наступною холодною деформацією (близько 30 %) та старінням [2].

Сплав 40KXHM має високий опір до малих пластичних деформацій та релаксаційної стійкості в умовах статичного та циклічного навантаження. Він призначений для виготовлення заводних пружин пружинних двигунів та наручних годинників, кручених циліндричних пружин, кернів електровимірювальних приладів, хірургічних деталей, а також розтяжок та торсіонів [3].

Найбільш поширені матеріали, що застосовуються в металевих імплантатах, – це нержавіюча сталь (відповідна ASTM F138) [4], кобальт-хром-молібденові сплави

(ASTM F75 та F799) [5; 6] та титанові сплави. Кожен з них має свої переваги та недоліки (Cramer, 2003; Hermawan, 2011; Kunčická, 2017) [7–9]. Сплави Co–Cr–Mo, що не містять нікелю, широко застосовуються для виготовлення медичних виробів завдяки високій міцності, зносостійкості та біосумісності. Ці матеріали ідеальні для ортопедичних і зубних імплантатів, таких як тазостегнові та колінні протези, а також зубні імплантати (Disegi, 1999; Manama, 2017; Niinomi, 2012; Buford, 2004; Liao, 2012) [10–14].

Важливо, щоб ці матеріали задовольняли всім вимогам біосумісності, забезпечуючи високі механічні властивості, стійкість до втоми, зношування та корозії, забезпечуючи тривалий термін служби.

Матеріали та методика. До категорії цього сплаву пред'являються вимоги за спектром властивостей: високий чи, навпаки, низький модуль пружності, незначний температурний коефіцієнт модуля пружності або частоти, відносно малий пружний гістерезис і пружна післядія, висока втомна міцність, корозійна стійкість, немагнітність, електропровідність. Зменшення цих показників проводиться шляхом зміни температур експлуатації.

У таблиці 1 наведено хімічний склад, який включає дані про вміст у сплаві різних елементів.

Таблиця 1

Хімічний склад сплаву 40KXHM в %

C	S	P	Mn	Cr	Ni	Fe	Mo	Co	Si
≤0,15	≤0,015	≤0,015	1–2,5	18,5–21,5	14,0–18,0	Залишок	6,5–8,0	39,0–42,0	1,0

Сплави повинні бути виконані із застосуванням спеціальних методів, таких як виплавка (вакуумно-індукційна), переплавка (вакуумно-дугова, електрошлакова) або їх комбінація. Метод виплавки та переплаву визначає виробник. На запит споживача виробник вказує метод виплавки у документі якості. Сплави, отримані спеціальними методами, можуть бути позначені через тире в копії найменування марки літерами: *ВІ* – вакуумно-індукційна виплавка; *ВД* – вакуумно-дугове переплавлення; *ЕШ* – електрошлакова переплавка.

Механічні властивості металопродукції в стані поставки повинні відповідати нормам. Щодо якості поверхні, термооброблена або напівзагартована стрічка повинна відповідати вимогам Держстандарту 14117, а напівзагартований дріт – Держстандарту 14118. По поверхні термообробленого дроту – за згодою. Величина дійсного зерна має не перевищувати 5-го номера за Держстандартом 5639. Для стрічки величина зерна визначається після термообробки. Результати контролю заносяться до Документа якості. Забрудненість металопродукції неметалевими включеннями в оцінці, попри найвищий бал, не має перевищувати норму [15].

Кожен компонент сплаву впливає на його фізико-механічні властивості. Завдяки точному складу стає можливим отримати матеріал із необхідними характеристиками міцності і пружності. Розглянемо вплив кожного компонента на властивості сплаву.

Со – основа металу, сприяє підвищенню жароміцності і ударної міцності. Відповідно до Держстандарту 51397-99, за узгодженням з органами охорони здоров'я допускаються незначні відхилення за масовою часткою елементів, зазначених у таблиці, які викликають зміни у структурі та механічних властивостей.

С – збільшує жорсткість та міцність сплаву за рахунок формування вуглецевих фаз у металевій матриці. За великих концентрацій може спричинити крихкість та підвищення в'язкості за високих температур.

Mn – поліпшує прожарювання сплаву, міцність та зміцнюваність за рахунок утворення твердих вуглецевих розчинів. Підвищує стійкість до утворення великих зерен під час кування та відпуску, а також знижує в'язкість за високих температур.

Ni – робить сплав пластичним і підвищує його міцність. Посилює стійкість до ударних навантажень та втомних руйнувань, а також корозійну стійкість.

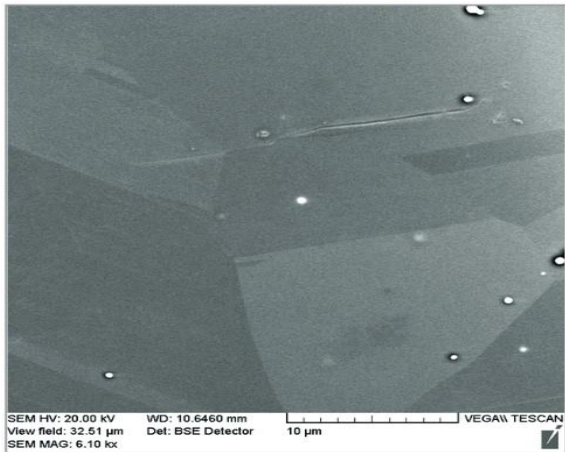
Mo – позитивно впливає на опір металу навантаженням розтягу, поліпшує жорсткість і зносостійкість, а також знижує чутливість до утворення зернової структури за високих температур.

Cr – збільшує жорсткість, зносостійкість та корозійну стійкість сталі. Утворює хромовмісні карбіди, які зміцнюють структуру та опираються зносу. Також посилює стійкість до окиснення та корозії.

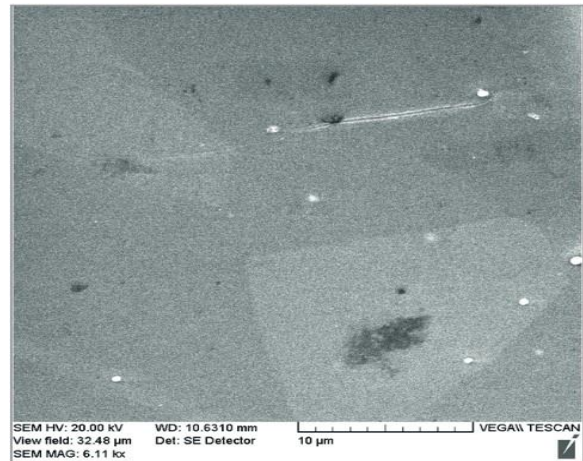
Si – підвищує міцність сталі. Цей елемент сприяє утворенню твердого розчину із залізом, що збільшує міцність матеріалу. Високі концентрації кремнію можуть також підвищувати межу плинності та межу міцності сталі. Додавання кремнію також може збільшити твердість сталі.

S і *P* – технологічні домішки, що впливають на властивості сплаву.

Фото на рисунку 1 демонструє результати електронної сканувальної мікроскопії. Виявлено, що поверхня імплантатів з *Со–Cr*, підданих різним термічним режимам (в діапазоні від 1 050 до 1 150 °С у вакуумі) та електрохімічній обробці, набуває мікрорельєфу з характерним ромбоподібним малюнком, що характеризується мозаїчною структурою [16].



a



б

Рис. 1. Результати сканувальної електронної мікроскопії ділянки обробленої поверхні зразка Co–Cr-імплантата після термічної та електрохімічної обробки (а – від відбитих електронів; б – від вторинних електронів)

Результати експерименту. Для обчислень використано програму «Експерт», розроблену В. М. Волчуком, Ю. І. Дубровим та Ф. В. Кріуліним і реалізовану в програмному середовищі *Delphi*.

Для побудови моделі прогнозу дослідник визначав такі параметри: назву та мету роботи, задаючи незалежні змінні (температура повітря, тиск навколишнього середовища), які не впливають на параметри, що вивчаються.

Також визначалися залежні змінні (наприклад, хімічний склад, режим термообробки), що впливають на мету дослідження, якою виступала жорсткість чавуну.

Наразі в матеріалознавстві активно впроваджуються експертні оцінки та нові методики для прогнозування критеріїв якості матеріалів (наприклад, фрактальний підхід [17–22]).

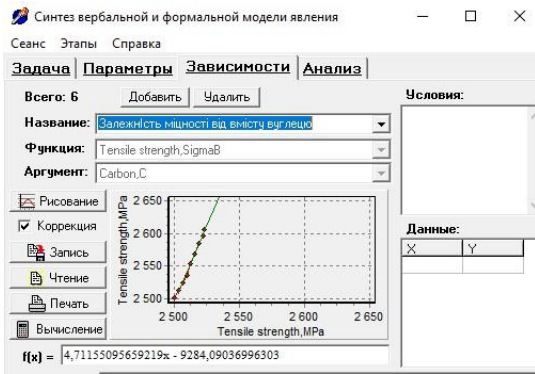
Наступним етапом досліджень було експертне оцінення, засноване на статистичних та літературних даних. Дослідник будував функцію експертним

методом, потім отриману залежність порівнювали із залежністю, отриманою аналітичним методом із використанням програми Excel.

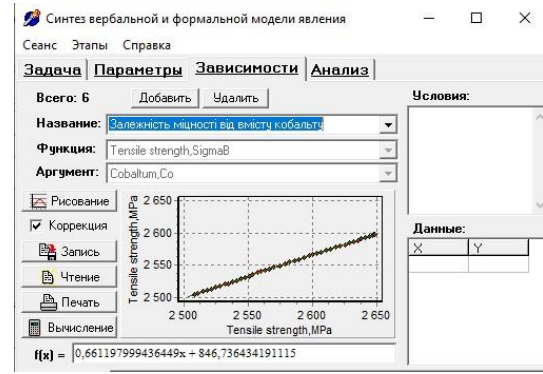
Після цього вибирали контрольні точки та проводили експерименти з метою коригування значень експертної моделі на основі експериментальних та статистичних оцінок. Отриману математичну модель можна було коригувати для досягнення необхідної точності, що дозволяло враховувати вирішальний людський чинник після ухвалення остаточного рішення.

Для отримання лінії тренду використано програму Excel, у якій отримали математичні моделі. Шляхом аналізу отриманих рівнянь регресії будувалися гістограми впливу параметрів функцію мети.

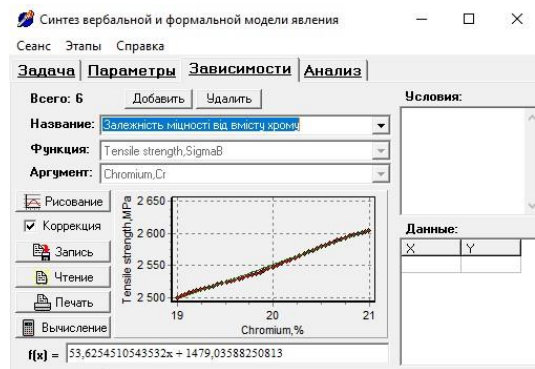
Далі наведено результати розрахунків впливу елементів хімічного складу досліджуваної марки валків на показники їх твердості, згідно з даними таблиці 1 (рис. 2).



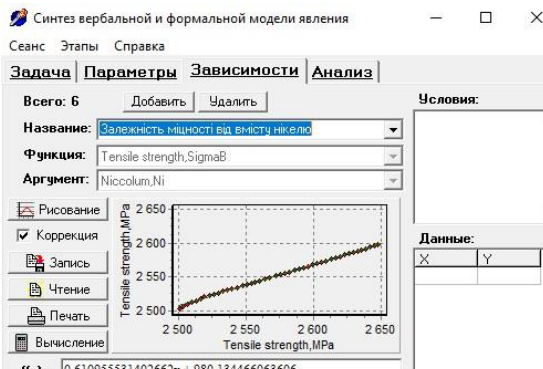
а



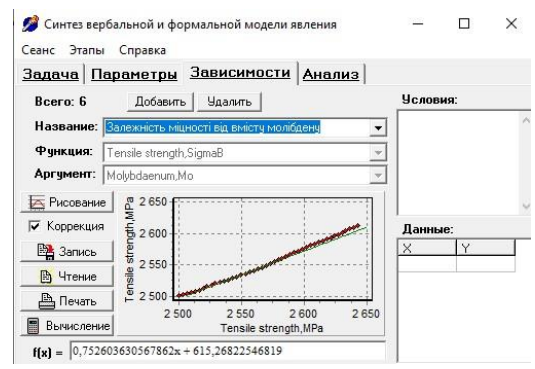
б



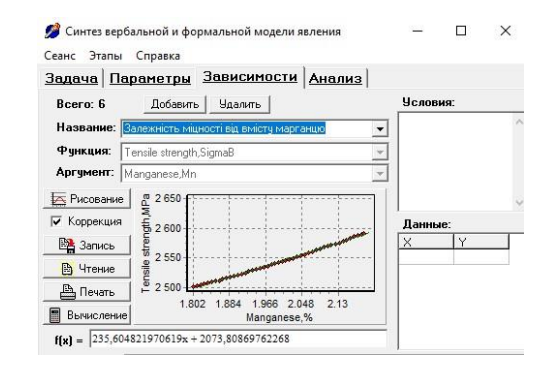
в



г



д



е



ж

Рис. 2. Залежність твердості сплаву 40КХНМ від хімічного складу

Отримано рівняння регресії, що показники твердості та коригувати їх у дозволяють оперативно визначати процесі виплавки сплаву 40КХНМ

Висновки

Проаналізовано вплив хімічного сплаву 40КХНМ на його твердість. Побудовані математичні моделі залежності хімічного складу дозволили провести ранжування цих елементів залежно від їх впливу на твердість.

Отримані гістограми впливу елементів хімічного складу сплаву 40КХНМ на його твердість та математичні моделі дозволяють проводити контроль якості цього сплаву без механічних іспитів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бялік О. М., Черненко В. С., Писаренко В. М., Москаленко Ю. Н. *Металознавство* : підруч., 2-ге вид., перероб. і доп. Київ : Політехніка, 2006. 384 с.
2. Дурягіна З. А., Лизун О. Я., Пілюшенко В. Л. *Сплави з особливими властивостями*. Львів : Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2007. 236 с.
3. Бойко І. А. та ін. Особливості використання та обробки функціональних покриттів деталей авіаційних двигунів. *Перспективи розвитку машинобудування та транспорту–2023* : зб. тез доп. III-ї Міжнар. науково-техн. конф. Вінниця, 1–3 черв. 2023 р. С. 252–253.
4. Standard Specification for Wrought 18Chromium-14Nickel-2.5Molybdenum Stainless Steel Bar and Wire for Surgical Implants (UNS S31673).
5. Standard Specification for Cobalt-28 Chromium-6 Molybdenum Alloy Castings and Casting Alloy for Surgical Implants (UNS R30075).
6. Standard Specification for Cobalt-28 Chromium-6 Molybdenum Alloy Forgings for Surgical Implants (UNS R31537, R31538, R31539).
7. Cramer S. D., Covino B. S. *ASM Handbook*. Vol. 13A. Corrosion : Fundamentals, Testing and Protection. Materials Park, OH USA, ASTM International. 2003.
8. Hermawan H., Ramdan D., Djuansjah J. R. P. *Biomedical Engineering. Metal for Biomedical Applications*. In: Tech Ed. Rijeka, Croatia, 2011.
9. Kunčická L., Lowe T. C., Kocich R. *Advances in Metals and Alloys for Joint Replacement*. *Progress in Materials Science*. № 88. 2017. Pp. 232–280.
10. Disegi J. A., Kennedy R. L., Pilliar R. *Cobalt-Base Alloys for Biomedical Applications*, STP1365. 1999.
11. Manama N. S., Harunb W. S. W., Shrib D. N. A., Ghanib, Kurniawanc T., Ismaild M. H., Ibrahim M. H. I. *Study of corrosion in biocompatible metals for implants : a review*. *J. Alloys and Compounds*. Vol. 701. 2017. Pp. 698–715.
12. Niinomi M., Nakai M., Hieda J. *Development of new metallic alloys for biomedical applications*. *Acta Biomater*. № 8. 2012. Pp. 3888–3903.
13. Buford A., Goswami T. *Review of wear mechanisms in hip implants : paper I*. *General. Mater. Des.* 25, 2004. Pp. 385–393.
14. Liao Y., Pourzal R., Stemmer P., Wimmer M. A., Jacobs J. J., Fischer A., Marks L. D. *New insights into hard phases of CoCrMo metal-on-metal hip replacements*. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* № 12. 2012. Pp. 39–49.
15. ДЕРЖСТАНДАРТ 51397-99. Стрічка і дріт із спеціальних сплавів для з'єднувальних і вживлюваних елементів виробів для серцево-судинної хірургії.
16. FOUNDRY PRODUCTION AND METALLURGY 4'2022 URL: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-108-114>
17. Большаков Вад. І., Большаков В.І., Волчук В. М., Дубров Ю. І. *Часткова компенсація неповноти формальної аксіоматики при ідентифікації структури металу*. *Вісник НАН України*. 2014. № 12. С. 45–48. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/73434>
18. Большаков В., Волчук В., Дубров Ю. *Пути применения теории фракталов : монография*. Саарбрюккен : Palmarium Academic Publishing, 2016. 146 с.
19. Большаков В. І., Волчук В. М., Котов М. А., Фісуненко Д. П. *Аспекти застосування фрактального моделювання*. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2022. № 2 (97). С. 7–18. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.050722.7.858>
20. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. *О применении имитационного моделирования в материаловедении*. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2015. № 4. С. 26–31. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/26-31>
21. Volchuk V. M., Kotov M. A. *Fractal express methods evaluation of a breaking stress of concrete*. *Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*. 2021. Vol. 1926, № 1. Pp. 012023. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1926/1/012023>
22. Volchuk Volodymyr, Bolshakov Volodymyr, Kotov Mykola, Konoplyanik Alexander, Chaikovska Hanna. *Influence of the multifractal characteristics of a macrostructure on cement mortar strength*. *AIP Conference Proceedings*. 2023. Vol. 2678. Pp. 020024. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0118682>

REFERENCES

1. Bialik O.M., Chernenko V.S., Pisarenko V.M. and Moskalenko Yu.N. *Metaloznavstvo : pidruchnyk 2-he vyd., pererob. i dop.* [Metallurgy : textbook, 2nd ed., revision. and additional]. Kyiv : Polytechnic Publ., 2006, 384 p. (in Ukrainian).
2. Duryagina Z.A., Lyzun O.Ya. and Pilyushenko V.L. *Splavy z osoblyvymy vlastyvostyamy* [Alloys with special properties]. Lviv : Publication of the Lviv Polytechnic National University, 2007, 236 p. (in Ukrainian).
3. Boyko I.A. et al. *Osoblyvosti vykorystannya ta obrobky funktsional'nykh pokryttiv detaley aviatsiynykh dvyhuniv* [Features of the use and processing of functional coatings of aircraft engine parts]. *Perspektyvy rozvytku mashynobuduvannya ta transportu-2023 : zb. tez dop. III-yi Mizhnar. nauk.-tekhn. konf.* [Perspectives for the development of mechanical engineering and transport-2023 : coll. thes. add. III Intern. sc. and tech. conf.]. Vinnytsia, June 1–3, 2023, pp. 252–253. (in Ukrainian).
4. Standard Specification for Wrought 18Chromium-14Nickel-2.5Molybdenum Stainless Steel Bar and Wire for Surgical Implants (UNS S31673).
5. Standard Specification for Cobalt-28 Chromium-6 Molybdenum Alloy Castings and Casting Alloy for Surgical Implants (UNS R30075).
6. Standard Specification for Cobalt-28 Chromium-6 Molybdenum Alloy Forgings for Surgical Implants (UNS R31537, R31538, R31539).
7. Cramer S.D. and Covino B.S. *ASM Handbook. Vol 13A. Corrosion : Fundamentals, Testing and Protection.* Materials Park, OH USA, ASTM International. 2003.
8. Hermawan H., Ramdan D. and Djuansjah J.R.P. *Biomedial Eneering, Metal for Biomedical Applications.* In: Tech Ed. Rijeka, Croatia, 2011.
9. Kunčická L., Lowe T.C. and Kocich R. *Advances in Metals and Alloys for Joint Replacemente.* Progress in Materials Science. No. 88, 2017, pp. 232–280.
10. Disegi J.A., Kennedy R.L. and Pilliar R. *Cobalt-Base Alloys for Biomedical Applications.* STP1365. 1999.
11. Manama N.S., Harunb W.S.W., Shrib D.N.A., Ghanib, Kurniawanc T., Ismaild M.H. and Ibrahim M.H.I. *Study of corrosion in biocompatible metals for implants : a review.* J. Alloys and Compounds. No. 701, 2017, pp. 698–715.
12. Niinomi M., Nakai M. and Hieda J. *Development of new metallic alloys for biomedical applications.* Acta Biomater. No. 8, 2012, pp. 3888–3903.
13. Buford A. and Goswami T. *Review of wear mechanisms in hip implants : paper I. General.* Mater. Des. 25, 2004, pp. 385–393.
14. Liao Y., Pourzal R., Stemmer P., Wimmer M.A., Jacobs J.J., Fischer A. and Marks L.D. *New insights into hard phases of CoCrMo metal-on-metal hip replacements.* J. Mech. Behav. Biomed. Mater. No. 12, 2012, pp. 39–49.
15. *State standard 51397-99. Tape and wire from special alloys for connecting and implantable elements of products for cardiovascular surgery.* (in Ukrainian).
16. *FOUNDRY PRODUCTION AND METALLURGY 4'2022* URL: <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2022-4-108-114>
17. Bol'shakov Vad.I., Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *Chastkova kompensatsiya nepovnoty formal'noyi aksiomatyky pry identyfikatsiyi struktury metalu* [The partial compensation of incompleteness of formal axiomatics in the identification of the metal structure]. *Visnyk akademiyi nauk Ukrayiny* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]. 2014, no. 12, pp. 45–48. (in Ukrainian).
18. Bol'shakov V., Volchuk V. and Dubrov Yu. *Puti primeniya teorii fraktalov* [Ways of applying the theory of fractals]. Saarbrucken : Palmarium Academic Publishing, 2016, 146 p. (in Russian).
19. Bolshakov V.I., Volchuk V.M., Kotov M.A. and Fisunen D.P. *Aspekty zastosuvannya fraktalnoho modeliuвання* [Aspects of the application of fractal modeling]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metal Science and Heat Treatment of Metals]. 2022, vol. 2, no. 2 (97), pp. 7–18. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.050722.7.858>. (in Ukrainian).
20. Bolshakov V.I., Volchuk V.N. and Dubrov Yu.I. *O primenenii imitatsionnogo modelirovaniya v materialovedenii* [The application simulated modelling in materials science]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metall Science and Heat Treatment of Metals]. 2015, no. 4, pp. 26–31. (in Russian).
21. Volchuk V.M. and Kotov M.A. *Fractal express methods evaluation of a breaking stress of concrete.* Journal of Physics : Conference Series. IOP Publishing. 2021, vol. 1926, no. 1, pp. 012023.
22. Volchuk Volodymyr, Bolshakov Volodymyr, Kotov Mykola, Konoplyanik Alexander and Chaikovska Hanna. *Influence of the multifractal characteristics of a macrostructure on cement mortar strength.* AIP Conference Proceedings. Vol. 2678, pp. 020024, 15.02.2023. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0118682>

Надійшла до редакції: 12.03.2024.

УДК 621.762

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.101.1079

ЕВОЛЮЦІЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ЕКСТРЕМАЛЬНО ДЕФОРМОВАНИХ СПЕЧЕНИХ МІДНИХ НАНОКОМПЗИТИВ

РОСЛИК І. Г.¹, канд. техн. наук, проф.,
НОСКО О. А.², канд. техн. наук, доц.,
КОВЗІК А. М.³, канд. техн. наук, доц.,
АЮПОВА Т. А.^{4*}, канд. техн. наук, доц.,
АЮПОВ О. А.⁵, студ.

¹ Кафедра покриттів, композиційних матеріалів і захисту металів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, e-mail: roslyk67@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7168-6623

² Кафедра покриттів, композиційних матеріалів і захисту металів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, e-mail: olganosko30@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5749-7578

³ Кафедра покриттів, композиційних матеріалів і захисту металів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, e-mail: anatoliykovzik@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5361-6381

^{4*} Кафедра покриттів, композиційних матеріалів і захисту металів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, e-mail: tanyaayupova@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-5706-4211

⁵ Кафедра систем якості, стандартизації та метрології, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, e-mail: tk136@ua.fm, ORCID ID: 0000-0002-1414-0835

Анотація. *Мета роботи* – визначення структури та механічних властивостей спеченої міді (в тому числі такої що містить вуглецеві нанотрубки) після інтенсивної пластичної деформації скручуванням. Об'єкт дослідження – зразки з порошку міді ПМС – 1 (ГОСТ 4960-75), порошку міді фракції 45 мкм, порошку міді ПМС – 1 з додаванням 1 % мас. вуглецевих нанотрубок, виготовлені двократним пресуванням – спіканням, з кінцевим тиском 700 МПа, за температури 950°C та піддані інтенсивній пластичній деформації скручуванням на ковалді Бріджмена. Досліджували структуру з використанням електронного сканувального мікроскопа Tescan Місга 3 LMU. Мікромеханічні випробування проводили за допомогою приладу «Мікрон – Гамма». **Наукова новизна.** Вперше досліджено мікроструктуру і механічні властивості спеченої міді та наноматеріалу «мідь – вуглецеві нанотрубки» після обробки інтенсивною пластичною деформацією скручуванням. Установлено, що інтенсивна пластична деформація скручуванням суттєво впливає на структуру та механічні властивості зразків спеченої міді. Форма зерен спеченої міді від близької до сферичної змінюється на витягнуту у напрямку деформації, розмір зерен зменшується у 5–7 разів. За інтенсивної деформаційної обробки наноматеріалу складу «мідь + 1 % ВНТ» ефект подрібнення зерна проявляється значно менше. Встановлено суттєве підвищення механічних властивостей спеченої міді у разі інтенсивної пластичної деформації. Найвищі показники отримані для матеріалу системи «мідь + 1 % ВНТ». **Практична цінність.** Результати роботи можуть бути використані для виготовлення мідних виробів електротехнічного та теплотехнічного призначення з підвищеною зносостійкістю.

Ключові слова: *спечена мідь; вуглецеві нанотрубки; інтенсивна пластична деформація; мікроструктура; механічні властивості*

EXTREMELY DEFORMED SINTERED COPPER NANOCOMPOSITES STRUCTURE AND PROPERTIES EVOLUTION

ROSLYK I.G.¹, Cand. Sc. (Tech.), Prof.,
NOSKO O.A.², Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
KOVZIK A.M.³, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
AIUPOVA T.A.^{4*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,
AIUPOV O.A.⁵, Stud.

¹ Department of Coatings, Composite Materials, and Metal Protection, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazariana St., Dnipro, 49010, Ukraine, e-mail: roslyk67@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7168-6623

² Department of Coatings, Composite Materials, and Metal Protection, Dean of the Faculty of Quality and Materials Engineering, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazariana St., Dnipro, 49010, Ukraine, e-mail: olganosko30@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5749-7578

³ Department of Coatings, Composite Materials, and Metal Protection, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazariana St., Dnipro, 49010, Ukraine, e-mail: anatoliykovzik@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5361-6381

^{4*} Department of Coatings, Composite Materials, and Metal Protection, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazariana St., Dnipro, 49010, Ukraine, e-mail: tanyaayupova@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-5706-4211

⁵ Department of Quality Systems, Standardization and Metrology, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazariana St., Dnipro, 49010, Ukraine, e-mail: tk136@ua.fm, ORCID ID: 0000-0002-1414-0835

Abstract. *The purpose of the work* is to determine the structure and mechanical properties of sintered copper (including those containing carbon nanotubes) after intensive plastic deformation by torsion. **Methodology:** The research objects are samples of copper powder PMS-1 (GOST 4960-75), copper powder with a 45 microns' fraction, copper powder PMS-1 with the carbon nanotubes addition 1 % by weight, manufactured by double pressing – sintering, with a 700 MPa final pressure, temperature of 950 °C, and subjected to intensive plastic deformation by torsion on a Bridgman anvil. The structure is investigated using a Tescan Micra 3 LMU scanning electron microscope. Micromechanical tests were carried out using the “Micron – Gamma” device. **Originality.** At first, the microstructure and mechanical properties of sintered copper and nanomaterial “copper – carbon nanotubes” after intensive plastic deformation by torsion were investigated. It has been established that intensive plastic deformation by torsion significantly affects the sintered copper samples structure and mechanical properties. The sintered copper grain shape changes from approximately spherical to elongated in the deformation direction, and the grain size decreases by 5–7 times. In the case of “copper + 1 % CNT” nanomaterial intensive deformation, the grain refinement effect is significantly less pronounced. A significant increase in the mechanical properties of sintered copper during intensive plastic deformation has been established. The highest indicators were obtained for the “copper + 1 % CNT” nanomaterial. **Practical value.** The results of the work can be used in the manufacture of copper products for electrical and thermal purposes with increased wear resistance.

Keywords: *sintered copper; carbon nanotubes; intensive plastic deformation; microstructure; mechanical properties*

Вступ. Мідь – досить поширений матеріал, який широко використовується в техніці. Широке використання міді пов'язане, насамперед, з її підвищеними електро- і теплопровідністю та порівняно невеликою ціною. Разом із тим використання міді у вузлах тертя обмежене, тому що мідні вироби через їх м'якість інтенсивно зношуються. Цей процес ще більшою мірою характерний за використання спечених матеріалів, які в разі виготовлення за класичною технологією «пресування – спікання» мають пористість 10–12 % [1]. Тому розроблення методів підвищення механічних характеристик спеченої міді бачиться актуальним завданням.

Один із методів істотного підвищення механічних характеристик металів та їх сплавів є інтенсивна пластична деформація скручуванням. Як відомо [2; 3], ІПДС – це метод обробки, за якого матеріал піддається зсувній деформації під гідростатичним тиском. Така обробка ущільнює матеріал та змінює мікроструктуру від монокристалічної до дрібнозернистої [4; 5]. Утворена структура з розміром зерна, меншим за 100 мкм, є наслідком так званої

динамічної рекристалізації [6], що відбувається у разі скручування під високим тиском за кімнатної температури. Вона надає матеріалу підвищені механічні, електричні [7], магнітні [8] та інші властивості.

Позитивний ефект від інтенсивної пластичної деформації (ІПД) можливо отримати, піддаючи такій обробці композиційні матеріали. Так, наприклад, наведені в [9] дослідження показали, що при ІПД композиційного спеченого матеріалу системи W–25 % Cu спостерігається значне подібнення зерен вольфраму, зростання щільності матеріалу в цілому при збільшенні ступеня деформації. Разом із тим, на фрагментах мікроструктур, наведених у [9], все ж фіксуються мікропори.

Викликає інтерес поведінка під час інтенсивної пластичної деформації композиційних матеріалів рівня наноматеріалів. Можливо очікувати, що наявність надміцної нанодисперсної арматури (наприклад, вуглецевих нанотрубок [10]) під час ІПД викличе специфічний перебіг процесів еволюції структури та надання виробам підвищених

механічних властивостей. Тому метою нашої роботи стало визначення структури та механічних властивостей спеченої міді (у тому числі тієї, що містить вуглецеві нанотрубки) після інтенсивної пластичної деформації скручуванням.

Матеріал та методика. Вихідні зразки для досліджень виготовляли з таких шихт:

- стандартного порошку міді ПМС-1 (ГОСТ 4960-75) – шихта 1;
- відсіяного зі стандартного мідного порошку ПМС-1 (фракція менше 45 мкм) – шихта 2;
- порошку ПМС-1 з додаванням 1% мас. вуглецевих нанотрубок (ВНТ) – шихта 3.

У роботі використано багатостінні ВНТ, виготовлені CVD методом розкладання пропілену за присутності каталізатора $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3\text{--MoO}_3$ за температури 650 °С. Характерний діапазон діаметрів ВНТ склав 8÷28 нм, а їх довжини в межах від 0,5 до десятків мікронів. Змішування міді з ВНТ проводили у лабораторному змішувачі типу «п'яна бочка» протягом 2 годин.

Компактні зразки діаметром 11,29 мм, висотою 1 мм виготовляли за такою технологією:

1. попереднє пресування (тиск 200 МПа);
2. спікання за температури 700 °С впродовж 1,5 год у середовищі водню;
3. допресування (тиск 700 МПа);
4. кінцеве спікання при температурі 950 °С впродовж 2 год у середовищі водню.

Технологія «двократне пресування – спікання» обрана з метою отримання вихідних зразків із низькою пористістю.

Виготовлені зразки піддавали інтенсивній пластичній деформації скручуванням на ковадлі Бріджмена [2]. Скручування проводили поворотом верхнього бійка на один оберт із прикладанням тиску від 1 до 3 ГПа.

Після деформації зразків поверхню, що контактувала з верхнім бійком, шліфували за стандартною методикою на папері від P120 до P1200 та полірували спеціальною пастою ГОІ. Шліфи промивали дистильованою водою та етиловим спиртом

і висушували фільтрувальним папером. Далі проводили металографічні та мікромеханічні дослідження.

Металографічні дослідження на травлених шліфах виконані з використанням електронного сканувального мікроскопа Tescan Mica 3 LMU.

Для об'єктивної оцінки місця сканування всіх зразків обрано на відстані половини радіуса осередку деформації.

Мікромеханічні дослідження проведено з використанням приладу «Мікрон-Гамма». Такий метод дослідження має низку переваг [11], насамперед, він дозволяє з високою точністю визначити найважливіші механічні характеристики матеріалів (твердість за Мейером, пружність – модуль Юнга, коефіцієнт пластичності). Як індентор використовували тригранну піраміду Берковича.

Результати та їх обговорення.

Виконано якісні та кількісні дослідження властивостей спеченої міді з додатковою обробкою методом ПД.

Якісні дослідження зроблені на базі металографічних досліджень. На рисунку 1 наведено мікроструктуру спеченої міді до крутіння, обробленої методом ПД. Як видно з рисунка 1, обробка ПД значно змінює форму і розміри зерен мідних зразків. Якщо порівняти мікроструктуру додатково оброблених зразків із вихідною, стає очевидним, що застосований режим ПД зменшує розміри зерен у 5–7 разів. Утворені зерна мають витягнуту форму. Пори, присутні у вихідному зразку, в деформованих зразках практично не фіксуються.

Порівняння мікроструктур інтенсивно деформованих зразків міді, виготовлених із порошоків різних фракцій (рис. 1, б, в), вказують на відсутність принципового впливу вихідних розмірів частинок порошку на кінцевий розмір зерен зразків після ПД.

Наявність нанотрубок у мідній основі суттєво змінює мікроструктуру зразків (рис. 1, г). У результаті ПД зерна міді та пори, в яких розташовані нанотрубки, витягуються в напрямку деформації. Фіксується наявність результатів процесу

подрібнення вихідних зерен міді, однак ступінь подрібнення значно менший, ніж для чистої міді. Така поведінка наноматеріалу – це наслідок зміцнення міді

за механізмом утворення дисперснозміцнених композиційних матеріалів [12].

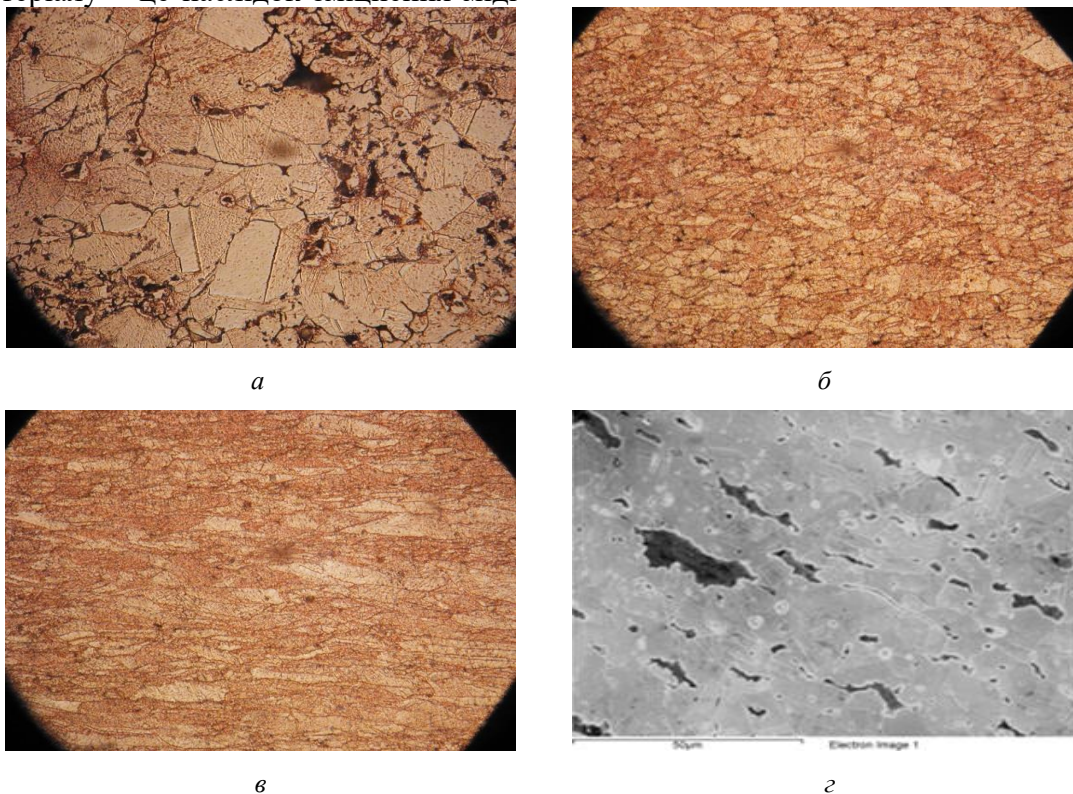


Рис. 1. Мікроструктура спечених мідних зразків: а – до крутиння; б, в, г – після ПЦД, виготовлених із шихт 1, 2, 3 відповідно

Таким чином, вивчення структур інтенсивно деформованих зразків показало значне подрібнення зерен спечених мідних зразків після зазначеної обробки. Це, ймовірно за все, спричинює збільшення кількості внутрішніх дефектів кристалічної будови, і, відповідно, зміцнення матеріалу, що підтверджується наступними мікромеханічними дослідженнями.

У ході мікромеханічних досліджень проводили запис діаграм «навантаження – розвантаження» ($P-h$) безперервного вдавлення індентора у матеріал та комп'ютерну обробку отриманих даних.

Наприклад, на рисунку 2 наведено діаграму $P-h$ для мідного зразка, що містить 1 % ВНТ.

На діаграмі міститься ряд кривих, отриманих у різних точках при переміщенні

індентора по радіусу зразка з кроком 200 мкм. Кожна крива має ділянку навантаження та розвантаження. На рисунку фіксується розкид даних, який, однак, не має систематичного характеру. Наприклад, відсутній зв'язок механічних властивостей матеріалу з відстанню місця ідентифікації від центру зразка. З теоретичної точки зору така залежність можлива, через те, що величина енергії деформації при скручуванні пропорційна відстані від центра осередку деформації. Однак у даному випадку через невеликий радіус осередку деформації (5 мм) градієнт переходу енергії незначний, тому суттєві зміни мікроструктури і властивостей зразків не фіксуються.

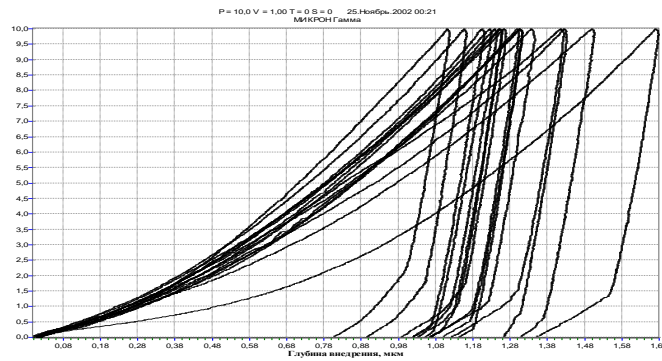


Рис. 2. Діаграма «навантаження – розвантаження» наноматеріалу мідь – ВНТ

Результати мікромеханічних досліджень показані в таблиці. За результатами аналізу даних таблиці виходить, що розміри

вихідного порошку міді суттєво не впливають на механічні характеристики спечених зразків, підданих ПД.

Таблиця

Середні результати визначення твердості, модуля пружності та коефіцієнта пластичності мідних зразків після ПД

Вихідна сировина для виготовлення зразків	Твердість за Мейером	Модуль Юнга, ГПа	Коефіцієнт пластичності
ПМС – 1	2,452	62,90	0,838
Порошок міді, фракція менше 45 мкм	2,450	64,49	0,879
ПМС – 1 + 1 % ВНТ	2,890	125,53	0,912

Армування міді вуглецевими нанотрубками значно підвищує її механічні властивості. Цей ефект зберігається і після ПД. Для наноматеріалу складу «мідь – 1 % ВНТ» порівняно з чистою міддю твердість підвищується орієнтовно на 15 %, пружність – на 50 %, пластичність – на 8 %.

Висновки

Інтенсивна пластична деформація скручуванням суттєво впливає на структуру та механічні властивості зразків спеченої міді. Після такої обробки форма зерен зразків спеченої міді від близької до сферичної змінюється на витягнуту у напрямку деформації, розмір зерен зменшується у 5–7 разів. Ефект подрібнення зерна проявляється значно менше за

інтенсивно деформаційно обробки наноматеріалу складу «мідь + 1 % ВНТ», що пов'язано зі зміцненням зразків за дисперсійним механізмом підвищення міцності композиційних матеріалів.

Механічні дослідження показали суттєве підвищення механічних властивостей – твердості, пружності, пластичності – спеченої міді за інтенсивно пластично деформування. Найвищі показники отримані за такої обробки матеріалу системи «мідь + ВНТ».

Інтенсивна пластична деформація скручуванням має практичне значення для виготовлення мідних виробів електротехнічного та теплотехнічного призначення з підвищеною зносостійкістю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Федорченко І. М., Францевич І. Н., Радомсельский І. Д. и др. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения : справ. Киев : Наук. думка, 1985. 624 с.
2. Бриджмен П. В., Бриджмен П. П. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. Москва: Иностранная литература, 1955. 444 с.
3. Кузнецов Р. И. и др. Пластическая деформация твердых тел под давлением. Свердловск : ИФМ УНЦ РАН, Препринт, 1982. 85 с.

4. Horita Z., Smith D. J., Nemoto M., Valiev R. Z., Langdon T. G. Observations of grain boundary structure in submicrometer-grained Cu and Ni using highresolution electron microscopy. *J. Mater. Res.* 1998. Vol. 13. Pp. 446–450.
5. Валиев Р. З., Корзников А. В., Мулюков Р. Р. Структура и свойства металлических материалов с субмикроструктурной структурой. *ФММ.* 1992. № 4. С. 70–86.
6. Горелик С. С., Добаткин С. В., Капуткина Л. М. Рекристаллизация металлов и сплавов. Москва : МИСИС, 2005. 432с.
7. Нестеров К. М., Исламгалиев Р. К., Валиев Р. З. Прочность и электропроводность ультрамелкозернистого медного сплава. *Вестник УГАТУ.* 2011. Т. 16, № 8 (53). С. 110–120.
8. Valiev R. Z., Mulyukov R. R., Ovchinnikov V. V. Direction of grain boundary phase in submicrometre grained iron. *Philos. Mag. Lett.* 1990. Vol. 62. Pp. 53–55.
9. Sabirov I., Pippan R. Formation of a W-25 %Cu nanocomposite during higt pressure torsion. *Scripta materialia.* 2005. Vol. 52.
10. Рослик І. Г. Нові нанокompозити на мідній основі, армовані вуглецевими нанотрубками. *Металургійна та гірничо-рудна промисловість.* 2020. № 3. С. 18–23.
11. Крохмаль С. А., Толмачева Г. Н. Микро- и наноиндентирование пиролитических карбидохромовых покрытий. *ФИП.* 2011. Т. 9, № 4. С. 350–356.
12. Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы : пер. с нем. Под ред. В. Шатта. Москва : Металлургия, 1983. 520 с.

REFERENCES

1. Fedorchenko I.M., Frantsevych I.N., Radomselskyi I.D. and oth. *Poroshkovaia metallurhiya. Materyaly, tekhnolohiya, svoistva, oblasti prymeneniya : sprav.* [Powder metallurgy. Materials, technology, properties, areas of application : reference book]. Kyiv : Naukova Dumka Publ., 1985, 624 p. (in Russian).
2. Brydzhmen P.V. *Yssledovanie bolshykh plastycheskykh deformatsyi y razryva* [Study of large plastic deformations and rupture]. Moscow : Inostrannaia Lyteratura Publ., 1955, 444 p. (in Russian).
3. Kuznetsov R.I. and oth. *Plastycheskaia deformatsiya tverdykh tel pod davlenyem* [Plastic deformation of solids under pressure]. Sverdlovsk : YFM UNTs RAN, Preprynt, 1982, 85 p. (in Russian).
4. Horita Z., Smith D.J., Nemoto M., Valiev R.Z. and Langdon T.G. Observations of grain boundary structure in submicrometer-grained Cu and Ni using highresolution electron microscopy. *J. Mater. Res.* 1998, vol.13, pp. 446–450.
5. Valyev R.Z., Korznykov A.V. and Muliukov R.R. *Struktura y svoistva metalllycheskykh materyalov s submykrokrystallycheskoi strukturoi* [Structure and properties of metallic materials with submicrocrystalline structure]. *FMM.* 1992, no. 4, pp. 70–86 (in Russian).
6. Horelyk S.S., Dobatkyn S.V. and Kaputkina L.M. *Rekrystallyzatsiya metallov i splavov* [Recrystallization of metals and alloys]. Moscow : MISIS Publ., 2005, 432 p. (in Russian).
7. Nesterov K.M., Islamhalyev R.K. and Valyev R.Z. *Prochnost y elektroprovodnost ultramelkozernystoho mednoho splava* [Strength and electrical conductivity of ultra-fine grain copper alloy]. *Vestnyk UHATU* [UGATU Bulletin]. 2011, vol. 16, no. 8 (53), pp. 110–120. (in Russian).
8. Valiev R.Z., Mulyukov R.R. and Ovchinnikov V.V. Direction of grain boundary phase in submicrometre grained iron. *Philos. Mag. Lett.* 1990, vol. 62, pp. 53–55.
9. Sabirov I. and Pippan R. Formation of a W-25 %Cu nanocomposite during higt pressure torsion. *Scripta materialia.* 2005, vol. 52.
10. Roslyk I.H. *Novi nanokompozyty na midnii osnovi, armovani vuhletsevymy nanotrubkamy* [New copper-based nanocomposites reinforced with carbon nanotubes]. *Metallurhiina ta hirnycho-rudna promyslovist* [Metallurgical and Mining Industry]. 2020, no. 3, pp. 18–23. (in Ukrainian).
11. Krokhmal S.A. and Tolmacheva H.N. *Mykro- y nanoindyentyrovanye pyrolytycheskykh karbydokhromovykh pokrytyi* [Micro- and nanoindentation of pyrolytic chromium carbide coatings]. *FYP* [FIP]. 2011, vol. 9, no. 4, pp. 350–356. (in Russian).
12. *Poroshkovaya metalurgiya. Spechennyye i kompozitsionnyye materialy* [Powder metallurgy. Sintered and composite materials]. Trans. from German; edited by V. Shatta. Moscow : Metallurhiya Publ., 1983, 520 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 01.04.2024.

УДК 691.32

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.107.1080

В'ЯЖУЧІ ІЗ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ ВІДХОДІВ ВУГЛЕЗБАГАЧЕННЯ ДЛЯ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ У ЗВЕДЕННІ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ МЕТОДОМ 3D-ДРУКУ

РУДІН А. А., *аспір.*

Кафедра технології будівельного виробництва, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (056)-756-34-76, e-mail: aconicus@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4215-3884

Анотація. Постановка проблеми. Технологія будівництва методом 3D-друку – один із сучасних методів швидкого будівництва, який дозволяє значно автоматизувати будівельний процес із досягненням високої точності у виготовленні конструкцій складної конфігурації за допомогою обладнання (3D-принтера), яке працює під управлінням програмного забезпечення для завдання точних координат моделі конструкції, що друкується. Основними матеріалами для технології будівельного 3D-друку стали композиційні суміші на основі в'язучого. Як в'язуче може бути застосований цемент або композиційні в'язучі [1]. Технологія виробництва цементу передбачає випал його компонентів за 1 450 °С, що потребує значних витрат енергетичних ресурсів та впливає на його кінцеву вартість і суміші загалом. Застосування відходів вуглезабагачення, які містять у своєму складі глинисті мінерали, кварц, пірит та незначну кількість карбонатів, домішок і горючих речовин, дозволяє знизити витрати технологічного палива та температури випалу в'язучого за рахунок реалізації тепловірних властивостей вугільних включень. Таким чином відходи вуглезабагачення можуть бути використані як паливний компонент в отриманні в'язучого. **Висновки.** На основі проведених досліджень можна зробити висновок про перспективність компонентного в'язучого матеріалу з використанням відходів вуглезабагачення та зведення будівельних об'єктів методом 3D-друку. За рахунок реалізації тепловірних властивостей можна знизити витрату технологічного палива та температуру випалу для отримання в'язучого і зменшити викиди CO₂ в атмосферу та кінцеву вартість будівельної суміші для 3D-друку.

Ключові слова: неорганічні в'язучі; відходи вуглезабагачення; будівельний 3D-друк

BINDERS FROM SECONDARY RAW MATERIALS OF COAL ENRICHMENT WASTE FOR CONSTRUCTION OBJECT ERECTION USING THE 3D PRINTING METHOD

RUDIN A.A., *Postgrad. Stud.*

Department of Construction Technology, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-76, e-mail: aconicus@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4215-3884

Abstract. Formulation of the problem. The 3D printing construction technology is one of the modern methods of rapid construction, which allows for a significant automation of the building process while achieving high precision in the fabrication of complex configurations using equipment (3D printers) controlled by software to define precise coordinates of the printed structure model. The main materials for construction 3D printing technology are composite mixtures based on binders. Cement or composite binders can be used as binders [1]. The cement production technology involves the firing of its components at 1 450 °C, which requires significant energy resources and affects its final cost and the overall mixture. The utilization of coal enrichment waste, which contains clay minerals, quartz, pyrite, and a small amount of carbonates, impurities, and combustible substances, allows for reducing the consumption of technological fuel and the firing temperature of the binder by harnessing the heat-generating properties of coal inclusions. Thus, coal enrichment waste can be used as a fuel component in obtaining the binder. **The purpose.** Based on the conducted research, it can be concluded that the use of component binders derived from coal enrichment waste shows promise in the construction of buildings using 3D printing technology. By harnessing the heat-generating properties of these waste materials, it is possible to reduce the consumption of technological fuel and firing temperature required for binder production, consequently lowering CO₂ emissions into the atmosphere and reducing the final cost of the construction mixture for 3D printing.

Keywords: inorganic building materials; coal enrichment waste; 3D concrete printing

Постановка проблеми. Враховуючи, що згідно із статистичними даними вартість будівельних матеріалів та робочої сили у світі постійно зростає, їх ефективне використання у будівництві, а саме зменшення термінів будівництва та зменшення залучення людських ресурсів через автоматизацію будівельних процесів дають значні перспективи для розвитку технології будівництва методом 3D-друку та удосконаленню властивостей будівельних матеріалів за її використання.

Для 3D-друку широко застосовуються композиційні в'язучі з регульованими реологічними характеристиками.

Композиційні суміші для будівельного 3D-друку із включенням вторинної сировини підлягають подальшому дослідженню для можливого зменшення їх вартості з урахуванням дотримання вимог до їх механічних, реологічних властивостей та особливостей технології їх укладання.

Видобуток та переробка мінеральної сировини стали причиною утворення великої кількості відходів, які займають значні за площею земельні ділянки та погіршують екологічний стан регіону їх зберігання. До таких відходів у тому числі належать відходи вуглезабагачувальної промисловості, які зберігаються в шламовідстійниках та накопичувачах. Це значний техногенний ресурс корисних копалин, кількість яких щорічно значно збільшується. З одного боку, шламові відходи – вуглецемістка сировина, яка може бути використана у виробництві будівельних матеріалів, а з іншого – джерело забруднення навколишнього середовища.

Щорічно для зберігання відходів вуглезабагачення фабрики виділяють значні території. Тому в районах розташування таких територій складається несприятлива екологічна ситуація, зумовлена, головним чином, забрудненням атмосферного повітря, ґрунту, водоносних горизонтів та виведенням земель із господарського використання.

У світовій практиці відходи вуглезабагачення застосовуються для виробництва керамзиту.

Аналіз публікацій. З останніх публікацій на тему адитивних технологій будівництва

відомо, що матеріалом для будівельного 3D-друку застосовуються суміші, які містять у своєму складі цемент та дрібний заповнювач розміром зерен від 0,16 до 5 мм. З метою зниження вартості будівельного матеріалу використовується композиційне в'язуче із цементу та шлаку [1], оскільки виробництво цементу – матеріало- та енерговитратний процес, а шлак – це відходи виробництва. У виробництві цементу як паливозберігальну добавку використовують відходи вуглезабагачення [2]. Вони містять у своєму складі паливні компоненти, глинисті мінерали і також використовуються як добавки у виробництві безклінкерних в'язучих. Після обпалу сумісно з доломітом, вапняком вони стають в'язучими [3].

У статтях [3; 4] зазначається, що використання відходів вуглезабагачення в шихті для обпалу в'язучого знижує витрати технологічного палива і витрати на помел сировини.

Використання як шихти тільки вапняку та шлаків знижує температуру обпалу приблизно на 500 °С [4]. Однак вміст вуглецю у відходах вуглезабагачення не має перевищувати 30 % для запобігання утворенню відновлювального середовища.

Мета роботи – оцінення можливості отримання в'язучого з вапняку та відходів вуглезабагачення для будівельного 3D-друку із зниженням температури обпалу та витрат технологічного палива під час виробництва матеріалу.

Результати досліджень. Для отримання в'язучого як сировини використано вапняк та відходи вуглезабагачення у вигляді шламу.

У дослідженні використано відходи вуглезабагачення Павлоградської ЦЗФ, а саме шлам вологістю 60 %, який містить у своєму складі частинки розміром до 5 мкм.

Мінералогічний склад твердої фази шламу визначено рентгенофазовим аналізом (рис. 1).

Установлено, що найбільшу інтенсивність мають дифракційні максимуми d , нм: 0,42; 0,33; 0,24; 0,23; 0,21. Вони належать оксиду кремнію, який є основною фазою. До основних фаз також належать: гідрослюда (d , нм: 0,969; 0,462; 0,363; 0,226; 0,207; 0,166), каолінит (d , нм: 0,69; 0,38;

0,247; 0,23; 0,226; 0,198; 0,178; 0,148), хлорит (d , нм: 0,77; 0,462; 0,35; 0,287; 0,26; 0,253; 0,141; 0,13), польові шпати (d , нм: 0,42; 0,316; 0,295; 0,28; 0,144; 0,134). У складі твердої фази шламу також присутні карбонат кальцію (d , нм: 0,302; 0,207; 0,19; 0,16; 0,153), пірит (d , нм: 0,277; 0,243; 0,222; 0,19; 0,163).

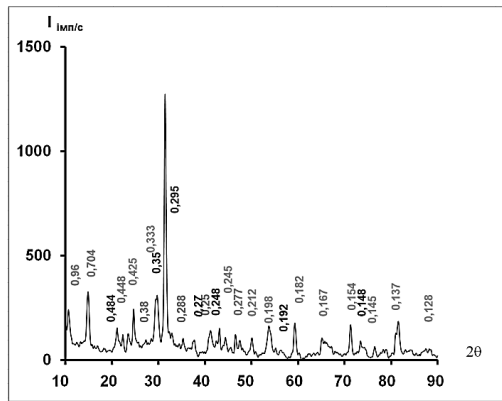


Рис. 1. Дифрактограма відходів вуглезбагачення

Хімічний склад відходів вуглезбагачення наведено у таблиці.

Таблиця

Хімічний склад відходів вуглезбагачення

Вміст оксидів, мас. частка %							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
49,6	18,82	7,82	1,62	1,24	3,2	1,6	1,1
Втрати при пропалюванні: 15 %							

Відомо, що домішки Mg, K, Na, які входять до складу твердої фази шламу, можуть впливати на процеси мінералоутворення із зниженням температури та утворення кінцевого складу в'язучого. Враховуючи викладене в [4], можливе зниження температури обпалу на 500 °С порівняно з температурою обпалу цементу за 1 500 °С. Тому проведено обпал в'язучого за 1 000 °С та 1 200 °С з метою виявлення можливого утворення необхідних силікатів та алюмінатів кальцію.

Обпалу підлягала суміш карбонату кальцію у кількості 70 % і шламу вуглезбагачення у кількості 30 % в перерахунку на суху речовину. У дослідженні вапняк підлягав помелу і подальшому гранулюванню разом із вугільним шламом.

Витримка за максимальної температури складала 30 хвилин. Після обпалу гранули в'язучого помололи в кульовому млині до

питомої поверхні 3 500 см²/г, що була визначена приладом ПСХ-2. Отриманий після обпалу мінералогічний склад в'язучого визначено методом рентгенофазового аналізу (рис. 2). Установлено, що найбільшу інтенсивність мають максимуми d , нм: 0,275; 0,238; 0,17, які належать до кремнезему і є основними фазами. Також ідентифікується β-двокальцієвий силікат (d , нм: 0,278; 0,275; 0,217), трикальцієвий алюмінат (d , нм: 0,27; 0,19; 0,154), але у значно меншій кількості.

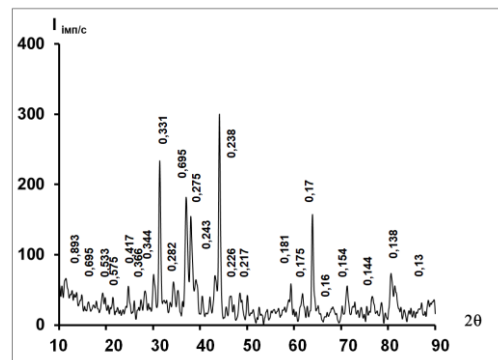


Рис. 2. Дифрактограма в'язучого, обпаленого за 1 000 °С

Суттєво кращі результати отримано обпалом суміші з карбонату кальцію і суміші відходів вуглезбагачення за 1 200 °С (рис. 3).

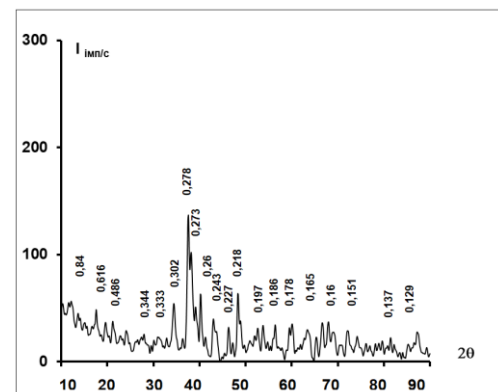


Рис. 3. Дифрактограма в'язучого, обпаленого за 1 200 °С

Позитивний ефект від збільшення температури обпалу до 1 200 °С базується на тому, що мінералогічний склад в'язучого містить у своєму складі значну кількість двокальцієвого силікату (d , нм: 0,278; 0,273; 0,26; 0,218), а також трикальцієвий силікат (d , нм: 0,302; 0,227; 0,273; 0,261; 0,218; 0,186; 0,178; 0,163), браунмілерит (d , нм: 0,277; 0,263; 0,192) і дуже в незначній кількості

кварц (d , нм: 0,424; 0,333; 0,243; 0,181; 0,151; 0,137).

Отже, дослідженням процесу формування мінералогічного складу у в'язучому з карбонату кальцію і шламу відходу вуглезабагачення за обпалу їх суміші в інтервалі 1 000–1 200 °С з використанням рентгенофазового аналізу встановлено: випал суміші за температури 1 000 °С забезпечує розклад глинистих мінералів, присутніх у твердій фазі шламу і карбонатів, а також проведення твердофазових реакцій синтезу в незначній кількості двокальцієвого силікату і трикальцієвого алюмінату.

Випал сировинної суміші за температури 1 200 °С інтенсифікує твердофазові реакції синтезу двокальцієвого силікату і браунмілериту, а також утворення трикальцієвого силікату. При цьому утворення трикальцієвого силікату можливе за рахунок мінералізаторів, які присутні у відходах вуглезабагачення.

Виходячи з вищенаведеного, можна зробити висновок, що для отримання в'язучого з карбонату кальцію і шламу вуглезабагачення сировинну суміш необхідно обпалювати за температури 1 100–1 200 °С. При цьому отримане в'язуче може бути використане в матеріалах для будівельного 3D-друку і самостійно як в'язуче і в поєднанні з цементом.

Висновки

Установлено можливість отримання в'язучого із вмістом вторинної сировини, а саме відходів вуглезабагачення із зниженням температури його обпалу. Використання вторинної сировини дає можливість одночасно досягти позитивних ефектів щодо зменшення впливу на навколишнє середовище та зменшення вартості будівельних робіт за рахунок зниження собівартості матеріалів із застосуванням технології 3D-друку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дворкін Л. Й., Марчук В. В., Зятюк Ю. Ю. Цементно-шлакові суміші для 3D принтеру. *Будівельні матеріали та вироби*. 2021. Вип. 1–2 (102). С. 14–19.
2. Бабушкін В. І., Винниченко В. І., Шульга І. В. Ефективність використання відходів вуглезабагачення при випалі цементного клінкеру. *Науковий вісник будівництва*. 1998. Вип. 2. С. 128–130.
3. Шпирько М. В., Бондаренко С. В., Бондаренко А. С. Отримання в'язучого з відходів вуглезабагачення відсіву доломіту з врахуванням коефіцієнту теплового енергопотенціалу. *Моделювання та оптимізація будівельних композитів*. Одеса, 2019. С. 195–199.
4. Приходченко В. Л., Слащева Е. А., Осенній В. Я., Клюєв Е. С. Основні напрямки використання відходів флотажії Червоноградської ЦЗФ в будівельній галузі. *Геотехнічна механіка*. Дніпропетровськ : ІГТМ НАНУ, 2012. Вип. 99. С. 220–227.

REFERENCES

1. Dvorkin L.J., Marchuk V.V. and Zyatyuk Yu.Yu. *Cementno-shlakovi sumishi dlya 3D printeru* [Cement slag concrete for 3D printer]. *Budivelni materialy ta virobi* [Building Materials and Products]. 2021, vol. 1–2 (102), pp. 14–19. (in Ukrainian).
2. Babushkin V.I., Vinnichenko V.I. and Shulga I.V. *Efektivnist vikoristannya vidhodiv vuglezbagachennya pri vipali cementnogo klinkeru* [The efficiency of utilizing coal enrichment waste in the clinker firing process]. *Naukoviy visnik budivnictva* [Scientific Bulletin of Civil Engineering]. 1998, vol. 2, pp. 128–130. (in Ukrainian).
3. Shpyrko M.V., Bondarenko S.V. and Bondarenko A.S. *Otrimannya v'yazhuchogo z vidhodiv vuglezbagachennya vidsivu dolomitu z vrahuvannyam koefitsiyentu teplovogo energopotencialu* [Production of binder from coal enrichment waste and dolomite residue]. *Modelyuvannya ta optimizaciya budivelnih kompozitiv* [Modeling and Optimization of Construction Composites]. Odesa, 2019, pp. 195–199. (in Ukrainian).
4. Prihodchenko V.L., Slashyeva E.A., Osenniy V.Ya. and Klyuyev E.S. *Osnovni napryamki vikoristannya vidhodiv flotaciyi Chervonogradskoyi CZF v budivelnij galuzi* [The main areas of application of wash slurry wastes in building branch of industry]. *Geotekhnichna mehanika : mizhgaluz. zb. nauk. pr.* [Geotechnical Mechanics: interdisciplinary coll. of sc. pap.]. Dnipropetrovsk : IGTM NANU Publ., 2012, vol. 99, pp. 220–227. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 15.04.2024.

УДК 614.8

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.111.1081

ПРОБЛЕМАТИКА ПРОВЕДЕННЯ АНАЛІЗУ ВИРОБНИЧОГО ТРАВМАТИЗМУ В ГАЛУЗІ ЛЕГКОЇ ТА ТЕКСТИЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

СОКОЛАН Ю. С., канд. техн. наук, доц.

Кафедра будівництва та цивільної безпеки, Хмельницький національний університет, вул. Інститутська, 11, 29000, Хмельницький, Україна, тел. +38 (0382) 670-276, e-mail: sokolan.julia@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0273-5719

Анотація. *Постановка проблеми.* Одна з основних функцій системи управління охороною праці на підприємствах – це аналіз виробничого травматизму та професійних захворювань, які виникають у працівників унаслідок виконання трудових обов'язків у випадку неналежного стану охорони праці на підприємстві. Галузь легкої та текстильної промисловості в Україні характеризується невизначеністю умов праці, оскільки вона базується в більшості на малих підприємствах. Відсутність аналізу виробничого травматизму та причин його виникнення ускладнює процес розроблення заходів з охорони праці для підприємств, які працюють відповідно у галузі легкої та текстильної промисловості. *Мета статті* – виявлення причин ускладнення процесу аналізу виробничого травматизму та проблематики аналізу причин виникнення травматизму в галузі легкої та текстильної промисловості. *Висновки.* Аналіз виробничого травматизму в галузі легкої та текстильної промисловості дозволив виокремити тенденцію до зростання кількості нещасних випадків у цій галузі. Враховуючи, що протягом останніх чотирьох років Державна служба статистики не виокремлює галузь легкої промисловості в окремий пункт збору статистичних даних, це ускладнює аналіз травматизму у цій галузі. Також встановлено, що протягом 2020–2024 років у Держпраці були зареєстровані смертельні та групові нещасні випадки, які за причиною не пов'язані з роботою в рамках галузі легкої та текстильної промисловості, але були класифіковані як такі внаслідок того, що власне виробництво займається легкою промисловістю. При цьому вид робіт, які виконували потерпі, більше класифікується як будівельний або вантажний, аніж як виконання робіт, пов'язаних із пошивом одягу. В результаті аналізу встановлено основні проблеми, які перешкоджають виокремленню точних причин нещасних випадків у галузі легкої та текстильної промисловості.

Ключові слова: *виробничий травматизм; аналіз нещасних випадків; причини нещасних випадків; Державна служба з питань праці України; Державна служба статистики України; легка та текстильна промисловість*

PROBLEMS OF ANALYZING OCCUPATIONAL INJURIES IN THE LIGHT AND TEXTILE INDUSTRIES

SOKOLAN Yu.S., *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

Department of Construction and Occupational Safety, Khmelnytskyi National University, 11, Intyutaska St., Khmelnytskyi, 29000, Ukraine, tel. +38 (0382) 670-276, e-mail: sokolan.julia@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-0273-5719

Abstract. *Problem statement.* One of the main functions of the occupational health and safety management system at enterprises is to analyze occupational injuries and diseases that occur to employees as a result of their work duties in the event of an inadequate state of occupational health and safety at the enterprise. The light and textile industry in Ukraine is characterized by uncertain working conditions, as it is mostly based on small enterprises. The lack of analysis of occupational injuries and their causes complicates the process of developing occupational safety and health measures for enterprises operating in the light and textile industry, respectively. *The purpose of the article* is to identify the reasons for the complication of the process of analyzing occupational injuries and the issues of analyzing the causes of injuries in the light and textile industries. *Conclusions.* The analysis of occupational injuries in the light and textile industry has revealed an upward trend in the number of accidents in this sector. Given that over the past four years, the State Statistics Service has not separated the light industry into a separate statistical data collection point, this makes it more difficult to analyze injuries in this area. It was also found that during 2020–2024, the State Labor Service registered fatal and group accidents that were not related to work in the light and textile industry, but were classified as such because the production itself is engaged in light industry. At the same time, the type of work performed by the

victim is more likely to be classified as construction or cargo rather than tailoring. The analysis identified the main problems that prevent the identification of the exact causes of accidents in the light and textile industry.

Keywords: *occupational injuries; accident analysis; accident causes; State Labor Service of Ukraine; State Statistics Service of Ukraine; light and textile industry*

Постановка проблеми. Одна з основних функцій системи управління охороною праці на підприємствах – аналіз виробничого травматизму та професійних захворювань, які виникають у працівників унаслідок виконання трудових обов'язків у випадку неналежного стану охорони праці на підприємстві.

Для зменшення виробничого травматизму необхідно впроваджувати на підприємстві низку заходів та методів. Але перш ніж впроваджувати заходи з охорони праці, такі як, наприклад, навчання працівників в питаннях охорони праці, необхідно виявити причини та закономірності виникнення нещасних випадків та виробництва та професійних захворювань.

Галузь легкої та текстильної промисловості в Україні характеризується невизначеністю умов праці, оскільки вона базується в більшості на малих підприємствах. У цьому випадку підприємства такого розміру досить часто встановлюють власні умови праці, які сильно відрізняються. Цей фактор дуже ускладнює проведення аналізу виробничого травматизму та професійних захворювань.

Актуальності набуває завдання виокремлення факторів, які впливають на кількість нещасних випадків на виробництвах легкої та текстильної промисловості.

Аналіз публікацій. У роботах [1; 2] проведено аналіз виробничого травматизму в галузях нафтогазодобувної та харчової промисловості. У праці [3] виконано аналіз стану виробничого травматизму загалом по промисловостях в умовах пандемії COVID-19.

У той же час відсутній окремий аналіз виробничого травматизму та причин його виникнення окремо в галузі легкої та текстильної промисловості в Україні протягом останніх близько 10 років.

Відсутність такого аналізу ускладнює процес розроблення заходів з охорони праці для підприємств, які діють відповідно в галузі легкої та текстильної промисловості.

Мета статті – виявлення причин ускладнення процесу аналізу виробничого травматизму та проблематики аналізу причин виникнення травматизму в галузі легкої та текстильної промисловості.

Результати досліджень. Державна служба статистики України щорічно проводить збір та оприлюднення статистичної інформації. До такої статистичної інформації відносять дані стосовно економічної, демографічної, соціальної статистики, а також багатогалузевої статистичної інформації.

Одним з об'єктів збору та обробки статистичної інформації Державною службою статистики в Україні постає саме травматизм на виробництві [4]. Подальший аналіз статистичних даних щодо виробничого травматизму в першу чергу розподіляється по регіонах та по галузях промисловості України.

У таблиці 1 наведено статистичну інформацію щодо виробничого травматизму в Україні по галузях промисловості, а у таблиці 2 наведено статистичні дані стосовно смертельних нещасних випадків та їх розподілу за галузями виробництва.

Слід звернути увагу, що Державна служба статистики з 2019 року перестала збирати та обробляти статистичні дані щодо виробничого травматизму в галузі легкої та текстильної промисловості у формі окремих статистичних даних. Із 2020 року ці дані збираються, але подаються у формі інших галузей промисловості. Тому для аналізу виробничого травматизму у галузі легкої промисловості також були оброблені статистичні дані Державної служби України з питань праці [5]. Таке винесення травматизму в галузі легкої промисловості також ускладнює аналіз.

Для кращого розуміння та подальшого аналізу статистичної інформації щодо нещасних випадків визначено частку нещасних випадків у галузі легкої та

текстильної промисловості від загальної кількості випадків в Україні. Результати наведені в таблиці 3.

Таблиця 1

Загальний стан виробничого травматизму за 2014–2020 рр. по галузях нагляду [4; 5]

Галузь нагляду	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Вугільна	2 034	752	864	780	725	690	524
Гірничорудна та нерудна	220	207	192	201	173	160	141
Нафтогазодобувна та геологорозвідка	19	11	23	20	25	30	19
Енергетика	135	113	136	121	118	121	137
Будівництво	263	206	184	224	205	244	212
Котлонагляд, підйомні споруди	20	10	20	16	15	14	23
Машинобудування	507	311	313	336	364	270	230
Металургійна	340	268	255	260	244	199	186
Хімічна	132	137	146	128	105	129	97
Транспорт	423	396	364	393	338	293	351
Зв'язок	74	60	60	57	76	47	54
Газова промисловість	51	48	36	35	32	28	46
Житлокомунгосп	171	141	167	155	140	135	132
Агропромисловий комплекс	691	602	578	537	503	517	407
Деревообробна промисловість	76	83	51	76	67	53	55
Легка та текстильна промисловість	25	17	22	23	38	22	14
Соціально-культурна сфера та торгівля	1 137	898	1 017	951	958	924	3 493
Разом	6 318	4 260	4 428	4 314	4 126	3 876	6 121

Таблиця 2

Кількість смертельних нещасних випадків за 2014–2020 рр. по галузях нагляду [4; 5]

Галузь нагляду	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Вугільна	99	19	20	23	21	20	20
Гірничорудна та нерудна	12	16	23	9	22	16	15
Нафтогазодобувна та геологорозвідка	2	4	5	3	1	3	1
Енергетика	26	18	15	16	11	20	25
Будівництво	48	35	41	54	54	61	47
Котлонагляд, підйомні споруди	6	1	6	9	8	7	10
Машинобудування	23	21	19	19	19	20	14
Металургійна	25	14	12	13	21	13	14
Хімічна	15	16	10	5	13	15	7
Транспорт	71	54	70	65	88	75	76
Зв'язок	8	8	1	2	3	0	0
Газова промисловість	8	2	2	2	0	3	5
Житлокомунгосп	9	14	33	17	17	20	19
Агропромисловий комплекс	95	84	83	75	67	80	71
Деревообробна промисловість	9	5	2	7	5	5	5
Легка та текстильна промисловість	0	0	0	1	1	1	0
Соціально-культурна сфера та торгівля	92	64	58	46	58	63	323
Разом	548	375	400	366	409	422	652

З отриманих даних видно, що загалом у легкій та текстильній промисловості України, характерний низький рівень виробничого травматизму, який становить менше 0,01 % від загальної частки. Але, якщо подати дані у графічному вигляді

(рис. 1), помітно тенденцію до зростання виробничого травматизму у цій галузі.

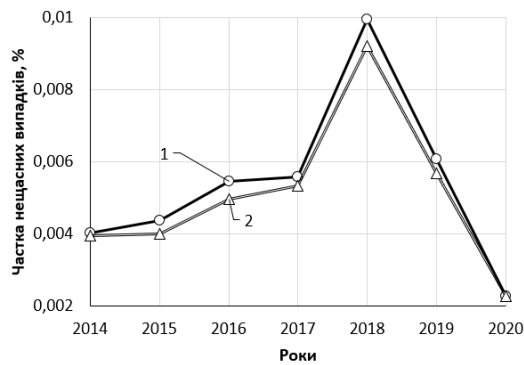
На рисунку 1 спостерігається стрімке падіння виробничого травматизму у галузі легкої та текстильної промисловості у 2020 році. Це в першу чергу, пояснюється карантинними заходами, запровадженими в

Україні у 2020 році [3], коли більшість підприємств протягом першого півріччя повністю або частково призупинили свою діяльність.

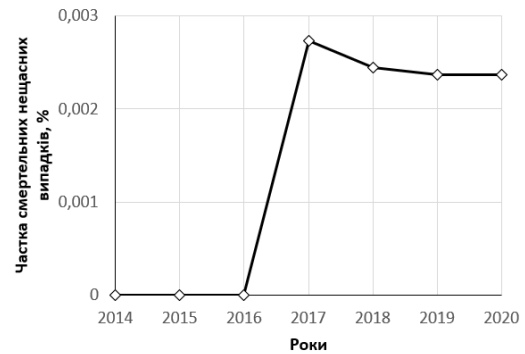
Таблиця 3

Частка нещасних випадків у галузі легкої та текстильної промисловості від загальної кількості нещасних випадків

Травматизм у легкій та текстильній промисловості, %	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Частка травматизму без урахування смертельних випадків	0,0040	0,0044	0,0055	0,0056	0,0099	0,0061	0,0022
Частка смертельних нещасних випадків	0	0	0	0,0027	0,0024	0,0024	0,0024
Частка травматизму від загальної кількості	0,0039	0,0040	0,0049	0,0053	0,0092	0,0057	0,0022



а



б

Рис. 1. Частка нещасних випадків у галузі легкої та текстильної промисловості від загальної кількості нещасних випадків в Україні:

а – нещасні випадки із врахуванням (1) та без врахування (2) смертельних; б – смертельні нещасні випадки

Із графічного подання (рис. 1) стає очевидною тенденція зростання нещасних випадків протягом 2017–2019 років. Також із рисунку 1, б видно, що зберігається тенденція до зростання кількості смертельних нещасних випадків у галузі легкої та текстильної промисловості у порівнянні із 2014–2016 роками.

Тобто можна зробити висновок, що, не зважаючи на низький відсоток частки нещасних випадків у легкій та текстильній промисловості від загального виробничого травматизму в Україні, цій галузі характерна тенденція до зростання виробничого травматизму. Тому питання збору статистичної інформації залишається актуальним і рішення Державної служби статистики України виділяти травматизм у цій галузі в пункт «Інші» в аналізі

виробничого травматизму – достатньо спірне.

За даними Державної служби України з питань праці [5], основними причинами нещасних випадків в аналізованій ситуації стала дія предметів та деталей, що рухаються, розлітаються, обертаються.

Крім того, Держпраці оприлюднило статистичні дані стосовно кількості потерпілих внаслідок нещасних випадків, пов'язаних із виробництвом за перше півріччя 2024 року [6], (рис. 2). Як видно з рисунка 2, частка потерпілих у галузі легкої та текстильної промисловості зросла з 0,004–0,01 % від загальної кількості до 1 %. Тобто це свідчить про зростання кількості потерпілих від нещасних випадків у цій галузі у 100 разів.

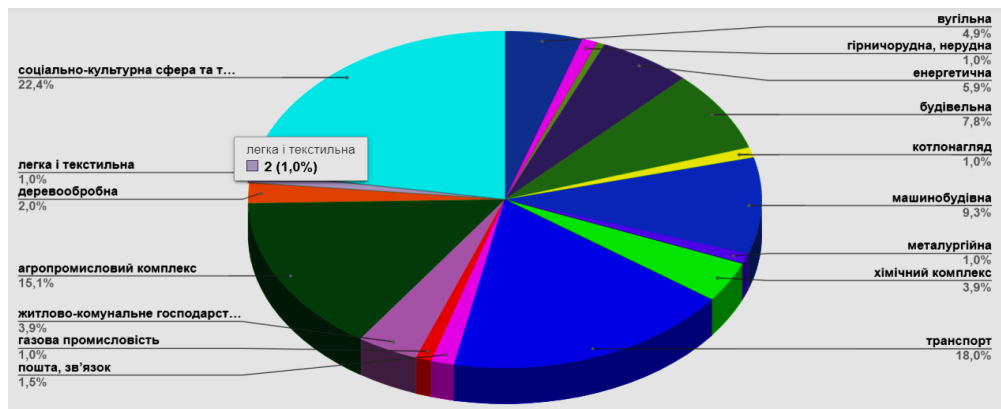


Рис. 2. Кількість потерпілих від нещасних випадків по галузях промисловості за 6 місяців 2024 року [6]

Хоча Держпраці відмічає двох потерпілих від нещасних випадків у зведеному графіку (рис. 2), ця інформація суперечить інформації Держпраці, в якій деталізуються оперативні дані щодо нещасних випадків зі смертельним наслідком та групових нещасних випадків [7].

За зазначеною інформацією, у 2024 році в галузі легкої та текстильної промисловості були зареєстровані:

- груповий нещасний випадок із кількістю потерпілих дві особи у Львівській області, який стався 18.01.2024 року (дві швачки отримали травми на автодорозі внаслідок ДТП);

- груповий нещасний випадок у Харківській області із кількістю потерпілих дві особи, який стався 23.01.2024 року, коли швачки отримали поранення внаслідок ракетного обстрілу;

- смертельний нещасний випадок у Чернівецькій області від 19.06.2024 року, коли «ФОП за договором підряду виконував будівельні роботи із реконструкції пожежного колодязя в інтересах ТОВ «_____» та, перебуваючи в колодязі, смертельно отруївся невідомими газами» [7].

Останній наведений смертельний нещасний випадок був класифікований за КВЕД як легка і текстильна промисловість, але стосувався проведення будівельних робіт.

За інформацією від Держпраці [7], у 2023 році не було зареєстровано групових або смертельних нещасних випадків у галузі

легкої та текстильної промисловості. У 2022 році зареєстровано один смертельний нещасний випадок у Рівненській області від 18.10.2022 року, коли водій загинув унаслідок ДТП повертаючись із відрадження.

У 2022 році в галузі легкої та текстильної промисловості зареєстровані такі смертельні та/або групові нещасні випадки:

- у Житомирській області від 08.07.2021 р., коли механік провалився під час огляду покрівлі та впав з висоти 10 метрів на бетонну підлогу;

- нещасний випадок у Волинській області від 25.06.2021 року, коли впали пачки дошок на вантажника з висоти 3,5 м, внаслідок чого працівник отримав смертельні травми [7].

Оскільки наведені нещасні випадки не пов'язані з виконанням трудових обов'язків саме у сфері виготовлення одягу та роботи із текстильним обладнанням, постає питання точності класифікації цих випадків та їх віднесення до галузі легкої та текстильної промисловості.

Висновки

Аналіз виробничого травматизму в галузі легкої та текстильної промисловості дозволив виокремити тенденцію до зростання в ній кількості нещасних випадків. Враховуючи, що протягом останніх чотирьох років Державна служба статистики не виокремлює галузь легкої промисловості в окремий пункт збору статистичних даних, це зумовлює загальне ускладнення аналізу травматизму у цій галузі.

Також встановлено, що протягом 2020–2024 років у Держпраці були зареєстровані смертельні та групові нещасні випадки, які за причиною не пов'язані з роботою в рамках сфери легкої та текстильної промисловості, але були класифіковані як такі, тому що власне виробництво займається легкою промисловістю. При цьому вид робіт, які виконували потерпілі,

більше класифікується як будівельний або вантажний, аніж як виконання робіт, пов'язаних із пошивом одягу.

У результаті аналізу встановлено основні проблеми, які перешкоджають виокремленню точних причин нещасних випадків у галузі легкої та текстильної промисловості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кружилко О. Є., Майстренко В. В., Лях Ю. М., Полукаров О. І., Демчук Г. В. Дослідження виробничого травматизму на підприємствах нафтогазовидобувної промисловості України. *Енергозбереження та промислова безпека: виклики та перспективи* : науково-технічний збірник : матер. II Міжнар. наук.-практ. конф. 2019. С. 269–276.
2. Челябієва В. М., Костенко І. А. Аналіз причин травматизму у харчовій галузі. *Таврійський науковий вісник. Серія : Технічні науки*. № 4. 2022. С. 110–116.
3. Нагорна А. М., Савенкова Н. В. Стан виробничого травматизму в Україні в умовах пандемії COVID-19. *Український журнал з проблем медицини праці*. 2021. № 17 (3). С. 160–174.
4. Травматизм на виробництві в Україні : веб-сайт. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 03.07.2024).
5. Легка та текстильна промисловість. Причини нещасних випадків. Державна служба України з питань праці : веб-сайт. URL: <https://dsp.gov.ua/coa/lehka-promyslovist/> (дата звернення: 04.07.2024).
6. Оперативна інформація. Державна служба України з питань праці : веб-сайт. URL: <https://dsp.gov.ua/operativna-informatsiia/> (дата звернення: 05.07.2024).
7. Оперативні дані про нещасні випадки зі смертельним наслідком та групові нещасні випадки, пов'язані з виробництвом, зареєстровані Держпраці : веб-сайт. URL: https://docs.google.com/spreadsheets/d/1nurNVy_10NOqJ9GujloAhnkRNG3vSGoZoLGYgeTw-O4/edit?gid=1228031954#gid=1228031954 (дата звернення: 05.07.2024).

REFERENCES

1. Kruzhylyko O.Ye., Maistrenko V.V., Lyakh Yu.M., Polukarov O.I. and Demchuk G.V. *Doslidzhennya vyrobnychogo vyrobnychogo travmatyzmu na pidpryemstvah naftogazovydobuvnoi promyslovosti Ukrainy* [Study of occupational injuries at the enterprises of the oil and gas industry of Ukraine]. *Energozberzhennya ta promislova bezpeka : vikliki ta perspektivi : naukovo-tehnichniy zbirnik : materialy II Mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferentsiyi* [Energy Saving and Industrial Safety : challenges and prospects : sc. and tech. coll. : materials of the II International sc. and pract. conf.]. 2019, pp. 269–276. (in Ukrainian).
2. Cheliabieva V.M. and Kostenko I.A. *Analiz prychn travmatyzmu u harchoviy galuzi* [Analysis of the causes of injuries in the food industry]. *Tavriyskiy naukovyi visnyk. Seriya : Tehnichni nauky* [Tauride Scientific Bulletin. Series : Technical Sciences]. No. 4, 2022, pp. 110–116. (in Ukrainian).
3. Nagorna A.M. and Savenkova N.V. *Stan vyrobnychogo travmatyzmu v Ukraini v umovah pandemii COVID-19* [The state of occupational injuries in Ukraine in the context of the COVID-19 pandemic]. *Ukrainskiy zhurnal z problem medycyny pratci* [Ukrainian Journal of Occupational Medicine]. 2021, no. 17 (3), pp. 160–174. (in Ukrainian).
4. *Travmatyzm na vyrobnytctvi v Ukraini* [Occupational injuries in Ukraine] : web-site. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (accessed: 03.07.2024). (in Ukrainian).
5. *Legka ta tekstylna promyslovist. Prychyny neshchasnyh vypadkiv. Derzhavna sluzhba Ukrainy z pytan pratci* [Light and textile industry. Causes of accidents. State Labor Service of Ukraine] : web-site. URL: <https://dsp.gov.ua/coa/lehka-promyslovist/> (accessed: 04.07.2024). (in Ukrainian).
6. *Operativna informatsiia. Derzhavna sluzhba Ukrainy z pytan pratci* [Operational information. State Labor Service of Ukraine] : web-site. URL: <https://dsp.gov.ua/operativna-informatsiia/> (accessed: 05.07.2024). (in Ukrainian).
7. *Operativni dani pro neshchasni vypadky zi smertelnym naslidkom ta grupovi neshchasni vypadky, poviazani z vyrobnytctvom, zareestrovani Derzhpratci* [Operational data on fatal and group work-related accidents registered by the State Labor Service] : web-site. URL: https://docs.google.com/spreadsheets/d/1nurNVy_10NOqJ9GujloAhnkRNG3vSGoZoLGYgeTw-O4/edit?gid=1228031954#gid=1228031954 (accessed: 05.07.2024). (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 02.04.2024.

УДК 625.7.12:004.9

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.117.1082

МЕТОДИКА БУДІВЕЛЬНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МІСЬКИХ ВУЛИЦЬ ТА ДОРІГ

ТРЕГУБ О. В.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
ЛАНДО Є. О.², канд. техн. наук, доц.,
БАЛАШОВА Ю. Б.³, канд. техн. наук, доц.,
ШУТИНА Г. С.⁴, канд. техн. наук, доц.,
САМКО Б. І.⁵, маг.

^{1*} Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: regub.olexandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6436-352X

² Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: lando.evgen@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-2608-931X

³ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: balashova.yuliia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-2286-9263

⁴ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: ishutina.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0665-3040

⁵ Кафедра автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, e-mail: bohdan.samko@gmail.com

Анотація. Постановка проблеми. Нові виклики у будівництві автомобільних доріг вимагають застосування сучасних та підтверджених кращою світовою практикою підходів до проектування та керування процесами будівництва об'єктів автодорожньої інфраструктури із залученням новітніх технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM). Впровадження BIM-технологій вимагає досліджень для систематизації інформації, прогнозування та оцінення результатів, розроблення методики моделювання. **Мета статті** – висвітлити методику будівельного інформаційного моделювання міських вулиць та доріг. **Результати досліджень.** Запропоновано методику будівельного інформаційного моделювання на прикладі ділянок вулично-дорожньої мережі у місті Дніпро. За геопросторовими даними дистанційного зондування Землі сформовано цифрові моделі рельєфу та місцевості у програмі InfraWorks, розроблено концептуальні моделі міських вулиць та доріг. Моделі концептуальних рішень експортовані до програми Civil 3D, де за даними наземної геодезичної зйомки уточнено модель рельєфу, виконано її аналіз, розроблено плани трас, поздовжні та поперечні профілі вулиць та доріг. Детально розроблені та скоординовані проектні рішення доріг у CIVIL 3D експортовані до програми InfraWorks з метою побудови цілісної автодорожньої інфраструктури. Проведено аналіз просторової плавності трас та перевірено відстані видимості на дорогах, аналіз поверхневого водовідведення за будівельною інформаційною моделлю. Розроблені у програмі Revit моделі шляхопроводу та мосту експортовані до моделі автодорожньої інфраструктури. Змодельовано засоби організації дорожнього руху. Інструментами «Traffic Simulation» програми InfraWorks виконано моделювання автотранспортних потоків на автомобільних дорогах і транспортних розв'язках досліджуваної вулично-дорожньої мережі з урахуванням фактичної інтенсивності руху. Будівельні інформаційні моделі перевірені щодо конструктивних недоліків у програмі Nawisworks. **Висновок.** Запропонована методика проектування міських вулиць та доріг за BIM-технологією передбачає поетапне розроблення цифрової моделі з використанням програм автоматизованого проектування автодорожньої інфраструктури з необхідним рівнем деталізації на відповідному етапі проектування.

Ключові слова: BIM-технології; будівельне інформаційне моделювання; міські вулиці та дороги; автодорожня інфраструктура; цифрова модель рельєфу

METHODOLOGY OF BUILDING INFORMATION MODELING OF URBAN STREETS AND ROADS

TREGUB O.V.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
LANDO Ye.O.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
BALASHOVA Yu.B.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
ISHUTINA H.S.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
SAMKO B.I.⁵, *Master's degree*

^{1*} Department of Highways, Geodesy, and Land Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: tregub.olexandr@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-6436-352X

² Department of Highways, Geodesy, and Land Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: lando.evgen@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-2608-931X

³ Department of Highways, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: balashova.yuliia@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-2286-9263

⁴ Department of Highways, Geodesy and Land Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: ishutina.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-0665-3040

⁵ Department of Highways, Geodesy, and Land Management, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, e-mail: bohdan.samko@gmail.com

Abstract. Problem statement. New challenges in road construction require the application of modern and globally recognized best practices in the design and management of road infrastructure construction processes, involving the use of the latest Building Information Modeling (BIM) technologies. The implementation of BIM technologies necessitates conducting research to systematize information, forecast and evaluate outcomes, and develop a modeling methodology. **The purpose of the article** is to develop a methodology for Building Information Modeling of urban streets and roads. **Research Results.** The proposed methodology for Building Information Modeling is demonstrated using sections of the street and road network in the city of Dnipro. Digital terrain and site models were created in the InfraWorks software based on geospatial data from remote sensing. Conceptual models of urban streets and roads were developed. The conceptual models were exported to Civil 3D, where the terrain model was refined using ground survey data, analyzed, and used to develop route plans, longitudinal and cross profiles of streets and roads. The detailed and coordinated road design solutions in Civil 3D were exported to InfraWorks to build an integrated road infrastructure. An analysis of the spatial smoothness of routes and sight distances on roads was conducted using the building information model. Models of an overpass and bridge developed in Revit were exported to the road infrastructure model. Traffic management measures were modeled. Using the "Traffic Simulation" tools in InfraWorks, vehicle traffic flows on roads and interchanges of the studied street and road network were simulated, taking into account the actual traffic intensity. The building information models were checked for structural deficiencies using Navisworks software. **Conclusion.** The proposed methodology for designing urban streets and roads using BIM technology involves the step-by-step development of a digital model utilizing software for the automated design of road infrastructure with the required level of detail at each stage of the design process.

Keywords: *BIM technologies; building information modeling; city streets and roads; highway infrastructure; digital terrain model*

Постановка проблеми. Нові виклики у будівництві автомобільних доріг вимагають застосування сучасних та підтверджених кращою світовою практикою підходів до проєктування та керування процесами будівництва об'єктів автодорожньої інфраструктури із залученням новітніх технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM). BIM-технології дозволяють розробляти і використовувати

інформацію про об'єкти інфраструктури на всіх етапах життєвого циклу у структурованому вигляді в єдиній цифровій моделі, що сприятиме: надійному і ресурсозберігаючому проєктуванню та експлуатації вулично-дорожньої мережі, транспортних розв'язок, підземних споруд та інженерних мереж в умовах щільної забудови; ефективній організації руху, підвищенню пропускну здатності доріг та

рівня безпеки на основі даних інформаційного моделювання транспортних потоків з урахуванням росту інтенсивності руху та перспективного розвитку міст [1].

Упровадження технології будівельного інформаційного моделювання вимагає проведення досліджень, зокрема, розроблення методики будівельного інформаційного моделювання міських вулиць та доріг.

Виділення невирішеної проблеми. Наразі BIM-технології в Україні здебільшого використовуються у проектуванні будівель. У повній мірі BIM-технології у практиці проектування, будівництва та експлуатації автомобільних доріг не застосовуються [2].

Для впровадження концепції технології будівельного інформаційного моделювання в Україні [3] необхідне: проведення дослідницької роботи для систематизації інформації, прогнозування та оцінення результатів; розроблення нормативних документів; запровадження систем і платформ; підготовка фахівців з BIM-технологій.

Мета статті – описати методику будівельного інформаційного моделювання міських вулиць та доріг.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З розвитком IT-технологій та появою будівельного інформаційного моделювання відбулась цифрова трансформація, яка вплинула на будівельне виробництво у світі, підвищивши показники продуктивності, надійності та якості об'єктів будівництва [4]. BIM поєднало комп'ютерне моделювання прототипу об'єкта будівництва за життєвими циклами з інформацією про об'єкт, координацію дій учасників проекту та співпрацю в узгодженні рішень із замовником, що дозволяє ефективно керувати проектом зі значним обсягом цифрових даних [5–8]. Незабаром BIM може стати світовим стандартом для розроблення проектів транспортної інфраструктури [9–10].

Кращий світовий досвід застосування BIM-підходів у розвинених країнах світу, таких як США, Великобританія,

Нідерланди, Сінгапур, Фінляндія, Іспанія та ін. дозволив Технічному комітету ISO/TC 59 – «Buildings and civil engineering works» та SC 13 – «Organization of information about construction works» узагальнити результати та розробити міжнародні стандарти [11–13]. Британський стандарт PAS 1192-2:2013 встановлює вимоги до управління інформацією у проектах будівництва з використанням BIM [14].

Група українських науковців та інженерів запропонувала Концепцію впровадження BIM в Україні [4], де проаналізовані виклики, які потребують рішень. Зокрема, зазначено про необхідність зміни підходів до процесів розроблення, зберігання та обміну інформації, її використання, керування об'єктами будівництва на різних етапах життєвого циклу, гармонізації національних норм та стандартів з європейськими та ін. У зв'язку з цим розроблено проект ДСТУ EN ISO 23386 з будівельного інформаційного моделювання [15].

Виклад основного матеріалу. У цьому дослідженні розглянуто методику будівельного інформаційного моделювання вулиць та доріг на прикладі магістральних вулиць загальноміського значення у місті Дніпро – пр. Науки та вул. Січеславська Набережна з інтенсивністю руху близько 1 400 авт./год. Кількість смуг руху проїзної частини 4–6. Розрахункові швидкості руху автотранспорту – 60 км/год.

Проектування автодорожньої інфраструктури за BIM-технологією передбачало розроблення інформаційних моделей комплексу інженерних споруд як цілісної інформаційної системи, що містить геометричні, фізичні, функціональні та інші характеристики, на основі яких розробляється документація, котра супроводжує всі етапи життєвого циклу об'єкта.

На першому етапі концептуального проектування сформовано попередні моделі рельєфу та території за геопросторовими даними дистанційного зондування Землі та інтегрованих функцій дешифрування супутникових знімків у «Model Builder»

програми InfraWorks. За тривимірними моделями проаналізовано характер рельєфу. Інструментами «Component Road» InfraWorks змодельовано існуючі вулиці та дороги.

Для будівельного інформаційного моделювання нових доріг у програмі InfraWorks використано інструменти оптимізації для трасування та профілювання, що дозволило за встановленими критеріями проектування отримати альтернативні концептуальні рішення доріг (рис. 1, 2).



Рис. 1. Моделювання ділянок вулично-дорожньої мережі на пр. Науки у м. Дніпро



Рис. 2. Моделювання магістральної вулиці районного значення на пр. Науки

Для побудови моделей доріг використано переваги тривимірного моделювання: для побудови елементів плану та поздовжнього профілю проводили просторовий аналіз плавності дороги, її узгодженість із ландшафтом та забудовою у 3D-моделі; аналіз профілів у інтерактивному режимі у вікні «Вигляд профілю» з використанням функції «Активного відслідковування»; контролювали пікетажне положення і висотні відмітки елементів траси (рис. 3).

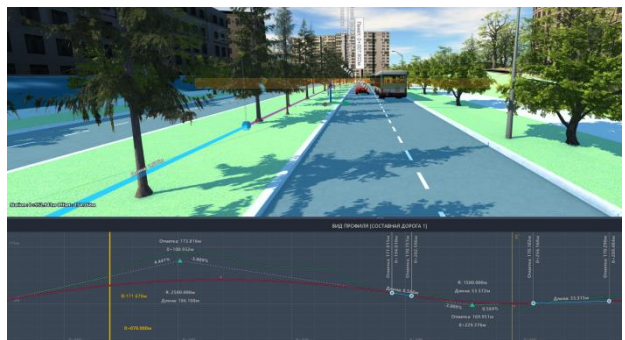
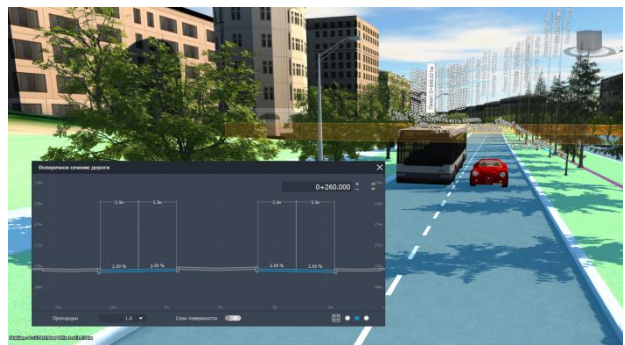


Рис. 3. Інтерактивний контроль елементів плану, поздовжнього та поперечного профілів

Динамічний зв'язок між елементами моделі дозволив коригувати параметри дороги та одразу отримувати відгук у зміні моделі: додавати кути повороту траси та переломи профілю, вводити значення радіусів вертикальних кривих, нахили проектної лінії та висотні відмітки контрольних точок на профілі для прокладення проектної лінії. Виконано укрупнений попередній розрахунок обсягу дорожніх матеріалів.

На другому етапі розроблено детальні проектні рішення та робочі креслення автодоріг із використанням програми AutoCAD Civil 3D. Попередньо у файлі CIVIL 3D налаштовано систему координат. У моделюванні об'єктів інфраструктури,

розташованих у місті Дніпро, прийняті: система координат UTM WGS84, координатна зона № 36 північної півкулі; код UTM84-36N.

Розроблена в InfraWorks концептуальна модель була експортована у програму Civil 3D у форматі IMX. Перед завантаженням моделі InfraWorks обрано такі об'єкти для імпорту: поверхні рельєфу та існуючих дорожніх покриттів, траси доріг.

Для підвищення точності попередньо сформованої за даними дистанційного зондування цифрової моделі рельєфу завантажено дані з файла координат точок (x, y, z) наземної геодезичної зйомки автомобільних доріг та рельєфу.

Виконано аналіз моделі рельєфу. Тривимірний поверхні рельєфу відображалась у вигляді горизонталей та сітки трикутників – TIN-поверхні. Переріз горизонталей рельєфу налаштований у «Surface properties» – «Surface style».

У робочому просторі «Planning and Analysis» під'єднано растр супутникового знімка та обрано прийняту у проєкті систему координат.

Після детального аналізу трас та оцінення їх відповідності вимогам будівельних державних норм, інструментами редагування та компоновки вносились зміни до параметрів колових та перехідних кривих. Траси доріг у Civil 3D являють собою складні динамічні лінійні об'єкти, у яких зміна будь-якого елемента викликає автоматичну зміну параметрів усіх взаємопов'язаних із ним інших елементів дороги. Це дозволило оперативно вносити зміни на будь-якій стадії проєктування доріг. Пікетаж трас розраховувався автоматично програмою.

Проєктуючи заокруглення підбирали оптимальні функції для побудови існуючої траси дороги згідно з координатами точок осі траси, визначених наземними методами геодезичної зйомки. Для цього використано такі інструменти програми автоматизованого проєктування: «Плаваючі криві», «З'єднання кривих через точку», «Пряма ділянка – пряма ділянка з кривими», «Фіксовані криві найкращого вписування»,

«Плаваюча S-подібна крива з перехідними кривими».

Визначено, що ефективний інструмент, який дозволяє оптимально підбирати параметри заокруглення, – це «Фіксовані криві найкращого вписування». Функція базується на методі регресійного аналізу та будує криву апроксимації за координатами точок осі траси. Підбір параметрів заокруглення існуючої дороги полягав у визначенні радіусів колових кривих, типу і довжини перехідних кривих.

Бібліотека програми CIVIL 3D вміщує такі типи перехідних кривих: клотоїди, синусоїди, кубічні параболи, біквдратичні. У практиці проєктування, як правило, застосовують клотоїдні перехідні криві. Для побудови траси дороги за координатами точок, отриманих за результатами геодезичної зйомки, використано клотоїдні та синусоїдальні перехідні криві.

Для побудови поздовжнього профілю використано інструменти «Створення профілю по поверхні» відповідно до обраної траси та цільових поверхонь – рельєфу та існуючих дорожніх покриттів. Автоматично програмою сформовані попередні креслення поздовжніх профілів із лініями поверхонь рельєфу та існуючого дорожнього покриття.

Для побудови проєктної лінії поздовжнього профілю використано функції, що дозволили оптимально описати поверхні існуючих дорожніх покриттів з урахуванням контрольних точок на перехрестях, примиканнях доріг та транспортних розв'язках: «Вертикальні криві найкращого вписування», що визначаються шляхом регресійного аналізу при апроксимації точок вертикального профілю; «Параболічні вертикальні криві»; «Вертикальні криві прокладені через контрольну точку та нахил».

Конструкції поперечних профілів розроблені інструментами «Assembly» та «Tool Palettes». Тривимірне моделювання дорожнього полотна виконане автоматично на основі розроблених поперечних профілів із застосуванням функції «Corridor».

Таким чином, у CIVIL 3D розроблено плани доріг, робочі креслення поздовжніх та

поперечних профілів, сформовано відомості елементів, плани вертикального планування, обчислено обсяги земляних робіт.

На третьому етапі детально розроблені та скоординовані проектні рішення доріг у CIVIL 3D були експортовані до моделі місцевості у InfraWorks з метою отримання цілісної дорожньої інфраструктури, узгодження із забудовою та інженерними комунікаціями, доповнення штучними спорудами, елементами благоустрою, озеленення і моделювання руху транспорту.

Параметри водозбірних басейнів та аналіз поверхневого водовідведення виконані за допомогою інструменту «Watershed» на основі сформованих поверхонь автодоріг і територій.

Виконано просторовий аналіз проектного рішення в цілому, оцінено плавність траси та видимість на перехрестях і примиканнях за ВІМ-моделями (рис. 4, 5).



Рис. 4. Інформаційна модель перехрестя пр. Науки – вул. Ніла Армстронга



Рис. 5. Оцінка просторової плавності та відстаней видимості під час руху на автомобілі, моделювання транспортних потоків по пр. Науки

Інструментами «Traffic Simulation» InfraWorks виконано моделювання автотранспортних потоків на дорогах і транспортних розв'язках досліджуваної вулично-дорожньої мережі з урахуванням фактичної інтенсивності руху (рис. 6).



Рис. 6. Моделювання транспортних потоків на кільцевій розв'язці

Згідно із запропонованою методикою розроблено модель ділянки вулично-дорожньої мережі з неповною транспортною розв'язкою за типом «накопичувальний ромб» зі шляхопроводом на підході до Центрального мосту по вул. Січеславська Набережна у місті Дніпро (рис. 7).



Рис. 7. Вид зверху ділянки вулично-дорожньої мережі та транспортної розв'язки на підході до Центрального мосту



Рис. 8. Інформаційна модель Центрального мосту через річку Дніпро

Попереднє моделювання дорожнього мосту та шляхопроводу виконане інструментами «Bridge structures» з урахуванням конструктивних особливостей та розмірів прогонових будов, опор та фундаментів споруд (рис. 8). Детально розроблені у програмі Revit моделі мосту та шляхопроводу експортовані до моделі дорожньої інфраструктури.

Змодельовані засоби організації дорожнього руху та автотранспортні потоки (рис. 9, 10).



Рис. 9. Транспортна розв'язка на підході до Центрального мосту у м. Дніпро



Рис. 10. Міська дорога по вул. Січеславська Набережна у м. Дніпро

Інструментами «Environment» у моделі вулично-дорожньої мережі змодельовано елементи благоустрою території: пішохідні переходи, зупинки громадського транспорту, малі архітектурні форми, озеленення, газони та ін.

Моделі перевірені щодо конструктивних недоліків у програмі Navisworks.

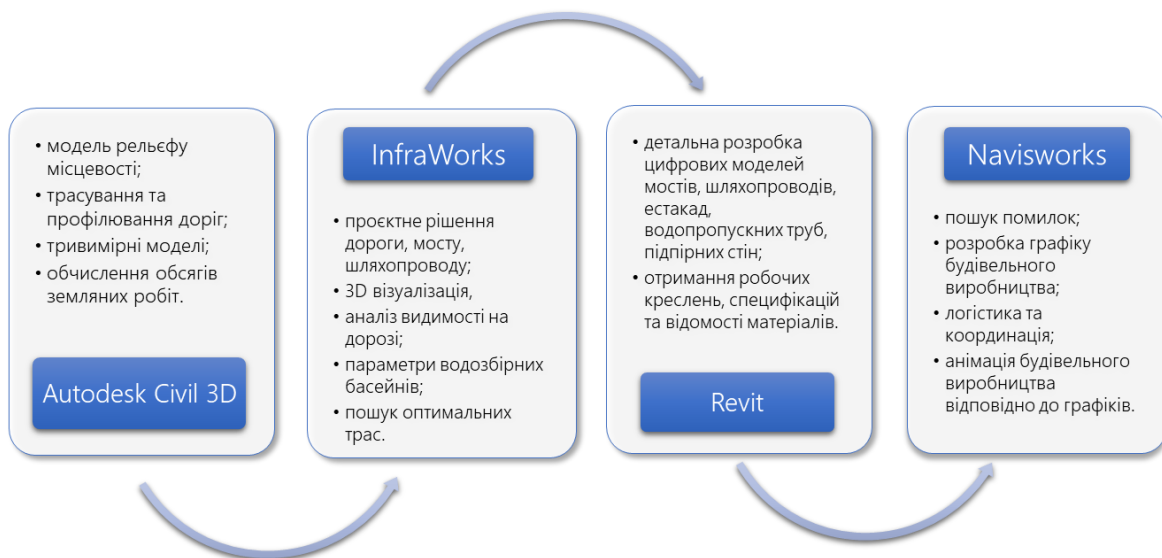


Рис. 11. Будівельне інформаційне моделювання автомобільних доріг

Рекомендується таке поетапне будівельне інформаційне моделювання міських вулиць та доріг:

1-й етап – концептуальне (ескізне) 3D-моделювання вулично-дорожньої мережі, транспортних розв'язок, мостових переходів, що надає інформацію про об'єкти

автодорожньої інфраструктури на базовому рівні, при цьому моделі скоординовані, відповідають геометричним параметрам, що дозволяє проводити попередній аналіз, узгоджувати та оптимізувати рішення, виконувати укрупнений розрахунок обсягів

необхідних дорожніх матеріалів і будівельних робіт;

2-й етап – уточнення цифрової моделі рельєфу за даними геодезичної зйомки; детальне проектування трас, поздовжніх та поперечних профілів автомобільних доріг та вулиць; формування робочих креслень, відомостей елементів трас та профілів; 3D-моделювання дорожнього полотна; визначення водостоків; визначення відстаней видимості; визначення обсягів земляних робіт і дорожніх матеріалів; проектування вертикального планування території;

3-й етап – формування загальної 3D-моделі автодорожньої інфраструктури; детальне моделювання штучних споруд, засобів організації дорожнього руху; просторовий аналіз проектного рішення в цілому, перевірка узгодження транспортної та інженерної інфраструктури і забудови; перевірка моделей щодо конструктивних недоліків і колізій; перевірка відстаней видимості; доповнення моделі об'єктами дорожнього сервісу, елементами благоустрою території та озеленення; моделювання та дослідження транспортних потоків на основі сформованої вулично-

дорожньої мережі; розроблення графіків будівельного виробництва та кошторисної документації;

4-й етап – приведення будівельної моделі автодорожньої інфраструктури міських вулиць відповідно до фактично виконаних дорожніх і будівельно-монтажних робіт за результатами виконавчих геодезичних зйомок; підготовка завершеної BIM-моделі до передачі для обслуговування й експлуатації організації-балансоутримувачу.

Технологія будівельного інформаційного моделювання автомобільних доріг у загальному вигляді наведена на рисунку 11.

Висновки

Для впровадження концепції BIM-технологій запропоновано методику проектування міських вулиць і доріг за BIM-технологією, що передбачає поетапне розроблення цифрової моделі з використанням програм для автоматизованого проектування автодорожньої інфраструктури з необхідним рівнем деталізації на відповідному етапі проектування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Самко Б., Трегуб О. Будівельне інформаційне моделювання міських вулиць та доріг : *зб. тез доп. VI наук.-практ. конф. студ., аспір. і мол. вч. ПДАБА*. Дніпро : ПДАБА, 2023. С. 536–537.
2. Трегуб О. В., Демура А. В. Методика реалізації концепції будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) при проектуванні об'єктів автодорожньої інфраструктури : *тези всеукр. наук.-практ. форуму «Переможемо – Відбудуємо!»*. Дніпро : ПДАБА, 2022. С. 98–99.
3. Концепція впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні та затвердження плану заходів з її реалізації : розпорядження Кабінету Міністрів України № 152-р 2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/152-2021-%D1%80#Text>
4. Афанасьєв Д., Блонський О., Коломоєць М., Поддубни А., Подольчук Ю., Смирнов Ю., Соколовський О., Юрасов І. Концепція впровадження BIM – Будівельного Інформаційного Моделювання в Україні. За підтримки проекту ЄС «Допомога органам влади України в удосконаленні менеджменту циклом інфраструктурного проекту». 2020. 118 с. URL: <http://surl.li/nvdqk>
5. Building Information Modelling (BIM) for road infrastructure: TEM requirements and recommendations. United Nations Economic commission for Europe, United Nations. Geneva, 2021. 119 p.
6. Biancardo S. A., Viscione N., Cerbone A., Dessi E. Jr. BIM-Based Design for Road Infrastructure :a Critical Focus on Modeling Guardrails and Retaining Walls. *Infrastructures*. 2020. № 5. 59 p.
7. Sacks R., Eastman C., Lee G., Teicholz P. BIM Handbook : a Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers, 3rd ed.; John Wiley & Sons : Hoboken, NJ, USA, 2018. 688 p.
8. Lati A. A., Mohd S., Kasim N., Fathi M. S. Building Information Modeling (BIM) Application in Malaysian Construction Industry. *Int. J. Constr. Eng. Manag.* 2013. № 2. Pp. 1–6.
9. Costin A., Adibfar A., Hu H., Chen S. S. Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations. *Autom. Constr.* 2018. Vol. 94. Pp. 257–281.
10. Biancardo S. A., Capano A., Oliveira S. G., Tibaut A. Integration of BIM and Procedural Modeling Tools for Road Design. *Infrastructures*. 2020. № 5. 37 p.

11. ISO 12006-2:2001. Building construction – Organization of information about construction works. Part 2: Framework for classification of information (Міжнародний стандарт).
12. ISO 12006-3:2007. Building construction – Organization of information about construction works. Part 3: Framework for object-oriented information.
13. ISO 22263:2008. Organization of information about construction works – Framework for management of project information.
14. PAS 1192-2:2013. Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modelling (Британський стандарт).
15. ДСТУ EN ISO 23386 (Проект). Будівельне інформаційне моделювання та інші процеси цифрового представлення даних, застосовані в будівництві.

REFERENCES

1. Samko B. and Tregub O. *Budivelne informaciyne modelyuvannya miskyh vulic ta dorig* [Building information modeling of city streets and roads]. *Zb. tez dopovidey VI naukovo-praktychnoyi konferentsiyi studentiv, aspirantiv i molodykh vchenykh PDABA* [Collection abstracts of reports of the VI scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists of PSACEA]. 2023, pp. 536–537. (in Ukrainian).
2. Tregub O.V. and Demura A.V. *Metodyka realizatsiyi kontseptsiyi budivel'noho informatsiynoho modelyuvannya (BIM-tehnolohiy) pry proyektuvanni ob'yektiv avtodorozhn'oyi infrastruktury* [Methodology for implementing the concept of building information modeling (BIM-technologies) in the design of road infrastructure objects]. *Tezy vseukrayins'koho naukovo-praktychnoho forumu «Peremozhemo – Vidbuduyemo!»* [Theses of the All-Ukrainian scientific and practical forum “We will win – We will rebuild!”]. Dnipro : SHEI PSACEA Publ., 2022, pp. 98–99. (in Ukrainian).
3. *Kontseptsiya vprovadzhennya tehnolohiy budivel'noho informatsiynoho modelyuvannya (BIM-tehnolohiy) v Ukrayini ta zatverdzhennya planu zakhodiv z yiyi realizatsiyi* [Concept of implementation of building information modeling technologies (BIM-technologies) in Ukraine and approval of the plan of measures for its implementation]. Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine no. 152-p, 2021. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/152-2021-%D1%80#Text> (in Ukrainian).
4. Afanasyev D., Blonskyi O., Kolomoets M., Poddubny A., Podolchuk Yu., Smirnov Yu., Sokolovskyi O. and Yurasov I. *Kontseptsiya vprovadzhennya BIM-Budivel'noho Informatsiynoho Modelyuvannya v Ukrayini* [Concept of implementation of BIM - Building Information Modeling in Ukraine]. *Za pidtrymky projektu ES “Dopomoha orhanam vlady Ukrayiny v udoskonalenni menedzhmentu tsyklom infrastruktornoho projektu”* [With the support of the EU project “Help to the authorities of Ukraine in improving the management of the infrastructure project cycle”]. 2020, 118 p. URL: <http://surl.li/nvdkq> (in Ukrainian).
5. Building Information Modelling (BIM) for road infrastructure : TEM requirements and recommendations. United Nations Economic commission for Europe, United Nations. Geneva, 2021, 119 p.
6. Biancardo S.A., Viscione N., Cerbone A. and Dessì E. Jr. BIM-Based Design for Road Infrastructure: A Critical Focus on Modeling Guardrails and Retaining Walls / *Infrastructures* 2020, 5, 59 p.
7. Sacks R., Eastman C., Lee G. and Teicholz P. *BIM Handbook : a Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*, 3rd ed.; John Wiley & Sons : Hoboken, NJ, USA, 2018, 688 p.
8. Lati A.A., Mohd S., Kasim N. and Fathi M.S. Building Information Modeling (BIM) Application in Malaysian Construction Industry. *Int. J. Constr. Eng. Manag.* 2013, no. 2, pp. 1–6.
9. Costin A., Adibfar A., Hu H. and Chen S.S. Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations. *Autom. Constr.* 2018, vol. 94, pp. 257–281.
10. Biancardo S.A., Capano A., Oliveira S.G. and Tibaut A. Integration of BIM and Procedural Modeling Tools for Road Design. *Infrastructures*. 2020, no. 5, 37 p.
11. ISO 12006-2:2001. Building construction – Organization of information about construction works. Part 2: Framework for classification of information (International Standard).
12. ISO 12006-3:2007. Building construction – Organization of information about construction works. Part 3: Framework for object-oriented information (International Standard).
13. ISO 22263:2008. Organization of information about construction works. Framework for management of project information (International Standard).
14. PAS 1192-2:2013. Specification for information management for the capital/delivery phase of construction projects using building information modelling (British Standard).
15. DSTU EN ISO 23386 (Proyekt). *Budivel'ne informatsiyne modelyuvannya ta inshi protsesy tsyfrovoho predstavlennya danykh, zastosovani v budivnytstvi* [Building information modeling and other processes of digital representation of data applied in construction (Project)] (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 02.04.2024.

УДК 624.01:691.32

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.126.1083

ВПЛИВ ВИДУ ОБРОБКИ РЕЦИКЛІНГОВИХ ЗАПОВНЮВАЧІВ НА МІЦНІСТЬ БЕТОНУ

ТРИКОЗ Л. В.^{1*}, *докт. техн. наук, проф.*,

ЗІНЧЕНКО О. С.², *асп.*,

КАЛІНІН О. А.³, *канд. техн. наук, доц.*,

НИКИТИНСЬКИЙ А. В.⁴, *канд. техн. наук, доц.*

^{1*} Кафедра будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, 61050, Харків, Україна, тел. +38 (057) 730-10-68, e-mail: lvtrikoz@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-8531-7546

² Кафедра будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, 61050, Харків, Україна, тел. +38 (057) 730-10-68, e-mail: potatosrumba@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-3858-8258

³ Кафедра будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, 61050, Харків, Україна, тел. +38 (057) 730-10-63, e-mail: oleg.kalinin.63@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3063-5659

⁴ Кафедра будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту, пл. Фейєрбаха, 7, 61050, Харків, Україна, тел. +38 (057) 730-10-63, e-mail: NykytynskiyAV@kart.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4923-8568

Анотація. Постановка проблеми. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року передбачено створення умов для розвитку ринку використання перероблених відходів будівельно-ремонтних робіт, зокрема, шляхом визначення показників для встановлення нормативів для перероблених відходів будівельно-ремонтних робіт, які забезпечать їх повторне використання та утилізацію. Один із способів повторного використання зруйнованого бетону – отримання з нього крупного і дрібного заповнювача для подальшого виробництва будівельних матеріалів і виробів. Традиційний метод отримання вторинного заповнювача містить етапи дроблення, які не дозволяють відновлювати чисті, тобто безцементні, заповнювачі. Отже, для виробництва високоякісних перероблених заповнювачів потрібен пошук ефективних методів обробки заповнювачів. **Мета дослідження** – оцінення міцності за стиску бетонних зразків із використанням заповнювачів, отриманих із відходів залізобетонних залізничних шпал. Зроблено порівняння міцності бетонів на заповнювачах, які були очищені механічною обробкою або просочені розчином силікату натрію. **Висновки.** Встановлено, що як механічне очищення від залишків старого цементно-піщаного розчину, так і просочення поліпшують фізико-механічні властивості бетону порівняно з бетоном на необробленому заповнювачі. Механічна обробка підвищує міцність на стиск і становить 98 % від міцності бетону на натуральних заповнювачах. Просочення силікатом натрію збільшує міцність бетону порівняно з міцністю на необробленому заповнювачі на 10 %. Отже, обидва способи обробки рециклінгових крупних заповнювачів можна використовувати для отримання бетонів відповідної міцності.

Ключові слова: бетон; крупний заповнювач; обробка; міцність за стиску; рециклінг

IMPACT THE TREATMENT TYPES OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATES ON CONCRETE STRENGTH

TRYKOZ L.V.^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,

ZINCHENKO O.S.², *Postgrad. Stud.*,

KALININ O.A.³, *PhD (Tech.), Assoc. Prof.*,

NYKYTYNSKYI A.V.⁴, *PhD (Tech.), Assoc. Prof.*

^{1*} Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach Sq., Kharkiv, 61050, Ukraine, tel. +38 (057) 730-10-68, e-mail: lvtrikoz@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-8531-7546

² Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach Sq., Kharkiv, 61050, Ukraine, tel. +38 (057) 730-10-68, e-mail: potatosrumba@gmail.com, ORCID ID: 0009-0000-3858-8258

³ Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach Sq., Kharkiv, 61050, Ukraine, tel. +38 (057) 730-10-63, e-mail: oleg.kalinin.63@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3063-5659

⁴ Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport, 7, Feuerbach Sq., Kharkiv, 61050, Ukraine, tel. +38 (057) 730-10-63, e-mail: NykytynskiyAV@kart.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-4923-8568

Abstract. Problem statement. The National Strategy of waste management in Ukraine until 2030 provides the creation of conditions for market development of usage recycled construction and demolishing waste including the ways of characteristic determination to obtain the regulations for recycled construction and demolishing waste that will let re-use and disposal. One of ways the re-use of deconstructed concrete is the obtaining coarse and fine aggregates for subsequent manufacturing of building materials and products. The ordinary way of recycled aggregates obtaining includes crushing stages that do not allow recovering the purified, i. e. cement-free, aggregates. Therefore, it is necessary to search the effective methods of treatments for producing high quality recycled aggregates. **The purpose of the article** is compressive strength evaluation of concrete samples with usage of aggregates obtained from waste of railway reinforcement concrete sleepers. The comparison of concrete strength has been done for coarse aggregates which are cleaned with mechanical treatment or impregnation by sodium silicate solution. **Conclusions.** It is established that both the mechanical purification from old cement-sand mortar rests and impregnation enhance physical and mechanical properties concrete comparing to concrete with untreated aggregates. The mechanical treatment increases the compressive strength and reaches 98 % of compressive strength for concrete with natural aggregates. The impregnation of sodium silicate increases at 10 % concrete strength compare with strength of concrete with untreated aggregates. So, both treatment methods of recycled coarse aggregates can be used for concrete manufacturing with appropriate strength.

Keywords: concrete; coarse aggregate; treatment; compressive strength; recycling

Постановка проблеми. Властивості виробленого з бетону вторинного заповнювача вивчаються з кінця 1970-х років, але його використання для будівництва нещодавно привернуло нову увагу, оскільки з роками зросло визнання значення сталого розвитку та захисту навколишнього середовища. Особливої актуальності набуває ця проблема з погляду необхідності переробки великої кількості зруйнованих конструкцій в умовах бойових дій в Україні.

Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року [4] передбачає створення умов для розвитку ринку використання перероблених відходів будівельно-ремонтних робіт, зокрема, шляхом визначення показників для встановлення нормативів для перероблених відходів будівельно-ремонтних робіт, які забезпечать повторне використання та утилізацію таких відходів; розроблення нормативів використання вторинної сировини з відходів будівельно-ремонтних робіт як матеріалів у будівельній галузі; розроблення механізмів гарантування якості перероблених матеріалів та економічних стимулів щодо заохочення їх використання; розвиток ринку перероблених матеріалів із відходів будівельно-ремонтних робіт; розроблення планів управління відходами будівельно-ремонтних робіт та їх інтеграція

до проектно-кошторисної документації щодо будівництва і реконструкції будівель та споруд. Аналіз сучасного стану поводження з відходами свідчить про негативний вплив на навколишнє середовище відходів будівельної діяльності і відсутність державного підходу до їх утилізації [5].

Один із способів повторного використання зруйнованого бетону – це отримання з нього крупного і дрібного заповнювача для подальшого виробництва будівельних матеріалів і виробів [6]. Традиційний метод отримання вторинного заповнювача містить етапи дроблення, які не дозволяють відновлювати звільнені, тобто безцементні, заповнювачі. Ці методи застосовують високі напруження стиску, які не досить ефективні для поставленої мети.

Завдяки високій міцності бетону на стиск вони забезпечують інтенсивне подрібнення не тільки бетонної матриці, а й самих заповнювачів. Крім того, кількість отриманих таким способом щебеню і піску дуже низька. Як наслідок, перероблені заповнювачі для бетону містять різну кількість налиплого цементного розчину, який негативно впливає на оброблюваність і механічні властивості бетону.

Таким чином, перероблені бетонні заповнювачі не збагачуються як заповнювачі для нового виробництва

бетону, а в основному переробляються як матеріали для дорожніх покриттів. Отже, для виробництва високоякісних перероблених заповнювачів потрібен пошук ефективних методів обробки заповнювачів.

Аналіз публікацій. Наявність прикріпленого розчину становить основну причину нижчої якості наповнювача з переробленого бетону порівняно з натуральним заповнювачем, і нині його використання обмежене до 30 % заміни природного наповнювача. Проблемі підвищення якості рециклінгових заповнювачів присвячено багато публікацій вітчизняних та закордонних дослідників, які пропонують різноманітні види обробки щебеню, отриманого з бетонних відходів – механічна, кислотна, термічна, мікрохвильова, поверхнева. Ці методи дозволяють або видалити шар старого цементно-піщаного розчину, або зміцнити його.

Для видалення старого розчину застосовують подрібнення в кульових млинах, нагрівання або дію кислотою. За механічної обробки в результаті комбінованої дії стирання, удару та подрібнення в обертовому барабані, що містить помольні кулі, налиплий розчин можна видалити, не викликаючи серйозного пошкодження самого щебеню. Тривалість обробки коливається від 10 хв [13] до 3 і навіть 5 годин [11]. Така обробка не тільки видаляє залишки розчину, а й сприяє збільшенню обкоченості зерен, що в подальшому вплине на рухливість бетонної суміші і кінцеві показники міцності бетону.

Наступний вид видалення старого цементно-піщаного розчину – шляхом нагрівання до температур від 300 до 900° С [13]. Принцип термічної обробки полягає у зневодненні старого цементного каменю, що сприяє відділенню шару старого розчину від частинок заповнювача. У свою чергу, саме необхідність кількогодінного нагрівання і подальшого механічного стирання стало суттєвим недоліком цього способу.

Для зменшення витрат енергії в дослідженні [7] представлено інноваційний метод переробки бетонних відходів, що

грунтується на ослабленні бетону за допомогою мікрохвильового нагрівання перед ударним дробленням. Результати показали, що мікрохвильове нагрівання завжди викликало підвищення крихкості зразків бетону, що знижувало енергію руйнування, сприяло більш високій фрагментації зразків і більшому вивільненню заповнювачів від цементного розчину.

Обробка кислотою – звичайний підхід до зменшення або видалення шару старого розчину, оскільки лужний розчин можна розчинити в кислоті. У праці [17] механічно оброблені зразки вторинних заповнювачів спочатку занурювали у водний розчин HCl і H₂SO₄ чотирьох різних концентрацій за температури навколишнього середовища. Концентрація розчину кислоти – ключовий фактор, що впливає на результати обробки, на відміну від часу замочування, який суттєво не вплинув на кількість видаленого розчину.

До недоліків цього способу обробки можна віднести необхідність промивання рециркульованого щебеню для видалення кислотного розчинника, а також велику ймовірність подальшої корозії арматури і бетону на такому заповнювачі.

Водночас не менше уваги в дослідженнях приділяють іншому шляху поліпшення властивостей перероблених заповнювачів. Багато досліджень стосуються зміцнення налиплих залишків цементно-піщаного розчину. Найбільш розповсюджений метод – карбонізація, яка полягає у витримуванні вторинних заповнювачів в умовах певної вологості, високої концентрації CO₂ і тиску. Зазвичай шар старого розчину на щебені містить велику кількість гідроксиду кальцію, гідрату силікату кальцію, еtringіту та моносульфату кальцію, які можуть мати реакцію карбонізації з CO₂ за присутності води. Під час прискореної карбонізації заповнювач зазвичай поміщають у камеру, заповнену CO₂, і обробляють під тиском протягом кількох днів.

У роботі [16] вторинний заповнювач бетону, попередньо замочений у вапняній

воді, обробляли прискороною карбонізацією протягом 24 годин за тиску 0,30 МПа. Зразки бетону готували шляхом заміщення природного щебеня вторинним карбонізованим заповнювачем у кількості від 0 до 100 %.

Випробування на міцність за стиску у віці 7 і 28 днів показали, що міцність поступово знижувалася разом із коефіцієнтом заміщення, але показники обробленого щебеню завжди були вищими, ніж у необробленого. Міцність за стиску зразків із 100 % заміною на необроблений рециклінговий щебінь знизилася до 33,8 МПа від початкових 40,8 МПа, у той час як 100 % заміна на карбонізований щебінь знизилася до 38,1 МПа.

На кінцеві властивості заповнювачів і бетону сильно впливають умови обробки – час карбонізації, концентрація CO_2 , вологість повітря, тиск. У дослідженні [10] узагальнено вплив кожного із цих факторів. Показано, що чим довший час карбонізації, тим повніша реакція карбонізації та кращі властивості щебеню. У разі витримування протягом від 0,5 год до 72 год ступінь карбонізації становив від 17,65 %, до 40,6 %. Ефективність карбонізації зростає повільно, коли концентрація CO_2 змінюється від 40 до 60 %, але оптимальне значення може бути отримане і за менших концентрацій.

Окрім концентрації CO_2 , тиск також постає важливим фактором, що впливає на ефективність карбонізації. Виявлено, що поглинання CO_2 суттєво зростає за тиску 0–0,01 МПа і незначно зростає в діапазоні 0,01–0,5 МПа. Хоча збільшення тиску газу спричинить те, що CO_2 швидше проникне в пори та мікротріщини заповнювача для реакції карбонізації, пори та мікротріщини можуть розширюватися та поширюватися, коли тиск буде занадто високим, тому не рекомендується застосовувати занадто високий тиск у вакуумній камері для карбонізації.

Міцність на стиск бетону на карбонізованих заповнювачах збільшується приблизно на 9,6 % порівняно з міцністю бетону на необробленому щебені. Крім того, виміряна міцність на стиск бетону на

карбонізованих заповнювачах лише приблизно на 3,49 % нижча, ніж для бетону на природному щебені.

Зміцнити прилиплий цементно-піщаний розчин можна шляхом просочування його шару різними речовинами. В експериментальному дослідженні [8] наведено метод поліпшення властивостей крупних рециркульованих заповнювачів шляхом зміни структури поверхні за рахунок поєднання двох різних методів обробки поверхні. У цьому дослідженні вторинний щебінь спочатку обробляють шляхом замочування в соляній кислоті концентрації 0,5 моль/л, а потім їх просочують розчином метасилікату кальцію. Результати дослідження показують, що ефект від комбінації цих двох методів обробки поверхні корисний, оскільки після обробки щільність частинок, водопоглинання та механічна міцність вторинного щебеню значно поліпшуються.

Введення обробленого заповнювача в бетон сприяє одержанню механічної міцності, яка наближається до міцності бетону, приготовленого з натуральними заповнювачами, і перевершує міцність бетону, приготованого з необробленим щебнем.

У дослідженні [9] три типи перероблених заповнювачів були оброблені проникними матеріалами (розчином силікату натрію, силановою суспензією та розчином полівінілового спирту), і їх водопоглинання та індекс дроблення порівнювали до та після модифікації.

Результати експериментів показали, що водопоглинання вторинного крупного заповнювача, замоченого в розчині полівінілового спирту, знижується суттєво, досягаючи 64,56 %. Порівняно з необробленим бетоном, рухливість, міцність на стиск, міцність на розколювання та вигин бетону з переробленого заповнювача, приготовленого за допомогою просочення силікату натрію та силану, збільшуються на 9,8, 26,53, 21,70 та 14,72 % відповідно.

Після модифікації заповнювача проникними кристалічними матеріалами відбувається хімічна реакція між іонами

кальцію в розчині та модифікованим матеріалом, що зумовлює утворення кристалів C–S–H. Ці кристали заповнюють внутрішні пори та мікротріщини розчину, що перешкоджає утворенню тріщин і зменшує пористість. У результаті цей процес підвищує щільність структури переробленого заповнювача.

Порівняння ефективності методів очищення вторинних заповнювачів від залишків цементно-піщаного розчину виконане у роботах [4; 12; 13]. Кількість залишкового прилиплого розчину в заповнювачах, оброблених кислотними, механічними та термічними методами обробки, становить 2, 5 та 11 % відповідно [12]. Обробка підвищує міцність на стиск бетону, виготовленого з оброблених заповнювачів, і становить понад 95 % від міцності бетону на природних заповнювачах, незалежно від методу обробки.

Серед розчинів соляної, азотної і сірчаної кислот, які застосовувалися в [14] для обробки поверхні вторинного щебеню, найбільш ефективною виявилася сірчана кислота концентрації 0,1 моль/дм³. Але згідно з дослідженням [15], карбонізація бачиться найбільш ефективним і можливим методом поліпшення механічних властивостей і довговічності бетону на рециклінгових заповнювачах.

Отже, як свідчить огляд попередніх досліджень, не існує однозначної відповіді щодо встановлення найкращого методу підготовки заповнювачів із переробленого бетону для подальшого використання. Кожен із них має певні недоліки, такі як досягнення високої температури за термічної обробки або ймовірність корозії арматури в подальшому, якщо кислота не повністю буде видалена з частинок щебеню. Карбонізація вимагає відповідного складного устаткування для створення підвищеного тиску. Механічна обробка виявляється менш трудомісткою, екологічно чистою та економічною порівняно з методом кислотної обробки, нагрівання або просочення іншими речовинами.

Наше дослідження спрямоване на визначення властивостей бетону, який

містить вторинні заповнювачі після механічного очищення та просочення.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи стало оцінення міцності за стиску бетонних зразків із використанням заповнювачів, отриманих із відходів залізобетонних залізничних шпал. Для досягнення мети поставлено такі завдання: отримати крупний заповнювач шляхом подрібнення і розсіювання відходів шпал; здійснити механічне очищення частинок щебеню від залишків цементно-піщаного розчину; просочити частинки щебеню із залишками цементно-піщаного розчину; визначити міцність бетону із заповнювачем кожного виду.

Виклад матеріалу. Частини зруйнованих залізобетонних залізничних шпал, які складаються із декількох зерен щебеню із залишками цементно-піщаного розчину, завантажували у шоківу дробарку для попереднього подрібнення до фракцій 10–20 мм. Механічне очищення отриманого щебеню здійснювали у барабанному млині протягом 30 хвилин. Іншу частину щебеню після дробарки поміщали у розчин силікату натрію і витримували протягом години, після чого висушували за температури 40 °C протягом години. Склад бетону розраховували згідно з ДСТУ Б В.2.7-215:2009 [3], міцність і середню густину зразків визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [2] і ДСТУ Б В.2.7-170:2008 [1].

Для зразків серії 1 використовували необроблений вторинний щебінь, для серії 2 – вторинний щебінь, просочений силікатом натрію, для серії 3 – вторинний щебінь після механічного очищення в барабанному млині, для серії 4 – природний щебінь. Для серій зразків-кубів бетону після витримки у нормальних умовах протягом 7 та 28 діб визначали середню густину та міцність на стиск. Результати наведені на рисунках 1 і 2.

Як показано на рисунках 1 та 2, всі зразки бетону демонструють однакову тенденцію розвитку середньої густини і міцності на стиск, за якої ці параметри збільшуються з терміном твердіння. Однак уведення необробленого вторинного щебеню (серія 1) помітно впливає на

міцність бетону на стиск і його середню густину. Результати показують, що бетон, виготовлений із використанням необробленого щебеню, має нижчу міцність на стиск (10,4 і 19,2 МПа), ніж контрольний бетон на природному заповнювачі (24 і 32,2 МПа) в обидва терміни випробувань.

Через 7 днів твердіння міцність бетону на вторинному щебені, просоченому силікатом натрію (серія 2), була на 10 % вища, ніж у бетону на необробленому щебені, а міцність бетону на механічно очищеному вторинному щебені (серія 3) перевищила у 2,3 раза бетон серії 1 на рециклінговому щебені. Через 28 днів міцність на стиск бетону з обробленим силікатом натрію і механічно очищеним щебенем становила 68 та 98 %, відповідно, від контрольного бетону на натуральному заповнювачі (серія 4).

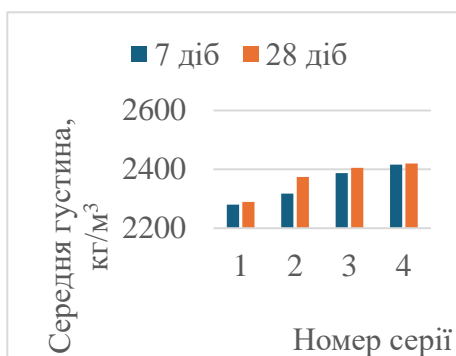


Рис. 1. Середня густина зразків серій бетону

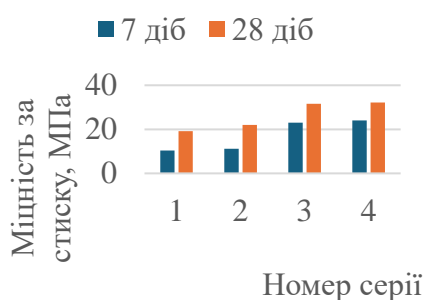


Рис. 2. Міцність на стиск зразків серій бетону

У цілому результати, отримані в ході цього дослідження, показали, що включення 100 % крупного заповнювача із необробленого щебеню в бетонні суміші дає несприятливі результати з погляду міцності на стиск та середньої густини. Фактори, що викликають негативні зміни, можуть бути описані таким чином. Прилиплий розчин до

частинок щебеню зумовлює більш низьку якість порівняно з природними заповнювачами. Тріщини і пухкі залишкові частинки розчину на поверхні частинок щебеню перешкоджають міцнішим зв'язкам між ним і новим цементним тістом, створюючи тим самим слабкі зв'язки під час додавання цього типу заповнювача в бетонну суміш.

Тим часом за введення механічно обробленого або просоченого щебеню в бетон спостерігаються зворотні результати. Підвищення міцності на стиск та середньої густини можна пояснити так. Видалення слабких і пухких частинок розчину з поверхні щебеню або їх просочення силікатом натрію значно поліпшує фізико-механічні властивості бетону на вторинних заповнювачах. Крім того, поліпшення якості поверхні забезпечує більш міцний поверхневий контакт міжфазної зони між цементним тістом і заповнювачем, що важливо для збільшення міцності бетону.

Модифікація поверхні рециркульованого заповнювача, яка відбувається після просочення його розчином силікату натрію, значно зменшує кількість пор і поглинальні характеристики щебеню. Гель С-S-H, що утворюється в результаті реакції силікату натрію з продуктом гідратації цементу $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в новому розчині, поліпшує структуру пор і заповнює поверхневі мікротріщини. Гель С-S-H має ті ж властивості матеріалу, що і бетон, і може зчеплюватися з новим розчином, не відшаровуючи просочення.

Отже, всі ці ефекти сприяють зміцненню зв'язку між поверхнею заповнювача та цементною матрицею, тим самим поліпшуючи механічну міцність бетону.

Висновки

У результаті експериментального дослідження бетонних зразків із вторинним щебенем, отриманим із подрібнених відходів залізобетонних шпал, встановлено таке. Як механічне очищення від залишків старого цементно-піщаного розчину, так і просочення цього шару розчином силікату натрію поліпшують фізико-механічні

властивості бетону порівняно з бетоном на необробленому заповнювачі. Міцність на стиск бетону, виготовленого з необробленого щебеню, втричі менша, ніж на природних заповнювачах. Механічна обробка підвищує міцність на стиск і становить 98 % від міцності бетону на натуральних заповнювачах. Просочення силікатом натрію незначно збільшує міцність бетону порівняно з міцністю на необробленому заповнювачі на 7-му добу, але дозволяє досягти 68 % міцності порівняно з бетоном на чистих

заповнювачах на 28-му добу.

Отже, обидва способи обробки рециклінгових крупних заповнювачів можна застосовувати для отримання бетонів відповідної міцності. Подальші дослідження будуть спрямовані на встановлення оптимальних режимів механічного видалення залишків цементно-піщаного розчину. Також буде проведено оптимізацію параметрів просочення, а саме концентрації розчину і часу витримки, з метою підвищення міцності бетону на такому заповнювачі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності. [Чинний від 2009-07-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. 38 с.
2. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. [Чинний від 2010-09-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 43 с.
3. ДСТУ Б В.2.7-215:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Правила підбору складу. [Чинний від 2010-09-01]. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 18 с.
4. Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року, схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017 р. № 820-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text>
5. Савицький М. В., Смирнов А. С. Особливості використання подрібненого бетонного брухту в якості крупного заповнювача для бетону. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 6 (018). С. 111–117. URL: [doi:10.30838/J.BPSACEA.2312.261223.111.1013](https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.261223.111.1013).
6. Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Никитинський А. В., Романенко О. В. Оцінювання гранулометричного складу вторинних заповнювачів, отриманих із відходів бетону. *Збірник наукових праць УкрДВЗТ*. 2023. Вип. 206. С. 121–128. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.206.2023.296685>.
7. Bru K., Touzé S., Bourgeois F., Lippiatt N., Ménard Y. Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste. *International Journal of Mineral Processing*. 2014. Vol. 126. Pp. 90–98. URL: <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2013.11.009>
8. Ismail S., Ramli M. Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 68. Pp. 726–739. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.058>
9. Li P., Gan W., Yao G., Huang Q., Zhao R. Effect of Permeable Crystalline Materials on the Mechanical and Porosity Property of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. *Materials*. 2023. Vol. 16 (13). Pp. 4596. URL: <https://doi.org/10.3390/ma16134596>
10. Liu K., Xu W., Sun D., Tang J., Wang A., Chen D. Carbonation of recycled aggregate and its effect on properties of recycled aggregate concrete : a review. *Mater. Express*. 2021. Vol. 11. Pp. 1439–1452. URL: [doi:10.1166/mex.2021.2045](https://doi.org/10.1166/mex.2021.2045).
11. Oikonomopoulou K., Ioannou S., Savva P., Spanou M., Nicolaidis D., Petrou M. F. Effect of Mechanically Treated Recycled Aggregates on the Long Term Mechanical Properties and Durability of Concrete. *Materials*. 2022. Vol. 15. Pp. 2871. URL: <https://doi.org/10.3390/ma15082871>
12. Pandurangan K., Dayanithy A., Om Prakash S. Influence of treatment methods on the bond strength of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 120. Pp. 212–221. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.093>
13. Pawluczuk E., Kalinowska-Wichrowska K., Bołtryk M., Jiménez J. R., Fernández J. M. The Influence of Heat and Mechanical Treatment of Concrete Rubble on the Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Materials*. 2019. Vol. 12. Pp. 0367. URL: [doi:10.3390/ma12030367](https://doi.org/10.3390/ma12030367)
14. Saravanakumar P., Abhiram K., Manoj B. Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 111. Pp. 611–617. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.064>
15. Shi C., Li Y., Zhang J., Li W., Chong L., Xie Z. Performance enhancement of recycled concrete aggregate – a review. *Journal of Cleaner Production*. 2016. Vol. 112, part 1. Pp. 466–472. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>

16. Wu J., Ding Y., Xu P., Zhang M., Guo M., Guo S. Effects of carbonated recycled concrete aggregates on the mechanical properties of concrete and the micro-properties of the interfacial transition zone. *Ceramics-Silikáty*. 2022. Vol. 66 (1). Pp. 113–127. URL: [doi:10.13168/cs.2022.0006](https://doi.org/10.13168/cs.2022.0006)

17. Yunusa M., Zhang X., Cui P., Tian X. Durability of Recycled Concrete Aggregates Prepared with Mechanochemical and Thermal Treatment. *Materials*. 2022. Vol. 15 (16). Pp. 57–92. URL: <https://doi.org/10.3390/ma15165792>

REFERENCES

1. *DSTU B V.2.7-170:2008. Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennia serednoi hustyny, volohosti, vodopohlynnania, porystosti i vodonepronyknosti* [DSTU B V.2.7-170:2008. Building materials. Concretes. Methods of determining the average density, humidity, water absorption, porosity and waterproofness]. Kyiv : Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine, 2009, 38 p. (in Ukrainian).

2. *DSTU B V.2.7-214:2009. Budivelni materialy. Betony. Metody vyznachennia mitsnosti za kontrolnymy zrazkami* [DSTU B V.2.7-214:2009. Building materials. Concrete. Methods of determination of strength according to control samples]. Kyiv : Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine, 2010, 43 p. (in Ukrainian).

3. *DSTU B V.2.7-215:2009. Building materials. Concretes. Rules of composition selection* [DSTU B V.2.7-215:2009. Building materials. Concretes. Rules of composition selection]. Kyiv : Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine, 2010, 18 p. (in Ukrainian).

4. *Natsionalna stratehiia upravlinnia vidkhodamy v Ukraini do 2030 roku, skhvalena rozporядzhennyam Kabinetu Ministriv Ukrayiny vid 8 lystopada 2017 r. № 820-r.* [National waste management strategy in Ukraine until 2030 approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated November 8, 2017 no. 820]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/820-2017-%D1%80#Text>. (in Ukrainian).

5. Savytskyi M.V. and Smyrnov A.S. *Osoblyvosti vykorystannia podribnenoho betonnoho brukhtu v yakosti krupnogo zapovniuvacha dlia betonu* [Peculiarities of using crushed concrete scrap as a coarse aggregate for concrete]. *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury* [Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture]. 2023, no. 6 (018), pp. 111–117. (in Ukrainian).

6. Trykoz L.V., Zinchenko O.S., Nykytynskyi A.V. and Romanenko O.V. *Otsiniuvannia hranulometrychnoho skladu vtorynnykh zapovniuvachiv, otrymanykh iz vidkhodiv betonu* [Particle-size distribution assessment of the recycled aggregates from concrete remains]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDUZT* [Collection of Scientific Works of UkrDUZT]. 2023, vol. 206, pp. 121–128. (in Ukrainian).

7. Bru K., Touzé S., Bourgeois F., Lippiatt N. and Ménard Y. Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste. *International Journal of Mineral Processing*. 2014, vol. 126, pp. 90–98.

8. Ismail S. and Ramli M. Mechanical strength and drying shrinkage properties of concrete containing treated coarse recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*. 2014, vol. 68, pp. 726–739.

9. Li P., Gan W., Yao G., Huang Q. and Zhao R. Effect of Permeable Crystalline Materials on the Mechanical and Porosity Property of Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete. *Materials*. 2023, vol. 16 (13), pp. 4596.

10. Liu K., Xu W., Sun D., Tang J., Wang A. and Chen D. Carbonation of recycled aggregate and its effect on properties of recycled aggregate concrete : a review. *Mater. Express*. 2021, vol. 11, pp. 1439–1452.

11. Oikonomopoulou K., Ioannou S., Savva P., Spanou M., Nicolaidis D. and Petrou M.F. Effect of Mechanically Treated Recycled Aggregates on the Long Term Mechanical Properties and Durability of Concrete. *Materials*. 2022, vol. 15, pp. 2871.

12. Pandurangan K., Dayanithy A. and Om Prakash S. Influence of treatment methods on the bond strength of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 2016, vol. 120, pp. 212–221.

13. Pawluczuk E., Kalinowska-Wichrowska K., Bołtryk M., Jiménez J.R. and Fernández J.M. The Influence of Heat and Mechanical Treatment of Concrete Rubble on the Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Materials*. 2019, vol. 12, pp. 0367.

14. Saravanakumar P., Abhiram K. and Manoj B. Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics. *Construction and Building Materials*. 2016, vol. 111, pp. 611–617.

15. Shi C., Li Y., Zhang J., Li W., Chong L. and Xie Z. Performance enhancement of recycled concrete aggregate – a review. *Journal of Cleaner Production*. 2016, vol. 112, p. 1, pp. 466–472.

16. Wu J., Ding Y., Xu P., Zhang M., Guo M. and Guo S. Effects of carbonated recycled concrete aggregates on the mechanical properties of concrete and the micro-properties of the interfacial transition zone. *Ceramics-Silikáty*. 2022, vol. 66 (1), pp. 113–127.

17. Yunusa M., Zhang X., Cui P. and Tian X. Durability of Recycled Concrete Aggregates Prepared with Mechanochemical and Thermal Treatment. *Materials*. 2022, vol. 15 (16), pp. 57–92.

Надійшла до редакції: 30.03.2024.

УДК 691.73:620.193.2

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.134.1084

ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ЛИВАРНОЇ ТРИБОТЕХНІЧНОЇ БРОНЗИ БрОЗА3

УЗЛОВ К. І.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
КІМСТАЧ Т. В.^{2*}, *канд. техн. наук, доц.*,
РЕП'ЯХ С. І.³, *докт. техн. наук, проф.*,
КОВЗІК А. М.⁴, *канд. техн. наук, доц.*,
РЕМЕЗ О. А.⁵, *канд. техн. наук, доц.*

¹ Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 950-14-08, e-mail: konst.uzlov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0744-9890

^{2*} Кафедра матеріалознавства та термічної обробки металів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна; Відділ проблем деформаційно-термічної обробки конструкційних сталей, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова, 1, 49107, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 567-85-61, e-mail: 1375tatjana@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8993-201X

³ Кафедра ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 592-70-95, e-mail: 123rs@ua.fm, ORCID ID: 0000-0003-0203-4135

⁴ Кафедра покриттів, композиційних матеріалів і захисту металів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 481-00-10, e-mail: anatoliykovzik@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5361-6381

⁵ Кафедра обробки металів тиском ім. Академіка Чекмарьова, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (098) 757-31-82, e-mail: o.a.remez@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5489-8798

Анотація. *Постановка проблеми.* Бронзи були та залишаються основним матеріалом для виготовлення підшипників тертя, антифрикційних та корозійностійких деталей, що працюють в умовах високих навантажень, у хімічно активних середовищах, за низьких та підвищених температур, в умовах кавітації, ерозії тощо. Тобто безперервний розвиток техніки потребує від антифрикційних бронз постійного підвищення їх корозійної стійкості як фактора, що дозволить значно розширити сферу їх застосування, підвищити довговічність та надійність литих виробів із них. **Мета.** На основі аналізу взаємозв'язку корозійних пошкоджень із хімічним складом порівняти корозійну стійкість бронзи БрОЗА3 із корозійною стійкістю бронз марок БрА5, БрА9ЖЗЛ та БрО5Ц5С5, як матеріалів, що найчастіше використовуються у промисловості для виготовлення деталей, які працюють у вузлах тертя та хімічно активних середовищах. **Методика.** Сплави для виготовлення зразків готували шляхом сплавлення первинних шихтових матеріалів технічної чистоти. Плавки проводили в індукційній печі з використанням графітового тигля і деревного вугілля як покривного матеріалу. Дослідження корозійної стійкості литих зразків бронз здійснювали відповідно до вимог ISO 7384:2001, ISO 11845:1995 та ГОСТ 9.308-85. Корозійну стійкість досліджуваних зразків оцінювали за результатами відносної втрати їх маси під час витримки протягом 90 діб у клімат-камері за відносної вологості повітря $93 \pm 3\%$ та температури $40 \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$, у морській та прісній воді з температурою 20...22 $^\circ\text{C}$. **Висновки.** Бронза БрОЗА3, із-поміж досліджених ливарних бронз, характеризується найкращим рівнем антикорозійних властивостей в усіх використаних у дослідженнях середовищах. У зв'язку з чим це є підставою рекомендувати досліджену бронзу для виготовлення литих деталей триботехнічного призначення, які працюють на повітрі, у прісній або морській воді.

Ключові слова: *бронза; корозійна стійкість; зміна маси; мікроструктура; клімат-гідрокамера; прісна вода; морська вода*

FOUNDRY TRIBOTECHNICAL BRONZE BrOZA3 CORROSION RESISTANCE INVESTIGATION

UZLOV K.I.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
KIMSTACH T.V.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
REPYAKH S.I.³, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
KOVZIK A.M.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
REMEZ O.A.⁵, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Material Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (067) 950-14-08, e-mail: kunst.uzlov@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0744-9890

^{2*} Department of Material Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine; Department of Problems of Deformation and Thermal Treatment of Structural Steel, Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of National Academy of Science of Ukraine, 1, Ak. Starodubov K.F. Sq., Dnipro, 49107, Ukraine, tel. +38 (097) 567-85-61, e-mail: 1375tatyana@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-8993-201X

³ Department of Casting Production, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. + 38 (050) 592-70-95, e-mail: 123rs@ua.fm, ORCID ID: 0000-0003-0203-4135

⁴ Department of Coatings, Composite Materials and the Protection of Metals, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (050) 481-00-10, e-mail: anatoliykovzik@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5361-63810

⁵ Department of Metal Forming, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (098) 757-31-82, e-mail: o.a.remez@ust.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-5489-8798

Abstract. Problem statement. Bronzes have been and remain the main material for friction bearings, anti-friction and corrosion-resistant parts manufacturing that work under high loads, chemically active aggression influence at low and elevated temperatures, in cavitation, erosion, etc. conditions. That is, technology continuous development requires from anti-friction bronzes constant their corrosion resistance increasing, as a factor that will allow to significantly expand their application scope and increase cast products from them durability and reliability. *The purpose of the articles.* Based on relationship between corrosion damages and chemical composition analysis, compare BrO3A3 bronze corrosion resistance with BrA5, BrA9Zh3L and BrO5Tz5C5 bronzes corrosion resistance as the materials most often used in industry for parts manufacturing that work in friction nodes and chemically active environments. *Methodology.* Alloys for samples production have been prepared by technical purity primary charge materials fusing. Melting has been carried out in induction crucible furnace using a graphite crucible and charcoal as a coating material. Cast bronze samples corrosion resistance studies have been carried out in accordance with ISO 7384:2001, ISO 11845:1995 and GOST 9.308-85 requirements. Studied samples corrosion resistance has been evaluated based on the results of their relative weight loss during exposure for 90 days in climate chamber at relative humidity of 93 ± 3 % and temperature of 40 ± 2 °C, in sea and fresh water with temperature of 20...22 °C. *Conclusions.* BrO3A3 bronze, among the studied foundry bronzes, is characterized by the best level of anti-corrosion properties in all environments used in this research. In this regard, it is a reason to recommend the studied bronze for tribotechnical purpose cast parts manufacturing, which work in air, fresh or sea water.

Keywords: *bronze; corrosion resistance; mass change; microstructure; climatic hydro-chamber; fresh water; sea water*

Актуальність. Основні причини виходу з ладу антифрикційних деталей та вузлів – це їх корозійне руйнування під час роботи в атмосферних умовах та агресивних середовищах, зношення у парах тертя та ерозія робочих поверхонь. У зв'язку з цим дослідження корозійної стійкості антифрикційних матеріалів постає важливим напрямком у галузі матеріалознавства. Один із таких матеріалів – ливарна триботехнічна бронза, яка широко застосовується в різних інженерних галузях, включаючи машинобудування, авіацію, суднобудування та інші.

Безперервний розвиток техніки потребує від триботехнічних бронз постійного підвищення їх корозійної стійкості як фактора, що дозволить значно розширити сферу їх застосування, підвищити довговічність та надійність литих виробів із них. Також підвищення корозійної стійкості

бронз дає суттєві економічні переваги внаслідок збільшення терміну служби обладнання, зниження витрат на його обслуговування та ремонт, а також скорочення втрат через простої та ризику.

Дослідження корозійної стійкості бронз мають велике значення для розроблення ефективних захисних методів та оптимізації умов експлуатації. Корозія може значно скорочувати термін служби та ефективність матеріалу, тому розуміння процесів корозії та знаходження способів запобігання їй стає важливим завданням в інженерії матеріалів.

Дослідження також можуть сприяти розробленню та впровадженню у виробництво нових складів сплавів із поліпшеною корозійною стійкістю, які можуть працювати в агресивних середовищах протягом тривалого часу без значного зниження якості та втрати маси.

Один із перспективних напрямів отримання корозійностійкої бронзи з високими рівнем антифрикційних властивостей – це легування її водночас оловом та алюмінієм [1; 2]. Тому дослідження корозійної стійкості нової литої бронзи БрО3А3 як підшипникового сплаву бачиться актуальним.

Стан питання. Велика різноманітність конструктивних типів вузлів тертя, а також умов експлуатації викликає необхідність створення різноманітних триботехнічних матеріалів, які, крім високих механічних, технологічних та антифрикційних властивостей, повинні мати необхідну корозійну стійкість. Цим вимогам найкраще відповідають мідні сплави, зокрема, бронзи.

Досить висока корозійна стійкість мідних сплавів зумовлена підвищеною термодинамічною стійкістю міді. Бронзи мають більш високу корозійну стійкість порівняно з чистою міддю завдяки наявності в їх складі легувальних елементів, які здатні утворювати стійкі захисні плівки [3]. Зазвичай у разі легування міді більш термодинамічно стійкими елементами на поверхні сплаву формується плівка, яка складається в основному з оксиду міді, що зумовлено меншим значенням тиску дисоціації оксиду міді. У разі легування міді менш термодинамічно стійкими елементами

на поверхні сплаву утворюється плівка, що має складний вміст [4].

Найширше застосування в промисловості як антифрикційні корозійностійкі матеріали отримали олов'яні та алюмінієві бронзи.

Олов'яні бронзи мають високі антифрикційні властивості, низький коефіцієнт тертя, високий опір зношуванню і, разом із тим, досить високу корозійну стійкість [5]. Їх в основному використовують для виготовлення антифрикційних деталей, вкладишів підшипників, деталей, що працюють у мастил тощо.

В атмосферних умовах та в морському середовищі олов'яні бронзи більш стійкі, ніж мідь та латунь. Олов'яні бронзи мають задовільну стійкість проти корозії в атмосфері перегрітого пару (250 °С, тиск не вище 2 МПа), сухих газів (хлору, бром, фтору та їх водневих сполук; кисню та чотирихлористого вуглецю). Проте олов'яні бронзи недостатньо стійкі в середовищі мінеральних кислот, лугів, аміаку, ціанідів, залізних та сірчаних сполук кислих рудних вод [5].

Швидкість корозії бронз БрО5 та БрО8 в атмосфері сільської місцевості становить 0,00015–0,0008 мм/рік, у морській атмосфері 0,001–0,002 мм/рік, у промисловій атмосфері 0,0015–0,0018 мм/рік [3; 6; 7].

Дані щодо корозії олов'яних бронз у різних середовищах наведені в таблиці 1 [3; 6; 8].

Таблиця 1

Корозійна стійкість олов'яних бронз у різних середовищах [3; 6; 8]

Марка бронзи	Морська вода, мм/рік	Морський туман	Суша пара	Волога пара	Розчин H ₂ SO ₄				Розчин NaCN 2-н 20 °
			250 °С	100 °С	20 °С		80 °С		
			$\frac{g}{(m^2 \cdot доба)}$ мм / рік		$\frac{g}{(m^2 \cdot доба)}$				
БрО5	0,02	–	– 0,0025	– 0,0025	–	–	–	–	0,89
БрО10	0,016	–	–	–	4,1	1,26	23,8	7,1	–
БрО10Ц2	0,018	<u>0,06</u>	<u>0,02</u>	<u>0,02</u>	3,5	0,53	15,6	4,6	–
БрО6Ц6С3	0,028	–	–	–	4,9	0,4	17,6	5,6	–

Досить висока корозійна стійкість олов'яних бронз пояснюється утворенням на поверхнях у природних умовах захисних шарів.

Зі збільшенням вмісту олова корозійна стійкість олов'яних бронз помітно підвищується. Підвищенню корозійної

стійкості олов'яної бронзи також сприяє легування нікелем. Залізо та свинець значно знижують корозійні властивості олов'яних бронз [6].

Найбільшого поширення серед ливарних безолов'яних бронз набули алюмінієві бронзи, які порівняно з олов'яними мають вищий рівень корозійної та кавітаційної стійкості [3; 5; 7].

Алюмінієві бронзи знайшли застосування в морському кораблебудуванні, загальному машинобудуванні, авто- та авіабудуванні. Ливарні багатокомпонентні алюмінієві бронзи широко використовують для виготовлення антифрикційних деталей (наприклад, із сплавів БрА9Мц2Л та

БрА10Мц2Л – зубчасті колеса, шестерні, ходові гайки, втулки).

Алюмінієві бронзи відрізняються високою корозійною стійкістю в атмосферних умовах, морській воді, вуглекислих розчинах, а також розчинах більшості органічних кислот (оцтової, лимонної, молочної та ін.).

Алюмінієві бронзи значно перевершують за корозійною стійкістю метали міді із цинком і оловом. У розчинах сірчано-кислих солей, їдких лугів та виннокам'яної солі більш стійкі однофазні алюмінієві бронзи зі знизеним вмістом алюмінію [6].

Дані щодо корозії алюмінієвих бронз у різних середовищах наведені в таблиці 2 [6; 8].

Таблиця 2

Корозійна стійкість алюмінієвих бронз у різних середовищах [6; 8]

Марка бронзи	Морська вода, мм/рік	Розчин H ₂ SO ₄	
		10 %	Волога пара
		20 °С	100 °С
г/(м ² ·доба)			
БрА5	0,55	1,2	–
БрА9Ж4Л	0,20–0,25	0,40	1,45
БрА10Ж3Мц1,5Л	0,20–0,25	0,7	–
БрА10Ж4Н4Л	0,18	0,58	–

Додаткове легування алюмінієвих бронз іншими елементами суттєво змінює їх властивості. Для підвищення корозійної стійкості та поліпшення механічних і технологічних властивостей алюмінієві бронзи в основному легують Mn, Ni, Fe.

Легування марганцем підвищує міцність, пластичність, корозійну стійкість алюмінієвої бронзи та поліпшує її обробку тиском. Нікель поліпшує механічні властивості, корозійну стійкість, підвищує жароміцність та антифрикційні властивості. Залізо підвищує міцність, твердість за деякого зниження пластичності, поліпшує антифрикційні властивості алюмінієвої бронзи. Однак підвищений вміст заліза погіршує технологічні та корозійні характеристики бронз.

У галузі виробництва підшипників тертя олов'яні бронзи, завдяки високим антифрикційним властивостям, більше поширені, ніж алюмінієві. Алюмінієві бронзи

характеризуються вищою корозійною стійкістю порівняно з олов'яними бронзами.

Однак серед великої кількості літературних джерел, у яких описано поведінку алюмінієвих та олов'яних бронз у різних середовищах, практично немає робіт, у яких розглядається спільний вплив алюмінію та олова на корозійну стійкість бронз. За даними [1; 2], легування бронзи водночас оловом та алюмінієм дозволяє отримати сплави з високими міцнісними, антифрикційними властивостями та високою корозійною стійкістю.

Із цього погляду, на сьогодні найбільш перспективна нова бронза БрО3А3, яка має високі ливарні та антифрикційні властивості, твердість і необхідний рівень механічних властивостей [9].

Та все ж наразі будь-які дані щодо корозійної стійкості бронзи БрО3А3 відсутні, що стало підставою для проведення відповідних досліджень.

Мета дослідження. На основі аналізу величини та характеру зміни маси досліджуваних зразків та взаємозв'язку корозійних пошкоджень із хімічним складом порівняти корозійну стійкість бронзи БрО3А3 із корозійною стійкістю бронз марок БрА5, БрА9ЖЗЛ та БрО5Ц5С5 як матеріалів, що найчастіше використовуються у промисловості для виготовлення деталей, які працюють у вузлах тертя та хімічно активних середовищах.

Методика досліджень. Корозійну стійкість визначали на зразках, виготовлених із бронз марок БрО3А3, БрА5, БрА9ЖЗЛ та БрО5Ц5С5 на зразках $\varnothing 30 \times 3$ мм із технологічним отвором $\varnothing 3$ мм у центрі. Зразки вирізали механічним способом,

використовуючи виливки циліндричної форми $\varnothing 32 \times 130$ мм, відлиті у ливарні форми з піщано-рідкоскляної суміші.

Для досліджень сплави готували шляхом сплавлення первинних шихтових матеріалів технічної чистоти в графітовому тиглі індукційній печі під шаром деревного вугілля як покривного матеріалу. Як шихту використовували мідь марки М1, олово марки О2, свинець марки С3, сталь марки Ст3, цинк марки Ц1, алюміній марки А7. Температуру вимірювали хромель-алюмелевою термопарою у комплекті з потенціометром АТ4208.

Хімічний склад бронз, які досліджували для порівняння, наведений в таблиці 3. Загальний вигляд зразків показаний на рисунку 1.

Таблиця 3

Хімічний склад зразків досліджуваних бронз

Марки бронз	Вміст елементів, масова частка % (залишок – Cu)					
	Al	Fe	Sn	Si	Pb	Zn
БрО3А3	3,38	0,13	4,16	0,09	0,07	–
БрА5	4,97	0,13	–	0,23	0,06	–
БрА9ЖЗЛ	8,62	3,68	–	0,14	–	–
БрО5Ц5С5	–	0,13	4,82	–	4,52	4,70



а б в з

Рис. 1. Вигляд зразків із бронз БрО3А3 (а), БрА5 (б), БрА9ЖЗЛ (в), БрО5Ц5С5 (з) до початку їх випробувань на корозійну стійкість

Дослідження здійснювали відповідно до вимог ISO 7384:2001, ISO 11845:1995 та ГОСТ 9.308-85.

Для випробувань пласкі поверхні зразків шліфували. До випробувань допускали лише зразки, які не мали поверхневих дефектів і задирок на торцях отвору та їх зовнішній циліндричній поверхні. Потім вимірювали розміри кожного зразка електронним штангенциркулем з точністю 0,01 мм.

Використовуючи ці дані зразків, розраховували загальну площу (S_3) їх реакційної поверхні за формулою:

$$S_3 = 2(S_{\text{п}} - S_{\text{по}}) + S_{\text{бз}} + S_{\text{бо}}, \quad (1)$$

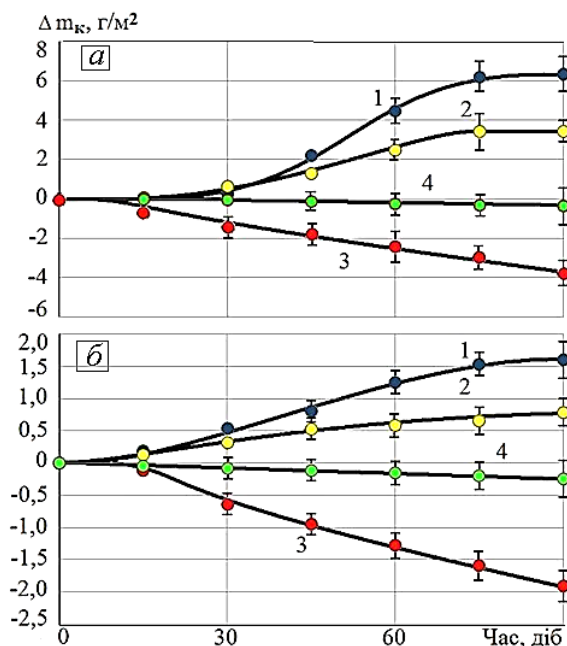
де $S_{\text{п}}$, $S_{\text{по}}$ – площа однієї пласкої поверхні зразка та гіпотетичної пласкої поверхні отвору відповідно; $S_{\text{бз}}$ – площа зовнішньої циліндричної поверхні зразка; $S_{\text{бо}}$ – площа циліндричної поверхні отвору.

Зважували зразки до початку випробувань, а також через кожні 15 діб впродовж 90 діб, на аналітичних вагах із точністю 0,0001 грама. Перед кожним зважуванням зразки промивали в дистильованій воді від продуктів їх корозії та сушили за нормальної температури впродовж 2 годин.

Випробування проводили у клімат-камері за відносної вологості повітря $Vл = (93 \pm 3) \%$ і температури $(40 \pm 2) ^\circ\text{C}$, у 3 % розчині NaCl, що імітує склад морської води, та прісній воді з температурою 20...22 °C.

Як показники перебігу корозії [9] в роботі прийнято величини та характер змін маси на 1 м^2 поверхні досліджуваних зразків бронзи впродовж 90 діб їх перебування в певному середовищі, які розраховували за формулою, г/м^2 :

$$\Delta m_K = 10^6 \cdot \frac{m_i - m_0}{S}, \quad (2)$$



Слід зазначити, що відповідно до ходу залежностей на рисунку 2, а на поверхнях зразків із бронзи БрА5 та БрО3А3 утворюється щільний захисний шар оксиду, вірогідно з Al_2O_3 , який вже з 75-ї доби викликає уповільнення корозії на поверхні зразків.

де m_0 , m_i – середнє значення вихідної та кінцевої (через «i» діб перебування зразків у відповідному середовищі) маси зразків, г; S – площа поверхні зразків, мм^2 .

Зразки оцінювали за результатами оптичного виду їх зовнішнього вигляду та за результатами металографічного аналізу їх корозійних пошкоджень із застосуванням у дослідженнях світлового мікроскопа НЕОРНОТ-21.

Результати досліджень. Залежності характеру зміни маси на 1 м^2 поверхні досліджуваних зразків (Δm_K) від часу їх витримки в різних середовищах показано на рисунку 2.

З аналізу ходу залежностей випливає, що з-поміж випробуваних бронз найбільшу корозійну стійкість у клімат-гідрокамері камері має бронза марки БрА5. При цьому за зміною маси зразків від корозії випробувані бронзи можна розмістити в такий ряд: БрА5 \rightarrow $\frac{\text{БрО3А3}}{\text{БрО5Ц5С5}}$ \rightarrow БрА9ЖЗЛ.

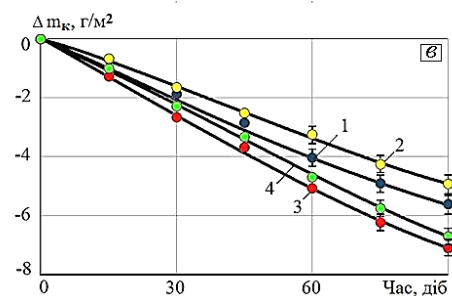


Рис. 2. Залежності Δm_K зразків від часу їх витримки у клімат-гідрокамері (а), у прісній воді (б), у морській воді (в): 1 – БрО3А3, 2 – БрА5, 3 – БрА9ЖЗЛ, 4 – БрО5Ц5С5

Найбільшу корозійну стійкість у прісній воді має бронза марки БрА5, а за зміною маси зразків від корозії випробувані бронзи можна розмістити в такий ряд: БрА5 \rightarrow $\frac{\text{БрО3А3}}{\text{БрО5Ц5С5}}$ \rightarrow БрА9ЖЗЛ.

Як і в попередньому випадку (див. рис. 2, б) на поверхнях зразків із бронзи

БрА5 та БрО3А3 вірогідно утворюється щільний захисний шар оксиду алюмінію, який вже з 75-ї доби починає уповільнення корозії на поверхні зразків. Водночас, невисокий рівень зміни маси зразків із бронзи БрО5Ц5С5 за час їх випробування дозволяє віднести цю бронзу до відносно стійкої у прісній воді.

Найбільшу корозійну стійкість у морській воді (див. рис. 2, в) має бронза марки БрА5, найменшу – бронза марки БрА9Ж3Л. Тобто за зміною маси зразків від корозії, випробувані бронзи можна розмістити в такий ряд: БрА5 → БрО3А3 → БрО5Ц5С5 → БрА9Ж3Л.

Слід зазначити, що від'ємний характер зміни мас всіх зразків бронз у морській воді пояснюється здатністю продуктів корозії розчинятися у цьому хімічно активному середовищі. Тобто, виходячи з того, що всі продукти корозії в морській воді є хлоридами компонентів, які входять до складу бронз, вони розчиняються у воді. Цим зумовлюється те, що процес корозії зразків усіх бронз у такому середовищі відбувається виключно зі зниженням їх маси.

Мікροструктурний аналіз закономірності формування осередків корозійних уражень бронз БрА9Ж3Л, БрА5, БрО5Ц5С5, БрО3А3 свідчить, що у бронзі БрО3А3 корозійні осередки виникають через міжкристалітну взаємодію на двофазній межі α -Cu ↔ β -Cu₅Sn у поверхневій зоні, де і локалізуються без активного просування від поверхні в глибину (рис. 3, а). На відміну від бронзи БрО3А3, у бронзі БрО5Ц5С5 корозійні пошкодження проникають із поверхні в глибину зразків по ділянках міжкристалітної взаємодії евтектоїдних фазових складових Cu + Cu₃₁Sn₈ (рис. 3, б).

Характер ураження бронзи БрА9Ж3Л (рис. 3, в) пов'язаний з шаруватим механізмом руйнування поверхні взаємодії за залізовмісною сполукою (Fe₃Al). У бронзі БрА5 характер корозійного руйнування є приповерхневий, нерівномірний із вибірковою взаємодією по межах зерен (рис. 3, г). При цьому активність корозійних процесів зростає із посиленням агресивності умов випробувань: прісна вода → клімат-камера → морська вода.

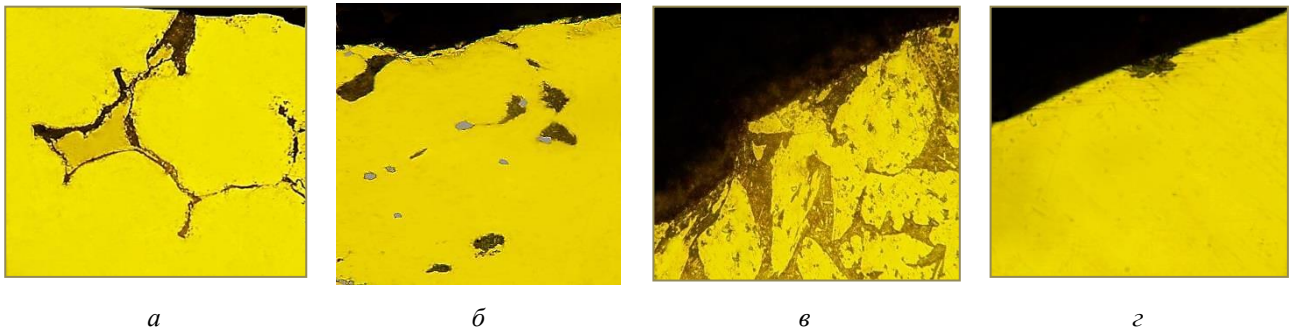


Рис. 3. Мікροструктура поверхні зразків бронз БрО3А3 (а, $\times 1000$), БрО5Ц5С5 (б, $\times 1000$), БрА9Ж3Л (в, $\times 650$) і БрА5 (г, $\times 1000$) після корозійних випробувань у морській воді

Отже, за результатами випробувань установлено, що найнижчу корозійну стійкість у будь-якому реакційному середовищі має ливарна бронза БрА9Ж3Л (див. рис. 2). Пов'язано це з шаруватим механізмом руйнування поверхні взаємодії за залізовмісною сполукою.

З викладеного випливає, що бронза БрО3А3 із числа досліджених ливарних бронз (бронза БрА5 не є ливарною) характеризується найкращим рівнем антикорозійних властивостей і може бути

рекомендована для виготовлення литих деталей, що експлуатуються на повітрі, у водопровідній або морській воді.

Висновки

1. Установлено, що з числа досліджених ливарних бронз БрО3А3 характеризується найкращим рівнем антикорозійних властивостей і може бути рекомендована для виготовлення литих деталей, які експлуатуються на повітрі, у водопровідній або морській воді.

2. Високий рівень антикорозійних властивостей бронзи BrO_3A_3 зумовлений тим, що корозійні осередки виникають через міжкристалітну взаємодію на двофазній границі $\alpha - Cu \leftrightarrow \beta - Cu_5Sn$ у поверхневій зоні, де і локалізуються без активного просування від поверхні в глибину. На відміну від бронзи BrO_3A_3 , у $BrO_5Ц_5C_5$ корозійні пошкодження розвиваються з поверхні в глибину зразків по ділянках міжкристалітної

взаємодії евтектоїдних фазових складових $Cu + Cu_{31}Sn_8$. Характер ураження бронзи $BrA_9Ж_3Л$ пов'язаний із шаруватим механізмом руйнування поверхні взаємодії за залізовмісною сполукою (Fe_3Al).

3. Активність корозійних процесів зростає з посиленням агресивності умов випробувань: водопровідна вода \rightarrow клімат-камера \rightarrow морська вода.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Habraken L., Rogister C., Davin A., Contsouradis D. *Metall.* 1969. Bd 23, H 11. Pp. 1148–1156.
2. Soares D. F., Abreu M., Barros D., Castro F. Experimental study of the Cu–Al–Sn phase equilibria, close to the copper zone. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy.* 2017. № 53 (3). Pp. 209–213.
3. Кімстач Т. В., Узлов К. І., Реп'ях С. І., Солоненко Л. І. Аналіз впливу різних середовищ на корозійну стійкість мідних сплавів. *Металознавство та термічна обробка металів.* 2021. № 3 (94). С. 36–45.
4. Стоєв П. І., Литовченко С. В., Гірка І. О., Грицина В. Т. Хімічна корозія та захист металів : навч. посіб. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. 216 с.
5. Грешта В. Л., Лисиця О. В., Степанова Л. П. Кольорові метали та сплави на їх основі : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНТУ, 2014. 286 с.
6. Смирязин А. П., Смирязина Н. А., Белова А. В. Промышленные цветные металлы и сплавы. Москва : Металлургия, 1974. 488 с.
7. Кімстач Т. В., Узлов К. І., Усенко Р. В., Солоненко Л. І. Корозійна стійкість бронзових виробів. *Стратегія якості в промисловості і освіті : матер. XVI Міжнар. конф. (м. Варна, Болгарія, 02–05 червня 2021 р.)*. Варна : ТУ–Варна, 2021. С. 78–83.
8. Арзамасов Б. Н., Брострем В. А., Буше Н. А. и др. Конструкционные материалы : справ. под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. Москва : Машиностроение, 1990. 688 с.
9. Узлов К. І., Реп'ях С. І., Кімстач Т. В., Сафронова О. А., Мазорчук В. Ф., Білий А. П. Триботехнічні властивості сплаву BrO_3A_3 в умовах сухого тертя. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії.* 2023. Вип. 37. С. 505–521.

REFERENCES

1. Habraken L., Rogister C., Davin A. and Contsouradis D. *Metall.* 1969, Bd 23, H 11, pp. 1148–1156.
2. Soares D.F., Abreu M., Barros D. and Castro F. Experimental study of the Cu–Al–Sn phase equilibria, close to the copper zone. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy.* 2017, no. 53 (3), pp. 209–213.
3. Kimstach T.V., Uzlov K.I., Repiakh S.I. and Solonenko L.I. *Analiz vplyvu riznykh seredovyshch na koroziiu stikiist midnykh splaviv* [Analysis of the influence of different environments on the corrosion resistance of copper alloys] *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2021, no. 3 (94), pp. 36–45. (in Ukrainian).
4. Stoiev P.I., Lytovchenko S.V., Hirka I.O. and Hrytsyna V.T. *Khimichna koroziiia ta zakhyst metaliv : navchalnyi posibnyk* [Chemical corrosion and protection of metals : study guide]. Kharkiv : KhNU named V.N. Karazina Publ., 2019, 216 p. (in Ukrainian).
5. Hreshtha V.L., Lysytsia O.V. and Stepanova L.P. *Kolorovi metaly ta splavy na yikh osnovi : navchalnyi posibnyk* [Non-ferrous metals and alloys based on them : study guide]. Zaporizhzhia : ZNTU Publ., 2014, 286 p. (in Ukrainian).
6. Smyriahyn A.P., Smyriahyna N.A. and Belova A.V. *Promyshlennye tsvetnye metally y splavy* [Industrial non-ferrous metals and alloys]. Moscow : Metallurhiya Publ., 1974, 488 p. (in Russian).
7. Kimstach T.V., Uzlov K.I., Usenko R.V. and Solonenko L.I. *Koroziiina stikiist bronzovykh vyrobiv* [Corrosion resistance of bronze products]. *Stratehiia yakosti v promyslovosti i osviti : materialy XVI Mizhnarodnoi konferentsii* [Quality strategy in industry and education : materials zha epu XVI Intern. conf.]. (Varna, Bolharia, 02–05 June 2021), TU–Varna, 2021, pp. 78–83. (in Ukrainian).
8. Arzamasov B.N., Brostrem V.A., Bushe N.A. and oth. *Konstrukcionnye materialy : spravochnik* [Structural materials : reference book]. Edited by B.N. Arzamasov, Moscow : Mechanical Engineering Publ., 1990, 688 p. (in Russian).
9. Uzlov K.I., Repiakh S.I., Kimstach T.V., Safronova O.A., Mazorchuk V.F. and Bilyi A.P. *Trybotekhnichni vlastyivosti splavu BrO_3A_3 v umovakh sukhoho tertia* [Tribotechnical properties of BrO_3A_3 alloy under dry friction conditions]. *Fundamentalni ta prykladni problemy chornoj metalurhii* [Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy]. 2023, no. 37, pp. 505–521. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції 16.04.2024.

УДК 669-176:539.3+539.4+539.5

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.142.1085

ПАРАМЕТРИ ТЕКСТУРИ КЕРНСА ТА ВЛАСТИВОСТІ ГЕКСАГОНАЛЬНИХ МОНО- ТА ПОЛІКРИСТАЛІВ

УСОВ В. В.¹, *докт. фіз.-мат. наук., проф.*,
ШКАТУЛЯК Н. М.², *канд. фіз.-мат. наук, доц.*,
ІОВЧЕВ С. І.^{3*}, *канд. фіз.-мат. наук, доц.*

¹ Кафедра технологічної та професійної освіти, Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського, вул. Старопортофранківська, 26, 65020, Одеса, Україна, тел. +38 (066) 352-90-92, e-mail: valentinusov67@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7855-5370

² Кафедра прикладної математики та інформатики, Південноукраїнський національний педагогічний університет імені К. Д. Ушинського, вул. Старопортофранківська, 26, 65020, Одеса, Україна, тел. +38 (066) 985-24-35, e-mail: shkatulyak56@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4905-001X

^{3*} Кафедра математики, фізики та астрономії, Одеський національний морський університет, вул. Мечникова, 34, 65029, Одеса, Україна, тел. +38 (096) 107-19-99, e-mail: iovchevodessa@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3161-8087

Анотація. *Постановка проблеми.* Фізико-механічні властивості полікристалів визначаються відповідними властивостями монокристалів (кристалітів), що складають полікристал, та розподілом останніх за орієнтацією в полікристалі (текстурою). У металів із гексагональною структурою використання параметрів текстури Кернса, що показують ступінь збігу гексагональної осі кристалітів із заданим напрямком у полікристалічному зразку, дозволяє визначити властивість полікристала у цьому напрямку, якщо відомі властивості монокристала у напрямку його гексагональної осі та перпендикулярному напрямку. Можливе також розв'язання зворотної задачі: визначення властивостей монокристала у напрямку його гексагональної осі та перпендикулярному напрямку за даними властивостей полікристала та визначеними параметрами текстури Кернса. *Матеріали та методи.* Досліджували пружні та механічні характеристики гексагональних сплавів на основі титану (Grade 1 і VT1-0) і магнію (Mg–10 % Li і ZE10) після різних типів деформації – вальцювання, попереминого згинання і гвинтової екструзії. Параметри текстури Кернса визначали рентгенівським методом за даними побудови обернених полюсних фігур (ОПФ) напрямку нормалі (НН) до площини листів та напрямку вальцювання (НВ). *Результати експерименту.* Показано, що вказаний метод дозволяє розраховувати пружні та механічні властивості зазначених полікристалів після проходження ними різних видів деформації з похибкою не більше 5–10 %, а також розв'язувати обернену задачу розрахунку властивостей монокристалів із похибкою не більше 5 %. *Висновки.* Використання параметрів текстури Кернса та характеристик монокристалів магнієвих сплавів ZE10, Mg 5 % Li, титану Grade1 і VT1-0 дозволило розрахувати відповідні властивості полікристалів та їх анізотропію. Використання параметрів текстури Кернса, експериментальних значень модуля пружності, меж міцності та пластичності полікристалічних листів досліджуваних магнієвих і титанових сплавів дозволило оцінити характеристики. Між значеннями модуля пружності, механічними характеристиками досліджуваних листів магнієвих і титанових сплавів, з одного боку, та відповідними параметрами текстури Кернса, з іншого боку, існують сильні кореляційні зв'язки.

Ключові слова: *гексагональні полікристали; параметри текстури Кернса; вальцювання; знакозмінний вигин; гвинтова екструзія; модуль Юнга; механічні властивості*

KEARNS TEXTURE PARAMETERS AND PROPERTIES OF HEXAGONAL MONO- AND POLYCRYSTALS

USOV V.V.¹, *Dr. Sc. (Phys. and Math.), Prof.*,
SHKATULYAK N.M.², *Cand. Sc. (Phys. and Math.), Assoc. Prof.*,
IOVCHEV S.I.^{3*}, *Cand. Sc. (Phys. and Math.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Technological and Professional Education, South Ukrainian National Pedagogical University named after K.D. Ushinsky, 26, Staroportofrankivska St., Odesa, 65020, Ukraine, tel. +38 (066) 352-90-92, e-mail: valentinusov67@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7855-5370

² Department of Applied Mathematics and Informatics, South Ukrainian National Pedagogical University named after K.D. Ushinsky, 26, Staroportofrankivska St., Odesa, 65020, Ukraine, tel. +38 (066) 985-24-35, e-mail: shkatulyak56@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4905-001X

^{3*} Department of Mathematics, Physics and Astronomy, Odesa National Maritime University, 34, Mechnikov St., Odesa, 65029, Ukraine, tel. +38 (096) 107-19-99, e-mail: ioychevodessa@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3161-8087

Abstract. Problem statement. Polycrystals' physical and mechanical properties are determined by the corresponding properties of single crystals (crystallites) that make up the polycrystal, and their distribution by orientation in the polycrystal (texture). In metals with a hexagonal structure, the use of Kearns texture parameters, which show the degree of coincidence of the hexagonal axis of crystallites with a given direction in a polycrystalline sample, allows determining the property of a polycrystal in this direction, if the properties of a single crystal in the direction of its hexagonal axis and the perpendicular direction are known. It is also possible to solve the inverse problem: determining the properties of a single crystal in the direction of its hexagonal axis and the perpendicular direction based on the properties of the polycrystal and the determined of the Kearns texture parameters. **Materials and methods.** Elastic and mechanical characteristics of hexagonal alloys based on titanium (Grade 1 and VT1-0) and magnesium (Mg – 10 % Li and ZE10) were studied after different types of deformation – rolling, alternating bending, and twist extrusion. The Kearns texture parameters were determined by the X-ray method based on the data of the construction of inverse pole figures (IPF) in the normal direction (ND) to the sheets plane and the rolling direction (RD). **The results of the experiment.** It is shown that the specified method allows to calculate the elastic and mechanical properties of the specified polycrystals after they undergo various types of deformation with an error of no more than 5–10 %, as well as to solve the inverse problem of calculating the properties of single crystals with an error of no more than 5 %. **Conclusions.** Using the parameters of the Cairns texture and the characteristics of single crystals of magnesium alloys ZE10, Mg 5 % Li, titanium Grade1 and VT1-0 made it possible to calculate the corresponding properties of polycrystals and their anisotropy. The use of Cairns texture parameters, experimental values of the modulus of elasticity, tensile strength and yield strength of polycrystalline sheets of the studied magnesium and titanium alloys made it possible to evaluate the characteristics. There are strong correlations between the values of the modulus of elasticity, the mechanical characteristics of the studied sheets of magnesium and titanium alloys, on the one hand, and the corresponding parameters of the Cairns texture, on the other hand.

Keywords: *hexagonal polycrystals; Kearns texture parameters; rolling; alternating bending; twist extrusion; Young's modulus; mechanical properties*

Вступ. Використання металевих виробів і заготовок визначається їх якістю після виготовлення. Тому дослідження впливу зовнішніх чинників на створення напівфабрикатів із найкращими якістьми актуальне. Анізотропія фізико-механічних властивостей полікристалічних металів зумовлена типом текстури (кристалографічної та механічної). З одного боку, ігнорування текстури металу може спричинити невідповідні результати або передчасне руйнування будівель і виробів (наприклад, утворення гребінців або фестонів під час глибокої витяжки чи штампування).

У цьому дослідженні оцінювали фізико-механічні характеристики різних сплавів із гексагональною структурою на основі магнію (Mg–10 % Li і ZE10) і титану (Grade 1 і VT1-0) після вальцювання, поперемінного згинання (ПЗ), гвинтової екструзії (ГЕ) та термічної обробки. Оцінка базувалася на використанні текстурних параметрів Кернса (які відображають ступінь збігу гексагональної осі кристалічної комірки зерен із певним

геометричним напрямком у полікристалічному зразку) та характеристик відповідних монокристалів. Також можна оцінити властивості монокристалів за інформацією про еквівалентні властивості полікристалів, що є так званим зворотним питанням.

Часто перед використанням необхідно випрямити листовий і рулонний метал за допомогою роликів правильних машин [1]. Це знижує внутрішні напруження металу та надає йому необхідних площинних властивостей, що поліпшує якість кінцевого продукту.

Під час правки матеріал піддається поперемінному згинанню (ПЗ), що змінює механічні властивості та структурний склад металу, незважаючи на відносно незначну пластичну деформацію розтягування та стиснення. Зокрема, розвиваються та накопичуються неконтрольовані мікротріщини та мікропори, що змінює характеристики металу. Однак недостатньо досліджень щодо того, як поперемінне згинання впливає на анізотропію фізико-механічних характеристик.

Значним резервом підвищення експлуатаційних якостей металевих матеріалів стало застосування інноваційних технологій інтенсивної пластичної деформації (ПД) [2]. Для досягнення масивних деформацій використовуються такі методи як гвинтова екструзія (ГЕ), кручення під високим гідростатичним тиском (КГТ), рівноканальне кутове пресування (РККП), всебічне кування (УК) та інші. Ці методи передбачають багаторазове піддавання оброблених матеріалів інтенсивній пластичній деформації зсуву.

Застосування технологій ПД дозволяє виготовляти металеві матеріали з об'ємними нано- або субмікрокристалічними (СМК) структурами. Ці матеріали відрізняються від існуючих металів і сплавів у звичайному крупнозернистому стані комплексом фізико-механічних і технологічних властивостей, що сприятливо підвищують характеристики міцності. Розмір структурних елементів (насамперед зерен і субзерен) у цих матеріалах становить близько 100–200 нм.

Ці характеристики включають помітне збільшення міцності та твердості при збереженні високого рівня пластичності. Однак недостатньо досліджень було проведено щодо формування кристалографічної текстури в СМК-матеріалах або як вона впливає на характеристики зернистого стану, значно підвищуючи міцність.

Мета роботи – показати можливості визначення фізико-механічних властивостей полікристалічних сплавів із гексагональною структурою на основі магнію (ZE10, Mg–5 % Li) та титану (Grade 1, VT1-0) за параметрами текстури Кернса та властивостями відповідних монокристалів, а також розв'язання зворотної задачі – визначення властивостей монокристалів досліджуваних сплавів, за даними вимірювань відповідних властивостей полікристалічних зразків та параметрами текстури Кернса.

Матеріали та методика. Матеріалом для дослідження слугували сплави на основі

магнію і титану з гексагональною структурою.

Досліджувалися листи з магнієвого сплаву ZE10 (1,3 % Zn, 0,15 % Zr і 0,2 % рідкоземельних металів (РЗМ), серед РЗМ переважно церій) у стані як отримано [3] і після подальшого попереминого згинання на 0,5; 1,0; 3,0 і 5,0 циклів.

Магнієвий сплав Mg–5 % Li (мас.) досліджували після таких процесів: 1) пресування через прямокутну матрицю за 350 °С і подальшого вальцювання з проміжним нагріванням до 350 °С товщиною 4 мм; 2) подальше вальцювання зі зміною напрямку вальцювання на 90° з проміжним нагріванням до 350 °С через кожний прохід до товщини 1 мм; 3) подальше почергове згинання листів товщиною 1 мм на 0,5, 1,0, 3,0 і 5,0 циклів.

Поперемине згинання смуг 100×100 мм сплавів здійснювали за допомогою спеціально розробленого інструменту на валику діаметром 50 мм. Швидкість деформації становила $\sim 10^{-2} \text{ с}^{-1}$, а рух металу під час згинання становив $\sim 150 \text{ мм/с}$.

Титановий сплав VT1-0 досліджували після п'яти проходів гвинтової екструзії, а також після додаткового годинного ізохронного вакуумного відпалу за температур 200, 250, 300, 350 і 400 °С.

Вимірювання модуля Юнга. Початкові листи та листи після необхідної кількості циклів попереминого згинання (ПЗ) нарізали з інтервалами 15° від НВ до ПН для отримання набору із семи прямокутних зразків, кожен розміром 100×10 мм. Використовуючи динамічний метод [4] і частоту власних згинальних коливань зразка, знайшли модуль Юнга. Похибка вимірювання не перевищувала 1 % [4].

Випробування на одноосьовий розтяг здійснювали, дотримуючись стандартних процедур для проведення на машинах для розтягування Zwick Z250/SN5A та INSTRON 8801. Для механічних випробувань у напрямку вальцювання (НВ), діагональному напрямку (ДН) – під кутом 45° до НВ та поперечному напрямку (ПН) вирізали три серії зразків із вихідного листа та листів після попереминого згинання на

0,5; 1,0; 3,0 і 5,0 циклів, а також зразки для дослідження текстури і структури.

За допомогою методу рентгенівської дифрактометрії з фокусуванням за Бреггом-Брентано побудовано обернені полюсні фігури (ОПФ) від нормального напрямку (НН) і напрямку вальцювання (НВ) для дослідження кристалографічної текстури [5]. Для побудови ОПФ від НВ з тонких листів зразки були набрані у вигляді пучка смужок шириною 3 мм, вирізаних із листів і скріплених разом. Хімічне полірування використовувалося для видалення шару поверхневих спотворень товщиною 0,1 мм, щоб запобігти негативному впливу на текстуру зразків.

Зразки без текстури виготовили з дрібної рекристалізованої тирси досліджуваних металів. Полюсні фігури зразків після відповідної кількості циклів попереминого згинання знімали з обох сторін листів. Відповідні ОПФ побудовано з використанням даних рентгенівської дифракції досліджуваних сплавів і відповідних стандартів у відфільтрованому K_{α} Mo випромінюванні на дифрактометрі ДРОН-3м.

Полюсну густину розраховували, використовуючи інтегральну інтенсивність ліній досліджуваних зразків, поділену на інтенсивність відповідних дифракційних ліній еталонного зразка. ОПФ були побудовані з використанням даних нормалізації Морріса [6].

Використання параметрів текстури Кернса для оцінення властивостей гексагональних полікристалів. Орієнтація нормалі до ізотропної площини системи координат зразка визначає внесок у загальні характеристики полікристала в тому чи іншому кристалографічному напрямку. Це вісь c гексагонального кристала, або [0001]. Обертання кристалів навколо цієї осі не впливає на анізотропію характеристик. Перпендикуляр до осі [0001] – вісь a . Кернс продемонстрував [7], що властивість гексагонального полікристала в заданому напрямку $P(\varphi_i)_{\text{ref}}$ залежить від кута [0001] між даним напрямком і напрямком кристала, від характеристики монокристала

вздовж осі c (P_c) та осі a (P_a), а також параметрів текстури f_j , відповідно до такого співвідношення:

$$P(\varphi_i)_{\text{ref}} = f_j P_c + (1 - f_j) P_a. \quad (1)$$

У формулі (1):

$$f_j = \langle \cos^2 \varphi_i \rangle_j = \sum A_i P_{ji} \cos^2 \varphi_i,$$

де: $P_{ji} = \frac{I_i / I_R}{\sum_{\Delta} (A_i (I_i / I_R))}$; I_i / I_R – відношення

інтегральної інтенсивності i -го рефлексу на j -й ОПФ до відповідного значення інтенсивності рефлексу зразка без текстури I_R ; A_i – статистичні ваги i -го рефлексу ($\sum A_i P_{ji} = 1$) [6]. Умовно A_i обчислюється як відсоток площі поверхні стереографічного трикутника навколо нормалі до i -го рефлексу відповідної ОПФ.

Параметр текстури Кернса для заданого напрямку полікристалічного зразка можна визначити з ОПФ трьох головних напрямків листового матеріалу (напрямку нормалі до площини листа (ОПФ НН), напрямку вальцювання (ОПФ НВ) і поперечного напрямку листа (ОПФ ПН)), відповідно, $f_{\text{НН}}$, $f_{\text{НВ}}$, $f_{\text{ПН}}$. У цьому випадку сума параметрів f_j за трьома основними напрямками листового матеріалу з гексагональною ґраткою повинна дорівнювати одиниці. Якщо значення параметрів f_j дорівнює 1/3 в кожному з основних напрямків листа, це свідчить про ізотропність властивостей.

Отже, знаючи два з трьох параметрів Кернса (наприклад, якщо ми визначили $f_{\text{НН}}$ та $f_{\text{НВ}}$), третій параметр $f_{\text{ПН}}$ можна знайти з рівняння:

$$f_{\text{НН}} + f_{\text{НВ}} + f_{\text{ПН}} = 1. \quad (2)$$

Методи визначення параметрів текстури Кернса за прямими та оберненими полюсними фігурами детально описано в [7].

Результати експерименту.

Пружні властивості листів зі сплавом ZE10 на основі параметрів текстури Кернса. Для визначення параметрів текстури Кернса сплаву магнію ZE10 скористаємось ОПФ, показаними на рисунку 1. Параметри текстури Кернса $f_{\text{НН}}$,

$f_{НВ}$ та $f_{ПН}$ визначали за формулами (1) і (2). Параметри текстури Кернса наведені в таблиці 1.

Аналіз розподілу полюсної густини на ОПФ НН протилежних сторін листів після різної кількості циклів ПЗ показав певні невідповідності (рис. 1, в, г; е, ж; і, к; л, м). Причина цих розбіжностей полягає в тому, що при згинанні в один бік шари металу на опуклому боці листа піддаються деформації розтягування. При цьому відповідні металеві шари на увігнутому боці листа деформуються стисненням.

Ці невідповідності відображаються на значеннях параметрів текстури Кернса,

розрахованих на основі ОПФ НН протилежних боків листів після ПЗ ($f_{НН}^{(1)}$ і $f_{НН}^{(2)}$, табл. 1).

Таблиця 1

Параметри текстури Кернса сплаву магнію ZE10 у вихідному стані та після різного числа циклів поперемінного згинання (ПЗ)

Число циклів, n	Параметри текстури Кернса				
	$f_{НН}^{(1)}$	$f_{НН}^{(2)}$	$f_{НН}^{(сп)}$	$f_{НВ}$	$f_{ПН}$
0	0,340	0,340	0,340	0,176	0,484
0.5	0,322	0,324	0,323	0,203	0,474
1.0	0,322	0,318	0,320	0,208	0,472
3.0	0,326	0,306	0,316	0,217	0,467
5.0	0,323	0,315	0,319	0,153	0,528

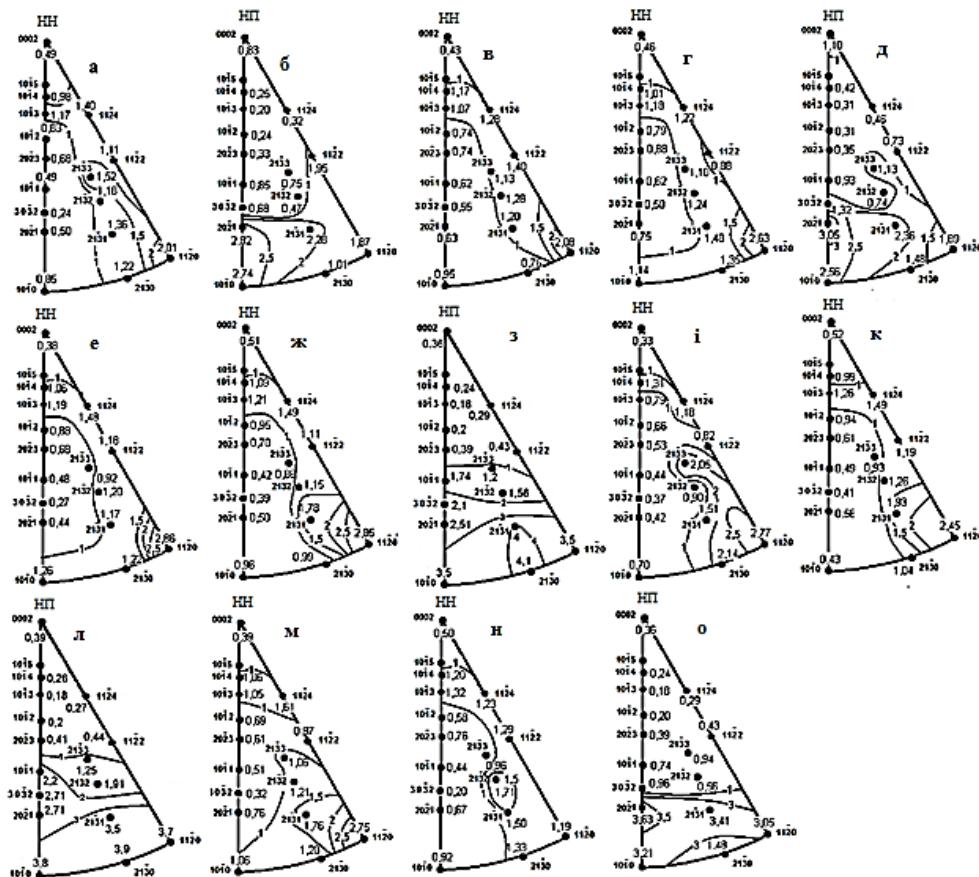


Рис. 1. Експериментальні ОПФ сплаву ZE10: (а, б) – вихідний лист; (в–д) – вигин 0,5 циклу; (е–з) – вигин 1 цикл; (і–л) – вигин 3 цикли; (м–о) – вигин 5 циклів; (г, ж, і, н) – розтягнутий бік листів; (в, д, з, м) – стислий бік листів

Для подальшого аналізу впливу ПЗ на властивості досліджуваного сплаву в НН до площини листа використовували параметри текстури Кернса, усереднені по обох боках листів після відповідної кількості циклів ПЗ ($f_{НН}^{(сп)}$). Для теоретичної оцінки модулів пружності сплаву ZE10 необхідні значення

пружних сталей сплаву. Згідно з роботою [8] $s_{33}^{-1} = E_c = 45,1$ ГПа ; $s_{11}^{-1} = E_a = 43,7$ ГПа . Модулі Юнга експериментальні ($E_{НВ}^{експ}$, $E_{ПН}^{експ}$) та розраховані за співвідношенням (1) ($E_{НВ}^{розра}$, $E_{ПН}^{розра}$) листів зі сплаву ZE10 наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Експериментальні та розрахункові модулі пружності після знакозмінного вигину листів сплаву ZE10

Число циклів ЗВ, n	$E_{НВ}^{експ}$, ГПа	$E_{НВ}^{розн}$, ГПа	$\Delta E_{НВ} / E_{НВ}^{експ}$, %	$E_{ПН}^{експ}$, ГПа	$E_{ПН}^{розн}$, ГПа	$\Delta E_{ПН} / E_{ПН}^{експ}$, %	$E_{ПН}^{розн}$, ГПа
0	46,3	43,9	5,2	43,9	44,4	-1,1	44,2
0.5	46,0	44,0	4,3	43,8	44,4	-1,4	44,2
1.0	45,8	44,0	3,9	43,5	44,0	-1,1	44,2
3.0	45,0	44,1	2,0	43,3	44,4	-2,5	44,2
5.0	44,8	44,0	1,8	43,3	44,5	-2,8	44,2

Як видно з таблиці 2, розрахунковий модуль E відрізняється від експериментального не більше ніж на 5,2 %.

Пружні властивості магнієвого сплаву Mg-5 % Li (мас.). Обернені полюсні фігури магнієвого сплаву Mg-5 % Li (мас.) показані на рисунку 2.

Параметри текстури Кернса розраховані на основі ОПФ НН ($f_{НН}$) та ОПФ НВ ($f_{НВ}$) з даних на рисунку 2, а також $f_{ПН}$, розраховані за співвідношенням (2), наведені в таблиці 3. Оскільки на ОПФ НН листів для протилежних боків після поперемінного згинання (рис. 2) є певні розбіжності в розподілі полюсної густини (як у випадку зі сплавом ZE10), використовували параметри

текстури Кернса, усереднені по обох боках листів після відповідної кількості циклів ПЗ $f_{НН}^{(ср)}$ для подальшого аналізу.

Таблиця 3

Параметри текстури Кернса сплаву Mg – 5 % Li

	Число циклів, n	Параметри текстури Кернса				
		$f_{НН}^{(1)}$	$f_{НН}^{(2)}$	$f_{НН}^{(ср)}$	$f_{НВ}$	$f_{ПН}$
Після екструзії	-	0,239	0,239	0,239	0,114	0,647
Після ПЗ	0	0,390	0,390	0,390	0,393	0,217
	0,5	0,435	0,407	0,421	0,224	0,355
	1,0	0,409	0,388	0,399	0,188	0,391
	3,0	0,399	0,411	0,404	0,289	0,407
	5,0	0,417	0,411	0,414	0,144	0,442

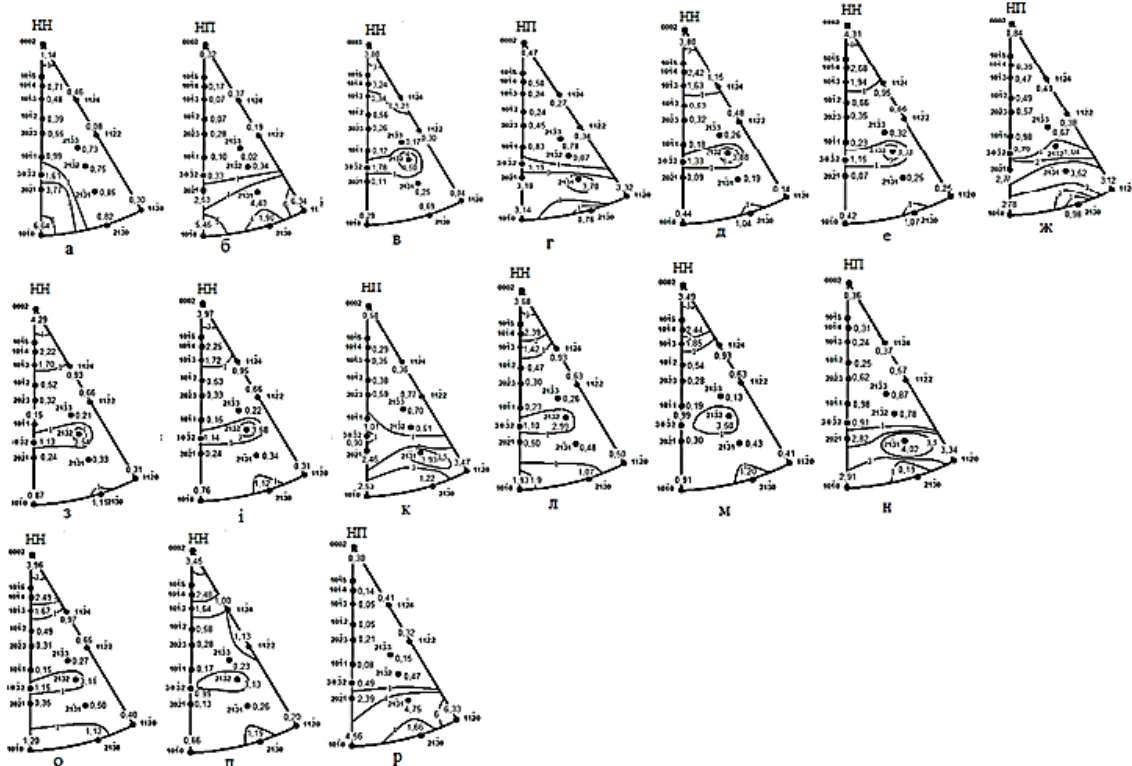


Рис. 2. Експериментальні обернені полюсні фігури сплаву Mg – 5 % (мас.) Li: (а, б) – після обробки № 1; (в, г) – після обробки № 2; після знакозмінного вигину на: 0,5 – (д-ж); 1 – (з-к); 3 – (л-н); 5 – (о-р) циклів; (д, і, м, п) – розтягнутий бік листів; (е, з, л, о) – стиснутий бік листів

Розв'язок оберненої задачі для сплаву Mg–5 % Li (мас.). Для теоретичного оцінення модулів пружності сплаву Mg–5 % (мас.) Li потрібні значення пружних сталих сплаву. Для цього складемо систему двох лінійних рівнянь, використовуючи співвідношення типу (1) для експериментальних значень модулів пружності в НВ і ПН, з двома невідомими $E_c^{розр}$ і $E_a^{розр}$ для кожного виду обробки сплав магнію Mg–5% (мас.) Li:

$$E_{НВ}^{експ} = f_{НВ} \cdot E_c^{розр} + (1 - f_{НВ}) \cdot E_a^{розр}; \quad (3)$$

$$E_{ПН}^{експ} = f_{ПН} \cdot E_c^{розр} + (1 - f_{ПН}) \cdot E_a^{розр}. \quad (4)$$

Розрахунок показав, що середні величини пружних модулів монокристалів

мають такі значення: $E_c^{розр} = 53,8$ ГПа; $E_a^{розр} = 44,6$ ГПа. Розрахункові величини відрізняються від відповідних літературних величин [9] ($s_{33}^{-1} = E_{0001} = E_c = 56,5$ ГПа; $s_{11}^{-1} = E_{10\bar{1}0} = E_a = 41,5$ ГПа) на 4,8% і 7,5%, відповідно. Використовуючи розраховані пружні модулі монокристалів сплаву Mg – 5 % (мас.) Li та його параметри текстури Кернса (табл. 3), оцінили пружні модулі відповідних полікристалів після вищезазначених обробок. Експериментальні та розраховані за співвідношенням (1) пружні модулі листів сплаву магнію Mg – 5 % (мас.) Li представлені у таблиці 4.

Таблиця 4

Розрахункові та експериментальні пружні модулі листів сплаву Mg – 5 % Li

	Число циклів, n	$E_{ПН}^{розр}$, ГПа	$E_{ПН}^{експ}$, ГПа	$E_{НВ}^{розр}$, ГПа	$E_{НВ}^{експ}$, ГПа	$\Delta E_{НВ} / E_{НВ}^{експ}$, %	$E_{ПН}^{розр}$, ГПа	$E_{ПН}^{експ}$, ГПа	$\Delta E_{ПН} / E_{ПН}^{експ}$, %
Після ГЕ	–	45,1	-	43,2	40,6	6,4	51,2	47,4	8,0
Після ПЗ	0	47,4	-	47,4	50,3	5,8	47,9	52,9	9,6
	0.5	47,8	-	44,9	48,2	6,9	46,8	49,6	5,6
	1.0	47,5	-	44,2	46,8	6,3	47,4	51,9	8,7
	3.0	47,6	-	44,3	44,2	0,3	47,6	46,2	3,0
	5.0	47,7	-	43,7	46,2	5,5	48,1	47,6	1,1

Як видно з таблиці 4, розрахунковий модуль E відрізняється від експериментального не більше ніж на 9,6 %. Виміряти модуль пружності в НН не вдалося через малу товщину листів (1 мм).

Розрахунки за співвідношеннями типу (3) і (4) для межі міцності зразків, вирізаних у НВ і ПН, аналогічні проведеним вище для модуля пружності, показали, що усереднені розрахункові значення межі міцності монокристалів досліджуваного сплаву магнію Mg–5 % (мас.) Li вздовж його осей c ($\sigma_{В розр}^c$) і a ($\sigma_{В розр}^a$) мають такі значення:

$$\sigma_{В розр}^c = 181 \text{ МПа}; \quad (7)$$

$$\sigma_{В розр}^a = 178 \text{ МПа}. \quad (8)$$

Аналогічні розрахунки за співвідношеннями типу (3) і (4) для межі плинності зразків, вирізаних у НВ та ПН, показали, що величини межі плинності сплаву магнію Mg – 5 % (мас.) Li вздовж осі

c ($\sigma_{0,2 розр}^c$) і вздовж осі a ($\sigma_{0,2 розр}^a$) мають такі значення:

$$\sigma_{0,2 розр}^c = 122 \text{ МПа}; \quad (9)$$

$$\sigma_{0,2 розр}^a = 118 \text{ МПа}. \quad (10)$$

У таблицях 5 і 6 показано експериментальні $\sigma_{В експ}^{НВ}$, $\sigma_{В експ}^{ПН}$, $\sigma_{0,2 експ}^{НВ}$, $\sigma_{0,2 експ}^{ПН}$ і розраховані $\sigma_{В розр}^{НВ}$, $\sigma_{В розр}^{ПН}$, $\sigma_{0,2 розр}^{НВ}$, $\sigma_{0,2 розр}^{ПН}$ значення межі міцності та межі плинності досліджуваних листів магнієвого сплаву Mg–5 % (мас.) Li. Розрахункові значення отримані після знаходження значень для монокристалів досліджуваного сплаву, обчислених за співвідношеннями типу (3) і (4) для експериментальних значень меж міцності та плинності в НВ і ПН (табл. 5, 6).

Як видно з таблиць 5 і 6, розрахункові величини відхиляються від експериментальних не більше ніж на 8,1 % та 6,1 % для меж міцності та пружності, відповідно.

Пружні властивості листів Кернса. Експериментальні ОПФ листів *Ti Grade 1* за параметрами текстури сплаву показані на рисунку 3.

Таблиця 5

Експериментальні та розрахункові величини межі міцності сплаву Mg-5 % Li

	Число циклів, n	$\sigma_{B \text{ експ}}^{HB}$, ГПа	$\sigma_{B \text{ розр}}^{HB}$, ГПа	$\Delta\sigma_B^{HB} / \sigma_{B \text{ експ}}^{HB}$, %	$\sigma_{B \text{ експ}}^{ПН}$, ГПа	$\sigma_{B \text{ розр}}^{ПН}$, ГПа	$\Delta\sigma_B^{ПН} / \sigma_{B \text{ експ}}^{ПН}$, %
Після GE	—	176	178	-1.1	165	178	7.9
Після ПЗ	0	180	179	0.6	184	195	6.0
	0.5	179	179	0	183	168	-8.2
	1.0	178	179	-0.6	182	171	-6.0
	3.0	179	179	0	180	176	-2.2
	5.0	178	178	0	179	178	-0.6

Таблиця 6

Експериментальні та розрахункові величини межі плинності сплаву Mg-5 % Li

	Число циклів, n	$\sigma_{0,2 \text{ експ}}^{HB}$, ГПа	$\sigma_{0,2 \text{ розр}}^{HB}$, ГПа	$\Delta\sigma_{0,2}^{HB} / \sigma_{0,2 \text{ експ}}^{HB}$, %	$\sigma_{0,2 \text{ експ}}^{ПН}$, ГПа	$\sigma_{0,2 \text{ розр}}^{ПН}$, ГПа	$\Delta\sigma_{0,2}^{ПН} / \sigma_{0,2 \text{ експ}}^{ПН}$, %
Після GE	—	176	178	-1.1	165	178	7.9
Після ПЗ	0	180	179	0.6	184	195	6.0
	0.5	179	179	0	183	168	-8.2
	1.0	178	179	-0.6	182	171	-6.0
	3.0	179	179	0	180	176	-2.2
	5.0	178	178	0	179	178	-0.6

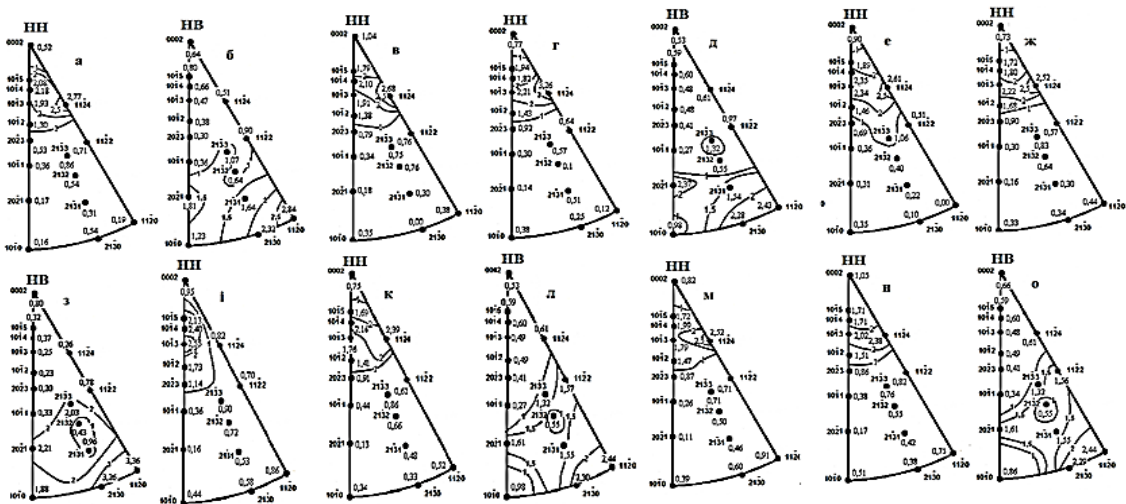


Рис. 3. Експериментальні обернені полюсні фігури титану (*Ti Grade 1*): (а, б) – вихідний лист; листи після знакозмінного вигину на 0,5 (в-д); 1 – (е-з); 3 – (і-л); 5 – (м-о) циклів; (в, е, і, м) – розтягнутий бік листів; (з, ж, к, н) – стиснутий бік листів

Таблиця 7

Параметри текстури Кернса листів *Ti Grade 1*

Число циклів, n	Параметри текстури Кернса				
	$f_{НН}^{(1)}$	$f_{НН}^{(2)}$	$f_{НН}^{(cp)}$	$f_{НВ}$	$f_{ПН}$
0	0,593	0,593	0,593	0,236	0,171
0,5	0,549	0,573	0,561	0,240	0,474
1,0	0,573	0,541	0,557	0,249	0,194
3,0	0,512	0,523	0,518	0,248	0,234
5,0	0,528	0,522	0,525	0,248	0,227

Параметри текстури Кернса, розраховані за ОПФ НН ($f_{НН}$) і ОПФ НВ

($f_{НВ}$) з даних на рисунку 3, і $f_{ПН}$, розраховані за співвідношенням (2), наведені в таблиці 7.

Оскільки спостерігаються певні невідповідності на ОПФ НН протилежних боків листів після попереминого згинання, як і раніше при дослідженні магнієвих сплавів, усереднені параметри текстури Кернса ($f_{НН}^{(cp)}$) використано для подальшого аналізу. Значення модулів пружності досліджуваного листа титану, виміряні та

розраховані у напрямках НН, НВ і ПН за співвідношеннями типу (1), наведені в таблиці 8. Для розрахунків використано модулі пружності монокристала титану [10],

з близьким хімічним складом. Відповідно до [10] модуль пружності вздовж гексагональної осі c ($E_c = 130$ ГПа) і вздовж осі a ($E_a = 99$ ГПа).

Таблиця 8

Розрахункові та експериментальні значення модуля пружності листів досліджуваного титану Grade 1

Число циклів, n	$E_{НН}^{розр}$, ГПа	$E_{НН}^{експ}$, ГПа	$E_{НВ}^{розр}$, ГПа	$E_{НВ}^{експ}$, ГПа	$\Delta E_{НВ} / E_{НВ}^{експ}$, %	$E_{ПН}^{розр}$, ГПа	$E_{ПН}^{експ}$, ГПа	$\Delta E_{ПН} / E_{ПН}^{експ}$, %
0	117,4	–	106,3	107,6	1,1	104,3	104,8	0,5
0.5	116,0	–	106,4	107,4	0,9	105,1	104,0	-1,1
1.0	116,0	–	106,7	106,4	-0,3	105,0	103,6	-1,7
3.0	115,1	–	106,7	106,0	-0,7	106,3	102,5	-3,7
5.0	115,3	–	106,7	105,4	-1,2	106,1	103,0	-3,0

Максимальне відхилення розрахункового та експериментального значень модуля пружності не перевищує 3,7 %. Виміряти модуль пружності в НН не вдалося через малу товщину листів (1 мм).

Оцінка меж міцності σ_B та плинності $\sigma_{0,2}$ листів Ti Grade за даними монокристалів і параметрами текстури Кернса. У літературі немає даних про межі міцності та плинності монокристала титану вздовж осі c (відповідно, σ_B^c і $\sigma_{0,2}^c$) і вздовж осі a (σ_B^a і $\sigma_{0,2}^a$). Використовуючи емпіричні співвідношення [12]:

$$\sigma_B = \frac{H_V}{2,9} \cdot (1-n) \cdot \left[\frac{12,5 \cdot n}{1-n} \right]^n; \sigma_{0,2} = \frac{H_V}{3},$$

де n – параметр зміцнення, рівний для

титану 0,11 за даними роботи [11], $H_V^c = 1770$ МПа і $H_V^a = 1220$ МПа за даними наноіндентування Ti Grade 1 [12], отримуємо: $\sigma_B^c = 374$ МПа, $\sigma_{0,2}^c = 315$ МПа, $\sigma_B^a = 356$ МПа, $\sigma_{0,2}^a = 329$ МПа. Далі, подібно до наведених вище розрахунків модулів Юнга з використанням співвідношення типу (1) і параметрів текстури Кернса (табл. 7), ми розрахували значення меж міцності та плинності полікристалічного титанового листа.

Експериментальні та розрахункові значення межі міцності σ_B та межі плинності $\sigma_{0,2}$ листів Ti Grade 1 наведено в таблицях 9 і 10.

Таблиця 9

Експериментальні та розрахункові значення межі міцності зразків Ti Grade 1

Число циклів ПЗ	$\sigma_{В розр}^{НН}$, МПа	$\sigma_{В експ}^{НН}$, МПа	$\sigma_{В розр}^{НВ}$, МПа	$\sigma_{В експ}^{НВ}$, МПа	$\Delta \sigma_{В}^{НВ} / \sigma_{В експ}^{НВ}$, %	$\sigma_{В розр}^{ПН}$, МПа	$\sigma_{В експ}^{ПН}$, МПа	$\Delta \sigma_{В}^{ПН} / \sigma_{В експ}^{ПН}$, %
0	380,3	–	386,0	365,0	5,8	387,0	365,0	6,0
0,5	380,8	–	385,9	372,0	3,7	386,6	380,0	1,7
1,0	380,9	–	385,8	365,0	5,7	386,7	382,0	1,2
3,0	381,5	–	385,8	375,0	2,9	386,0	391,0	-1,3
5,0	381,4	–	385,8	370,0	4,3	386,2	385,0	0,3

Таблиця 10

Експериментальні та розрахункові значення межі плинності зразків Ti Grade 1

Число циклів ПЗ	$\sigma_{0,2 розр}^{НН}$, МПа	$\sigma_{0,2 експ}^{НН}$, МПа	$\sigma_{0,2 розр}^{НВ}$, МПа	$\sigma_{0,2 експ}^{НВ}$, МПа	$\Delta \sigma_{0,2}^{НВ} / \sigma_{0,2 експ}^{НВ}$, %	$\sigma_{0,2 розр}^{ПН}$, МПа	$\sigma_{0,2 експ}^{ПН}$, МПа	$\Delta \sigma_{0,2}^{ПН} / \sigma_{0,2 експ}^{ПН}$, %
0	320,0	–	325,7	300,0	8,6	326,5	305,0	7,1
0,5	321,3	–	325,6	297,0	9,6	326,2	300,0	8,7
1,0	321,3	–	325,5	300,0	8,5	326,2	310,0	5,2
3,0	321,9	–	325,5	310,0	5,0	325,7	336,0	-3,1
5,0	321,8	–	325,5	320,0	1,7	325,8	340,0	-4,2

Як видно з таблиць 9, 10, максимальне відхилення значень міцності та межі плинності, виміряних у НВ і ПН листів досліджуваного титану та розрахованих за параметрами текстури Кернса, не перевищує 10 %. Виміряти зазначені характеристики міцності в НН досліджуваних листів титану не вдалося через їх малу товщину (1 мм).

Властивості пружності та міцності

титану VT1-0 за параметрами текстури Кернса та сталими монокристалів після гвинтової екструзії (ГЕ) та відпалу.

Обернені полюсні фігури (ОПФ) зразків у напрямку осі екструзії (ОПФ НЕ) і напрямку, перпендикулярному до напрямку осі екструзії (ОПФ ПН) після п'яти проходів ГЕ та після відпалу за вищевказаних температур представлені на рисунку 4.

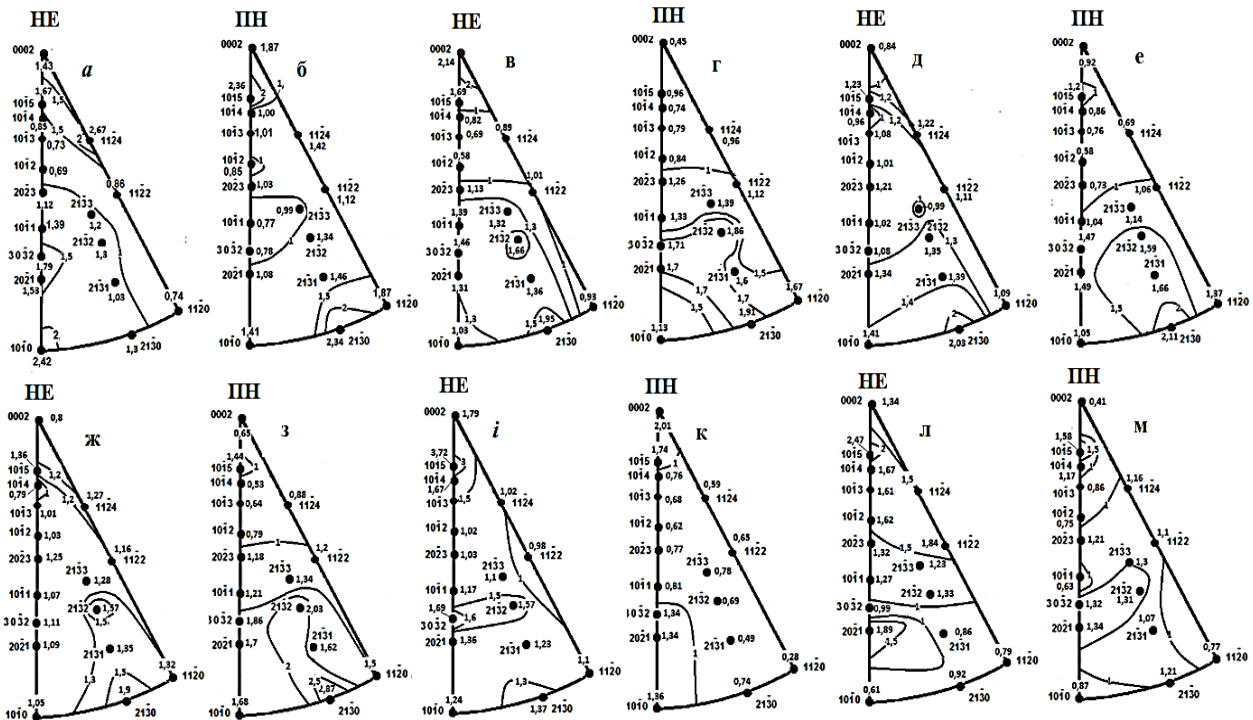


Рис. 4. Обернені полюсні фігури зразків сплаву титану VT1-0 після 5 проходів гвинтової екструзії (а, б) і після відпалу за температур 200 (в, г), 250 (д, е), 300 (з, з), 350 (і, к) і 400 °С (л, м), відповідно

Параметри текстури Кернса, розраховані за ОПФ ОЕ (f_{HE}) і ОПФ ПН (f_{HN1}) на рисунку 4 та (f_{HN2}), розраховані за співвідношенням (2), наведені в таблиці 11.

Таблиця 11

Параметри текстури Кернса після 5 проходів гвинтової екструзії та подальшого відпалу сплаву титану VT1-0

Температура відпалу, °С	f_{HE}	f_{HN1}	f_{HN2}
після 5 проходів ГЕ	0,488	0,471	0,041
200	0,406	0,363	0,231
250	0,391	0,334	0,275
300	0,407	0,376	0,217
350	0,578	0,325	0,097
400	0,565	0,393	0,042

Для оцінення модуля Юнга досліджуваного титанового сплаву VT1-0

після деформування гвинтовою екструзією та відпалу згідно з (1) скористаємось текстурними коефіцієнтами Кернса (табл. 11) і модулями пружності монокристалів. У працях [13–16] показано результати вимірювань різними авторами модулів пружності монокристалів титану, близького за хімічним складом до досліджуваного сплаву VT1-0. Оскільки експериментальні результати різних авторів відрізняються, для подальших розрахунків візьмемо усереднені значення модулів пружності монокристалів титану.

Для оцінення модулів пружності зразків титану VT1-0 у напрямку осі екструзії (ОЕ) та поперечному напрямку (ПН) використаємо середні значення $E_c^{cp} \approx 141$ ГПа;

$E_a^{cp} \approx 107$ ГПа із праць [13–16]. Модулі пружності сплаву ВТ1-0 знаходили із співвідношень:

$$E_{HE} = f_{HE} \cdot E_c^{cp} + (1 - f_{HE}) \cdot E_a^{cp}; \quad (11)$$

$$E_{ПН1} = f_{ПН1} \cdot E_c^{cp} + (1 - f_{ПН1}) \cdot E_a^{cp}; \quad (12)$$

$$E_{ПН2} = f_{ПН2} \cdot E_c^{cp} + (1 - f_{ПН2}) \cdot E_a^{cp}. \quad (13)$$

Результати розрахунків наведені в таблиці 12.

Таблиця 12

Модулі пружності сплаву титану ВТ1-0, розраховані за текстурними параметрами Кернса (табл. 11) та усередненими пружними модулями монокристала за [13–16]

Модулі пружності сплаву титану ВТ1-0 після ГЕ та наступного відпалу				
	E_{HE} , ГПа	$E_{ПН1}$, ГПа	$E_{ПН2}$, ГПа	η , %
після 5 проходів ГЕ	123,6	123,0	108,4	14,0
200	120,8	119,3	114,0	5,96
Після відпалу за t , °C				
250	120,3	118,4	116,4	3,35
300	120,8	119,8	114,4	5,59
350	126,7	118,1	110,3	14,87
400	126,2	120,4	108,4	16,42

де $\eta = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{min}} \cdot 100\%$ – коефіцієнт анізотропії.

Експериментальний модуль пружності сплаву ВТ1-0 після ГЕ за даними [17] склав $E_{HE}^{експ} = 113$ ГПа. Розбіжність у 9,4 % може бути пов'язана з тим, що результат у [17] був отриманий шляхом одновісного

розтягування до рівня пластичної деформації $\varepsilon = 0,7\%$, з подальшим розвантаженням і повторним навантаженням. У цьому випадку можуть утворюватися мікродфекти, які знижують модуль пружності.

Для оцінювання величин меж міцності та плинності зразків сплаву титану ВТ1-0 після гвинтової екструзії за допомогою параметрів текстури Кернса потрібні відповідні дані монокристала. Тому знайдемо необхідні величини межі міцності та плинності монокристала сплаву ВТ1-0 вздовж осі c (відповідно σ_B^c і $\sigma_{0,2}^c$) і вздовж осі a (σ_B^a і $\sigma_{0,2}^a$). Розрахунки проведемо, використовуючи емпіричні співвідношення [14] між твердістю за Віккерсом H_V та межами міцності та плинності:

$$\sigma_B^c = \frac{H_V}{2,89}; \quad \sigma_{0,2}^c = \frac{H_V}{3,33}. \quad (14)$$

Усереднені за даними [11–14] величини твердості H_{Vcp} за даними наноіндентації титану ВЕ1-0 вздовж гексагональної осі $H_{Vcp}^c = 1780$ МПа, а в поперечному напрямку $H_{Vcp}^a = 1030$ МПа. Використовуючи (14), отримаємо:

$$\sigma_B^c = 615 \text{ МПа}; \quad \sigma_{0,2}^c = 534 \text{ МПа}; \quad (15)$$

$$\sigma_B^a = 356 \text{ МПа}; \quad \sigma_{0,2}^a = 309 \text{ МПа}. \quad (16)$$

Далі, використовуючи співвідношення, аналогічні (11)–(13) і дані (15), (16), ми розрахували властивості міцності та плинності титану ВТ1-0 після гвинтової екструзії та подальшого відпалу. Результати розрахунків наведені в таблиці 13.

Таблиця 13

Межі міцності та плинності титану ВТ1-0 після гвинтової екструзії та подальшого відпалу, отримані за коефіцієнтами текстури Кернса (табл. 11) та даними для монокристала (15), (16)

Температура відпалу, °C	σ_B^{HE} , МПа	$\sigma_{0,2}^{HE}$, МПа	$\sigma_B^{ПН1}$, МПа	$\sigma_{0,2}^{ПН1}$, МПа	$\sigma_B^{ПН2}$, МПа	$\sigma_{0,2}^{ПН2}$, МПа	η_{σ_B} , %	$\eta_{\sigma_{0,2}}$, %
–	482	419	478	415	367	319	32,0	32,0
200	461	400	450	391	416	361	11,0	11,0
250	457	397	443	384	427	371	7,0	7,0
300	462	401	454	394	412	358	12,0	12,0
350	506	439	440	382	381	331	33,0	33,0
400	502	436	458	397	367	319	37,0	37,0

Із таблиці 13 видно наявність анізотропії. Максимальні значення σ_B і $\sigma_{0,2}$ знаходяться в напрямку осі екструзії (HE). Коефіцієнти анізотропії (η) межі міцності та межі плинності мінімальні після відпалу за 250 °С. Подальше збільшення анізотропії з підвищенням температури відпалу пов'язане з рекристалізацією.

Експериментальні дані після 5 проходів GE [17] були такими: $\sigma_B^{HE} = 475$ МПа, а $\sigma_{0,2}^{HE} = 412$ МПа. Отримані нами відповідні розрахункові значення досліджуваних зразків (табл. 13) перевищують наведені в [17] приблизно на 1,5 і 1,7 % відповідно.

Висновки

1. Використання параметрів текстури Кернса та характеристик монокристалів магнієвих сплавів ZE10, Mg 5 % Li (мас. %), титану Grade1 і BT1-0 дозволило

розрахувати відповідні властивості полікристалів та їх анізотропію з відхиленням від експериментальних даних у межах 5–10 % після різних видів деформації: вальцювання, попереминого згинання і гвинтової екструзії.

2. Використання параметрів текстури Кернса, експериментальних значень модуля пружності, меж міцності та плинності полікристалічних листів досліджуваних магнієвих і титанових сплавів дозволило оцінити характеристики монокристалів із відхиленням від експериментальних не більше 10 %.

3. Між значеннями модуля пружності, механічними характеристиками досліджуваних листів магнієвих і титанових сплавів, з одного боку, та відповідними параметрами текстури Кернса, з іншого боку, існують сильні кореляційні зв'язки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Methods of leveling sheet metal. URL: <https://www.arku.com/en/magazine/sheet-metalleveling-methods-en/>
2. Segal V. Review : Modes and Processes of Severe Plastic Deformation (SPD). *Materials*. 2018. № 11 (7). P. 1175. URL: <https://doi.org/10.3390/ma11071175>
3. Magnesium-based alloy for wrought applications. URL: <http://www.sumobrain.com/patents/wipo/Magnesium-based-alloy-wrought-applications/WO2011146970A1.html>
4. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impuls Excitation of Vibration. URL: http://forlab.pt/wpcontent/uploads/2015/08/E1876_mvuj8965.pdf
5. X-ray diffraction (XRD). URL: <https://ywcmatsci.yale.edu/xrd>
6. Morris P. R. Reducing the Effects of Nonuniform Pole Distribution in Inverse Pole Figure Studies. *Journal of Applied Physics*. 1959. № 30 (4). Pp. 595–599. URL: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1702413>
7. Kearns J. J. Thermal expansion and preferred orientation in zircaloy. URL: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/WAPDTM472.xhtml>
8. San'kova S. V., Shkatulyak N. M., Usov V. V., Volchok N. A. The Elastic Constants of the Single Crystal of the Mg–Zn–Zr–REM Alloy from the Data of the Elastic Anisotropy and the Texture of the Polycrystalline Sheet. *International Journal of Metals*. 2014. Article ID 142920. 6 p. URL: <https://www.hindawi.com/journals/ijmet/2014/142920/>
9. Shkatulyak N. M., Usov V. V., Smirnova S. V. Single crystal magnesium lithium alloy elastic constants. *International Journal of Advances in Materials Science and Engineering (IJAMSE)*. 2015. № 4 (4). Pp. 1–11. URL: <https://issuu.com/ijamsejournal/docs/4415ijamse01/1>
10. Gong J. & Wilkinson A. Investigation of elastic properties of single-crystal α -Ti using microcantilever beams. *Philosophical Magazine Letters*. 2010. № 90 (7). Pp. 503–512. URL: <https://doi.org/10.1080/09500831003772989>
11. Zambaldi C., Yang Y., Bieler T.R. et al. Orientation informed nanoindentation of α -titanium : Indentation pileup in hexagonal metals deforming by prismatic slip. *Journal of Materials Research*. 2012. № 27. Pp. 356–367. URL: <https://doi.org/10.1557/jmr.2011.334>
12. Lubenets S. V., Rusakova A. V., Fomenko L. S., Moskalenko V. A. Micromechanical properties of single crystals and polycrystals of pure α -titanium: Anisotropy of microhardness, size effect, effect of the temperature (77-300 K). *Low Temp. Phys.* 2018. № 44 (1). Pp. 96–105. URL: https://www.researchgate.net/publication/322199541_Micromechanical_properties_of_single_crystals_and_polycrystals_of_pure_titanium_Anisotropy_of_microhardness_size_effect_effect_of_the_temperature_77-300_K
13. Weaver J. S. et al. On capturing the grain-scale elastic and plastic anisotropy of α -Ti with spherical nanoindentation and electron back-scattered diffraction. *Acta Materialia*. 2016. № 117. Pp. 23–34. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.053>
14. Zhang P., Li S. X., Zhang Z. F. General relationship between strength and hardness. *Materials Science and*

Engineering A. 2011. № 529. Pp. 62–73. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.08.061>

15. Gong J., Wilkinson A. Investigation of elastic properties of single-crystal α -Ti using microcantilever beams. *Philosophical Magazine Letters*. 2010. № 90 (7). Pp. 503–512. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/09500831003772989>

16. Zhang J.-M., Zhang Y., Xu K.-W., Ji V. Anisotropic elasticity in hexagonal crystals. *Thin Solid Films*. 2007. № 515 (17). Pp. 7020–7024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.01.045>

17. Karpinos B. S., Pavlenko D. V., Kachan O. Ya. Deformation of a submicrocrystalline VT1-0 titanium alloy under static loading. *Strength of Materials*. 2012. № 44 (1). Pp. 100–107. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11223-012-9354-9>

REFERENCES

1. Methods of leveling sheet metal. URL: <https://www.arku.com/en/magazine/sheet-metalleveling-methods-en/>

2. Segal V. Review : Modes and Processes of Severe Plastic Deformation (SPD). *Materials*. 2018, no. 11 (7), pp. 1175. URL: <https://doi.org/10.3390/ma11071175>

3. Magnesium-based alloy for wrought applications. URL: <http://www.sumobrain.com/patents/wipo/Magnesium-based-alloy-wrought-applications/WO2011146970A1.html>

4. Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impuls Excitation of Vibration. URL: http://forlab.pt/wpcontent/uploads/2015/08/E1876_mvuj8965.pdf

5. X-ray diffraction (XRD). URL: <https://ywcmatsci.yale.edu/xrd>

6. Morris P.R. Reducing the Effects of Nonuniform Pole Distribution in Inverse Pole Figure Studies. *Journal of Applied Physics*. 1959, no. 30 (4), pp. 595–599. URL: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1702413>

7. Kearns J.J. Thermal expansion and preferred orientation in zircaloy. URL: <https://ntrl.ntis.gov/NTRL/dashboard/searchResults/titleDetail/WAPDTM472.xhtml>

8. San'kova S.V., Shkatulyak N.M., Usov V.V. and Volchok N.A. The Elastic Constants of the Single Crystal of the Mg–Zn–Zr–REM Alloy from the Data of the Elastic Anisotropy and the Texture of the Polycrystalline Sheet. *International Journal of Metals*. 2014, article ID 142920, 6 pages. URL: <https://www.hindawi.com/journals/ijmet/2014/142920/>

9. Shkatulyak N.M., Usov V.V. and Smirnova S.V. Single crystal magnesium lithium alloy elastic constants. *International Journal of Advances in Materials Science and Engineering (IJAMSE)*. 2015, no. 4 (4), pp. 1–11. URL: <https://issuu.com/ijamsejournal/docs/4415ijamse01/1>

10. Gong J. and Wilkinson A. Investigation of elastic properties of single-crystal α -Ti using microcantilever beams. *Philosophical Magazine Letters*. 2010, no. 90 (7), pp. 503–512. URL: <https://doi.org/10.1080/09500831003772989>

11. Zambaldi C., Yang Y., Bieler T.R. et al. Orientation informed nanoindentation of α -titanium : Indentation pileup in hexagonal metals deforming by prismatic slip. *Journal of Materials Research*. 2012, no. 27, pp. 356–367. URL: <https://doi.org/10.1557/jmr.2011.334>

12. Lubenets S.V., Rusakova A.V., Fomenko L.S. and Moskalenko V.A. Micromechanical properties of single crystals and polycrystals of pure α -titanium : Anisotropy of microhardness, size effect, effect of the temperature (77-300 K). *Low Temp. Phys.* 2018, no. 44 (1), pp. 96–105. URL: https://www.researchgate.net/publication/322199541_Micromechanical_properties_of_single_crystals_and_polycrystals_of_pure_titanium_Anisotropy_of_microhardness_size_effect_effect_of_the_temperature_77-300_K

13. Weaver J.S. et. al. On capturing the grain-scale elastic and plastic anisotropy of alpha-Ti with spherical nanoindentation and electron back-scattered diffraction. *Acta Materialia*. 2016, no. 117, pp. 23–34. URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.06.053>

14. Zhang P., Li S. X. and Zhang Z.F. General relationship between strength and hardness. *Materials Science and Engineering A*. 2011, no. 529, pp. 62–73. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.08.061>

15. Gong J. and Wilkinson A. Investigation of elastic properties of single-crystal α -Ti using microcantilever beams. *Philosophical Magazine Letters*. 2010, no. 90 (7), pp. 503–512. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/09500831003772989>

16. Zhang J.-M., Zhang Y., Xu K.-W. and Ji V. Anisotropic elasticity in hexagonal crystals. *Thin Solid Films*. 2007, no. 515 (17), pp. 7020–7024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2007.01.045>

17. Karpinos B.S., Pavlenko D.V. and Kachan O.Ya. Deformation of a submicrocrystalline VT1-0 titanium alloy under static loading. *Strength of Materials*. 2012, no. 44 (1), pp. 100–107. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11223-012-9354-9>

Надійшла до редакції: 16.04.2024.

УДК 620.92

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.155.1086

ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ОРІЄНТАЦІЇ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

ЮРЧЕНКО Є. Л.¹, канд. техн. наук, доц.,

КОВАЛЬ О. О.², канд. техн. наук, доц.,

ТИМОФЄЄВ В. В.^{3*}, студ.,

ОДНОБУРЦЕВ Р. О.⁴, маг.

¹ Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 487-91-73, e-mail: yel@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9356-3261

² Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 92-999-55, e-mail: koval.olena@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7805-6811

^{3*} Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 632-85-69, e-mail: yovativ@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-3983-199X

⁴ Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +380 (097) 048-13-14, e-mail: rostyslav.odnoburtsev@gmail.com

Анотація. Досліджується питання оптимізації параметрів установаження сонячних панелей для максимізації їх ефективності в умовах сучасної України, де традиційна енергетична інфраструктура зазнає значних руйнувань через війну. Особлива увага приділяється параметрам, таким як кут нахилу та орієнтація сонячних панелей відносно сонця, що впливають на загальну продуктивність системи. Дослідження проводилося на базі сонячної електростанції, розташованої на даху навчального корпусу Українського державного університету науки і технологій у місті Дніпро. Проведено детальний аналіз роботи станції з орієнтацією сонячних масивів на південний захід (азимут 222°) та порівняння результатів із розрахунками, отриманими за допомогою калькулятора PVWatts®, розробленого Національною лабораторією енергетики США (NREL). Результати дослідження показали, що фактична річна генерація електроенергії становила 3 917 кВт·год, що наближається до прогнозованих 3 973 кВт·год, отриманих за допомогою PVWatts®. Аналіз також продемонстрував, що зміна орієнтації сонячних панелей з південного заходу на південь (азимут 180°) може збільшити річну генерацію електроенергії до 4 227 кВт·год, що підтверджує максимальну ефективність південної орієнтації. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації існуючих і майбутніх проектів сонячних електростанцій, забезпечуючи більш ефективне використання ресурсів та підвищення загальної ефективності енергосистем. Це знання сприятиме зниженню залежності від викопних джерел енергії, скороченню викидів парникових газів та забезпеченню безперебійного постачання електроенергії для населення та критично важливих об'єктів в умовах руйнування традиційної енергетичної інфраструктури.

Ключові слова: орієнтація сонячних панелей; ефективність сонячної енергії; оптимальний кут нахилу; відновлювана енергія; продуктивність сонячних панелей

SELECTION OF OPTIMAL SOLAR PANEL ORIENTATION PARAMETERS

YURCHENKO Ye.L.¹, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

KOVAL O.O.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,

TIMOFEEV V.V.^{3*}, *Stud.*,

ODNOBURTSEV R.O.⁴, *Master's degree*

¹Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 487-91-73, e-mail: yel@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0002-9356-3261

² Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 92-999-55, e-mail: koval.olena@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7805-6811

^{3*} Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 632-85-69, e-mail: vovatim@gmail.com, ORCID ID: 0009-0005-3983-199X

⁴ Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +380 (097) 048-13-14, e-mail: rostyslav.odnoblurtev@gmail.com

Abstract. The article investigates the issue of optimising the installation parameters of solar panels to maximise their efficiency in the conditions of modern Ukraine, where the traditional energy infrastructure is severely damaged due to military operations. Particular attention is paid to parameters such as the angle of inclination and orientation of solar panels relative to the sun, which affect the overall performance of the system. The study was carried out on the basis of a solar power plant located on the roof of the educational building of the Ukrainian State University of Science and Technology in Dnipro. A detailed analysis of the plant's operation was carried out with the solar arrays oriented to the southwest (azimuth 222°) and the results were compared with the calculations obtained using the PVWatts® calculator developed by the US National Energy Laboratory (NREL). The results of the study showed that the actual annual electricity generation was 3917 kWh, which is close to the predicted 3973 kWh obtained using PVWatts®. The analysis also demonstrated that changing the orientation of the solar panels from southwest to south (180° azimuth) could increase the annual electricity generation to 4227 kWh, which confirms the maximum efficiency of the southern orientation. The findings can be used to optimise existing and future solar power plant projects, ensuring more efficient use of resources and improving the overall efficiency of power systems. This knowledge will help to reduce dependence on fossil energy sources, reduce greenhouse gas emissions and ensure uninterrupted electricity supply for the population and critical facilities in the face of the destruction of traditional energy infrastructure.

Keywords: *solar panel orientation; solar energy efficiency; optimal tilt angle; renewable energy; solar panel performance*

Постановка проблеми. У сучасному світі спостерігається стрімке зростання попиту на відновлювані джерела енергії. Особливо актуальною ця проблема стала для України, яка перебуває у стані війни з росією і нашу енергетичну систему знищує ворог. В умовах руйнування традиційної енергетичної інфраструктури важливо шукати альтернативні джерела енергії, які можуть забезпечити безперервне постачання електроенергії для населення та критично важливих об'єктів.

Один із найпоширеніших та найперспективніших видів відновлюваної енергії – сонячна. Використання сонячних панелей для генерації електроенергії дозволяє знизити залежність від викопних джерел енергії та скоротити викиди парникових газів, що сприяє збереженню навколишнього середовища.

Проте ефективність роботи сонячних панелей значною мірою залежить від таких параметрів як кут нахилу та орієнтація відносно сонця [1]. Невідповідний вибір цих параметрів може спричинити значні втрати енергії, що знижує загальну ефективність системи та збільшує час окупності

інвестицій у встановлення сонячних панелей.

Існує необхідність в оптимізації параметрів установа сонячних панелей для забезпечення максимальної ефективності генерації електроенергії. Це завдання ускладнюється великою кількістю змінних, які потрібно враховувати, таких як географічне розташування, кліматичні умови, сезонні зміни, а також технічні характеристики самих панелей [4].

Мета статті – детальний аналіз орієнтації сонячних панелей на їх ефективність. Це дозволить визначити оптимальні параметри встановлення, які забезпечать максимальну продуктивність сонячних панелей у різних умовах експлуатації. В результаті дослідження будуть розроблені рекомендації для проектування та встановлення сонячних панелей, що сприятиме підвищенню ефективності використання сонячної енергії.

Об'єкт дослідження – сонячна електростанція, розташована на даху навчального корпусу Українського державного університету науки і технологій,

а також у частині приміщень Енергоінноваційного.

Розташування сонячних панелей та орієнтація за сторонами світу зображені на рисунку 1.

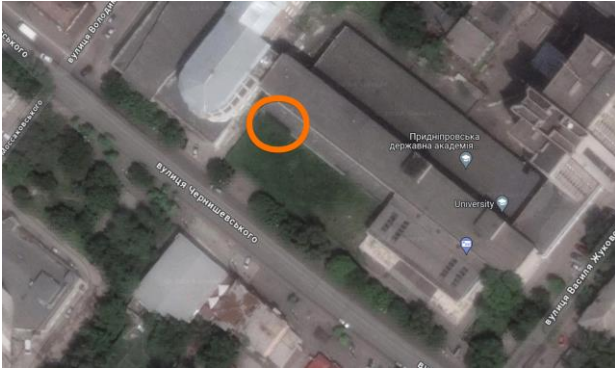


Рис. 1. Розташування сонячних масивів

Сонячна електростанція складається з 20 монокристалічних сонячних панелей моделі UL-405M-144. Ефективність цієї моделі досягає 22,65 %. Високий ККД досягнутий завдяки монокристалічній структурі, використанню половинчастих комірок і технології Tiling Ribbon (TR). TR-технологія передбачає безшовне з'єднання комірок та усунення розривів, що значно підвищує ефективність.

Сонячний масив орієнтований на південний захід. Усі дані про генерацію електроенергії звітуються в електронному форматі, що дозволяє відстежувати та досліджувати генерацію електроенергії та потужність СЕС протягом часу. Це також дозволяє за потреби змінювати кут нахилу сонячних панелей і аналізувати ефективність СЕС.

Конструктивні можливості дозволяють орієнтувати сонячні масиви тільки в південно-західному напрямку. Однак аналіз ефективності роботи можливий шляхом визначення сонячної інсоляції, яка безпосередньо впливає на значну генерацію електроенергії. Аналіз проводиться на основі відстеження генерації електроенергії як у зимовий, так і в літній період для порівняння показників та визначення оптимального орієнтування сонячних масивів щодо сторін світу. Джерелом теплових надходжень від сонця є сонячна радіація, режим якої характерний у даній

місцевості; її визначають орієнтацією сприймальних поверхонь [2].

Максимальні показники генерації електроенергії, тобто максимальна вихідна потужність СЕС, залежать від отриманої максимальної потужності сонячних променів під час пікових сонячних годин. Об'єднавши два значущі фактори — сонячну інсоляцію та показники іррадіації, тобто максимальної кількості сонячної енергії, — можна проаналізувати, яка орієнтація найбільш ефективна для роботи СЕС.

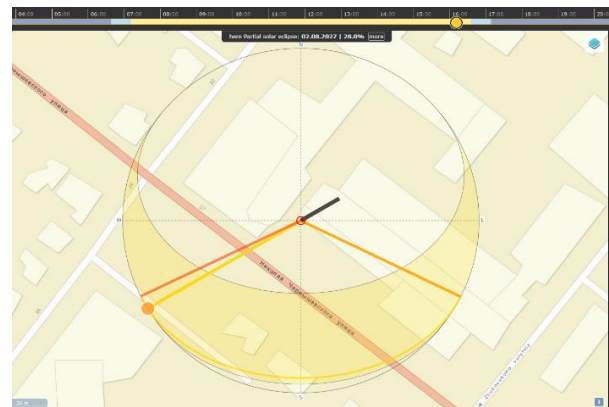


Рис. 2. Дані інсоляції за 30 січня 2023 року

30.Jan.2023 16:12 UTC+2 LIVE	
Solar data for the selected location	
Dawn:	06:38:03
Sunrise:	07:11:32
Culmination:	11:53:00
Sunset:	16:35:01
Dusk:	17:08:31
Daylight duration:	9h23m29s
Distance [km]:	147,365,486
Altitude:	2.70°
Azimuth:	239.65°
Shadow length [m]:	21.19
at an object level [m]:	1

Рис. 3. Характеристики сонячного дня на 30 січня 2023 року

Спершу аналізуємо ефективність роботи СЕС у робочому положенні з орієнтацією сонячних панелей на південний захід. Аналіз базується на зібраних даних за чотири дні різних сезонів: зимовий, весняний, літній та осінній.

Зібрані дані об'єднують у загальну річну генерацію електроенергії та порівнюють із

показниками можливої генерації електроенергії через калькулятор PVWatts, який дозволяє аналізувати генерацію електроенергії протягом року [3].

Порівняння характеристик проводиться залежно від зміни азимуту орієнтації сонячних масивів. У разі орієнтації на південь, де, як зазначалося раніше, є найбільші показники інсоляції, азимут складає 180°, тоді як за орієнтації на південний захід, на який спрямований масив дослідження, азимут складає 222°.

З отриманих результатів генерації електроенергії спостерігається, що максимальне значення потужності фіксується о 12-й годині дня. Початок

генерації електроенергії фіксується о 10-й годині ранку, а спад генерації відбувається близько 16-ї години дня.

З настанням весняного періоду, згідно з результатами інсоляції, видно, що пік сонячних годин значно збільшується, що підвищує генерацію електроенергії. Це підтверджують дані генерації електроенергії за 14 березня 2023 року, де максимальна потужність склала 4 Вт.

Влітку зростає як рівень інсоляції, так і пік сонячних годин, що значно підвищує генерацію електроенергії.

Проведено аналіз за кожен пору року. Зведені дані генерації електроенергії наведені в таблиці.

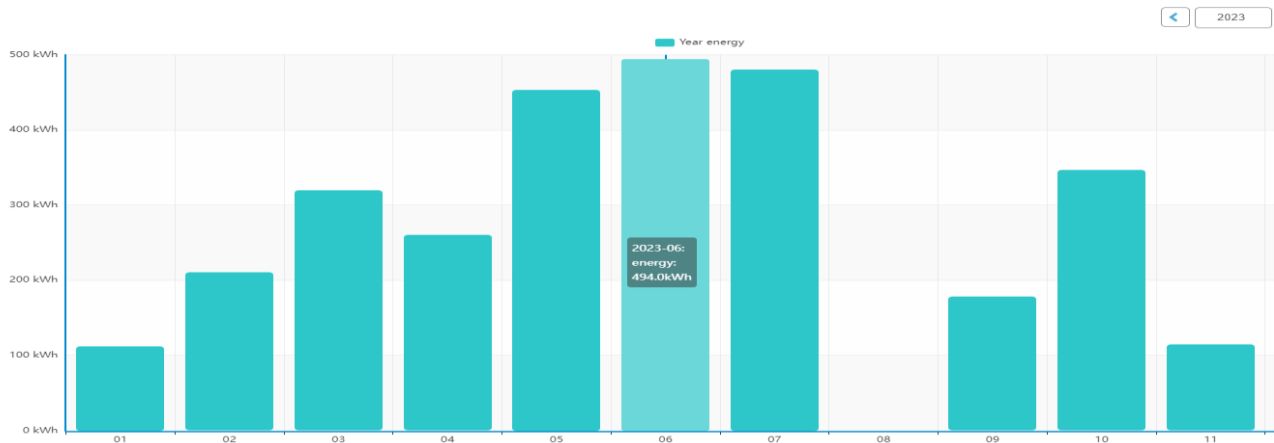


Рис. 4. Генерація електроенергії за 2023 рік

Т а б л и ц я

Зведені показники генерації електроенергії

Місяць	Обсяг виробництва електроенергії, кВт*год
січень	112,0
березень	319,0
червень	494,0
жовтень	346,0
Всього за 2023 рік	3 917,0

Порівняння показників генерації електроенергії з калькулятором PVWatts.

Отримавши зведені результати генерації електроенергії за рік, порівнюємо ефективність роботи сонячної електростанції (СЕС) з розрахунками, проведеними за допомогою калькулятора PVWatts® [3].

Калькулятор PVWatts® – це онлайн-інструмент, розроблений Національною лабораторією енергетики США (NREL),

призначений для прогнозування продуктивності систем сонячних панелей. Цей інструмент широко застосовують як професіонали у сфері сонячної енергетики, так і звичайні користувачі, які бажають встановити сонячні панелі на своїх будинках або підприємствах.

Основна мета PVWatts® – надати оцінку щоденної та щорічної генерації електроенергії сонячною установкою в певному місці [3]. Для обчислення враховується багато факторів, включаючи географічні координати, нахил даху (якщо це установка на даху), орієнтація панелей, тип сонячних панелей та інші параметри.

Користувач вводить дані про місце розташування, характеристики установки та бажаний розмір сонячної системи. Після цього калькулятор надає прогнозовану енергопродуктивність у кіловат-годинах

(кВт-год) на основі місцевих кліматичних умов та інших факторів.

Для розрахунку генерації електроенергії за допомогою PVWatts® використовуються такі вихідні дані:

- Координати СЕС: вулиця, будинок, місто.
- Розмір системи постійного струму: 4 кВт.
- Тип модуля: стандартний.
- Системні втрати: за замовчуванням 14,08 %.
- Кут нахилу панелей: 50°.
- Азимут (орієнтація сонячного масиву): південний захід (222°).

РЕЗУЛЬТАТИ		
Роздрукувати результати		
3973 кВт/год*		
місяць	Сонячна радіація (кВт/год / м / день)	Енергія змінного струму (кВт/год)
січня	0,62	50
лютий	1,90	180
березень	2,97	307
квітень	5,05	477
травень	5,76	548
червень	5,71	514
липень	4,68	431
серпень	6,51	600
вересень	3,75	347
жовтень	3,64	357
листопад	1,44	140
грудень	0,24	21
Річний	3,51	3,972

Рис. 5. Результати розрахунку калькулятора PVWatts (азимут 222°)

Увівши всі вихідні дані, ми отримали такий результат: щорічна генерація електроенергії склала 3 973 кВт-год, що максимально наближено до фактичної генерації електроенергії СЕС за 2023 рік (рис. 5). Наближені значення, розраховані за допомогою калькулятора, демонструють високу точність визначення генерації електроенергії не тільки за рік, а і щомісяця.

Отримавши результати розрахунків за допомогою калькулятора PVWatts, ми можемо підтвердити, що сонячна електростанція ПДАБА, орієнтована на південний захід, демонструє ефективність

роботи на рівні 93 %. Цей показник порівнюється з максимально можливою ефективністю у 100 %, якої можна досягти у разі орієнтації на південь.

Для дослідження максимально можливої ефективності роботи сонячної електростанції ми замінили в розрахунках калькулятора азимут орієнтації сонячних масивів. Як зазначалося раніше, максимальна інсоляція досягається за орієнтації сонячних масивів на південь, тобто з азимутом 180°.

Після зміни значення азимуту ми отримали нові результати: річна генерація електроенергії зросла до 4 227 кВт-год. Це свідчить, що саме південна орієнтація сонячних масивів забезпечує максимальні показники генерації електроенергії, а отже, і найвищу ефективність роботи сонячної електростанції.

Висновки

Аналіз показує, що зміна орієнтації сонячних панелей з південного заходу на південь дозволяє значно підвищити їх продуктивність. Враховуючи ці результати, можна зробити висновок, що для максимального використання сонячної енергії найкращою орієнтацією є південна, що підтверджується як теоретичними розрахунками, так і практичними вимірами.

Ці знання можна застосувати для оптимізації існуючих і майбутніх проектів сонячних електростанцій, забезпечуючи таким чином більш ефективне використання ресурсів та підвищення загальної ефективності енергосистем.

Ефективність роботи СЕС визначається не тільки шляхом перевірки даних через калькулятор, а і через самі значення інсоляції, наведені вище, де чітко зображено, що саме південний напрямок орієнтації сонячних масивів дає більше значення рівня інсоляції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гергега С., Коваль В., Філюк Я. Збільшення ефективності використання сонячних панелей. *Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування : матер. III Всеукр. наук.-техн. конф.* (8–9 червня 2017 р.). ТНТУ, 2017. С. 202.

2. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. [Чинний від 2023–03–01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022. URL: <http://uas.gov.ua> (Національний стандарт України).
3. Калькулятор PVWatts®. URL: <https://pvwatts.nrel.gov/>
4. Орієнтація та кут нахилу сонячних колекторів. URL: <https://solarsoul.net/uk/oriyentaciya-ta-kut-naxilu-sonyachnix-kolektoriv>

REFERENCES

1. Gerega S., Koval V. and Filiuk Ya. *Zbil'shennya efektyvnosti vykorystannya sonyachnykh paneley* [Increasing the efficiency of using solar panels]. *Teoretychni ta prykladni aspekty radiotekhniki i pryladobuduvannya : Materialy III Vseukrayins'koyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi* [Theoretical and Applied Aspects of Radio Engineering and Instrumentation : Materials of the III All-Ukrainian Scientific and Technical Conference]. June 8–9, TNTU, 2017, 202 p. (in Ukrainian).
2. *DSTU 9190:2022. Enerhetychna efektyvnist' budivel'. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannya pid chas opalennya, okholodzhennya, ventylyatsiyi, osvitlennya ta haryachoho vodopostachannya* [DSTU 9190:2022. Energy efficiency of buildings. Method for calculation of energy use for space heating, cooling, ventilation, lighting and domestic hot water]. Valid from 2023–03–01. Kyiv : SE “UkrSSEC” Publ., 2022. URL: <http://uas.gov.ua> (National Standard of Ukraine). (in Ukrainian).
3. *Kal'kulyator PVWatts®* [Calculator PVWatts®]. URL: <https://pvwatts.nrel.gov/> (in Ukrainian).
4. *Oriyentatsiya ta kut nakhylu sonyachnykh kolektoriv* [Orientation and angle of inclination of solar collectors]. URL: <https://solarsoul.net/uk/oriyentaciya-ta-kut-naxilu-sonyachnix-kolektoriv> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 15.04.2024.

Відповідальність за достовірність інформації, що міститься в друкованих матеріалах,
несуть автори.
Редколегія не завжди поділяє авторську точку зору.

Комп'ютерну верстку виконано в редакційно-видавничому відділі ННІ «ПДАБА».

Адреса редакції:
✉ вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Україна, м. Дніпро
кімната 501 (відповідальний секретар)
☎ +38 (050) 452-43-63
e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com

Підписано до друку 05.09.2024 р. Формат 60×84 1/8.
Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 10,00. Умовн. фарб.-відб. арк. 10,00.
Обл.-видавн. арк. 20,00. Наклад 50 прим. Зам. 210

Authors are responsible for the accuracy of the information
contained in the printed materials.
Editors do not always agree with the author's point of view.

Desktop publishing is performed in the Editorial Department of ESI “PSACEA”.

Editorial address:
✉ room 501 (Executive Secretary)
24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine
☎ +38 (050) 452-43-63
e-mail: mitomdnipro1997@gmail.com

Sent to press on 05 September 2024. Format 60×84 1/8.
Digital printing. Conventional quire 10,00. Conventional colour imprints 10,00.
Publisher's signatures 20,00. Number of copies 50. Order 210