

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний університет

МЕТАЛУРГІЯ

Випуск 1

Видається з 1998 року

Засновник: Запорізький національний університет



Видавничий дім
«Гельветика»
2025

*Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа: Рішення Національної ради України
з питань телебачення і радіомовлення № 2607 від 29.08.2024 року.
Видання включено до Переліку фахових видань України: категорія «Б» з технічних наук
(наказ № 886 від 02.07.2020 року)
Друкується за рішенням Вченої ради Запорізького національного університету
(протокол № 11 від 27.05.2025 р.)*

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Артемчук В.В., д-р техн. наук, професор (Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна)
Бєлоконь Ю.О., д-р техн. наук, професор (Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна)
Бурбелко А.О., д-р техн. наук, професор (AGH University of Science and Technology Faculty of Foundry Engineering, м. Краків, Польща)
Верховлюк О.М., д-р техн. наук, професор (Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАНУ, м. Київ, Україна)
Гіржон В.В., д-р фіз.-мат. наук, професор (Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна)
Григор'єв С.М., д-р техн. наук, професор (Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна)
Гридин О.Ю., д-р техн. наук, професор (Падерборнський університет, м. Падерборн, Німеччина)
Грицак В.З., д-р техн. наук, професор (Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна)
Карпенко Г.В., канд. техн. наук, доцент (Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна)
Коваленко В.Л., д-р техн. наук, доцент (Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна)

Критська Т.В., д-р техн. наук, професор (Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна)
Максименко А.Л., д-р техн. наук, ст. наук. співробітник (Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ, Україна)
Метеленко Н.Г., д-р економ. наук, професор (Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна)
Овчинников О.В., д-р техн. наук, професор (ПАТ «Інститут Титану», м. Запоріжжя, Україна)
Пазюк М.Ю., д-р техн. наук, професор (Запорізький національний університет, м. Запоріжжя, Україна)
Рудь В.Д., д-р техн. наук, професор (Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна)
Скачков В.О., д-р техн. наук, професор (Запорізький національний університет, м. Запоріжжя), головний редактор
Середа Б.П., д-р техн. наук, професор (Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, Україна)
Фролов Г.О., д-р техн. наук, ст. наук. співробітник (Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, м. Київ, Україна)

Головний редактор	Скачков В.О. , д-р техн. наук, професор
Відповідальні секретарі	Карпенко Г.В. , канд. техн. наук, доцент Манідіна Є.А. , канд. техн. наук, доцент

М 54 **МЕТАЛУРГІЯ** / Гол. ред. В. О. Скачков. – Запоріжжя : Видавничий дім «Гельветика», 2025. – Вип. 1. – 188 с.

ISSN 2071-3789

Розглянуто теоретичні та технологічні проблеми чорної і кольорової металургії: питання спікання залізорудної шихти та твердого палива, удосконалення сталеплавильного виробництва, механізму формування структури металу за електрошлакового наплавлення у струмопідводному кристалізаторі, одержання композиційних електрохімічних покриттів на основі нікелю, хрому, міді, цинку, благородних металів, а також аналізу методів синтезу тугоплавких сполук. Обговорено питання прокатного виробництва, металургійної теплотехніки, автоматизації виробничих процесів, а також охорони праці у металургійній промисловості.

Журнал призначений для наукових і науково-педагогічних працівників, аспірантів і студентів металургійних спеціальностей закладів вищої освіти, а також інженерно-технічних працівників металургійної галузі.

Іл. 47. Табл. 25. Бібліогр. 335 назв.

УДК 669.1+669.2/8

ЗМІСТ

Вілкул Ю.Г., Ступнік М.І., Савельєв С.Г., Єременко Г.І., Ярош Т.П. Перспективи трансформації чорної металургії України в «зелену».....	7
Лаптева Г.М., Биковський О.Г., Єфанов В.С. Металургійні та технологічні аспекти зварювання композитних і різнорідних металів.....	16
Vlasov A., Vasilchenko T., Hrechanyi O., Ivakhnenko O., Skrypka R. Analysis of installation and basising methods of nodes of technological lines of metallurgical shopping plants.....	27
Григор'єв С.М., Міщенко А.Г., Яковлєв Д.В., Скачков Р.О. Математичне моделювання та оптимізація техніко-економічних показників виробництва і використання металізованого молібденового концентрату.....	35
Малишев В.В., Габ А.І., Шахнін Д.Б., Паламаренко А.Ю., Скачкова К.Є. Маркетингові дослідження світового ринку магнію.....	45
Бєлоконь Ю.О., Шапуров О.О., Гречаний О.М., Проценко В.М. Технології синтезу високоентропійних сплавів: сучасний стан і майбутні напрямки.....	58
Скачков В.О., Варченко Д.А., Карпенко Г.В., Кириченко О.Г. Сучасний стан науково-технічної проблеми впливу хімічних елементів на показники міцності ливарних сплавів на основі нікелю.....	71
Скачков В.О., Курінний М.С., Бехтер Р.В., Гнатишак А.Р. Аналіз процесів фазоутворення в складнолегованих сплавах.....	84
Таратута К.В., Бондаренко Ю.В., Явтушенко Г.В. Визначення енергосилових параметрів процесу волочіння дроту через подвійні волокна.....	96
Грідяєв В.В., Манідіна Є.А., Савельєв Д.В., Румянцев В.Р., Карпенко Г.В. Комплексна безпека електричних силових трансформаторів в умовах ворожих обстрілів: електробезпека, пожежна безпека та цивільний захист...106	106
Кожемякін Г.Б., Бєлоконь К.В., Румянцев В.Р. Знешкодження високомінералізованих стічних вод металургійних виробництв на проміжному твердому теплоносії.....	114
Кухар В.В., Чупринов Є.В., Навольнєв І.Ю. Вплив властивостей шихти та застосування пар на енергоспоживання і продуктивність випалювальної машини: промислова оцінка та прогнозування.....	121
Башлій С.В., Ніколенко А.В., Коваленко І.І., Тітов А.О., Чікаловець Я.С. Стратегія енергозбереження на промислових підприємствах.....	133
Харченко О.В., Воляр Р.М., Юров М.Ю. Дослідження впливу частки брукху на оптимальні параметри киснево-конвертерної плавки.....	142
Таратута К.В., Кулік Т.О., Олійник В.А. Методологічні підходи до вибору систем технічного обслуговування, що орієнтовані на надійність металургійного обладнання.....	154
Башлій С.В., Коваленко В.Л., Радченко В.В., Верьовкін О.В., Чабанюк М.Ю. Ефективність функціонування гідроенергетики в провідних країнах світу...163	163

Капустян О.Є., Погрелюк І.М., Лаврись С.М., Канашевич Г.В., Білоник І.М., Осіпов М.Ю., Завгородній О.В., Білоник Д.І. Отримання титан-молібденових сферичних порошків методом PREP з використанням катодів, виготовлених безкамерною електрошлаковою виплавною.....	174
Ахінько О.В. Гідрид титану, як один з основних продуктів отримання титанових порошків.....	183

CONTENTS

Vilkul Y., Stupnik M., Saveliev S., Yeremenko H., Yarosh T. Prospects for the transformation of Ukraine's ferrous metallurgy into "green" metallurgy.....	7
Lapteva A., Bykovsky O., Yefanov V. Metallurgical and technological aspects of welding composite and dissectional metals.....	16
Vlasov A., Vasilchenko T., Hrechanyi O., Ivakhnenko O., Skrypka R. Analysis of installation and basing methods of nodes of technological lines of metallurgical shopping plants.....	27
Hrigoriev S., Myshchenko A., Yakovlev D., Skachkov R. Mathematical modeling and optimization of technical and economic indicators of production and use of metallised molybdenum concentrate.....	35
Malyshev V., Gab A., Shakhnin D., Palamarenko A., Skachkova K. Marketing research of the global magnesium market.....	45
Belokon Y., Shapurov O., Hrechanyi O., Protsenko V. Technologies for the synthesis of high-entropy alloys: current state and future directions.....	58
Skachkov V., Varchenko D., Karpenko H., Kyrychenko O. Current station of scientific and technical problems in the inflection of chemical elements on the indicators of the indicators of the intelligence of livery alloys based on nickel.....	71
Skachkov V., Kurinny M., Bekhter R., Hnatyshak A. Analysis of phase formation processes in complex alloys.....	84
Taratuta K., Bondarenko Y., Yavtushenko H. Determination of energy parameters of the wire drawing process through double drawings.....	96
Gridiaiev V., Manidina Y., Saveliev D., Rummyantsev V., Karpenko H. Comprehensive safety of electrical power transformers under hostile shelling: electrical safety, fire safety, and civil protection.....	106
Kozhemiakin G., Belokon' K., Rummyantsev V. Neutralization of highly mineralized wastewater from metallurgical production using an intermediate solid coolant.....	114
Kukhar V., Chuprinov E., Navolniev I. Effect of feed mix properties and surfactant application on energy consumption and productivity of an induration machine: industrial assessment and predictive modelling.....	121
Bashliy S., Nikolenko A., Kovalenko I., Titov A., Chikalovets Y. Energy saving strategy at industrial enterprises.....	133
Kharchenko O., Volyar R., Yurov M. Research on the influence of the scrap portion on the optimal parameters of the oxygen-converter melting.....	142
Taratuta K., Kulik T., Oliinyk V. Methodological approaches to the selection of systems reliability-centered maintenance metallurgical equipment.....	154
Bashliy S., Kovalenko V., Radchenko V., Vervovkin O., Chabanyuk M. Engineering in providing territories of the world effectiveness of the functioning of hydropower.....	163

Kapustian O., Pogrelyuk I., Lavris S., Kanashevich G., Bilonyk I., Osipov M., Zavgorodniy O., Bilonyk D. Obtaining titanium-molybdenum spherical powder by the prep method using cathodes manufactured by chamber-less electroslag smelting.....	174
Akhinko O. Titanium hydride as one of the main products in the production of titanium powders.....	183

Вілкул Юрій Григорович, доктор технічних наук, професор, президент Академії гірничих наук України, ORCID: 0000-0003-3979-3231

Ступнік Микола Іванович, доктор технічних наук, професор, ректор, Криворізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3318-3889

Савельєв Сергій Геннадійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри металургії чорних металів і ливарного виробництва, Криворізький національний університет, ORCID: 0000-0001-6263-9422

Єременко Геннадій Іванович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри відкритих гірничих робіт, Криворізький національний університет, ORCID: 0009-0006-9997-6784

Ярош Тетяна Петрівна, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри металургії чорних металів і ливарного виробництва, Криворізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3455-9630

ПЕРСПЕКТИВИ ТРАНСФОРМАЦІЇ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ УКРАЇНИ В «ЗЕЛЕНУ»

В представлений роботі визначені фізико-хімічні особливості типової схеми безкоксового виробництва сталі у порівнянні з традиційною схемою. Доведено ефективність шведської металургійної промисловості, головним досягненням якої стало перше в світі отримання у черні 2021 року «зеленого» заліза за технологією ГІБРИТ. Наведені основні положення виступів учасників Міжнародного форуму «Зелена» металургія – на шляху до відновлення та трансформації промислового сектору економіки України», який відбувся 20 листопада 2024 року у місті Кривому Розі. Наголошено, що детерміноване технічне поняття «зелена» металургія – це процес виробництва металу, в якому всі складові елементи технології здійснюються з використанням лише відновлюваних джерел енергії і без викидів діоксиду вуглецю в довкілля. Ця умова поширюється також на всі матеріали, які використовуються в процесі виробництві металу. Така металургія можлива лише в умовах «зеленої» економіки, яка є справою майбутнього, адже перехід до неї потребує багато часу і значних витрат. Сьогодні питання полягає в здійсненні максимально можливих кроків на шляху до чистої «зеленої» металургії. Існують сучасні ефективні розробки окремих процесів виробництва сталі, що майже повністю відповідають принципам «зеленої» технології. При виборі способу промислової реалізації процесу виробництва «зеленої» сталі, поряд з екологічними і техніко-економічними показниками, необхідно враховувати вимоги до характеристик вихідної сировини.

Ключові слова: процес, метод, виробництво, технологія, сталь, дослідження

Вступ. Поява незвичного і навіть трохи дивного терміну «зелена металургія» на певному етапі розвитку металургійної галузі цілком закономірна, тому, що він є одним із проявів глобального поступового переходу людства до «зеленої» економіки. Цей напрямок розвитку, що сформувався наприкінці ХХ століття, підкреслює необхідність скорочення негативного впливу виробничої діяльності людини на сферу її проживання і ставить в основу сталій розвиток економіки з мінімальними ризиками для навколишнього середовища. Але ще століття тому видатні вчені-металурги Д.І. Менделєєв, Д.К. Чернов, А.А. Байков вважали можливим і доцільним пряме одержання заліза з руд, минаючи чавун, що сьогодні є технічною суттю «зеленої» металургії [1]. Таким чином, екологічне прагнення широкого загалу до зеленої економіки, в тому числі до зеленої металургії, з одного боку, доповнювалось і опиралось на впевненість вчених-металургів щодо теоретичної можливості і технологічної доцільності безкоксової мета-

лургії, з іншого боку подібний збіг поглядів і задач забезпечив успішне просування до бажаної мети.

Основна фізико-хімічна відмінність безкоксової металургійної схеми полягає в тому, що вміст кисню в залізорудному матеріалі, що оброблюється, знижується поступово. У традиційній схемі одержання металу вміст кисню знижується від ~ 20 % у руді до 0,001 % у чавуні, а потім знову підвищується до 0,1 % у сталі. У безкоксовій схемі кількість кисню плавно знижується від 20 % до 1 % у металізованій сировині, а потім, після плавки в електропечі, знижується до 0,1% у готовій сталі.

Принципова схема виробничого процесу найбільш поширеної технології безкоксової металургії може бути представлена таким чином: збагачення рудної сировини, подача отриманого залізорудного концентрату у вигляді пульпи на огрудкування для отримання сирих окатишів, які піддаються випалу для отримання належної міцності, а потім – відновному випалу у шахтній печі. Одержані металізовані окатиші, що містять до 95 % заліза, подають на переділ у сталь в електродугові печі.

Загальна кількість викидів пилу, SO_2 , NO_x , CO у технології прямого одержання заліза в 6 разів менше, ніж у традиційній технології. Якщо враховувати, що виключене виробництво коксу з виділеннями канцерогенних поліциклічних ароматичних вуглеводнів, то сумарна токсичність викидів за такої технології в 300 разів менше, ніж за традиційної [2].

В останні роки найбільш поширеними в світі методами виробництва заліза прямого відновлення залишаються Мідрекс і декілька способів металізації з використанням твердого палива, відносна доля яких у 2021 році складала 59,5 і 25,4 % від загального обсягу виробництва у 119,2 млн. т (рис. 1) [3]. Динаміка розвитку світового виробництва заліза прямого відновлення (див. рис. 1) свідчить про нарощення темпів виробництва заліза прямого відновлення: якщо за перші 30 років з початку промислового виробництва річний обсяг досяг 40 млн. т., то для збільшення на наступні 40 млн. т. знадобилось майже вдвічі менше часу – лише 17 років. В подальшому темпи зростання стали ще більш стрімкими: з 2017 по 2022 роки річне виробництво заліза прямого відновлення (ПВЗ – DRI) і гарячебрикетованого заліза (ГБЗ – HBI) зросло з 80 до більше як 125 млн. т./рік.

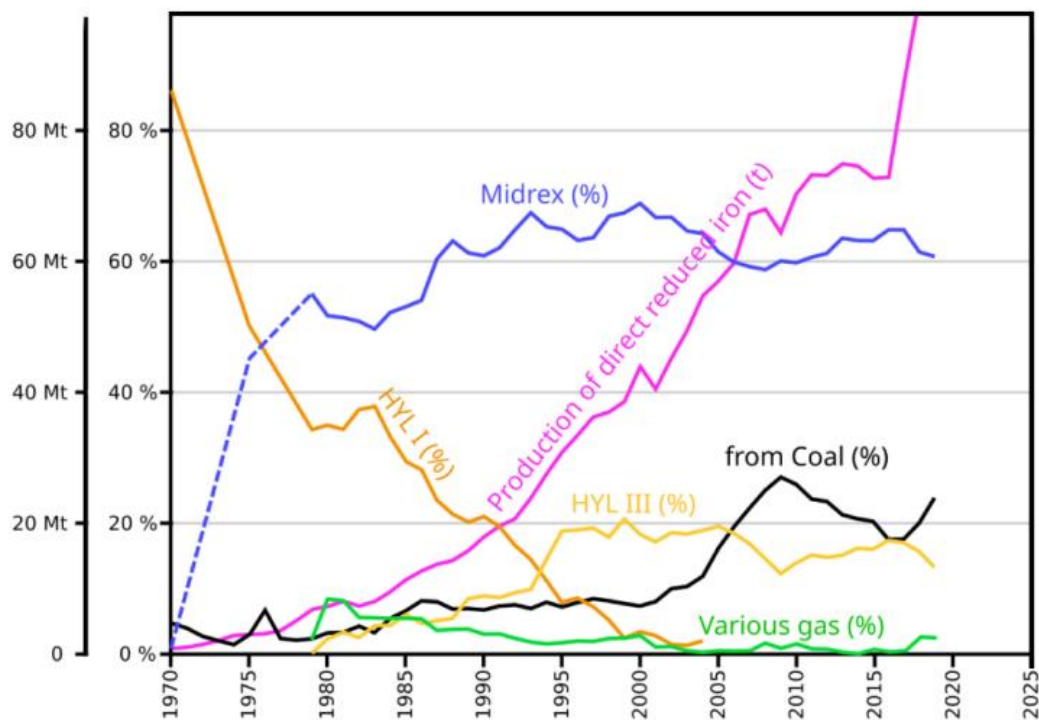


Рисунок 1 – Динаміка розвитку світового виробництва заліза прямого відновлення (червона лінія, млн. т/рік) з 1970 по 2021 роки за окремими технологіями (різнокольорові лінії, %)

Основним напрямком розвитку «зеленої металургії» вважається технологія ПВЗ-ЕДП (DRI-EAF), за якою із продуктів заліза прямого відновлення, отриманих за допомогою водню, в дугових електропечах (EAF) виробляють сталь. При цьому водень потрібно генерувати шляхом електролізу з використанням води та електроенергії, які надходять з відновлюваних джерел. Саме таку технологію виробництва «зеленої» сталі просувають найбільш потужні учасники ринку сталі, так як Арселор Мітал (ArcelorMittal), Тіссен Крупп (ThyssenKrupp), Зальцгіттер (Salzgitter AG) [4]. Таким чином, повноцінна «зелена» металургія неможлива без «зеленого» водню і «зеленої» енергетики, які в свою чергу повинні бути невід’ємними складовими «зеленої» економіки.

Узагальненим показником виходу парникових газів в еквіваленті CO_2 є так званий «вуглецевий слід», який вимірюється на одиницю виробленого продукту і може служити екологічним критерієм екологічної досконалості металургійного процесу. Чорна металургія є одним з найбільших індустріальних джерел викидів CO_2 , на яке приходить близько 7-9 % глобального виходу діоксиду вуглецю. Три основних процеси виробництва сталі – 1) інтегрована доменна піч/основний кисневий конвертор (BF/BOF), за яким сьогодні отримують близько 70 % світового виробництва сталі; 2) електродугова піч (EAF), що зараз забезпечує 25 % світового випуску сталі; 3) електродугова піч прямого відновлення заліза (DR/EOF), цей процес використовується для виробництва близько 5 % світового виробництва сталі, мають наступні значення вуглецевого сліду (т. CO_2 /т. сталі): 2, 0,6, 1,4 відповідно [5].

Перше в світі «зелене» залізо було отримано в червні 2021 року на експериментальному заводі ГІБРИТ – Воднева революційна технологія виробництва заліза (HYBRIT – Hydrogen Breakthrough Ironmaking Technology) в Елліварі, північна Швеція. Компанія SSAB виробила першу у світі сталь без використання копалин та поставила її замовнику. Шведська металургійна промисловість вже є кліматично ефективною за міжнародними стандартами, але цього недостатньо. З цієї причини ініціатива HYBRIT була започаткована SSAB, LKAB та Vattenfall і отримала фінансову підтримку від Шведського енергетичного агентства та Інноваційного фонду ЄС для різних ініціатив [6, 7].

Крім Швеції, активне просування по шляху до зеленої металургії відбувається в Австрії, Німеччині, Великій Британії, Китаї, Індії, Південній Кореї, Японії та інших країнах.

В Україні концептуально зафіксовано [8], що держава рухатиметься в напрямку реалізації Європейської зеленої угоди (The European Green Deal), яка є низкою політичних ініціатив, висунутих Європейською Комісією з кінцевою метою зробити європейський континент кліматично нейтральним до 2050 року.

Враховуючи актуальність переходу металургії на «зелені» рейки, а також усвідомлюючи значення та можливості міста Кривий Ріг як гірничо-металургійного центру України, Академія гірничих наук України, Криворізький національний університет і виконком Криворізької міської ради 20 листопада 2024 року провели Міжнародний форум «Зелена» металургія – на шляху до відновлення та трансформації промислового сектору економіки України», де відбулось зацікавлене обговорення питань переходу до «зеленої» металургії та зниження викидів забруднювальних речовин в атмосферу [9]. Робота Форуму пройшла у трьох секціях: 1) «Зелена» металургія – інноваційні технології та перспективи розвитку; 2) Переробка відходів металургійного виробництва як елемент «зеленої» металургії; 3) Роль малого та середнього бізнесу у розвитку «зеленої» металургії. Тематична спрямованість секцій свідчить, що на Форумі був розглянутий комплекс найбільш важливих проблемних організаційно-юридичних, технологічних і фінансових аспектів створення «зеленої» металургії в Україні.

Метою роботи є аналіз і узагальнення питань створення «зеленої» металургії в Україні, які розглядалися на Міжнародному форумі «Зелена металургія» – на шляху до відновлення та трансформації промислового сектору економіки України» (м. Кривий Ріг, 20.11.2024 р.), встановлення на підґрунті інформації, оприлюдненої на Форумі, нових наукових результатів, врахування яких сприятиме діяльності по створенню підприємств «зеленої» металургії в Україні. Таким результатом є положення про необхідність врахування при виборі для конкретних умов раціонального методу промислового виробництва «зеленої» сталі результатів порівняльної оцінки техніко-економічних

показників процесу отримання металу комплексної характеристики вихідної рудної сировини.

Завдання дослідження полягає в аналізі і узагальненні вмісту доповідей і презентаційних матеріалів, оцінок і висновків при обговоренні виступів, перевірці окремих оприлюднених даних, їх доповненні і уточненні.

Матеріали та методи. Основні матеріали дослідження – вміст виступів і презентацій доповідачів на Форумі, при необхідності доповнений інформацією з інших джерел.

Методи наукового дослідження. В роботі використані загальноприйняті теоретичні методи наукового дослідження – аналіз і синтез, аналогія, узагальнення.

Результати. Відкриваючи Форум, в. о. міського голови Кривого Рогу д.т.н., проф. Юрій Вілкул відмітив, що з жовтня 2024 року набув чинності Закон України «Про основні засади державної кліматичної політики», який спрямований на визначення правових та організаційних засад державної кліматичної політики, направленої на забезпечення низьковуглецевого та сталого розвитку України, досягнення кліматичної нейтральності, пом'якшення наслідків зміни клімату та адаптації до неї. Законом установлено, що перший національно визначений внесок України до Паризької кліматичної угоди, схвалений Кабінетом Міністрів України, який ставить за мету скорочення викидів парникових газів до 60 % від рівня 1990 року, вважається базовою середньостроковою ціллю.

Ректор Криворізького національного університету д.т.н., проф. Микола Ступнік у вітальному слові констатував, що наразі у світі немає єдиної думки відносно шляхів подолання вуглецевої кризи, але Україна обов'язково буде частиною відновлювального процесу після воєнно-політичної кризи, яка зачепила весь світ. Відновлення буде відбуватися вже на нових, декарбонізованих засадах. Це надасть змогу уникнути підвищення концентрації в атмосфері парникових газів і зростання глобальної температури земної поверхні, що сприятиме сталому розвитку.

У зверненні до учасників Форуму президент Всесвітньої організації Академія гірничих наук Нурлан Ріспанов (Республіка Казахстан) відмітив актуальність проблеми переходу до «зеленої» металургії для Казахстану, з його розвинутою гірничо-металургійною промисловістю, наголосив важливість міжнародних нормативно-правових документів з питань охорони навколишнього середовища, виконання яких усіма державами із залученням достатнього обсягу інвестицій стане запорукою успіху на цьому шляху.

Порівняння трьох перспективних варіантів екологічного виробництва сталі за допомогою технологій прямого відновлення – Мідрекс, Хайрекс (HyREX), Хайфор (HYFOR – Hydrogen-based fine-ore reduction – Відновлення тонкої руди на основі водню) – свідчить про перевагу останньої [з виступу доповідача Крістіана Боем, керівника відділу продаж технологій прямого відновлення Прайметиз Текноледжиз Остриа Джіємбіейч (Primetals Technologies Austria GmbH), Австрія]. Процес Хайфор, розроблений міжнародною інженіринговою кампанією Прайметиз Текноледжиз, використовує технологію, яка базується на відновленні воднем тонкоздрібленої залізної руди або концентрата крупністю <150 мкм до залізо прямого відновлення у реакторі з киплячим шаром без будь-яких попередніх етапів згрудкування, таких як гранулювання або спікання [10].

Про розбудову компанією Tata Стіл (TataSteelLtd) сталеливарної промисловості в напрямку «зеленої» металургії доповів Хенрік Адам, генеральний директор, голова правління Tata Стіл Незерлендз Холдін («TataSteel NetherlandsHolding») та віце-президент «TataSteelLtd», Нідерланди. В місті Еймейден Tata Steel Netherlands має один із найефективніших у світі сталеливарних заводів із викидів CO₂, які приблизно на 7 % нижчі за середній європейський показник. Але ми не зупиняємось на досягнутому. Ми перебудовуємо наш виробничий процес і будемо виробляти сталь на основі водню. Очікуємо, що це скоротить викиди CO₂ на 35–40 % до 2030 року. Наша мета – виробляти повністю CO₂-нейтральну сталь до 2045 року [11].

Головними характеристиками технології Хайсарна (Hisarna) є виробництво рідкого чавуну і шлаку без вимагання агломерації руди і коксування вугілля, використання недорогої сировини, значне зниження викидів NO_x, SO_x, дрібного пилу та вуглеводів (з виступу доповідача Карела Кліманса, технічного директора та директора з розвитку технології Хайсарна в «Tata Steel Netherlands», Нідерланди). Серед ключових особливостей процесу (рис. 2) використання чистого кисню, попереднє твердофазне віднов-

лення Fe_2O_3 оксидом вуглецю до FeO у верхній циклонній конвертерній частині печі (CCF) і остаточне рідкофазне відновлення FeO твердим вуглецем у нижній частині печі (SRV).

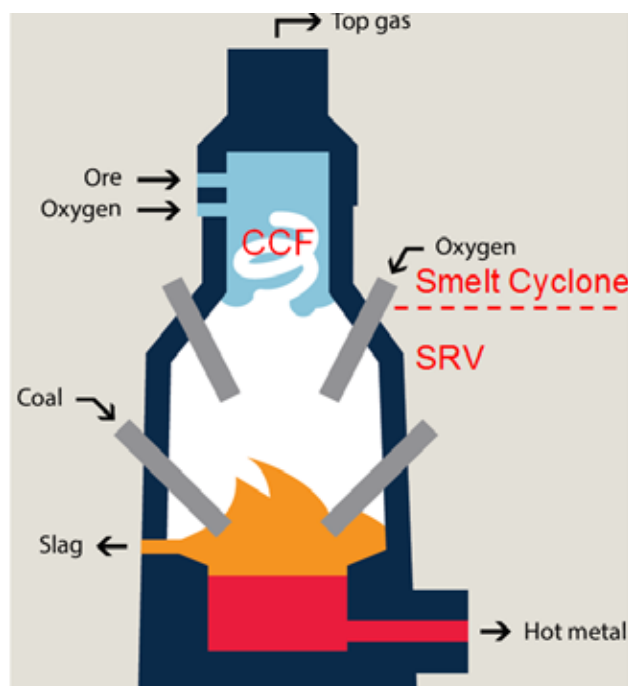


Рисунок 2 – Принципова схема процесу Хайсарна

Впровадження заходів з «зеленої» металургії в Україні передбачено у ряді екологічних програм, які увійшли у проект Плану національного відновлення України (2022 р.), у тому числі проекти з металургійної галузі (з виступу доповідача д.т.н., проф. Сергія Грищенка, представника ОП «Укрметалургпром», Україна). Так, у Національній програмі № 8 «Україна може нарощувати додану вартість у конкурентних секторах» у секторі «Металургія» серед ключових проектів значиться долучення до ланцюга доданої вартості «зеленої» сталі: збільшити виробництво окатишів DR-класу, забезпечити виробництво заліза прямого відновлення та гаряче-брикетованого заліза, в тому числі з використанням H_2 , виробництво «зеленої» сталі в електродугових печах або занурених дугових печах. Загальна орієнтовна вартість металургійних проектів становить \$5,8 млрд. Сюди включено приватні і державні інвестиції. Очікується, що більшість інвестицій надходитиме від приватних гравців після впровадження конкурентоспроможних процентних ставок, страхування зони бойових дій та заходів для покращення ділового середовища.

Європейський контекст низки нормативних документів, що регламентують порядок дій і відносин між країнами у сфері викидів, – Кліматичний закон, пакет «Вдатний до 55» («Fitfor 55»), Європейська схема торгівлі викидами (ЄСТВ), Механізм вуглецевого коригування на кордоні (СВАМ) – спрямований на досягнення проміжної цілі у 2030 році і кінцевої – кліматичної нейтральності до 2050 року, є юридичним базисом трансформації металургійного сектору економіки (з виступу доповідача Ольги Семків, директора зі сталого розвитку ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», Україна).

У березні поточного року відбулось підписання Меморандуму про взаєморозуміння команди Нео-Еко Україна і міста Кривого Рогу [12]. Консалтингова компанія Нео-Еко, як експерт у сфері циркулярної економіки, підтримуватиме та спільно з містом розроблятиме стратегії поводження з відходами та проекти сталого розвитку міста. Циркулярне майбутнє Кривого Рогу ґрунтується на нових рішеннях для ефективного використання промислових відходів та збереження ресурсів (з доповіді Барта Груйарта, директора проекту «Нео-Еко Україна», Франція).

Зелена металургія – це валоризація шлаків сталеплавильного виробництва і хвостів збагачення залізної руди. Такою була тема доповіді Міке Квагебеур, доктора філософії, експерта зі сталих матеріалів Фламандського інституту технологічних досліджень (VITO NV), Бельгія. Однією з інноваційних розробок інституту є технологія карбстоуну, яка дозволяє переводити негідровані шлаки, такі як шлаки EAF і шлаки BOF, які сьогодні важко повторно використовувати, у високоцінний будівельний матеріал. Унікальна концепція полягає в тому, що використовується CO_2 в якості клею, тому не потрібні інші в'язучі. Технологія впроваджена у промислових масштабах у Бельгії. Вона досить популярна, оскільки дозволяє одночасно вирішувати два завдання: корисне використання CO_2 (постійне зв'язування) та переробка сталевих шлаків у високоякісні будівельні матеріали.

Другий приклад використання побічних продуктів для карбонізації мінералів – переробка хвостів. Тут також розроблений портфель рішень, починаючи від наповнювача в бетоні, щільних заповнювачів для використання у будівництві та легких заповнювачів, до клінкеру мінеральної карбонізації.

Можлива роль ціноутворення на вуглець для зеленої реконструкції промислового сектору України розглянута у доповіді Рувена Штуббе, економіста з енергетики та консультанта проекту Низьковуглецева Україна (Low Carbon Ukraine) в рамках Міжнародної кліматичної ініціативи, Німеччина. Зокрема, було змодельовано два сценарії переходу на сталь з низьким вмістом вуглецю при збільшенні виробництва сталі: за допомогою нових ДСП на основі брухту, або після 2030 року з потужностями H_2 -DRI-EAF (рис. 3), що потребує капіталовкладень у розмірі 1-2 і 2-5 млрд. євро відповідно.

При вступі України до ЄС можливі два варіанти уникнути вуглецевого цінового шоку: 1) перехідний період з фіксованими цінами (без жорсткої стелі); 2) ціновий коридор з підвищенням нижньої межі ціни на вуглець.

Можливостям фінансування та підтримки малого та середнього бізнесу (МСБ) у сфері «зеленої» металургії присвятив свою доповідь Стівен Ташпер, заступник керівника проекту "Підтримка відновлення Криворізького району", головний технічний радник Люксембурзького державного агентства розвитку ЛюксДев (LuxDev). Основними фінансовими джерелами, орієнтовані на МСП, які наразі доступні в Україні, є: 1) комерційні кредити від державних банків, частина яких фінансується за рахунок коштів донорів; 2) фінансування від міжнародних фінансових установ та донорів, яке, зокрема для ЄС, включає: фінансування для покриття збитків за кредитами для місцевого бізнесу; субсидії процентних ставок; обмежені гарантії, де до 70–80 % кредиту забезпечується гарантією тощо.

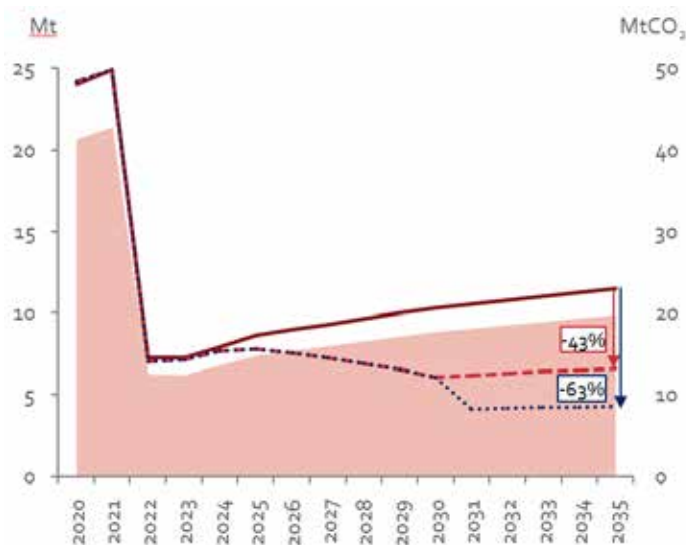


Рисунок 3 – Виробництво металургійного сектору та прогноз викидів CO_2 : поле кольору «пудра» – виробництво сталі, млн. т/рік; суцільна лінія – CO_2 викиди, традиційний сценарій; штрихова лінія – CO_2 викиди, EAF (100 % скрап) сценарій; лінія з точок – CO_2 викиди, H_2 -DR-EAF сценарій

Діяльність Європейського банку реконструкції та розвитку (ЄБРР) в Україні була предметом виступу Флоренса Башар-Бакала, регіонального керівника з виробництва та послуг в Україні ЄБРР. Величезна сфера впливу ЄБРР поширюється також на «зелене» поле. Серед ключових пріоритетних напрямків на майбутнє у розділі «Промисловість, торгівля та агробізнес» значиться «ліквідність і капітальні витрати, включаючи проекти з компонентів зелених інвестицій». Можливість підтримки ЄБРР інвесторів проектів «зеленого» поля спирається на глибокі знання галузі та місцеві знання для участі у фінансових проектах з нуля, з спонсорським досвідом. Участь може бути структурована як обмежений/повний регрес, формуванням ціноутворення, пов'язаного з ефективністю і гнучкими варіантами погашення.

Обговорення. Виступаючи в обговоренні доповідей учасників Форуму, завідувач кафедри металургії чорних металів і ливарного виробництва Криворізького національного університету, д.т.н., проф. Сергій Савельєв наголосив, що перехід від чорної металургії до «зеленої» є важливою складовою глобальної трансформації всієї економічної системи суспільства, яка потребує значного часу і великих матеріальних витрат. Але цей процес неминучий, якщо ми хочемо зберегти гідне життя на планеті для майбутніх поколінь. Виступи учасників Форуму свідчать про багатогранність проблеми створення «зеленої» металургії, існування різних підходів до виробництва «зеленої» сталі, що викликає необхідність вибору оптимального варіанту рішення цього питання для конкретних умов.

Перший заступник міського голови Євген Удод зазначив, що Кривий Ріг завжди був і є прогресивним та інноваційним містом, відповідальним за сьогодні і майбутнє. Зараз Кривий Ріг – це майже 20 % економіки України, десятки тисяч робочих місць. Місто допомагає малому та середньому бізнесу, долучає колег з інших країн, використовує будь-які моделі фінансування для залучення новітніх технологій в напрямку «зеленої» металургії. Застосовуються комплексні і системні підходи до цього питання.

Підсумовуючи основні результати Форуму, його головуєчий, Президент Академії гірничих наук України, д.т.н., проф. Юрій Вілкул наголосив на важливості інформації, яку представили доповідачі. Цей захід об'єднав науковців, виробничників та представників компаній, що займаються металургійною промисловістю по всьому світу. На Форумі представлено доповіді представників семи країн, які активно впроваджують «зелену» металургію та інші сучасні технології. «Зелена» металургія – це комплекс заходів, спрямованих на видобуток, переробку, управління відходами та зменшення викидів вуглекислого газу у виробництві сталі. Головна мета – скоротити рівень викидів на 80 % до 2050 року. Це надзвичайно важливо для мешканців Кривого Рогу та всієї України. Результати роботи Форуму дають підставу вважати, що він прискорить життєво необхідний рух по всеосяжному скороченню вуглецевого сліду, відновленню та трансформації промислового сектора економіки України.

Висновки. В ідеальному вигляді «зелена» металургія це комплексний високотехнологічний процес виробництва металу, в якому всі складові елементи технології від етапів до операцій здійснюються з використанням лише відновлюваних джерел енергії і без викидів діоксиду вуглецю в оточуюче середовище. Ця вимога стосується також всіх матеріалів, які задіяні у виробництві металу. Зрозуміло, що така металургія можлива лише в умовах всього «зеленої» економіки, яка є справою майбутнього, адже для переходу до неї знадобиться багато часу, великих зусиль і значних витрат. Сьогодні питання полягає в здійсненні максимально можливих кроків на шляху до чистої «зеленої» металургії. Проведений аналіз стану вирішення цієї проблеми свідчить про наявність певної кількості сучасних розробок, спрямованих на виробництво сталі за майже на 100 % «зеленою» технологією. При виборі способу промислової реалізації процесу виробництва «зеленої» сталі, поряд з екологічними і техніко-економічними показниками, необхідно враховувати вимоги до характеристик вихідної сировини, на яку розрахована кожна з конкуруючих технологій.

Подальші дослідження в цьому напрямку слід проводити шляхом детального аналізу технології «зеленої» металургії, найбільш придатних до впровадження за техніко-економічними показниками.

Автори висловлюють подяку всім учасникам Форуму, які представили презентації своїх виступів для використання при роботі над цими нотатками.

Бібліографічний перелік

1. Губін Г.В., Півень В.О. Сучасні промислові способи безкоксової металургії заліза: монографія під наук. ред. Губіна Г.В. Кривий Ріг, 2010. 336 с.
2. Мальований М.С., Боголюбов В.М., Шаніна Т.П., Шмандій В.М., Сафранов Т.А. Техноекіологія: підручник за ред. М.С. Мальованого. Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2013. 424 с.
3. Production préréduits (DRI et HBI) par procédés Midrex HYL Charbon.svg. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Production_pr%C3%A9r%C3%A9duits_\(DRI_et_HBI\)_par_proc%C3%A9d%C3%A9s_Midrex_HYL_Charbon.svg](https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Production_pr%C3%A9r%C3%A9duits_(DRI_et_HBI)_par_proc%C3%A9d%C3%A9s_Midrex_HYL_Charbon.svg). (дата звернення 15.05.2025)
4. Єрмоленко Г. H₂ Green Steel: стартап, що формує майбутнє «зеленої» металургії. GMK centr. URL: <https://gmk.center.ua/posts/h2-green-steel-startap-shho-formuie-majbutnie-zelenoi-metalurgii/> (дата звернення 14.05.2025).
5. Технологічний огляд. Carbon neutral energy intensive industries. Information Service United Nations Economic Commission for Europe, 2023. URL: https://drupal-main-staging.unece.org/sites/default/files/2023-09/Industry%20brief_EN_2_0.pdf (дата звернення 14.05.2025).
6. Fossil-free steel – a joint opportunity! URL: <https://www.hybritdevelopment.se/en/> (дата звернення 14.05.2025).
7. A fossil-free future. URL: https://www-hybritdevelopment-se.translate.goog/en/a-fossil-free-future/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc (дата звернення 14.05.2025).
8. Екологічна трансформація: як розвивається зелена металургія в Україні URL: <https://biz.nv.ua/ukr/markets/vidnovlennya-promislovosti-a-ukrajini-v-yakomu-stani-zelena-metalurgiya-perspektivi-50346472.html> (дата звернення 21.08.2023)
9. У Кривому Розі занепокоєні викидами в атмосферу і мають намір сприяти переходу на "зелену" металургію / Інтерфакс-Україна, URL: <https://interfax.com.ua/news/greendeal/1030640.html> (дата звернення 28.11.2024)
10. Daniel Spreitzer, Johann Wurm, Bernhard Hiebl. HYFOR – HYdrogen-based Fine-Ore Reduction etc. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 2022. Vol. 59. № 2. 5 p. URL: <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e592/e592070.pdf>
11. Тага Стіл. Майбутня сталь. URL: https://www-tatasteelnederland-com.translate.goog/en/Green-steel-and-sustainability/co2-neutral-steel/Making-steel-using-hydrogen?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc&_gl=1*vqppj6*_up*MQ*_ga*ODkwNjU2NjMzLjE3MzQ3OTY3OTU*_ga_ZJG2C9ENNR*MTczNDc5Njc5NC4xLjEuMTczNDc5ODE5Mi4wLjAuMA. (дата звернення 19.05.2025).
12. «Нео-Еко Україна» підписала нове партнерство з VITO та Кривим Роґом. URL: <https://neo-eco.com.ua/news/neo-eko-ukraina-pidpysala-nove-partnerstvo-z-vito-ta-kryvym-rohom/> (дата звернення 19.05.2025).

References

1. Hubin H.V., Piven V.O. Modern Industrial Methods of Coke-Free Iron Metallurgy: Monograph / Edited by H.V. Hubin. Kryvyi Rih, 2010. 336 p.
2. Malovanyi M.S., Boholiubov V.M., Shanina T.P., Shmandii V.M., Safranov T.A. Technoecology: Textbook / Edited by M.S. Malovanyi. Lviv: National University "Lviv Polytechnic," 2013. 424 p.
3. Production of Pre-Reduced Iron (DRI and HBI) by Midrex and HYL Processes Using Coal. URL: Wikipedia file on Midrex and HYL processes (accessed 15.05.2025).
4. Yermolenko H. H₂ Green Steel: A Startup Shaping the Future of "Green" Metallurgy GMK Center. URL: GMK Center article on H₂ Green Steel (accessed 14.05.2025).
5. Technology Brief: Carbon Neutral Energy Intensive Industries Information Service, United Nations Economic Commission for Europe, 2023. URL: UNECE industry brief PDF (accessed 14.05.2025).
6. Fossil-free steel – a joint opportunity! URL: <https://www.hybritdevelopment.se/en/> (дата звернення 14.05.2025).
7. A fossil-free future. URL: https://www-hybritdevelopment-se.translate.goog/en/a-fossil-free-future/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=ru&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=sc (дата звернення 14.05.2025).
8. Ecological Transformation: How Green Metallurgy Is Developing in Ukraine URL: biz.nv.ua article on green metallurgy in Ukraine (accessed 21.08.2023).
9. Kryvyi Rih Concerned About Air Emissions and Intends to Support the Transition to "Green" Metallurgy / Interfax-Ukraine URL: [Interfax-Ukraine news on green metallurgy in Kryvyi Rih](https://interfax.com.ua/news/greendeal/1030640.html) (accessed 28.11.2024).
10. Daniel Spreitzer, Johann Wurm, Bernhard Hiebl. HYFOR – HYdrogen-based Fine-Ore Reduction etc. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 2022. Vol. 59. № 2. 5 p. URL: <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e592/e592070.pdf>.

11. Tata Steel. Future Steel URL: Tata Steel Netherlands – Making Steel Using Hydrogen (accessed 19.05.2025).

12. “Neo-Eco Ukraine” Signed a New Partnership with VITO and Kryvyi Rih. URL: Neo-Eco Ukraine partnership announcement (accessed 19.05.2025).

Vilkul Yurii, doctor of technical sciences, professor, President of the Academy of Mining Sciences of Ukraine, ORCID: 0000-0003-3979-3231

Stupnik Mykola, doctor of technical sciences, professor, rector, Kryvyi Rih National University, ORCID: 0000-0003-3318-3889

Saveliev Serhii, doctor of technical sciences, professor, Head of the department of ferrous metallurgy and foundry production, Kryvyi Rih National University, ORCID: 0000-0001-6263-9422

Yeremenko Hennadii, candidate of technical sciences, associate professor, Department of open-pit mining, Kryvyi Rih National University, ORCID: 0009-0006-9997-6784

Yarosh Tetiana, candidate of technical sciences, associate professor, Department of ferrous metallurgy and foundry production, Kryvyi Rih National University, ORCID: 0000-0003-3455-9630

PROSPECTS FOR THE TRANSFORMATION OF UKRAINE'S FERROUS METALLURGY INTO “GREEN” METALLURGY

The presented work defines the physicochemical characteristics of a typical coke-free steel production scheme compared to the traditional process. The efficiency of the Swedish metallurgical industry has been proven, with its greatest achievement being the world's first production of “green” iron using the HYBRIT technology in June 2021.

The paper outlines the key points from the speeches of participants at the International Forum “Green Metallurgy – Towards the Recovery and Transformation of Ukraine's Industrial Sector,” which took place on November 20, 2024, in Kryvyi Rih.

It is emphasized that the determined technical concept of “green” metallurgy refers to a metal production process in which all technological components are carried out exclusively using renewable energy sources and without carbon dioxide emissions into the environment. This condition also applies to all materials used in metal production.

Such metallurgy is only possible within the framework of a “green” economy, which remains a future endeavor, as the transition requires significant time and financial investment. Today, the focus is on taking the maximum possible steps toward clean “green” metallurgy.

There are modern, efficient developments in specific steel production processes that almost fully comply with the principles of “green” technology. When selecting an industrial implementation method for “green” steel production, alongside environmental and techno-economic indicators, it is essential to consider the requirements for the characteristics of the raw materials.

Keywords: process, method, production, technology, steel, research

Лаптева Ганна Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри, Національний університет «Запорізька політехніка», ORCID: 0000-0003-4475-2354

Биковський Олег Григорович, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, Scopus ID: 6506391379

Єфанов Володимир Сергійович, PhD, докторант, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-6363-4081

МЕТАЛУРГІЙНІ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗВАРЮВАННЯ КОМПОЗИТНИХ І РІЗНОРІДНИХ МЕТАЛІВ

При створенні сучасних об'єктів в авіамашинобудуванні, ракетній та космічній техніці виникає необхідність використання не тільки окремих вузлів, виготовлених із композитів, які часто самі одержують методами зварювання, а й з'єднання їх між собою, а також з однорідними і різнорідними матеріалами, що пов'язано з певними труднощами.

Висвітлено основні типи композитних матеріалів, їх будову, властивості та призначення.

Розглянуто можливість фізичної зварюваності матеріалів: розчинність в рідкому стані, здатність до металургійної обробки металу зварювальної ванни.

Проаналізовано основні труднощі, пов'язані зі зварюваністю композитних матеріалів, матрицею яких є кольорові метали, а також різнорідних кольорових металів алюміній + мідь, алюміній + титан, титан + мідь (наявність оксидної плівки, пористість, схильність до втрат з'єднань, забезпечення рівномірності) та шляхи їх подолання як на стадії попередньої підготовки виробів під зварювання, так і під час зварювального процесу.

Показано, що зварювання плавленням є найбільш технологічним з'єднанням КМ, але в той же час дуже складним у зв'язку з розшаруванням в навколошовній зоні і пористістю. Наведено технологічні заходи, при яких зварювання плавленням композитних матеріалів буде давати задовільні результати. Вказано допустиму товщину інтерметалідного прошарку, при якій міцність зварного шва буде на задовільному рівні.

Розглянуто можливості зварювання тиском різнорідних матеріалів.

Для всіх випадків наведено орієнтовну міцність отриманих зварних з'єднань.

Наведено технічні прийоми та технологічні рекомендації щодо зварювання цих матеріалів, розглянуто сучасні тенденції вдосконалення зварюваності, технології та техніки виготовлення зварних металоконструкцій із композитних та різнорідних кольорових металів.

Ключові слова: зварювання, композитні матеріали, матриця, кольорові метали, різнорідні сполуки, оксидна плівка, зварюваність, рівномірність.

Вступ. При створенні сучасних об'єктів в авіамашинобудуванні, ракетній та космічній техніці виникає необхідність використання не тільки окремих вузлів, виготовлених із композитів (композитних матеріалів, далі – КМ), які часто самі одержують методами зварювання, а й з'єднання їх між собою, а також з однорідними і різнорідними матеріалами, що пов'язано з певними труднощами.

Композитні матеріали дозволяють реалізувати комплекс протилежних властивостей – високу міцність та жорсткість при розтягуванні та стисканні з високими показниками витривалості та роботи руйнування у поєднанні з низькою вагою. Металева матриця передає навантаження на несучі волокна, ниткоподібні кристали, частинки тощо, перешкоджає поширенню тріщин, формує волокна та захищає їх від зовнішнього впливу.

Постановка проблеми. Як матриці для металевих КМ найчастіше використовується алюміній, магнієві сплави, титан, нікель та кобальт. Як наповнювачі застосовуються

високоміцні високомодульні волокна, ниткоподібні вуса, частинки карбідів і оксидів металів, дисперсійно-зміцнюючі компоненти, псевдосплави і т.д. Вони відрізняються високою температурою плавлення, мінімальною розчинністю в матриці та надають КМ спеціальних властивостей. Дисперсійно-зміцнювані КМ (ДУКМ) мають у матриці рівномірно розподілені дрібнодисперсні частинки іншої речовини. При навантаженні всі зусилля сприймає матриця, в якій безліч практично нерозчинних частинок фази, що зміцнює, створює структуру, ефективно протистоїть пластичній деформації. Серед металевих КМ найбільшого поширення набули: алюмінієві та магнієві сплави, армовані борними волокнами марок ВКА-1, ВКА-2, ВКМ-1, вуглецевими волокнами ВКУ-1, сталевими дротами марок КАС-1, КАС-1А; КМ на мідній основі з волокнами ніобію, арматури з вольфраму або молібдену; КМ з матрицею з титану та його сплавів, армованої волокнами карбіду кремнію, бору, вуглецю, сталевими дротиками і т.д. [1].

Температура плавлення матриці лежить в межах 600...1700°C, а зміцнювача – 1500...2500°C, що при зварюванні плавленням призводить до порушення цілісності зміцнювача, перебігу реакції між ним і матричним сплавом, наслідком чого можливо утворення інтерметалідних фаз.

Армування матричного сплаву змінює характер поширення у ньому тепла; останнє залежить від розташування волокон та їх об'ємної частки. Це вимагає суворого контролю за введенням тепла при зварюванні, що досягається присадкою електродного металу, який, розплавляючись, захищає верхні шари зміцнювача від дії високотемпературного джерела нагріву, проникає і змочує лежачі нижче волокна. Деякі волокнисті матеріали – бор, графіт, Al_2O_3 – не змочуються присадковими металами, сумісними з матричним сплавом. Зварювання таких КМ ведеться із зазором та відповідними присадками. Проблема поганої змочуваності вуглецевих волокон вирішується шляхом додаткового введення в зварювальну ванну цинку або хрому, що взаємодіють з вуглецевими волокнами з утворенням карбідів, що мають кращу змочуваність.

Значна відмінність у коефіцієнтах теплоємності, теплопровідності та лінійного розширення матриці та зміцнювача призводить до утворення температурних напруг. Останні виникають навіть при зварюванні тиском без підігріву внаслідок різних значень модулів пружності складових компонентів.

На відміну від традиційних матеріалів міцність КМ залежить від безперервності волокон по всій площі в напрямку, поперечному осі основної напруги. При порушенні цієї умови в процесі зварювання майже повністю втрачаються механічні властивості КМ.

При зварюванні деталей з накладками або внапустку внаслідок концентрації напруг знижуються механічні властивості та збільшується маса виробу.

Тому спосіб, технологія та техніка зварювання повинні забезпечити отримання безпористого зварного з'єднання без втрати міцності та розплавлення зміцнювача, без взаємодії компонентів КМ між собою.[1]

Результати та їх обговорення. Зварювання плавленням є найбільш технологічним з'єднанням КМ, але дуже складним у зв'язку з розшаруванням в навколошовній зоні і пористістю. Тому умови зварювання мають передбачати такі заходи:

- способи та параметри режиму зварювання повинні забезпечувати мінімальне тепловкладання;
- зварювання плавленням може застосовуватися тільки для КМ, які складені із сумісних компонентів (легкі сплави, армовані керамічними наповнювачами або мають бар'єрні покриття);
- присадкові матеріали або проміжні прокладки застосовуються з легуючими добавками, що обмежують розчинення армуючого компонента та створення крихких продуктів міжфазної взаємодії в процесі зварювання та подальшої експлуатації зварних вузлів. Так, при зварюванні композитних вузлів системи Al-SiC, Al-C доцільним є використання присадок з великим вмістом кремнію, цирконію, титану або інших карбідоутворюючих елементів, що усувають утворення карбіду Al_2C_3 , а при зварюванні КМ Al- Al_2O_3 – присадок з магнієм;
- для отримання рівномірності при зварюванні ДУКМ доцільно використовувати присадки з відповідними керамічними компонентами з об'ємною часткою 15...25 %;

• волокнисті та шаруваті КМ доцільно зварювати внапустку при співвідношенні величини покриття до товщини матеріалу більше 20, такі шви можна додатково посилити болтовими або заклепочними з'єднаннями.

Композитні матеріали, армовані частинками, короткими волокнами, ниткоподібними кристалами, можна зварювати встик за умови, що вони виготовлені методами рідкофазної технології. Якщо вони виготовлені методами порошкової металургії, то в зоні зварювання утворюються ділянки підвищеної пористості, і міцність таких сполук знижується. Тому перед зварюванням необхідно проводити вакуумну дегазацію для видалення водню. Залежно від особливостей міжфазної взаємодії компонентів можна встановити критерії зварюваності КМ.

Так, якщо компоненти КМ при плавленні створюють однорідну рідину, а в твердому стані взаємно практично нерозчинні (системи Al-Be, Ti-Mg), то після кристалізації в цьому КМ утворюється однорідна гетерогенна структура з частинками матриці та зміцнювача, що чергуються. При зварюванні плавленням таких матеріалів утворюється зварний шов з властивостями, що практично не відрізняються від основного металу.

Якщо компоненти при розплавленні та кристалізації мають обмежену розчинність (системи Ni-W, Al-Si), то в таких КМ утворюються тверді розчини з евтектикою, перитектикою або з концентрацією, що плавно змінюється. Як і попередньому випадку, властивості зварного шва близькі до властивостей основного металу.

Якщо компоненти КМ взагалі не взаємодіють при зварюванні у зв'язку з великою різницею в температурах плавлення (системи Al-Be-Mg, Fe-Cu-Pb), вони зварюються погано, і необхідно використовувати спеціальні прийоми для усунення випаровування більш легкоплавкого компонента.

Якщо компоненти КМ не змішуються в рідкому стані (системи Al-Pb, Fe-Cu-Pb), їх зварювання неможливе, зварні з'єднання легко руйнуються по зоні сплавлення.

Дугове зварювання вольфрамовим електродом серед захисних газів – найчастіше використовуваний спосіб. При зварюванні стикових з'єднань КМ типу ВКА ефективно використання спеціальних проміжних розплавлених проставок з алюмінієвих сплавів типу АМг6, 1420, 1201, які часто мають □-подібну форму. Зварювання ведеться вздовж волокон у середовищі гелію на формуючій мідній підкладці з канавкою спеціальної форми, при цьому забезпечується необхідне проплавлення вставки на всю висоту шва, зменшується зона термічного впливу, забезпечується висока швидкість нагрівання та охолодження металу, покращується структура шва, а міцність становить 80...95 % від міцності матричного матеріалу.[1]

Зварювання КМ ВКА-2, КАС-1А можна вести імпульсно-дуговим способом з присадним матеріалом СВАК5, який розміщується в обробці з кутом розкриття 90°. Це дозволяє збільшити рідину зварювальної ванни при одночасному збільшенні зміцнюючих частинок і отримати надійний провар кореня шва.

Зварювання електродом, що плавиться, в середовищі захисних газів дозволяє краще регулювати склад зварного шва. Деталі, що зварюються, з КМ Al + 18 % SiC (карбід кремнію) за обсягом збираються встик із зазором для забезпечення повного провару. Зварювання ведеться на постійному струмі зворотної полярності в аргоні, але внаслідок дії зварювальної дуги деяка кількість волокон викидається зі зварювальної ванни. Тому для компенсації втрат армуючий матеріал слід додатково подавати до низькотемпературної хвостової частини ванни за допомогою спеціального пристрою. Інші варіанти передбачають попереднє нанесення на кромки, що зварюються суміші армуючого матеріалу, порошку матриці, сполучної речовини і легуючих добавок, які сприяють або навпаки стримують змочування волокон. Як сполучна речовина використовуються клеї, пасти, етиловий спирт у кількості 50...80 % за обсягом щодо волокон. Можна також використовувати спеціальний плавкий електрод, що містить метал матриці або подібний до нього, суміш металу матриці і волокна, що по своїй конструкції нагадує порошковий дріт.

Електронно-променево зварювання передбачає використання проміжних прошарків, наприклад, у стиковому з'єднанні з КМ магнієвий сплав + 20 % Al_2O_3 застосовується прошарок товщиною 0,5 мм з матричного сплаву. При зварюванні КМ алюміній + 22 % SiC використовуються проміжні проставки таврового або двотаврового профілю

з 5...10 % додаткових елементів кремнію, нікелю, хрому та ін. Часто застосовуються комбіновані способи зварювання. Так, при стиковому з'єднанні борволокнистих труб використовуються гомогенні перехідники зі сплаву марки 01980, які спочатку дифузійним зварюванням приварюються до труб, після чого виконується зварювання електронним променем гомогенної вставки з формуванням кореня шва на підкладці, що запобігає витіканню розплавленого металу із зварювальної ванни.

Спосіб зварювання диспергованим металом передбачає розплавлення електронним променем присадкового металу у вигляді диска зі сплаву необхідного складу, що обертається з частотою 1800 ... 3100 хв-1. Дрібні краплі розплавленого металу переносяться на попередньо підігріті до температури 0,5...0,6 Тпл підкладки, що формують поверхні, де відбувається їх кристалізація на відповідно підготовлених кромках. Управління пучком променя здійснюється приладом дискретної розгортки з набором траєкторій сканування, що створює різні умови розподілу щільності енергії пучка в зоні нагріву та отримання необхідного об'єму розплавленого металу та розмірів рідких крапель, що переносяться відцентровою силою до виробу. На відміну від зварювання з оплавленням кромки у матричному матеріалі частки зміцнювача не розпадаються, як і зв'язок з матричним матеріалом не порушується.

Плазмове напilenня може бути використане при зварюванні КМ алюмінієвий сплав + 10...20 % SiC.

Попередньо V-подібно оброблені та підготовлені під напilenня кромки збираються без зазору. Напilenня ведеться порошкоподібним матеріалом на основі алюмінієвого сплаву з об'ємною часткою 15 % SiC у вигляді гранул до заповнення всієї обробки, після чого з'єднання піддається ізостатичному пресуванню і термічній обробці – загартовування та старіння.

Способи зварювання тиском дозволяють досягти хороших результатів внаслідок меншої енергії, що підводиться, завдяки чому можна зменшити зміщення або дроблення армуючих компонентів [1].

Для усунення деформації виробів застосовуються спеціальні термофіксуючі пристрої, де часто виробляється і термічна обробка. При електричному контактному зварюванні КМ має місце зниження тепло- та електропровідності порівняно з матеріалом матриці, що перешкоджає формуванню литого ядра. Ця обставина долається вибором електродів з різною провідністю, обтисканням периферійної зони, зміною діаметра та радіусу закруглення електродів, використанням проміжних прокладок. На відміну від однорідних металів при проходженні зварювального струму через КМ ВКА має місце розтікання силових ліній струму на більшій площі через вплив сітки бору, що призводить до розсіяного тепловиділення. Тому потрібно збільшувати контактну площадку електрод-деталь, використовуючи електроди з радіусом сфери 150 ... 200 мм, що забезпечить більш рівномірний розподіл ліній струму в перерізі контакту і повністю ліквідує зовнішні виплески. Для запобігання внутрішнім виплескуванням зварювання потрібно вести на режимах середньої жорсткості, використовуючи електроди з обтисненням, особливо при товщині плакуючого шару 50...150 мкм.

Композитні матеріали системи Al-B можна зварювати на параметрах режиму, рекомендованих для алюмінієвих сплавів типу Д16Т, при цьому в ядрі зварної точки тріщини не утворюються, додаток куваального зусилля не обов'язково, він необхідний лише для зниження залишкових напружень у металоконструкції. При товщині шару плакуючого більше 200 мкм необхідно використовувати м'які режими зварювання і помірні зусилля стиснення. Міцність зварного з'єднання визначається лише міцністю матеріалу матриці. При відповідному виборі параметрів режиму і геометрії електродів за рахунок нагрівання і нерівномірності зусиль стиснення металу плакуючого шару можна забезпечити його інтенсивне вдавлювання в зазор з'єднання практично без утворення зони розплавлення. При цьому з'єднання набуває композиційних властивостей і здатне передавати значну частину навантаження на розташовані поруч волокна бору. Однак ці властивості найбільш повною мірою проявляються тільки в багатоточкових з'єднаннях або одноточкових, виконаних у спеціальних пристроях, що включають вигин.

У зв'язку з меншою усадкою КМ ВКА-1 порівняно з алюмінієвими сплавами в точкових з'єднаннях відсутні дефекти у вигляді пор та тріщин. Міцність зварних з'єд-

нань з цього КМ на зріз в 1,2-1,5 рази, а на відрив у 2-3 рази менше в порівнянні з тими ж товщинами зі сплаву Д16Т; проте показники міцності втомі у цих матеріалів близькі.

Дифузійне зварювання у вакуумі або інертній атмосфері КМ можливе як встик, так і внапустку з утворенням з'єднання у твердій фазі або нагадує процес зварювання-паяння. У цьому разі передбачається зварювання через прокладку (фольгу).

Дисперсійно-зміцнювані КМ – системи алюмінієві сплави + частинки SiC, Al₂O₃, TiC – зварюються через проміжні прошарки із міді, срібла; сплави системи Al–Li – з тими самими зміцнювачами під час використання фольги з міді, цинку, срібла. Принцип вибору складу прокладок такий: вони повинні мати температуру плавлення евтектики (550°C – мідь і 560°C – срібло) нижче температури плавлення алюмінію або температура солідуса сплава у АД1 повинна бути нижчою, ніж у сплава типу АД-31. Зварювання потрібно вести в області температур вище за температуру евтектики і солідуса при утворенні рідкої фази.

Зварювання з прокладкою забезпечує більшу міцність та менший ступінь деформації. Ще краще здійснювати зварювання КМ АМг5 + 27 % Al₂O₃ через наночарову фольгу на основі системи Ni–Al, яка наноситься методом шарового електронно-променевого осадження металу на підкладку, що обертається; товщина шару становить 0,05...0,07 мкм.

У процесі зварювання прошарок фрагментується на окремі дисперсійні частинки внаслідок твердофазної реакції в умовах інтенсивного пластичного деформування матеріалу. Шари з такою структурою не тільки активують дифузійні процеси, але й не знижують суттєві властивості зварного з'єднання.

Волокнисті ДУКМ на нікелевій основі із зміцнювачами з ниткоподібних кристалів, дротів із тугоплавких металів, керамічних або вуглецевих волокон зварюються з проміжною прокладкою товщиною 0,1–0,3 мм складу: Co + 28 % Cr + 25% W + 0,9% Ti + 0,4% Zn + 2% Re + 0,15% C.

Цей спосіб зварювання придатний і для з'єднання різнорідних матеріалів, таких як титановий сплав + КМ КАС-1А без утворення інтерметалідних фаз на межах Ti–Al і сталь–Al і збереження початкового розташування сталевих армуючих дротів.

Найбільш ефективним типом з'єднання КМ з титаном є зварювання в замок типу "ластівчиного хвоста", яке забезпечує передачу навантаження на боралюміній за рахунок зсуву в умовах стиснення.

Сполука внапустку не забезпечує повноцінної передачі навантаження на шари КМ, з'єднання ускладнює для шаруватих КМ забезпечення рівномірності розподілу тиску, а висока жорсткість і крихкість борних волокон сприяє утворенню дефектів на межі розділу Ti–Al.

Клінопресове зварювання виробів з КМ боралюмінію із законцюванням із звичайних конструкційних сталей виконується у спеціальному пристосуванні, де оправлення виготовлено з титанового сплаву ВТ6, а обойма – з молібденового сплаву. На внутрішній поверхні алюмінієвого законцювання попередньо наноситься дрібне різьблення, а сама закінцівка посаджена з обоймою на посадці, що ковзає. Тиск пресування виходить за рахунок термічної напруги, що виникає при нагріванні двох коаксіально зібраних жорстких циліндрів з різними коефіцієнтами термічного розширення. Нагрів здійснюється у середовищі аргону. Виправлення з титанового сплаву збільшується в діаметрі при нагріванні, і, натискаючи на внутрішню поверхню конуса, пружно деформується. Її призначенням є збільшення стійкості стінки конуса при впресуванні плакуючого шару виступів різьблення законцювання в плакуючий шар труби, а молібденова обойма в процесі нагрівання перешкоджає розширенню алюмінієвої закінцівки і фактично тримає в облозі її по зовнішньому діаметру. При випробуванні на зсув руйнування відбувається по шару плакуючого алюмінію [1].

Зварювання тертям ДУКМ супроводжується руйнуванням армуючих частинок, інтенсивною пластичною деформацією матриці та зростанням твердості, а в зоні термічного впливу – навпаки, зниженням твердості через відпал матричного сплаву. Тому доцільно виробляти старіння алюмоматричних ДУКМ, після чого міцність таких сполук досягає 80% міцності основного матеріалу.

Часто оптимальні експлуатаційні властивості виробів можна отримати лише за умови використання окремих зварних вузлів із різнорідних кольорових металів. Так, шляхом

зварювання алюмінію з міддю можна істотно скоротити витрату дефіцитної міді при виготовленні струмопідвідних деталей електромашин і апаратів, шинопроводів: в електрохімічній промисловості – це титаномідні катоди і титаноалюмінієві аноди електролізерів, а також трубчасті перехідники [2].

Використання подібних комбінованих зварних вузлів взагалі дозволяє створювати принципово нові види конструкцій, які раніше були відсутні.

Додатково до раніше розглянутих труднощів зварювання кольорових металів з'являються нові, пов'язані з особливістю взаємодії при зварюванні. Вже на стадії розгляду бінарних діаграм стану металів, що з'єднуються, з'ясовується наявність обмеженого їх взаємного розчинення в рідкому і твердому станах з утворенням інтерметалідів з високою твердістю і крихкістю, що руйнуються мимоволі під дією температурних напруг при охолодженні зварного шва. Ці інтерметаліди виділяються по межах сплавлення у вигляді дифузійних прошарків різної товщини. При невеликій товщині (2...3 мкм) прошарок не впливає істотно на міцність, при більшій різко її зменшує. Тому при зварюванні металургійна дія має бути спрямована не тільки на зменшення товщини прошарку, а й на формування не суцільної, а переривчастої її будови.

Існують і технологічні труднощі, зумовлені значною різницею щільності матеріалів, що з'єднуються, їх температур плавлення, теплоємностей, теплопровідності, коефіцієнтів лінійного розширення. Остання обставина особливо суттєва, оскільки неможливо зняти зварювальні напруги шляхом термічної обробки: нагрівання після зварювання ще більше їх збільшить.[2]

У цьому випадку потрібно використовувати більш високий попередній підігрів металу з меншим коефіцієнтом лінійного розширення або проміжні метали-компенсатори, наплавлені або напилені на кромки, що зварюються, або у вигляді вставок.

Останнє широко практикується при зварюванні у твердій фазі – дифузійному у вакуумі, тертям тощо.

Найкращі результати досягаються за умови ведення процесу при температурі не більше 0,4 $T_{пл}$ легкоплавкого металу при достатній активації поверхні міцнішого металу.

При зварюванні плавленням необхідно використовувати технологію і техніку, при яких теплова потужність джерела нагріву зміщувалася б у бік більш теплопровідного матеріалу, а більш тугоплавкий метал захищався від розплавлення пристроєм, що охолоджує.

Такі прийоми лежать в основі способу з'єднання різнорідних металів – зварювання-паяння, коли один з металів має значно меншу температуру плавлення. і твердим металом. Нанесення на поверхню твердого тіла покриттів з третіх металів, які не створюють хімічних сполук з матеріалами, що зварюються, сприяють гальмування дифузійних процесів на межі їх контакту або підвищують взаємну розчинність елементів, що сприяє поліпшенню якості виробів.

При зварюванні різнорідних металів застосовуються ті типи з'єднань, що і для однорідних – стикові, внапустку і кутові, але для максимального зменшення тепловкладання кут обробки кромки зменшується, а перевага надається стиковим швам.

Зварювані поверхні деталей готуються відповідно до рекомендацій для кожного з металів.

Слід мати на увазі, що як умови експлуатації, так і технологія і техніка зварювання біметалічних різнорідних перехідників передбачають перебування зварного шва при температурі не вище 400°C, інакше внаслідок протікання дифузійних процесів буде виникати проміжний прошарок з інтерметалідів, яка розміцнить металоконструкцію.

Пара металів алюміній + мідь характеризується обмеженою взаємною розчинністю: при кімнатній температурі вміст міді в алюмінії вбирається у 8 %, а алюмінію в міді – 9 %.

Внаслідок перенасичення зайва кількість елементів виділяється у вигляді інтерметалідів типу $AlmCu_n$ та евтектики Al_2Cu , розташованих за межами сплавлення, що мають низьку міцність та крихкість. Крім того, температура плавлення міді в 1,6 рази, щільність в 3,3 рази вище за цей показник для алюмінію, а коефіцієнт лінійного розширення майже в 1,5 рази нижче, ніж у алюмінію.

Зварювання плавленням цих металів ведеться із застосуванням третіх металів, що наносяться на мідь гальванічним методом товщиною 50...60 мкм – срібла, цинку, кремнію, які більш-менш задовільно розчиняються як у міді, так і в алюмінії, покращуючи властивості зварного шва та зони сплаву. Таке покриття є бар'єром, що перешкоджає взаємодії алюмінію з міддю, внаслідок того, що перед зварювальною ванною, що рухається, утворюється рідкий прошарок цинку, що покращує змочування поверхні міді алюмінієм. Процес зварювання треба вести так, щоб в основному розплавлявся алюміній, а мідь майже не плавилася, що досягається зміщенням осі електрода від осі зварного шва на величину 0,5...0,6 товщини металу, що зварюється в бік мідної деталі і може бути виконано тільки при автоматичному зварюванні. Обробці піддаються тільки кромки мідної деталі.[3]

Зварювання виконується або вольфрамовим електродом у середовищу аргону на змінному струмі або під шаром флюсу марки АН-А1 на постійному струмі зворотної полярності. Як присадка використовується спеціальний алюмінієвий дріт, легований кремнієм і цинком. Отримані зварні мідноалюмінієві сполуки мають характеристики міцності на рівні алюмінію.

Зварювання у твердій фазі виконується прокаткою для отримання біметалічних листів, смуг та плит. При холодній прокатці використовуються великі обтискання 60...75 %, що з урахуванням можливостей прокатного обладнання дозволяє отримати біметал сумарною товщиною не більше 4 мм, у якому мідна складова дорівнює 0,1...0,8 мм. При гарячій прокатці у вакуумі, вакуумованих пакетах, в атмосфері аргону можна отримати біметал більшої товщини, де мідь матиме рекристалізовану структуру.

Холодне зварювання міді з алюмінієм має кілька різновидів. При точковому зварюванні ступінь необхідної деформації здійснюється пуансонами з різною площею їх робочих частин, які визначаються із співвідношення різних питомих тисків (для алюмінію 280...590 МН/м², для міді – 1 960 МН/м²) в кінцевий момент зварювання в однорідному співвідношенні. Користуючись тими самими міркуваннями, можна зварювати алюміній з латунями марок ЛС59 ЛС62 при односторонньому вдавлюванні пуансонів з боку міді або латуні, коли поверхня алюмінію залишається гладкою.

Іншим різновидом холодного зварювання алюмінію з міддю є облицювання міддю алюмінію.

Алюмінієві шини завтовшки 3...10 мм облицюються відпаленими мідними штабами завтовшки 0,3...1,2 мм у спеціальному пристрої одночасно декількома точками. Кращі результати досягаються при використанні прямокутних пуансонів із шириною, близькою до товщини міді і навіть трохи більшою. Цим досягаються кращі умови течії металу та рівномірного розподілу питомого тиску в контакті і, як наслідок, більш висока міцність. Рівномірність таких з'єднань завжди забезпечує надійну електропровідність.

При холодному стиковому зварюванні необхідно відпалити мідь хоча б на ділянці вильоту. Припуск на зварювання призначається більше алюмінію, ніж міді. При зварюванні спочатку деформується алюміній, виникає складна деформація з елементами зсуву алюмінію з міддю. При зварюванні встик деталей різних діаметрів і товщин, зазвичай у алюмінієвих більших, ніж у мідних, спочатку треба виконати посадку міді, а потім відпалити припуск на зварювання. Властивості таких зварних з'єднань відрізняються високою статичною, динамічною міцністю та електропровідністю.

Зварювання тертям алюмінію з міддю дозволяє отримати з'єднання без мікродеформування міцнішого металу завдяки різкій різниці опору деформування металів під час нагрівання в стику. Кордон розділу є переривчастою інтерметалідною лінією завтовшки до 1,5 мкм. При додатку кувального зусилля міцність підвищується. За рахунок інтенсифікації деформації та її локалізації на початку зварювання можна обмежити зростання прошарку вздовж поверхні контакту та сформувати дисперсну структуру без шару інтерметаліду. Процес треба вести при мінімальному часі нагріву та максимальному часі гальмування, тиску при нагріванні та проковуванні. За рахунок оптимізації часу гальмування можна значно зменшити зусилля проковування.

Дифузійне зварювання у вакуумі дозволяє отримати як безпосереднє з'єднання міді з алюмінієм на оптимальних режимах, так і із застосуванням проміжних вставок з цинку та срібла, якщо температурні та часові параметри режиму зварювання перевищують

оптимальні. При їх використанні із зони зварювання добре видаляються оксидні плівки Al_2O_3 , проте при перевищенні температури вище евтектичних міцність різко знижується, особливо при використанні цинку. Час зварювання у всіх випадках має бути мінімальним, щоб не допускати зростання інтерметалідного прошарку, товщина якого не повинна перевищувати 10 мкм.

Магнітно-імпульсне зварювання використовується для виготовлення мідно-алюмінієвих трубчастих перехідників. Сутність цього процесу полягає в реалізації зусиль, що виникають при взаємодії магнітних полів струму індуктора і наведеного в трубках, що зварюються. Зварювана мідна трубка діаметром 6 мм збирається внапустку з алюмінієвою діаметром 8 мм, так що мідна знаходиться всередині алюмінієвої розвальцованої з невеликим зазором.

Для збереження прохідного перерізу всередину мідної трубки вводиться сталевий стрижень, який згодом видаляється. Зібрані трубки вводяться в центральну частину машини-індуктора до зони найбільшої концентрації магнітних силових ліній. Під дією пондермоторних сил розвальцована частина алюмінієвої трубки співпадає з мідною з утворенням міцного герметичного з'єднання.

Ударне зварювання у вакуумі застосовується при виготовленні біметалічних шайб, зібраних внапустку товщиною 2,4 мм та діаметром 30 мм. Деталі, зібрані із зазором 2...3 мм, попередньо підігріваються кільцевим електронно-променевим джерелом. При імпульсному навантаженні заготовки переміщуються в холодну матрицю, що деформує, де і відбувається зварювання з одночасним формуванням контакту необхідної конфігурації. При цьому деформації мідної та алюмінієвої деталі становлять 10 та 40 % відповідно, а міцне зварне з'єднання утворюється без інтерметалідів.

Алюміній+титан. Згідно з діаграмою стану Al–Ti внаслідок практичної відсутності взаємної розчинності при кімнатній температурі в алюмінії може розчинятися лише 0,07 % Ti, решта – інтерметалідні сполуки $TiAl$, $TiAl_3$ та $\square$ -фаза.

При зварюванні титану з алюмінієвими сплавами АМг і АМц з'являються додаткові труднощі у зв'язку з підвищеною концентрацією на межі розділу фаз типу $AlmMgn$, $AlmCup$ та подібних до них, так що уникнути утворення зварних швів з крихкими фазами неможливо [4].

Зварювання плавленням цих металів передбачає ведення процесу способом зварювання-паяння, де має місце взаємодія рідкого алюмінію з твердим титаном. Така технологія забезпечує короткочасне контактування двох металів, коли концентрація титану недостатня для створення $\square$ -фази, а кількість сполук $TiAl_3$ суттєво зменшена. Необхідною умовою є попереднє нанесення на титанові кромки шару алюмінію, найкраще алітуванням, якщо розміри деталей невеликі. Наплавлення шару алюмінію виконується під шаром флюсу Ф-320, а процес ведеться на змінному струмі вольфрамовим електродом в середовищу аргону; товщина наплавленого шару вибирається в залежності від глибини проплавлення при подальшому зварюванні з алюмінієвою деталлю. Непроплавлена частина шару має бути не менше 2 мм. Основні типи зварних з'єднань – стикове, внапустку та таврове. Техніка зварювання передбачає розміщення центру плями зварювальної дуги лише на рівні краю титанової деталі чи зі зміщенням їх у бік алюмінієвої деталі. При зварюванні внапустку процес ведеться із створенням двох окремих зварювальних ванн. Під дією зайвого тепла рідкої титанової ванни плавиться алюмінієва деталь, створюючи у свою чергу ванну рідкого алюмінію, але завдяки шару твердого непроплавленого титану товщиною 0,3...0,4 мм обидві ванни не контактують між собою. Захист плавильного простору та прилеглих зон металу здійснюється за рахунок піддуву інертного газу в підкладку, спеціальне "плаваюче" сопло та в козирок.

При зварюванні труб аргон подається в їхню внутрішню порожнину. Обов'язковою умовою якісного процесу є щільне прилягання деталей, що зварюються. При зварюванні "на вазі" для зменшення проплавлення алюмінієвої кромки шляхом відведення зайвого тепла застосовують спеціальні холодильники у вигляді сталевих або мідних підкладок або кілець. Їх розміри у кожному випадку визначаються експериментально залежно від теплопровідних властивостей матеріалів та параметрів режиму зварювання. Як присадка використовується алюмінієвий дріт СваК5. При ретельному дотриманні параметрів режиму та техніки зварювання забезпечуються допустимі темпера-

турні умови взаємодії алюмінію з титаном. Хоча повністю усунути появу інтерметалідів неможливо, їх наявність як окремих розрізнених включень є допустимим з погляду працездатності таких різнорідних конструкцій.

Іншим різновидом зварювання-паяння є ведення процесу в камері з контрольованою інертною атмосферою, коли нагрівання кромки, що з'єднуються (найчастіше деталей з компактною формою поперечного перерізу) здійснюється електричною дугою змінного струму, що горить у зазорі між деталями. Вона рівномірно розігріває торцеві поверхні, здійснює їх катодне очищення та формує шар розплавленого алюмінію. Після цього здійснюється осадка, при якій рідкий метал витісняється зі стику, і зварне з'єднання формується у твердій фазі. При цьому способі зварювання відсутні непровари, а міцність зварного з'єднання становить 95% міцності алюмінію [4].

Електричне контактне точкове зварювання з керованим внутрішнім виплеском дозволяє також отримати з'єднання у твердорідкому стані. Для попередження початкового внутрішнього виплеску передній фронт зварювального імпульсу модулюється, а після реалізації внутрішнього виплеску, під час якого видаляється рідка частина ядра разом з інтерметалідними з'єднаннями, деталі додатково проковуються з підвищеним зусиллям для остаточного витіснення рідкого металу і механічного дроблення. роблячи її дискретною.

Зварювання у твердій фазі титану з алюмінієм виконується кількома способами. Виготовлення біметалу такого складу здійснюється прокаткою у вакуумі з обтисканням 68...70 % за температури 470...500 °C [5].

Отримання складу біметалу VT1-0 + АМг6 високої та стабільної якості забезпечується в тому випадку, якщо на поверхні, що контактують, попередньо нанесені тонкі шари алюмінію; при цьому величина обтиснення може бути знижена до рівня 47...50%.

Холодне зварювання такої ж композиції проводиться при виготовленні трубчастих перехідників шляхом спільного формування заготовок у спеціальній оправці. Алюмінієва заготовка поєднується з титановою, на поверхні якої виконуються циліндричні канавки та виступи трикутної форми з кутом 60° та глибиною 1 мм. Затискне кільце має конічну форму, і з його торця прикладається особливе зусилля, яке стискає алюмінієву заготовку із середньою величиною стиснення 37...43 %. Алюміній при цьому заповнює канавки, створюючи щільний контакт між металами, що з'єднуються, так що міцність різнорідного з'єднання дорівнює міцності алюмінію.

Дифузійне зварювання титану VT1-0 зі сплавом АД1 здійснюється при безпосередньому контактуванні без утворення інтерметалідного прошарку, а при зварюванні пари VT1-0 + АМг3 необхідно алітування титанової деталі або розміщення проміжного прошарку з фольги АД1 товщиною 0,4 мм.

Зварювання ведеться при тиску, більшому межі плинності матеріалів при температурі процесу, а збереження необхідних геометричних розмірів виробу забезпечується спеціальним оснащенням, що забезпечує примусове формування металу в зоні контакту.

Титан + мідь. Титан і мідь також розрізняються за своїми властивостями, утворюючи систему з обмеженою взаємною розчинністю, яка при температурі 400°C становить лише 0,4 % за масою. Тому з'єднання цих металів як при плавленні, так і в твердій фазі з нагріванням здійснюється в основному з використанням проміжних прокладок з третіх металів, що задовільно зварюються як з титаном, так і з міддю.

Зварювання плавленням титану з міддю виконується за схемою зварювання-паяння, наведеною раніше для отримання різнорідної сполуки титан-алюміній. Деталі, що зварюються, збираються внапустку, їх крайки зачищаються і знежирюються. Використовуються спеціальні притискні механічні пристосування для попередження зміщення кромки, особлива увага приділяється точності установки та підтримки постійної відстані осі вольфрамового електрода від торця мідної деталі по всій довжині шва, яке в залежності від товщини становить 1,5...4,5 мм у бік міді. Зварювання ведеться на постійному струмі прямої полярності. Іноді на оброблену кромку під кутом 45°C наноситься методом плазмового напилення шар міді завтовшки 0,15...0,25 мм, а деталі, що зварюються, збираються встик. Зварювання ведеться вольфрамовим електродом, вісь якого зміщується у бік мідної деталі на 2,5...4,5 мм із використанням мідної присадки типу BrX1 або MCp10.

За рахунок максимального обмеження тривалості взаємодії цих металів за високої температури можна значно зменшити товщину інтерметалідного прошарку та забезпечити задовільні властивості зварного з'єднання.

У разі застосування проміжної вставки з тугоплавких металів – ванадію, ніобію, танталу – зварювання ведеться у два прийоми: спочатку зварюється титановий сплав із тугоплавким металом, а потім з ним зварюється мідний сплав аргондуговим або електронно-променевим зварюванням. Міцність такого з'єднання знаходиться на рівні мідного сплаву, а руйнування відбувається по його межі зі швом.

Електричне контактне точкове зварювання титану краще реалізується з мідними сплавами, наприклад, з латунню, якщо процес ведеться з керованим виплеском, коли зварна точка з задовільними характеристиками міцності утворюється в рідко-твердій фазі з інтерметалідним прошарком товщиною 2...3 мкм [5].

Зварювання титану з міддю в твердій фазі найкраще реалізується, якщо процес ведеться за схемою, описаною раніше для пари Ti–Al. На поверхнях міді, що з'єднуються, виконуються виступи і відповідні їм западини на титані. Зварювані поверхні, що знаходяться під кутом до напрямку дії стискаючого зусилля взаємно контактують, і при вдавненні утворюється міцне і щільне зварне з'єднання.

При зварюванні тертям, яке повинно вестися в середовищі аргону, незважаючи на часткове видалення інтерметалідів разом з пластичним металом, зона з'єднання характеризується розрізненим прошарком товщиною близько 7 мкм, але руйнування з'єднання відбувається за мідною складовою на відстані від зварного шва.

Взагалі, безпосереднє з'єднання цих двох металів неможливе без утворення інтерметалідного прошарку. Навіть такий швидкореалізований спосіб, як зварювання вибухом, вимагає використання проміжного металу – ніобію товщиною 0,3...1,0 мм при отриманні заготовки біметалу Ti–Cu для подальшої металообробки прокаткою, де нагрівання ведеться до температури 750...800 °C. Після цього виконується примусове підстуджування пакета, щоб перепад температур між міддю і титаном становив 70...120 °C для наступної прокатки з обтисканням 30...40 % за один прохід.

Безпосереднє дифузійне зварювання титану з міддю може бути здійснено тільки у вузькому температурно-часовому діапазоні, що іноді практично важко, тому використовуються як проміжні матеріали молибден і ніобій як у вигляді фольг, і так і у вигляді напилених шарів [6].

Техніка дифузійного зварювання істотно впливає на поведінку металу в приконтактних зонах під дією термодеомаційного циклу. Якщо зварювання ведеться у щільній оправці з кільцевою проточною у місці стику, відбувається локальна деформація, в приконтактному шарі міді протікає динамічна рекристалізація під навантаженням, метал залишається пластичним, зберігає свої властивості, а руйнування відбувається по поверхні контакту.

Якщо ж зварювання ведеться в щільній жорсткій оправці, яка забезпечує спільну деформацію металів незалежно від їх властивостей, потрібно значно більший час, щоб титан продавив мідь, деформація розосереджується, захоплюючи не лише приконтактний шар, а й подальші ділянки. Динамічна рекристалізація забезпечує повний розвиток фізичного контакту, релаксуючи напруги, заліковує дефекти кристалічних ґрат і усуває пори.

Бібліографічний перелік

1. Сварка композиционных материалов: обзор / В.Р. Рябов. Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1990. 60 с.
2. Сварка разнородных металлов и сплавов / В.Р. Рябов, Д.М. Рябкин, Р.С. Курочко, Л.Г. Стрижевская. Машиностроение, 1984. 239 с.
3. Сварка алюминия и его сплавов с другими металлами / В.Р. Рябов. Киев: Наукова думка, 1983. 264 с.
4. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С.М. Гуревич, В.Н. Замков, В.Е. Блащук и др. 2-е изд., доп. и перераб. Киев: Наукова думка, 1986. 240 с.
5. Технологія та обладнання електричного контактного зварювання: навч. посіб. / О.Г. Біковський, Д.М. Лутов, І.В. Пінковський. Киев: Техніка, 2001. 240 с.
6. Сахацкий Г.П. Технология сварки металлов в холодном состоянии. Киев: Наукова думка, 1979. 296 с.

References

1. Welding of composite materials: a review / V.R. Ryabov. Kyiv: E.O. Paton Electric Welding Institute, 1990. 60 p.
2. Welding of dissimilar metals and alloys / V.R. Ryabov, D.M. Ryabkin, R.S. Kurochko, L.G. Strizhevskaya. Mashinostroenie, 1984. 239 p.
3. Welding of aluminum and its alloys with other metals / V.R. Ryabov. Kyiv: Naukova Dumka, 1983. 264 p.
4. Metallurgy and technology of welding titanium and its alloys / S.M. Gurevich, V.N. Zamkov, V.E. Blashchuk et al. 2nd ed., supplemented and revised. Kyiv: Naukova Dumka, 1986. 240 p.
5. Technology and equipment of electric contact welding: training manual / O.G. Bikovsky, D.M. Lutov, I.V. Pinkovsky. Kyiv: Technika, 2001. 240 p.
6. Sakhatsky G.P. Cold metal welding technology. Kyiv: Naukova Dumka, 1979. 296 p.

Lapteva Anna, candidate technical Sciences, associate professor of the department, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", ORCID: 0000-0003-4475-2354

Bykovsky Oleg, professor, doctor of technical sciences, Zaporizhzhia National University, Scopus ID: 6506391379

Yefanov Volodymyr, PhD, doctoral student, Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, ORCID: 0000-0002-6363-4081

METALLURGICAL AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF WELDING COMPOSITE AND DISSECTIOUS METALS

When creating modern objects in aircraft engineering, rocketry, and space technology, there is a need to use not only individual components made of composites, which are often obtained by welding methods, but also to connect them with each other, as well as with homogeneous and heterogeneous materials, which is associated with certain difficulties.

The main types of composite materials, their structure, properties and purpose are highlighted.

The possibility of physical weldability of materials is considered: solubility in the liquid state, susceptibility to metallurgical processing of the weld pool metal.

In this article the main problems connected with welding capacity of composite materials with matrix from nonferrous metals and heterogeneous nonferrous metal aluminium + copper, aluminium + titanium, titanium + copper (oxide film, weld porosity, losses of strengthen fibres and particles, formation of intermetallic compositions, equivalent solid) and the ways that help to overcome them both on stage to preliminary prepare of wares before welding and during of the welding process are analyzed.

It is shown that melting welding is the most technologically advanced type of composite material joining, but at the same time it is very complex due to delamination in the near-seam zone and porosity. Technological measures are presented, under which melting welding of composite materials will give satisfactory results. The permissible thickness of the intermetallic layer is indicated, at which the strength of the weld will be at a satisfactory level.

The possibilities of pressure welding of dissimilar materials are considered.

For all cases, the approximate strength of the resulting welded joints is given.

The technical methods and technological recommendations by the welding this materials are given too.

Modern tendencies on perfection welding capacity, technology and technique of manufacture from composite and heterogeneous nonferrous metals welded constructions are examined.

Keywords: welding, composite materials, matrix, non-ferrous metals, dissimilar compounds, oxide film, weldability, uniform strength

Vlasov Andrii, candidate of technical sciences, associate professor, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0003-3253-6435

Vasilchenko Tatiana, candidate of technical sciences, associate professor, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-0340-3900

Hrechanyi Oleksii, Ph.D., associate professor, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0003-0524-4998

Ivakhnenko Oleksandr, senior lecturer, Zaporizhzhia National University

Skrypka Rodion, magister, department of metallurgical equipment, Zaporizhzhia National University

ANALYSIS OF INSTALLATION AND BASISING METHODS OF NODES OF TECHNOLOGICAL LINES OF METALLURGICAL SHOPPING PLANTS

Rolling production is the final stage of the metallurgical cycle, and the quality of finished products supplied to the consumer directly depends on the coordinated operation of all technological units. The high level of wear and tear of the main production assets of metallurgical enterprises necessitates not only their renewal, but also the constant modernization of outdated equipment. Since renewal is carried out in the conditions of existing production, this process involves complex installation work to integrate new or reconstructed equipment into already functioning production lines.

Operation of mechanical equipment is a set of three interdependent processes: performance of technological operations, wear during operation and performance of repair actions to restore operability. The rate of wear of machines and mechanisms depends on both the intensity of technological actions and the quality of installation work, lubrication modes of friction units, periodicity and completeness of technical maintenance.

The reliability of machines depends on the quality of design, technological and assembly work. Errors in dimensions, configuration, mutual arrangement of parts can lead to an unacceptable increase in forces and emergency failures. For metallurgical equipment, such errors often appear during assembly, which is understood as a set of operations to connect parts into a product. Thus, an important issue arises of establishing optimal methods for assembling metallurgical equipment in the conditions of a manufacturing enterprise in view of the possibility of minimizing all possible errors in assembly work.

Known methods of assembly and verification of basic parts of technological equipment are somewhat outdated and require constant and continuous improvement. The most accurate and fast method of controlling the accuracy of assembly and installation of basic parts is optical-geodetic, which allows you to free up to 20% of working personnel and at the same time save up to 30% of working time compared to the string method of controlling the assembly of metallurgical equipment units.

Keywords: foundation, installation accuracy, string method, optical-geodetic method, theodolite.

Problem statement. Modern technological lines of metallurgical production workshops have a lot of auxiliary and main equipment, which consists of various components such as gearboxes, electric motors, as well as the executive unit itself [1-3].

Operation of mechanical equipment is a set of three interdependent processes: performance of technological operations, wear during operation and performance of repair actions to restore operability. The rate of wear of machines and mechanisms depends on both the intensity of technological actions and the quality of installation work, lubrication modes of friction units,

periodicity and completeness of maintenance. The quality of the restoration process (repairs and preventive maintenance) is determined by the level of knowledge about the patterns of failure of parts, the organization of repair production, and the qualifications of service personnel. High operational reliability of units and equipment is achieved through the use of the most modern methods of maintenance and repair [4-5].

The complexity of technological processes in metallurgy has significantly increased the requirements for the reliability of units and equipment. High operational reliability of equipment is achieved through the use of the most modern methods of maintenance and repair: centralization of repairs and repair forces, improvement of organization, planning, production and provision of spare parts; application of methods for increasing the durability of parts; industrial repair methods – large-unit and aggregate; improvement of the lubrication system [6].

The reliability of machines depends on the quality of design, technological and assembly work. Errors in the dimensions, configuration, and mutual arrangement of parts can lead to unacceptable growth of forces and emergency failures [7]. For metallurgical equipment, such errors often appear during assembly, which is understood as a set of operations to connect parts into a product.

Thus, an important issue arises of establishing optimal methods for installing metallurgical equipment in a production enterprise, taking into account the possibility of minimizing all possible errors in assembly work.

Analysis of recent research and publications. Assembly technology depends on the nature of production. In mass production, machines are assembled from interchangeable parts on conveyors, in serial production at several workplaces from parts that require minor adjustment, and in individual production on temporary foundations [8].

The basic parts of mechanical equipment include large supporting parts of machines [9], which are installed primarily on foundations or other bases [10].

The foundation is the supporting part of the equipment and is designed to transfer the load from the structures located on it to the base, that is, to the (soil) [11].

The operational qualities of the equipment, and of course the durability of its use, depend on the reliability and stability of the foundations. The cost of building foundations can be up to 40% of the cost of the equipment itself, but correcting mistakes is usually very expensive, so the construction of the foundation must be approached very responsibly. [12].

The soil located under the foundation and bearing the load from the weight of the equipment and the foundation itself is called the base. The bases under any buildings and structures can be of two types – natural and artificial [13].

Natural bases include those on which the foundation is laid without any additional reinforcement. An artificial base is one that is reinforced, for example, with sand bedding (sand cushion), crushed stone or other material, followed by tamping [14].

The initial indicators for designing foundations are the parameters and overall dimensions of the machine bases, the foundation loading scheme, data on geology, hydrogeology and physical and mechanical properties of the soil, schemes for attaching the foundation to the building, and the location of embedded parts, pits and channels [15]. In addition, an important point is not only the installation of equipment on the foundation, but also its interdependent attachment on the foundation to already installed structures and buildings, which is one of the main tasks of mechanical installers.

The basic parts are installed in the design position, checking along two mutually perpendicular axes in plan and in height. Thus, according to the known method [16], the position of the actuator drive reducer in plan is checked in kind along the reference axes, made in the form of strings stretched along the installation axes (Fig. 1).

With this method, it is necessary to perform a whole complex of interconnected and resource-intensive operations. According to the assembly diagram, first you need to install racks designed to hold the axes 4 (Fig. 1). Next, you need to stretch the strings 13, which duplicate the axes, and hang the pendulums 12 to them. It is important to connect the pendulums with the marks on the plates in such a way that they leave a gap of 1...2 mm to the mark.

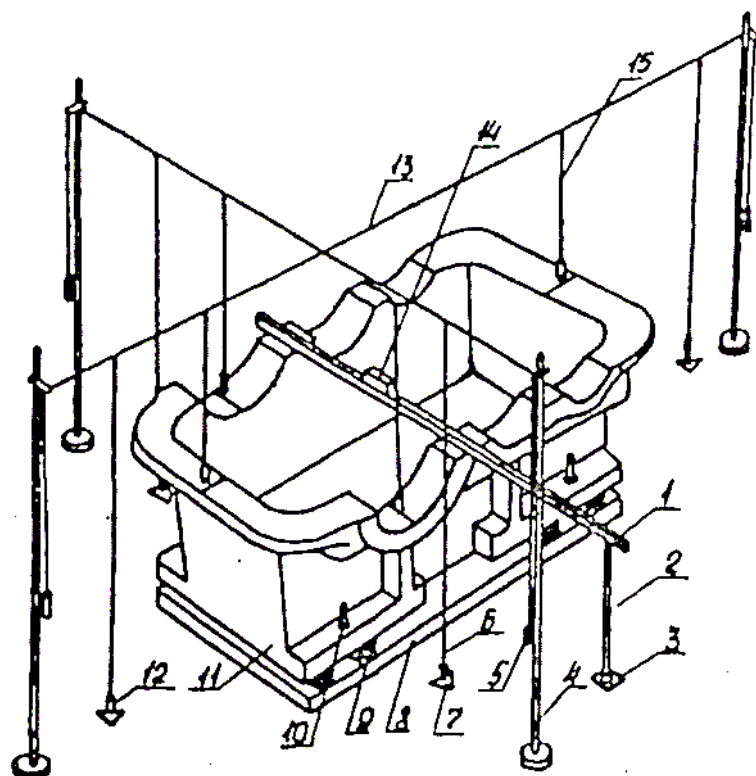


Figure 1 – Scheme of installation and calibration of the gearbox of the actuator of the metallurgical unit

On the gearbox housing 11, the longitudinal and transverse axes should be marked, focusing on the position of the driven wheel shaft inserts. Next, it is necessary to determine and form packages of installation and adjustment pads of the appropriate thickness. These packages 9 should be placed near the foundation bolts on the frame 8.

The next step is to precisely align the installation packages of the pads using a benchmark. After that, the body 11 is installed on the foundation bolts, and the towers 15 are brought closer to the strings 13. The longitudinal and transverse axes of the body should be carefully checked with the position of the towers.

Using the reference 3, ruler or measuring tape 2, alignment ruler 1 and level 14, it is necessary to check the height position of the housing. If there is a need to adjust the height, it should be adjusted using adjustment shims. After that, the foundation bolts 10 must be securely tightened. At the final stage, the final alignment of the structure is carried out.

The position of the base parts in the vertical plane is regulated using metal shims. Metallurgical equipment is mainly installed on packages of rectangular metallurgical shims. The height of the package is determined by calculation, based on the actual assessment of the top of the foundation concrete, provided in the executive diagram, and the design assessment of the bottom of the base of the base part. The height of the package is set with an overestimation of 1...3 mm, taking into account its subsidence when tightening the bolts. Gaskets with a thickness of 5 mm and above are called adjustment, and from 0.5 to 5 mm – adjustment. The base part is installed on the packages of shims. Using the adjustment shims and the level, its position in plan and in height relative to the benchmark and design axes is checked, and a form is drawn up for the installation of the base part. The number of shims or the required area of the package is determined by the formula [17]:

$$m = \frac{P + 0,75nd^2[\sigma]}{kF[\rho_\sigma]}, \quad (1)$$

where P is the technological load from the weight of the unit, N ; n – number of anchor bolts; d – diameter of the anchor bolt, mm ; $[\sigma]$ – allowable stress from tightening the anchor bolt; k – coefficient of unevenness of the substrate to the foundation; F – area of the substrate package, mm^2 ; p_o – permissible specific pressure on concrete from gaskets.

After final alignment, the substrates in the package are welded together by electric arc welding. The form indicates the actual and design dimensions and estimates, the alignment method, and the tool with which it was performed.

To perform this method of installation and adjustment, a team of at least four installation workers and an additional welder is required.

Research objective. Given the laboriousness of the known method of assembling basic parts and the acute shortage of working personnel in wartime conditions, the question arises of considering more promising and progressive methods of assembling and adjusting metallurgical equipment. The main goal of the study is to create prerequisites for assembly with a smaller number of working personnel, provided that the quality of the adjustment of basic parts does not deteriorate, but on the contrary, with the possibility of improving it.

Presentation of the main material.

The optical-geodetic method is a more accurate way to control the accuracy of assembly and installation of basic parts and machines compared to the string method given above. Its essence lies in fixing optical axes using high-precision theodolites, as well as in determining elevations using precise electronic levels and compact dotted lines. Theodolites are used to measure horizontal angles and angles of inclination, which allows you to determine the direction of the axes with high accuracy. They can be mechanical, optical or electronic, but optical models are most often used in installation work [16]. At the same time, given the constant development of equipment for performing installation work, it sometimes does not even require professional education to use, but basic engineering knowledge is enough. Thus, the teachers of the department purchased a laser theodolite from the Deko company, model Laser 4V1H, which belongs to professional installation devices, for conducting laboratory work. (Fig. 2).

This model belongs to the self-leveling laser x high-precision x devices that appointed and for construction and finishing works. He automatically leveled and capable to design not only horizontal and vertical lines, and also a point slope. For comfortable good job illuminated premises foreseen possibility using laser glasses that provide clear visibility beam on any surfaces.

Key characteristics models:

- projection: 5 lines and 6 points.
- operating range: up to 30 m without use receiver.
- laser type: combined, green.
- system Alignment: automatic.
- power supply: three AA batteries (1.5 V) or from a power supply unit operating from a 220 V household AC network.
- fastening: thread for 5/8" tripod.
- rotation: 360° [18].

For additional control of the equipment's tilt points, a compact digital protractor-level (inclinometer) is used. with a measurement accuracy of 0.2°. Although this device is quite simple to use, it allows you to control the deviation of the installed equipment from the horizontal or vertical axis by reproducing the tilt angles on the liquid crystal screen. In case of unexpected battery discharge, analog tilt angle control elements are installed – bubble capsules, which allows for comprehensive and continuous process control.

Another equally important factor is the attachment of the equipment to structures indoors or on an industrial site. The simplest and most effective in this aspect are laser rangefinders on the ProZone T-40 Red, which is also used for educational purposes when performing laboratory work in the educational process (Fig. 3).

The device is quite versatile and professional, allows you to perform height measurements at a distance, has the ability to perform unprecedented measurements. Its main characteristic is a measurement range of up to 40 m with an error of 1.5 mm, which allows you to perform high-precision alignment to shop communications.



Figure 2 – Deko Laser theodolite model Laser 4V1H [18]



Figure 3 – Professional laser rangefinder ProZone T-40 [19]

The advantages of the device include the ability to instantly calculate not only the surface area of the foundation on which the equipment is planned to be installed, but also its volume, which at the installation stage will allow you to check the compliance of the calculations made for the manufacture of the foundation with its actual execution. The built-in memory allows you to store up to 20 of the last measurements.

Thus, the use of relatively inexpensive, but professional devices for performing the optical-geodetic method of basing parts when performing laboratory work allowed to reduce the time for conducting the practical component of measurements by 40%, and free up at least 2 personnel when imposing the equipment calibration scheme in relation to the string method. At the same time, the accuracy of setting up laboratory equipment has significantly improved.

Conclusions. An important stage in the modernization and repair of metallurgical equipment is its installation and alignment at the assembly stage. The most common and used string method of alignment of basic units is morally obsolete and is quite costly in terms of the use of human resources. The indisputable advantage over the string method is the use of the optical-geodetic method, which, thanks to the constant improvement and reduction in the cost of specialized devices, allows you to free up to 20% of human resources during the assembly of equipment. At the same time, the time for aligning basic parts on control marks can be reduced by a total of 30%, which is important in conditions of work with a shortage of service personnel.

References

1. Analysis of possible ways to increase the productivity of the equipment production line of rolling shops / O. M. Hrechanyi et al. *Visnyk of Kherson National Technical University*. 2021. T. 78, № 3. C. 36–42. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.3.4> (in Ukrainian)
2. Hrechanyi O. M. Substantiation of the choice of technical parameters of the guillotine shears of the rolling mill. *Metallurgy: scientific works of the Zaporizhia State Engineering Academy*. 2017. Vol. 38, no. 2. P. 126–130
3. Belodedenko S., Grechany A., Yatsuba A. Prediction of operability of the plate rolling rolls based on the mixed fracture mechanism. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1, no. 7 (91). P. 4–11. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.122818>
4. Bilous O. I. Operation and maintenance of MOMS: lecture notes. Kamianske: DSTU, 2024. 56 p. (in Ukrainian)
5. Klimov S. V. Operation and maintenance of machines: manual. Rivne: NUVHP, 2010. 218 p. (in Ukrainian)
6. Krashenin O. S. Assessment of the impact of deviations in operational and working characteristics of equipment on their reliability. *Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport*. 2015. Vol. 1, No. 151. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.151.2015.68522> (in Ukrainian)
7. Bilodidenko S.V., Bilichenko G.M., Ganush V.I. Periodicity of diagnostics of mechanical systems: manual. Dnipro: NMetAU. 2017. 88 p. (in Ukrainian)
8. Repair of metallurgical equipment: manual. / Zhuk A. Ya. et al. K.: Publishing House "Kondor", 2017. 236 pp. ISBN 978-617-7582-08-2 (in Ukrainian)
9. Belodedenko, S., Hrechanyi, O., Hanush, V., Vlasov, A. Estimating the residual resource of basic structures using a model of fatigue durability under complex loading. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, 3(1 (117)), 33–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.257013>
10. Mikulyonok I. O. Manufacturing, installation and operation of chemical production equipment: manual. K.: NTUU "KPI", 2012. 419 p. ISBN 978-966-622-374-9
11. Parfentyeva I.O., Vereshko O.V., Gusachuk D.A. Fundamentals and foundations: textbook. Lutsk: LNTU, 2017. 296 p.
12. Maevska I., Blashchuk N. Accounting of the coefficient of the soil porosity for determination of resistance of side surface of drilling pile. *Bases and Foundations*. 2019. No. 38. P. 53–64. URL: <https://doi.org/10.32347/0475-1132.38.2019.53-64>
13. Morgun A., Met I., Zadorozhniuk V. Calculation of the foundations in compacted excavations with extended base, applying boundary elements method. *Bases and Foundations*. 2019. No. 38. P. 28–33. URL: <https://doi.org/10.32347/0475-1132.38.2019.28-33>
14. Boyko I., Chechelnytskyi S. Numerical modeling of field stamp tests, the influence of boundary conditions of the soil mass on the settlement of the stamp during modeling. *Bases and Foundations*. 2019. No. 39. P. 65–73. URL: <https://doi.org/10.32347/0475-1132.39.2019.65-73>
15. Boyko I., Ruchkivskyi V. Influence of the building foundations on the stress-strain state of the retaining structures. *Bases and Foundations*. 2019. No. 38. P. 9–15. URL: <https://doi.org/10.32347/0475-1132.38.2019.9-15>

16. Installation of metallurgical equipment: a textbook / Zhuk A.Ya. et al. Kyiv: Publishing house "Kondor", 2017. ISBN 978-617-7320-95-0 (in Ukrainian)
17. Bilous O. I. Assembly, installation, diagnostics and repair of equipment: lecture notes. Kamyanske: DSTU, 2018. 138 p. (in Ukrainian)
18. Laser level in a bag DEKO 5 lines, green beam: sale, price in Odessa region. Laser levels, levels, scanners from "FOP Petrenko Alina Anatoliivna" – 1622768591. "FOP Petrenko Alina Anatoliivna" – contacts, products, services, prices. URL: <https://odimpexstore.prom.ua/ua/p1622768591-lazernyj-uroven-sumke.html> (access date: 16.02.2025). (in Ukrainian)
19. Professional laser rangefinder (40 meters) ProZone T-40 Red (ID#2018556786), price: 1011 ₪, buy at Prom.ua. prom.ua. URL: https://prom.ua/ua/p2018556786-professionalnyj-lazernyj-dalnomer.html?utm_source=google_pmax&utm_medium=cpc&utm_content=pmax&utm_campaign=Pmax_cpa_50_b2b&utm_source=1&utm_gclid=CjwKCAiAtsa9BhAKEiwAUZAszWxekt9ESb8Yk2kcZKXIT3z84yxanjhpZlu404vVv3TPeX7KwhoP-RoC5iMQAvD_BwE (access date: 16.02.2025). (in Ukrainian).

Бібліографічний перелік

1. Аналіз можливих шляхів підвищення продуктивності обладнання потокових ліній прокатних цехів / О. М. Гречаний та ін. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2021. Т. 78, № 3. С. 36–42. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.3.4>
2. Hrechanyi O. M. Substantiation of the choice of technical parameters of the guillotine shears of the rolling mill. Metallurgy: scientific works of the Zaporizhia State Engineering Academy. 2017. Vol. 38, no. 2. P. 126–130.
3. Belodedenko S., Grechany A., Yatsuba A. Prediction of operability of the plate rolling rolls based on the mixed fracture mechanism. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Vol. 1, no. 7 (91). P. 4–11. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.122818>
4. Білоус О. І. Експлуатація та обслуговування МОМЗ : конспект лекцій. Кам'янське : ДДТУ, 2024. 56 с.
5. Клімов С. В. Експлуатація і обслуговування машин : навч. посіб. Рівне : НУВГП, 2010. 218 с.
6. Крашенінін О. С. Оцінка впливу відхилень експлуатаційних і робочих характеристик обладнання на їх надійність. Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport. 2015. Т. 1, № 151. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.151.2015.68522>
7. Білодієнко С.В., Біліченко Г.М., Гануш В.І. Періодичність діагностування механічних систем: навч. посіб. Дніпро: НМетАУ. 2017. 88с.
8. Ремонт металлургийного обладнання : навч. посіб. / Жук А.Я. та ін. К.: Видавничий дім «Кондор», 2017. 236 с. ISBN 978-617-7582-08-2
9. Belodedenko, S., Hrechanyi, O., Hanush, V., Vlasov, A. Estimating the residual resource of basic structures using a model of fatigue durability under complex loading. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2022, 3(1 (117)), 33–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.257013>
10. Мікульонюк І. О. Виготовлення, монтаж та експлуатація обладнання хімічних виробництв: підруч. К. : НТУУ «КПІ», 2012. 419 с. ISBN 978-966-622-374-9
11. Парфентьева І.О., Верешко О.В., Гусачук Д.А. Основи та фундаменти: навчальний посібник. Луцьк: ЛНТУ, 2017. 296 с.
12. Maevska I., Blashchuk N. Accounting of the coefficient of the soil porosity for determination of resistance of side surface of drilling pile. Bases and Foundations. 2019. No. 38. P. 53–64. URL: <https://doi.org/10.32347/0475-1132.38.2019.53-64>
13. Morgun A., Met I., Zadorozhniuk V. Calculation of the foundations in compacted excavations with extended base, applying boundary elements method. Bases and Foundations. 2019. No. 38. P. 28–33. URL: <https://doi.org/10.32347/0475-1132.38.2019.28-33>
14. Boyko I., Chechelnytskyi S. Numerical modeling of field stamp tests, the influence of boundary conditions of the soil mass on the settlement of the stamp during model-ing. Bases and Foundations. 2019. No. 39. P. 65–73. URL: <https://doi.org/10.32347/0475-1132.39.2019.65-73>
15. Boyko I., Ruchkivskyi V. Influence of the building foundations on the stress-strain state of the retaining structures. Bases and Foundations. 2019. No. 38. P. 9–15. URL: <https://doi.org/10.32347/0475-1132.38.2019.9-15>
16. Монтаж металлургийного обладнання: навчальний посібник / Жук А.Я. та ін. Київ: Видавництво «Кондор», 2017. ISBN 978-617-7320-95-0
17. Білоус О. І. Складання, монтаж, діагностика та ремонт обладнання : конспект лекцій. Кам'янське : ДДТУ, 2018. 138 с.
18. Лазерний рівень у сумці DEKO 5 ліній, зелений промінь: продаж, ціна у Одеській області. Лазерні нівеліри, рівні, сканери від "ФОП Петренко Аліна Анатоліївна" – 1622768591. "ФОП

Петренко Аліна Анатоліївна" – контакти, товари, послуги, ціни. URL: <https://odimpexstore.prom.ua/ua/p1622768591-lazernyj-uroven-sumke.html> (дата звернення: 16.02.2025).

19.Професійний лазерний далекомір (40 метрів) ProZone T-40 Red (ID#2018556786), ціна: 1011 ₪, купити на Prom.ua. prom.ua. URL: https://prom.ua/ua/p2018556786-professionalnyj-lazernyj-dalnomer.html?utm_source=google_pmax&utm_medium=cpc&utm_content=pmax&utm_campaign=Pmax_cpa_50_b2b&utm_gad_source=1&utm_gclid=CjwKCAiAtsa9BhAKEiwAUZAszWxekt9ESb8Yk2kcZKXIT3z84yxanjhpZlu404vVv3TPeX7KwhoPRoC5iMQAvD_BwE (дата звернення: 16.02.2025).

УДК 621.9.07.002

Власов Андрій, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3253-6435

Васильченко Тетяна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-0340-3900

Гречаний Олексій, доцент, Ph.D., Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-0524-4998

Івахненко Олександр, викладач, Запорізький національний університет

Скрипка Родіон, магістрант кафедри металургійного обладнання, Запорізький національний університет

АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОНТАЖУ ТА БАЗУВАННЯ ВУЗЛІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЛІНІЙ МЕТАЛУРГІЙНИХ ЦЕХІВ

Прокатне виробництво є завершальним етапом металургійного циклу, і якість готової продукції, що постачається споживачеві, безпосередньо залежить від злагодженої роботи всіх технологічних агрегатів. Високий рівень зношеності основних виробничих фондів металургійних підприємств зумовлює необхідність не лише їх оновлення, а й постійної модернізації застарілого обладнання. Оскільки оновлення здійснюється в умовах діючого виробництва, цей процес передбачає складні монтажні роботи з інтеграції нового або реконструйованого обладнання в уже функціонуючі виробничі лінії.

Експлуатація механічного устаткування – це сукупність трьох взаємозалежних процесів: виконання технологічних операцій, зношування в процесі експлуатації та виконання ремонтних впливів по відновленню роботоздатності. Швидкість зношування машин і механізмів залежить як від інтенсивності технологічних впливів, так і від якості монтажних робіт, режимів змазування вузлів тертя, періодичності й повноти технічного обслуговування.

Надійність машин залежить від якості конструкторських, технологічних і складальних робіт. Погрішності в розмірах, конфігурації, взаємному розташуванні деталей можуть привести до неприпустимого росту сил й аварійних відмов. Для металургійного встаткування такі погрішності часто проявляються при зборці, під якою розуміють сукупність операцій по з'єднанню деталей у виріб. Таким чином постає важливе питання встановлення оптимальних методів монтажу металургійного обладнання в умовах виробничого підприємства з огляду на можливість мінімізації всіх можливих погрішностей складальних робіт.

Відомі методи монтажу та вивірки базових деталей технологічного обладнання дещо застаріли та потребують постійного і безперервного удосконалення. Найбільш точним та швидким методом контролю точності складання та встановлення базових деталей є оптико-геодезичний, який дозволяє вивільнити до 20% робочого персоналу та одночасно зекономити до 30 % робочого часу в порівнянні зі струнним методом контролю складання вузлів металургійного обладнання.

Ключові слова: фундамент, точність монтажу, струнний метод, оптико-геодезичний метод, теодоліт

Григор'єв Станіслав Михайлович, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-3875-8880

Міщенко Андрій Григорович, аспірант, Запорізький національний університет

Яковлєв Дмитро Володимирович, аспірант, Запорізький національний університет, ORCID: 0009-0002-0406-9868

Скачков Родіон Олексійович, магістрант, Національний університет «Запорізька політехніка»

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ВИРОБНИЦТВА І ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛІЗОВАНОГО МОЛІБДЕНОВОГО КОНЦЕНТРАТУ

В роботі проведено дослідження техніко-економічних показників активного промислового експерименту виплавки і використання металізованого молібденового концентрату (губчастого феромолібдену). У вітчизняній практиці отримала розвиток і довгий час експлуатувалась технологія виробництва нового легувального матеріалу на основі молібдену в шахтних електропечах і оптимізувалась. Розроблена математична модель техніко-економічних показників з урахуванням найбільшої кількості технологічних факторів. Результатом математичного моделювання є багатофункціональна система показників. Встановлені і оптимізовані межі виробничих показників та видаткових коефіцієнтів шихтових матеріалів, що дало можливість стабілізувати якість цільового продукту.

У виконаній оцінці наскрізної економічної ефективності при отриманні нового легувального матеріалу присутнє зниження собівартості технології виробництва і зниження видаткових коефіцієнтів. У методиці оцінки використовували не тільки загальні рекомендації співвідношення, а і оригінальні фактори, які набули розвиток в дійсній роботі. У розрахунках оцінки ефективності використовувалась удосконалена методика з конкретизацією відповідних коефіцієнтів і цін на такі матеріали як стандартний феромолібден ФМо52...ФМо60, молібденовий концентрат марок КМо1...КМо3, ФМоГ1...ФМоГ3 та сталі Р6М5.

Новий легувальний матеріал на основі молібдену ФМоГ відрізняється від традиційних феросплавів виплавлених рудно- або металотермічним способом вигідними техніко-економічними показниками: в 7-8 разів більшою швидкістю засвоєння молібдену розплавом сталі, зниженням окислювального потенціалу під час легування – засвоєння хрому, молібдену та ванадію підвищується на 4-10%.

На прикладі виробництва і використання губчастого феромолібдену для легування сталі виконана оцінка економічної ефективності, яка підтверджує доцільність і перспективність використання в металургії легувальних матеріалів на основі важкоплавких елементів.

Ключові слова: молібден, концентрат, феросплави, економічні показники, легувальний елемент, сталь.

Вступ. Серед чисельних проблем, які вирішуються за допомогою порошкової металургії, у цій роботі запропоновані два напрями, які отримали розвиток в наукових працях авторів і доведені до впровадження в промислове виробництво і довгострокової експлуатації. Одним з таких напрямів в роботі розглядаються результати розробки наукових і прикладних рішень отримання легувальних матеріалів і лігатур на основі важкоплавких і рідкісних елементів у гетерогенних системах і системах рідкофазних реакцій, альтернативних виробництву феросплавів і металевих елементів, які використовують в металургії спеціальних сталей. В якості вихідних матеріалів можуть

використовуватись руди, рудні концентрати і техногенні відходи металургійних і обробляючих переділів виробництва металопродукції. Розроблені технології відрізняються безвідходністю, гнучкістю, не складним апаратурним оснащенням, високою ефективністю виробництва і їх використанням. В цьому напрямку запропоновані наукові і практичні рішення дійсних досліджень.

Практичний промисловий інтерес представляють розроблені технології виробництва металургійних і карбідізованих легувальних матеріалів на основі молібдену, вольфраму, хрому, ванадію, кобальту та інших, які впроваджені і вироблялись у великих обсягах з високою економічною ефективністю.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження оптимальних техніко-економічних показників, проведення аналізу та розрахунків економічної ефективності виробництва з використанням нового легувального матеріалу при виплавці швидкорізної сталі.

Аналіз джерел інформації. В собівартості виробництва спеціальних сталей легувальних рідкісними та важкоплавкими елементами доля витрат на феросплави та металеві матеріали складає 40-50 %.

Найбільш розповсюдженим серед таких класів є інструментальні леговані і швидкорізальні сталі, отримані відкритою виправкою і методом порошкової металургії. Зрозуміло, що ресурсо- та енергозбереження виробництва та використання цих видів металопродукції є одним з джерел розвитку перспективних напрямків у металургії.

Високі темпи зростання виробництва спеціальних легованих сталей можуть бути забезпечені за умови одночасного підвищення виробництва необхідних легувальних матеріалів і підвищення їх якості. При цьому, для радикальної зміни структури на користь спеціальних сталей випереджаючими темпами повинно здійснюватися нарощування обсягів виробництва легувальних матеріалів [1].

Вирішити поставлені задачі можливо тільки шляхом розробки та впровадження прогресивних технологій отримання легувальних матеріалів з особливими заданими споживчими властивостями, які задовольняють вимогам сталеплавильного виробництва [2].

Перспективні закордонні і відчинянні розробки свідчать про те, що перевага відається процесам отримання металізованих концентратів та губчастих феросплавів на основі важкотопких елементів у вигляді брикетів. В цьому сенсі порошкова металургія володіє великими потенціальними можливостями для утворення економічних і високоякісних матеріалів, її процеси, як правило, відбуваються при температурах на 20-80 % нижче температури плавлення, тим самим забезпечується можливість економії енергоресурсів [2]. В плануванні майбутніх виробництв, які спеціалізуються на виробництві легувальних матеріалів і виплавці сталей з їх використанням, ці фактори є вирішальними [3].

В найближчі 10-15 років найбільш перспективною є стратегія інвестування будівництва нових і реконструкція діючих виробничих потужностей, які спеціалізуються на виробництві важкоплавких легувальних матеріалів, освоєння виробництва достатньо випробувальних продуктів металізації рудної сировини. В залежності від складу вихідної сировини, її якості, технічних можливостей, переробки і призначення, а також сфер використання продуктів металізації можливі різні варіанти апаратурно-технічного оснащення виробництва і якості цільових продуктів металізації. Важливою умовою перспективності даного напрямку в металургії важкотопких легувальних матеріалів є достатньо висока економічна ефективність виробництва нових видів продукції із заданими властивостями і використання в сталеплавильному процесі, в порівнянні з традиційними рудно-металургійними методами виробництва феросплавів і рідкісних металів

Підтвердженням цього підходу у вирішенні стратегічних проблем ресурсозбереження може служити досвід технології виробництва металізованого молібденового концентрату (губчастого феромолібдену). Висока питома економічна ефективність використання губчастого феромолібдену і її довгострокового вдосконалення технології на обладнанні основного цеху підприємства металургії підтверджують доцільність вибраного напрямку.

Результати проведених досліджень. В процесі металізації молібденових матеріалів, які складаються із триоксиду молібдену і залізної окалини, склад шихт і цільового

продукту визначається співвідношенням основних компонентів, який дозволяє отримати продукти з масовою долею молібдену від 5 до 70%. Вихідні компоненти шихти подрібнюють, брикетують і відновлюють конвертованим природним газом. Отриману губку піддають розмолу і повторному брикетуванню для підвищення щільності металізованих матеріалів до 4,5 – 6,1 г на см³. До числа недоліків такого складу шихти (8-85% – MoO₃, решта – це залізо) необхідно віднести низьку швидкість металізації триоксиду молібдену газовою сумішшю в порівнянні з комбінованим відновленням твердим вуглецем і конвертованим природним газом.

У вітчизняній практиці отримала розвиток і довгий час використовувалась технологія виробництва металізованого молібденового концентрату в шахтних електропечах із брикетованої шихти [1, 2], параметри якої вдосконалювались і оптимізувались [2, 4 – 11].

Шихта для виробництва нового легувального матеріалу на основі молібдену, яка вміщує молібденовий концентрат, вуглецевий відновник і металевий порошок, додатково включає зволожувач, а в якості молібденового концентрату гідрометалургійний – і/або уротропіновий концентрат. Склад концентрату, % мас: 52-58 Mo; 0,01-0,02 P; 0,01-0,02 Cu; 0,01-0,08 Sb; 0,03-0,07 As; 0,03-0,07 Zn; 0,08-1,0 SiO₂; 0,01-0,03 Bi; 2,0-5,0 H₂O.

Зволожувач додають в шихту разом з гідрометалургійним концентратом, вологість якого складає 0,5-1,5% по рівням поставки. Інша частка зволожувача додається у вигляді парів води при 393-413K під тиском 200-400 кПа під час перемішування шихти в змішувачі з паровим обігрівом. Додавання зволожувача до складу шихти дозволяє практично виключити механічні втрати компонентів і що головне, зробити його реагентом комбінованого відновлення оксидів молібдену в пічних агрегатах. Взаємодія зволожувача проявляється через пароокислювальний механізм і має каталізаційну природу, прискорює процес відновлення оксидів молібдену і забезпечує підвищення продуктивності пічних агрегатів.

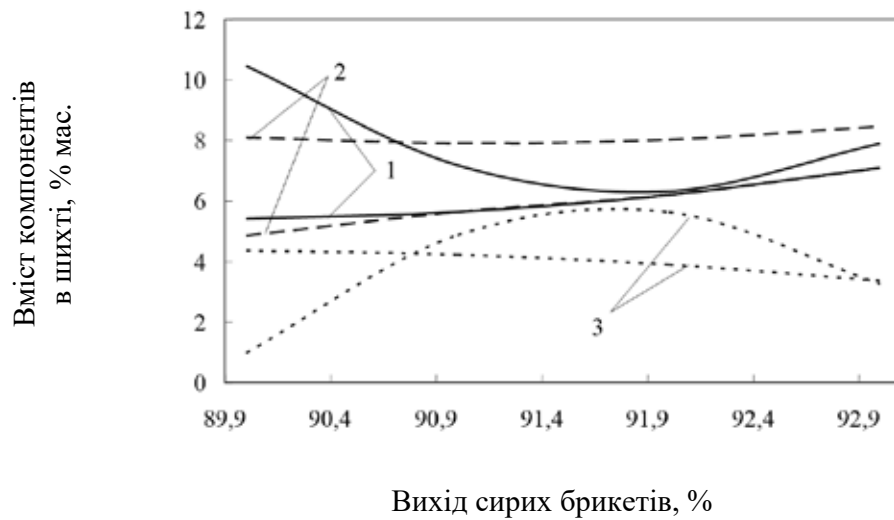
В промислових умовах був проведений експеримент зі зміною складу шихти і технологічних параметрів в широких межах для встановлення найбільш значимих закономірностей. Виконаний аналіз, а потім відібрані, оптимізовані і виділені в систему параметри, які визначають техніко-економічні показники технологічного процесу і склад цільового продукту. Виділена система кількісних показників (y_i , x_j) при $i=1 \dots 5$, $j=1 \dots 4$, де y_{i1} , y_{i2} , y_{i3} , y_{i4} , y_{i5} – масова доля в шихті, % молібденового концентрату, кам'яновуглецевого сполучного, вуглецевовмісткого відновника, металевого порошку, зволожувача відповідно, x_1 – вихід сирих брикетів, %; x_2 – ступінь відновлення, %; x_3 – продуктивність процесу, кг/год.; x_4 – щільність металізованих брикетів, г/см³.

Розрахунки виконані з точністю до 0,01%, що повністю задовольняє вимогам точності і техніко-економічних показників в промислових умовах.

На основі результатів аналізу попередніх робіт по удосконаленню технологічних параметрів виробництва губчастого феромолібдену [2, 10, 12] розроблені і визначені умови зміни інгредієнтів у складі шихти і виділені ті, які найбільш суттєво впливають на показники, що стосуються цільової задачі дійсних досліджень. Враховуючи це, в першій серії активного експерименту масові долі молібденового концентрату і металевого порошку у всіх випадках були однакові – 46,5% і 33,5% відповідно. Основні показники отриманого металізованого молібденового концентрату наведені на рисунках 1-4 і в таблицях 1-4.

На малюнках вміст кам'яновугільного сполучного, вуглецевмісного відновника і зволожувача представлені парами кривих, таким чином верхніми і нижніми межами, а крайні між ними відображають оптимальні значення показників. По технічній суттєвості і результату, що досягається вони найбільш переважні [2].

Встановлено рафінуючи дію конвертованого природного газу в процесі комбінованого відновлення обпаленого молібденового концентрату на концентрацію супутніх домішок сірки та фосфору. З метою покращення якості виробляемого губчастого феромолібдену випробувані і впровадженні технологічні показники відновлення молібденовмісної сировини, які забезпечили зниження вмісту сірки та фосфору в 4-6 разів кожного. Швидкість десульфурзації відновлювальних брикетів залежить від швидкості їх нагріву та швидкості руху газу в печі.

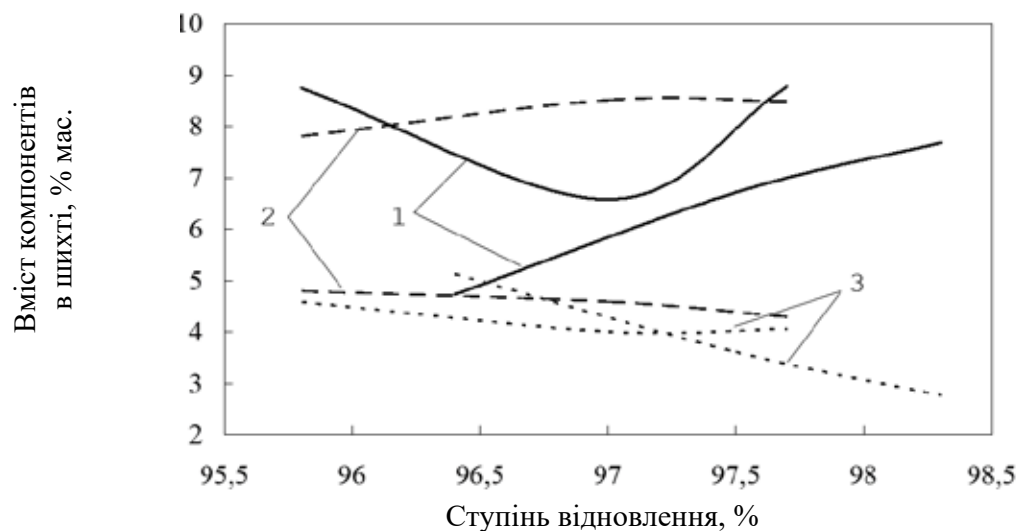


1 – кам'яновугільний пек; 2 – вуглецьвмісний відновник; 3 – зволожувач [1].

Рисунок 1 – Вплив вмісту компонентів на вихід сирих брикетів

Таблиця 1 – Коефіцієнти функціональних закономірностей між показниками технологічного процесу

y_i	x_j	Інтервал		$a_{\bar{j}}^{(k)}$	$b_{\bar{j}}^{(k)}$	$c_{\bar{j}}^{(k)}$
		$m_{\bar{j}1}^{(k)}$	$m_{\bar{j}2}^{(k)}$			
y_2	x_1	90	93	1,2157	-223,33	10263
		90	93	0,1667	-29,944	1350,1
y_3		90	93	0,1556	-28,354	1299,6
		90	93	0,0056	-1,1796	65,663
y_5		90	93	-1,5652	287,19	-13168
		90	93	-0,1	17,967	-802,67

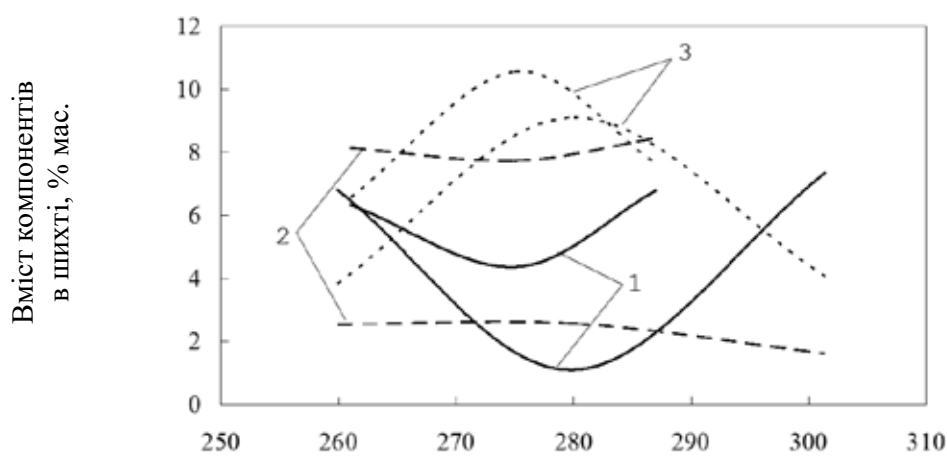


1 – кам'яновугільний пек; 2 – вуглецьвмісний відновник; 3 – зволожувач [1].

Рисунок 2 – Вплив складу компонентів шихти на ступінь відновлення

Таблиця 2 – Коефіцієнт функціональних залежностей між показниками технологічного процесу відповідно рисунку 2.

y_i	x_j	Інтервал		$a_j^{(k)}$	$b_j^{(k)}$	$c_j^{(k)}$
		$m_{j1}^{(k)}$	$m_{j2}^{(k)}$			
y_2	x_2	95,8	97,7	2,6063	-504,3	24401
		96,4	98,3	-0,3148	62,847	-3128,3
y_3		95,8	97,7	-0,3313	64,462	-3127,1
		96,4	98,3	-0,0993	19,072	-910,96
y_5		95,8	97,7	0,2977	-57,881	2817,4
		96,4	98,3	0,1722	-34,772	1756,9



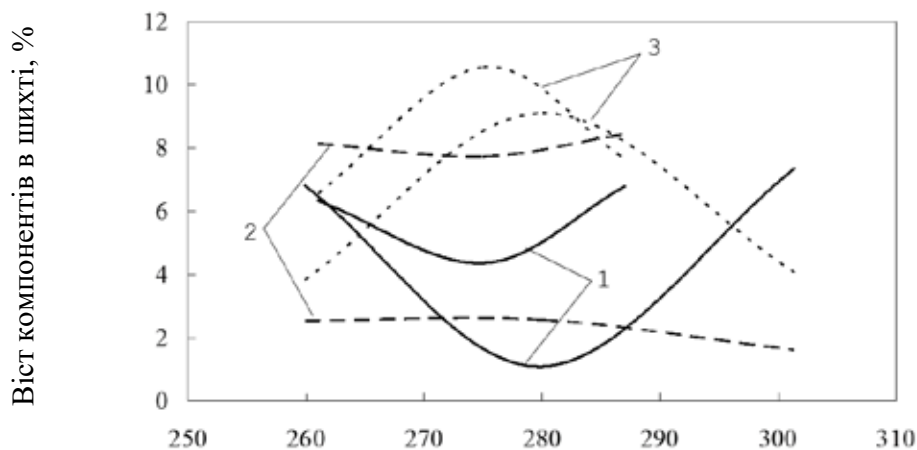
Продуктивність процесу, кг/год.

1 - кам'яновугільний пек; 2 - вуглецьвмісний відновник; 3 - зволожувач [1]

Рисунок 3 – Вплив складу компонентів шихти на продуктивність процесу відновлення молибдену із концентрату в шахтовій печі

Таблиця 3 – Коефіцієнти функціональних залежностей між параметрами технологічного процесу відновлювання рисунок 3 та 4

y_i	x_j	Інтервал		$a_j^{(k)}$	$b_j^{(k)}$	$c_j^{(k)}$
		$m_{j1}^{(k)}$	$m_{j2}^{(k)}$			
y_2	x_3	261	287	0,0132	-7,2162	990,57
		259,9	301,4	0,0139	-7,7888	1092,2
261		287	0,0034	-1,8513	259,72	
259,9		301,4	-0,0011	0,5951	-77,818	
y_5		261	287	-0,0203	11,166	-1524,9
		259,9	301,4	-0,012	6,7411	-937,6
y_2	x_4	3,61	3,92	-167,84	1268,9	-2388,9
		3,37	3,83	-109,34	782,91	-1392,7
3,61		3,92	-23,044	175,12	-324,17	
3,37		3,83	13,371	-94,798	171,96	
y_5		3,61	3,92	116,2	-884,033	1685,8
		3,37	3,83	92,708	-664,27	1191,3



Щільність металізованих брикетів, г/см³ .

1 – кам'яновугільний пек; 2 – вуглецьвмісний відновник; 3 – зволожувач [1]

Рисунок 4 – Вплив складу компонентів в шихті на вихар молібдену при виплавці сталі в ДСП-18

Наступний етап технічних досліджень полягає в аналізі розрахунку і економічній оцінці виробництва та використання губчатого феромолібдену для легування швидкорізальної сталі.

Традиційно розрахунок економії виконується співвідношенням ціни визначеної кількості шихти до і після впровадження розробленого заходу. При цьому сума економії може бути отримана не за рахунок скорочення витрат окремого елемента, який входить в склад даного матеріалу, а за рахунок зміни співвідношення матеріалів які мають різну ціну [1].

У виконаній оцінці наскрізні вигоди при отриманні нового легувального матеріалу на основі молібдену присутнє зниження собівартості технології його отримання і зниження вихідних коефіцієнтів основних легувальних елементів в розплаві за рахунок молібдену із заданими властивостями. З цієї точки зору конкретні технічні рішення по використанню губчатого феромолібдену в якості легувального матеріалу по визначенню його економічної доцільності потребує використання не тільки загальних рекомендацій, а і врахування оригінальних критеріїв співставлення. До частки таких критеріїв відносяться розрахунок балансів по елементам, які вносяться і застосовуються при виплавці сталі і порівняння витрат елемента, заданого шихтою, з вмістом його в готовому металі (кількість зволоження, коефіцієнти засвоєння).

В цих умовах доцільним є розрахунок вище названих коефіцієнтів для визначення балансу шихтових матеріалів по плавкам проведених по базовій і новій технологіям. В розрахунках використовувались методики з конкретизації відповідних коефіцієнтів.

По результатам впровадження нової технології виробництва і використання губчатого феромолібдену ФМоГ по ТУ 48-5-224-81 його рекомендовано використовувати замість плавленого феромолібдену марок ФМо52...ФМл60 по ДСТУ 4755-79 і обпаленого молібденового концентрату марок КМо1...КМо3 по ТУ 14-5-88-77.

Ціна оксидного молібденового концентрату (вихідна сировина для виробництва ФМоГ) по даним Лондонської біржі металів і досвід маркетингу на 21.03.2024 року з урахуванням НДС складала 9,4 – 10,21 доларів США на 1 кг Мо в концентраті. Для розрахунку прийнята ціна 73,48 дол./кг (середнє значення). Видатковий коефіцієнт молібденового концентрату КМо дорівнює 1,05 на 1 кг Мо в ФМо. Умовна ціна ФМо і ФМоГ прирівняна до дол./кг (ціна на 21.03.2024р.). Собівартість переділу металізації у виробництві концентрату прийняли 0,450 дол. на 1 т КМо з вмістом 55% Мо.

Тоді на базовий вміст 100% Мо буде витрачено:

$$0,45/60 \cdot 100 = 0,75 \cdot 100 = 750 \text{ дол./т}$$

З урахуванням видаткового коефіцієнту:

$$75,0 \cdot (1,05 - 1,03) = 78,75 - 77,45 = 1,5 \text{ дол./кг} = 78,0 \text{ дол./т}$$

Повна собівартість виробництва губчастого феромолібдену ФМоГ В перерахунку на базовий вміст 100% Мо складає:

$$1,5 + 78,0 \cdot 1600 = 781,5 \text{ дол./т}$$

Прибуток від виробництва і реалізації нового легувального на основі молібдену складе:

$$П = \sum_{i=1}^n (C_i - C_i) Q_2$$

де C_i – ціна 1 кг молібдену в стандартному і губчастому феромолібдену по курсу ЛМЕ; C_i – повна собівартість виробництва губчастого феромолібдену в перерахунку на базовий вміст 100% Мо; Q_2 – обсяг виробництва (на 1000 кг).

$$П = (78,0 - 75,0) \cdot 349,3 = 1047,9 \text{ дол./т}$$

Узагальнені показники виплавки швидко різальних сталей з використанням обпаленого молібденового концентрату стандартного плавленого феромолібдену і губчастого феромолібдену взяті з використанням і видаткових коефіцієнтів до і після впровадження нової технології.

1. Економія коштів за рахунок зниження витрат легувальних елементів на 1 тону сталі Р6М5 при виплавці в дуговій печі ДСВ-18 розрахована по формулі:

$$\mathcal{E}_1 \frac{n_1 - n_2}{B_1} y_1 \cdot C_1 + \frac{Z_1 - Z_2}{B_2} y_2 \cdot C_2 + \frac{L_1 - L_2}{B_3} y_3 \cdot C_3,$$

де n_1, Z_1, L_1 – це витрати хрому, молібдену і ванадію на тону рідкої сталі при виплавці з КМо, кг; n_2, Z_2, L_2 – це витрати хрому, молібдену і ванадію на тону сталі при виплавці з ФМоГ, кг; B_1, B_2, B_3 – доля хрому, молібдену і ванадію відповідно у феросплавах, %; y_1, y_2, y_3 – засвоєння хрому, молібдену і ванадію із феросплавів; C_1, C_2, C_3 – вартість хрому, феромолібдену і ферованадію, дол./кг.

$$\mathcal{E}_1 \frac{52,21 - 46,3}{0,70} \cdot 0,95 \cdot 1,776 + \frac{63,24 + 59,4}{0,60} \cdot 0,97 \cdot 17,63 + \frac{28,79 - 24,85}{0,35} \cdot 0,90 \cdot 26,52 = 392,376 \text{ дол.}$$

2. Витрати по підвищенню ФМоГ по відношенню до КМо:

$$Z_1 = Z_2' \cdot (C_2 - C_2'),$$

де Z_2' – витрати молібдену, кг/т; C_2 – ціна ФМоГ, дол./кг Мо; C_2' – вартість КМо, дол./кг Мо.

$$Z_1 = 22,37(7801,5 - 73,48) = 101,45 \text{ дол./т сталі}$$

3. Витрати по підвищенню вартості ФМоГ по відношенню до феромолібдену (ФМо):

$$Z_2 = (Z_2'' - Z_2') \cdot (C_2 - C_2')$$

де Z_2'' – витрати ФМо, кг/т; Z_2' – витрати КМо кг/т; C_2, C_2' – вартість ФМоГ та ФМо, дол./кг Мо.

$$Z_2 = (24,04 - 22,37) \cdot (78,5 - 75) = 5,01 \text{ дол./кг сталі}$$

4. Сумарна ефективність при використанні ФМоГ разом з КМо і ФМо складає:

$$\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_1 - Z_1 - Z_2 = 285,42 \text{ дол./т. сталі}$$

3. Економічний ефект від використання 1т губчастого феромолібдену складає:

$$\mathcal{E}_3 = \frac{285,42 \cdot 1000}{24,04} = 11872,71 \text{ дол.}$$

6. Економічний ефект від використання 1000 т губчастого феромолібдену дорівнює:

$$\Xi_4 = 11872,71 \cdot 1000 = 11872710.$$

Висновки. Розроблена і впроваджена технологія виробництва губчастого феромолібдену методом порошкової металургії. Вироблений матеріал відрізняється від традиційних феросплавів на основі молібдену виплавлених рудно- або металотермічним способами, вигідними заданими технологічними властивостями: в 7-8 раз більше високою швидкістю засвоєння молібдену розплавом сталі, зниження окислювального потенціалу під час легування засвоєння хрому, молібдену і ванадію підвищується на 4 – 10%.

Отримана залежність параметрів, яка забезпечує підвищення і оптимізацію техніко-економічних показників виробництва губчастого феромолібдену: склад шихти і технологічних режимів комбінованого відновлення молібденового концентрату в шахтних печах.

Вміст кам'яновугільного пеку, вуглевмісного відновника і зволожувача представлені верхніми і нижніми межами, а крайні між ними – представлені оптимальними значеннями показників. По технічній суттєвості і досяжному економічному результату вони найбільш переважні.

Подальший науковий розвиток і практика використання для легування сталі цей напрямок отримав в роботах з вольфрамом і хромом. Удосконалювався склад і якість цільових легувальних матеріалів.

На прикладі виробництва і використання губчастого феромолібдену для легування сталі Р6М5 виконана кількісна оцінка економічної ефективності в цінах Лондонської біржі металів станом на 21.03.2024 рік. Представлені результати підтверджують доцільність і перспективність напрямку в металургії легувальних матеріалів на основі рідкісних і важкотопких елементів.

Бібліографічний перелік

1. Григор'єв С. М., Скачков В. А., Бережна О. Р. Порошкова металургія легуючих та композиційних матеріалів : монографія. Запоріжжя : ЗНУ, 2017. 737 с.
2. Григор'єв С. М., Петрищев А. С. Сучасне ресурсозбереження в металургії спеціальних сталей (техніко-економічна версія) : монографія. Запоріжжя : ЗНУ, 2016. 532 с.
3. Тарасов О.В. Мінеральна сировина, нові технології та розвиток виробництва тугоплавких металів у Росії та країнах СНД. *Кольорові метали*, 2011. № 6. С. 12-24.
4. Jung, W.-G. (2014). Recovery of tungsten carbide from hard material sludge by oxidation and carbothermal reduction process. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20 (4), 2384–2388. doi: 10.1016/j.jiec.2013.10.017.
5. Pashkeev K. Y., Pashkeev I. Y., Mikhailov G. G., Sudarikov M.V. Tarasov P. A. Investigation of aluminothermic reduction of wolframite concentrates. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy*, 2015. V. 15, №. 2. P. 13-19.
6. Leont'ev L. I., Grigorovich K. V., Kostina M. V. The development of new metallurgical materials and technologies. Part 1. Steel in Translation. 2016. Vol. 46, Issue I.P. 6-15. doi: 10.3103/s 096709121601006x.
7. Kozyrev N. A., Bendre Y. V., Goryushkin V. F., Shurupov V. M., Kozyreva O. Y. Thermodynamics of WO₃ Reduction by Carbon. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2016. № 2(16). Pp. 15-17.
8. Ryabchikov I. V., Belov B. F, Mizin V. G. Reactions of metal oxides with carbon. *Steel in Translation*. 2014. Vol. 44, Issue 5. P. 368-373. doi: 10.3103/s 0967091214030206.
9. Shveikin G. P., Kedin N. A. Products carbothermal reduction of tungsten oxides in argon flow. *Russian journal of inorganic chemistry*. 2014. Vol. 59, Issue 3. P. 153-158. doi: 10.1134/s 0036023614030206.
10. Kuzmichev E. N., Nikolenko S. V., Balakhonov D. I. Obtaining tungsten carbide from scheelite concentrate by concentrated energy flows. *Chemical Technology*. 2017. No. 3. P. 113-118.
11. Grigoriev D.S. Some kinetic regularities of the carbon-thermal reduction of a mixture of high-speed steel scale with additions of scheelite concentrate. *Metals and casting of Ukraine*. 2010. № 9-10. Pp. 57-61.
12. Tsvirko E.I., Grigoriev D.S. Some phase and structural transformations in the carbon-thermal reduction of a mixture of dross of high-speed steels with additions of scheelite concentrate. *New materials and technologies in the metal industry and machine-based machines*. 2010. № 2. P. 90-94.

References

1. Hryhor'ev S. M., Skachkov V. A., Berezhna O. R. Powder metallurgy of alloying and composite materials: monograph. Zaporizhzhia: ZNU, 2017. 737 p.
2. Hryhor'ev S. M., Petrishchev A. S. Modern resource conservation in the metallurgy of special steels (technical and economic version): monograph. Zaporizhzhia: ZNU, 2016. 532 p.
3. Tarasov O.V. Mineral raw materials, new technologies and the development of the production of refractory metals in Russia and the CIS countries. Non-ferrous metals, 2011. No. 6. P. 12-24.
4. Jung, W.-G. (2014). Recovery of tungsten carbide from hard material sludge by oxidation and carbothermal reduction process. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 20 (4), 2384–2388. doi: 10.1016/j.jiec.2013.10.017.
5. Pashkeev K. Y., Pashkeev I. Y., Mikhailov G. G., Sudarikov M.V. Tarasov P. A. Investigation of aluminothermic reduction of wolframite concentrates. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy*, 2015. V. 15, №. 2. P. 13-19.
6. Leont'ev L. I., Grigorovich K. V., Kostina M. V. The development of new metallurgical materials and technologies. Part 1. Steel in Translation. 2016. Vol. 46, Issue I.P. 6-15. doi: 10.3103/s 096709121601006x.
7. Kozyrev N. A., Bendre Y. V., Goryushkin V. F., Shurupov V. M., Kozyreva O. Y. Thermodynamics of WO₃ Reduction by Carbon. Bulletin of the Siberian State Industrial University. 2016. № 2(16). Pp. 15-17.
8. Ryabchikov I. V., Belov B. F., Mizin V. G. Reactions of metal oxides with carbon. Steel in Translation. 2014. Vol. 44, Issue 5. P. 368-373. doi: 10.3103/s 0967091214030206.
9. Shveikin G. P., Kedin N. A. Products carbothermal reduction of tungsten oxides in argon flow. Russian journal of inorganic chemistry. 2014. Vol. 59, Issue 3. P. 153-158. doi: 10.1134/s 0036023614030206.
10. Kuzmichev E. N., Nikolenko S. V., Balakhonov D. I. Obtaining tungsten carbide from scheelite concentrate by concentrated energy flows. Chemical Technology. 2017. No. 3. P. 113-118.
11. Grigoriev D.S. Some kinetic regularities of the carbon-thermal reduction of a mixture of high-speed steel scale with additions of scheelite concentrate. Metals and casting of Ukraine. 2010. № 9-10. Pp. 57-61.
12. Tsivirko E.I., Grigoriev D.S. Some phase and structural transformations in the carbon-thermal reduction of a mixture of dross of high-speed steels with additions of scheelite concentrate. New materials and technologies in the metal industry and machine-based machines. 2010. № 2. P. 90-94.

Hrigoriev Stanislav, professor, doctor of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-3875-8880

Myshchenko Andriy, PhD student, Zaporizhzhia National University

Yakovlev Dmytro, PhD student, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0009-0002-0406-9868

Skachkov Rodion, master's student, National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

MATHEMATICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF PRODUCTION AND USE OF METALLISED MOLYBDENUM CONCENTRATE

In the work, a study of technical and economic indicators of an active industrial experiment of smelting and using metallized molybdenum concentrate (spongy ferromolybdenum) was carried out. In domestic practice, the technology for the production of a new alloying material based on molybdenum in mine electric furnaces was developed and exploited for a long time and was optimized. A mathematical model of technical and economic indicators was developed, taking into account the largest number of technological factors. The result of mathematical modeling is a multifunctional indicator system. The limits of production indicators and expenditure coefficients of bulk materials were established and optimized, which made it possible to stabilize the quality of the target product.

In the performed assessment of end-to-end economic efficiency when obtaining a new alloying material, there is a reduction in the cost of production technology and a reduction in expenditure ratios. In the assessment methodology, not only the general recommendations of the ratio were used, but also the original factors that were developed in actual work. In the

efficiency assessment calculations, an improved technique was used with the specification of the relevant coefficients and prices for such materials as standard ferromolybdenum FMo52...FMo60, molybdenum concentrate of grades KMo1...KMo3, FMoG1...FMoG3 and steel P6M5.

The new alloying material based on molybdenum FMoG differs from traditional ferroalloys smelted by ore or metalothermic methods by favorable technical and economic indicators: 7-8 times higher rate of assimilation of molybdenum by molten steel, reduction of oxidation potential during alloying – assimilation of chromium, molybdenum and vanadium increases by 4-10%.

On the example of the production and use of spongy ferromolybdenum for steel alloying, an economic efficiency assessment was performed, which confirms the expediency and perspective of using alloying materials based on refractory elements in metallurgy.

Keywords: molybdenum, concentrate, ferroalloys, economic indicators, alloying element, steel.

Малишев Віктор Володимирович, професор, доктор хімічних наук, Приватний заклад вищої освіти «Міжнародний європейський університет», м. Київ, ORCID 0000-0003-2756-3236

Габ Ангеліна Іванівна, доцент, кандидат хімічних наук, доцент, Приватний заклад вищої освіти «Міжнародний європейський університет», м. Київ, ORCID 0000-0003-3162-7159

Шахнін Дмитро Борисович, доцент, кандидат хімічних наук, доцент, Приватний заклад вищої освіти «Міжнародний європейський університет», м. Київ, ORCID 0000-0001-9657-8621

Паламаренко Андрій Юрійович, аспірант, Запорізький національний університет
Скачкова Ксенія Євгеніївна, здобувач, Київський національний університет культури, м. Київ

МАРКЕТИГОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ СВІТОВОГО РИНКУ МАГНІЮ

Завдяки своїм унікальним фізичним, хімічним, механічним і біологічним властивостям магній широко використовують у багатьох галузях промисловості, зокрема, в автомобільній промисловості, космонавтиці та оборонній промисловості, будівництві, медицині та охороні здоров'я, харчовій промисловості, електротехніці та електроніці. Галузь виробництва та використання магнію постійно розвивається, займається пошуком нових сучасних методів одержання магнію та його сполук, які знаходять нове перспективне застосування.

Ринок магнію охоплює пошук нових джерел видобутку магнієвмісної сировини, розробку нових технологій одержання магнію, дослідження властивостей нових магнієвмісних матеріалів та можливостей їх використання. У 2024 році обсяг світового ринку магнію оцінювався в 5,62 млрд. дол. США і, за прогнозами, очікується його зростання до 5,92 млрд. дол. у 2025 році і до 9,50 млрд. дол. до 2034 року з сукупним середньорічним темпом зростання 5,39% з 2025 по 2034 рік.

Досліджено світовий ринок магнію та виявлено фактори позитивного і негативного впливу на нього. Відповідно до сегментації світового ринку магнію за типом виробничого процесу провідну позицію у 2022 р. займав сегмент термічного відновлення магній оксиду силіцієм з часткою 80 %; за складом продукту у 2023 р. – сегмент металевих магнію (39,2%); за географічними регіонами у 2024 р. – сегмент Азійсько-Тихоокеанського регіону (35%); за застосуванням у 2024 р. – сегмент алюмінієвих сплавів (34%); за галузями промисловості у 2022 р. – сегмент автомобільної промисловості (38%). Наведено основні стратегічні тенденції та напрямки подальшого розвитку світового ринку магнію.

Ключові слова: світовий ринок магнію, тенденції ринку, обмеження ринку, напрямки розвитку ринку, методи одержання магнію, сегментація ринку.

Вступ. Магній – це метал з низькою густиною ($1,739 \text{ г/см}^3$ при 293 К), відносно низькою температурою плавлення ($650 \text{ }^\circ\text{C}$) та високою хімічною реакційною здатністю. Його вміст у земній корі становить 1,87%, в т.ч. у морській воді – 0,12%. Він міститься у великих родовищах доломіту, магнезиту та інших мінералів і мінеральних водах. Магній має великий попит у будівництві та медицині. Крім того, він є одним із найважливіших елементів, необхідних для існування живих організмів. Він також є цінним металом для використання в хімічних джерелах струму та хімічному синтезі. Цей метал здебільшого отримують із морської води, яка містить близько 1,2 г магнію на кілограм морської води.

Низька густина і висока питома міцність (приблизно 130 кНм/кг) сприяють його широкому застосуванню в промисловості. Магній посідає третє місце після сталі й алюмінію за використанням у якості конструкційного матеріалу та є найреакційноздатнішим серед інженерних матеріалів [1].

Завдяки своїм хорошим електромагнітним екранувальним властивостям і теплопровідності магній є ідеальним матеріалом для лиття під тиском та виробництва алюмінієвих сплавів. У харчовій промисловості також зростає виробництво сплавів алюмінію та магнію, використовуваних для виготовлення банок для напоїв. Зростання попиту на металевий магній також визначається його застосуванням у процесі легування алюмінію в автомобільній промисловості [2-4]. Автори огляду [5] підкреслюють, що доступність магнію та унікальне поєднання властивостей зробили його також дуже привабливим та перспективним для біомедичних застосувань. Важливу роль відіграє магній у одному з основних промислових способів виробництва титану – магнієтермічному відновленні тетрахлориду титану [6, 7].

Метою статті є виявлення закономірностей, відслідковування сучасних тенденцій та інновацій розвитку світового ринку магнію.

Об'єктами дослідження є загальна характеристика, стан, фактори зростання, чинники впливу, обмеження, перспективи, методи одержання та сегментація світового ринку магнію.

Методика здійснення дослідження. При дослідженні були використані такі наукові методи: метод пошуку літературних даних з наукових публікацій та аналітичних звітів з досліджуваної тематики; метод аналізу літературних джерел; контент-аналіз документів; метод систематизації та класифікації при проведенні дослідження щодо досягнень сучасної науки у виробництві магнію.

Результати та їх обговорення. У 2024 році обсяг світового ринку магнію оцінювався в 5,62 млрд. дол. США і, за прогнозами, очікується його зростання до 5,92 млрд. дол. у 2025 році і до 9,50 до 2034 року із сукупним середньорічним темпом зростання (ССТЗ) 5,39% з 2025 по 2034 рік [8]. Зростання попиту на магнієву продукцію насамперед зумовлено її застосуванням при литті під тиском і виробництві алюмінієвих сплавів для різних галузей промисловості.

Ключові висновками щодо стану та перспектив світового ринку магнію:

- у 2024 році Азійсько-Тихоокеанський регіон домінував на ринку з найбільшою часткою ринку в 35%;
- передбачається значне зростання європейського ринку протягом прогнозованого періоду;
- у 2024 році за сферою застосування сегмент алюмінієвих сплавів домінував на ринку;
- відповідно до застосування, очікується, що спостерігатиметься значне зростання сегменту лиття під тиском протягом прогнозованого періоду.

Аналіз публікацій [2-4, 9, 10] дозволяє узагальнити фактори зростання світового ринку магнію: впровадження сучасних інфраструктурних і будівельних проєктів; збільшення використання магнію в галузі медицини та охорони здоров'я; досягнення у технологічних розробках виробництва магнію; зросла урбанізація та індустріалізація в країнах з економікою, що розвивається; збільшення застосування магнію в технологіях відновлюваної енергетики.

Динаміка світового ринку магнію включає чинники впливу на ринок, його обмеження та перспективи. Чинниками впливу на ринок є зростання потреби в легованих металах; впровадження удосконалених проєктів виробництва літаків, космічних кораблів і ракет; розробка акумуляторів на основі магнію; збільшення використання магнію в автомобілях; зросло занепокоєння забрудненням довкілля викидами палива.

Обмеження світового ринку магнію викликані екологічною політикою щодо зменшення шкоди навколишньому середовищу при видобутку магнію, який завдає шкоди стану ґрунтів та біорізноманіттю. Використання магнію у виробництві будівельних матеріалів може бути уповільнене через схильність цього металу та його сплавів реагувати з киснем. Ця властивість магнію також створює проблеми для аерокосмічної та автомобільної галузей, де корозійна стійкість використовуваних матеріалів має вирішальне

значення. Ще однією з проблем, з якими стикається ринок металевого магнію, є наявність альтернативних металів. Алюміній і цинк можна використовувати як заміники магнію в литих і кованих виробах. Висока вартість магнію є недоліком у порівнянні з цими заміниками. Замість магнію в процесах десульфуризації сталі та чавуну можна використовувати карбід кальцію. Таким чином, через значну доступність заміників ринок металевого магнію, за оцінками, зіткнеться з проблемами найближчими роками.

Основні перспективи світового ринку магнію пов'язані зі збільшенням його використання в електромобілях. Використання магнієвих матеріалів у електромобілях підвищує загальний запас ходу транспортних засобів і покращує пробіг на одному заряді батареї. Оскільки ринок електромобілів розширюється, різні компоненти транспортних засобів включатимуть металевий магній. Зважаючи на те, що споживачі все більше надають перевагу транспортним засобам із меншими викидами, очікується, що зміни в політиці щодо викидів і суворіші правила сприятимуть подальшому зростанню ринку магнію.

Занепокоєння щодо зміни клімату вимагає ретельної оцінки впливу на навколишнє середовище ланцюга постачання критично важливих матеріалів, таких як магній, що має широкий спектр застосувань. Прискорення колообігу цього матеріалу є життєво важливим для забезпечення його сталого використання. Однак систематичний аналіз сталості глобального виробництва магнію та його колообігу все ще відсутній. Автори дослідження [11] пропонують нову динамічну модель, засновану на геології та маршрутах переробки для кількісного визначення ключових екологічних проблем протягом життєвого циклу первинного та вторинного магнію. Споживання енергії, використання води та відповідні викиди оцінюються для переробки, включаючи функціональну (відновлений магній повторно використовується в замкнутому ланцюгу постачання) і нефункціональну (відновлений магній як елемент, використовуваний в алюмінієвих сплавах як ланцюг постачання з відкритим циклом), а також лиття та формування. Результати показують значний потенційний внесок циркуляції магнію в економію енергії (до 31 мільярда ГДж) і води (до 2,7 Км³), а також у пом'якшення викидів парникових газів (до 3 млрд. тонн CO₂) у всьому світі. Проте аналіз показує, що 87% вторинного магнію походить від нефункціональної переробки. Результат показує можливе збільшення нефункціональної переробки магнію з 612 тис. тонн у 2020 році до 1 млн. тонн у 2050 році, а також зростання функціональної переробки магнію з 96 тис. тонн у 2020 році до 161 тис. тонн у 2050 році [11]. Це викликає необхідність поліпшення ланцюга постачання магнію за допомогою технологічних розробок та операційних змін для забезпечення його сталого розвитку та переходу до циркулярної економіки.

Аналіз літературних даних [6, 9, 10, 12] виявляє, що однією з особливостей магнієвої промисловості є велика різноманітність виробничих процесів. Порівняно з галуззю, яка комерційно виробляє продукт протягом майже ста років, існує понад 10 різних процесів виробництва магнію. На відміну від багатьох інших галузей, немає жодної конкретної домінуючої технології, яка використовується для більшості світового виробництва. Велика кількість виробничих технологій зумовлена відмінностями основних параметрів виробничих процесів. Нижче наведено основні параметри, які відрізняють різні методи виробництва.

А. Сировина. Існує шість джерел сировини для виробництва магнію: магнезит, доломіт, бішофіт, карналіт, серпентин і морська вода. Ці джерела відрізняються вмістом магнію, методами виробництва та походженням. Деякі види сировини видобуваються в шахтах, інші утворюються в результаті різноманітних процесів, що здійснюються в морській воді та солоних озерах, а ще інші – із відходів процесу виробництва азбесту.

В. Матеріали та метод відновлення. Магній завжди знаходиться в природі в іонній формі. Ця обставина пов'язана з низькою енергією іонізації двох зовнішніх електронів. Низький стандартний відновний потенціал магнію є причиною відсутності металевого магнію в природі [8]: $Mg^{2+} + 2e^- = Mg$, $E^0 = -2,375$ В. Тому всі технології виробництва магнію потребують відновника, який може надати магнію два електрони. Відновниками можуть бути електричний струм із відповідним потенціалом (електрохімічні технології), вугілля в різних формах, матеріали на основі силікону (FeSi), кальцій карбід CaC₂ та алюміній (термічні технології). Всі електрохімічні технології використовують постійний струм, який проходить через електролізні комірки та розряджає йони хлору й магнію в газоподібний хлор та металевий магній. Термічні методи засновані на

нагріванні магnezії до різних температур у присутності різних відновних матеріалів. За певної температури відбувається реакція відновлення, і магній стає металом, зазвичай у газоподібній формі.

С. Виробничі температури. Максимальні температури в різних виробничих процесах знаходяться в діапазоні 655-1900 °С, що є дуже великим температурним діапазоном для процесу виробництва одного конкретного матеріалу. Загалом, процеси електрохімічного виробництва відбуваються в нижчому діапазоні температур виробництва, як правило, між 655-720 °С, тоді як процеси термічного відновлення – в діапазоні вищих температур, зазвичай між 900-1900 °С.

Д. Побічні продукти. Склад побічних продуктів різних методів залежить від складу сировини. Якщо основною сировиною є бішофіт або карналіт, то крім цільового продукту – магнію утворюються хлор та інші побічні продукти, склад яких залежить від компонентів вихідного матеріалу. Якщо основною сировиною є карналіт, побічними продуктами будуть хлор і калій хлорид, використання якого можливе при виробництві добрив.

Як зазначається в дослідженнях [13, 14], комерційне виробництво магнію здійснюється двома різними методами: електролізом магній хлориду та термічним відновленням оксигеновмісних сполук магнію. Наприкінці ХХ століття на частку виробництва магнію електролізом припадало близько 75% його світового виробництва. Але на початку ХХІ століття, коли Китай став провідним світовим виробником магнію, низька вартість робочої сили та енергії сприяли більшій економічності процесу термічного відновлення, незважаючи на його меншу ефективність порівняно з процесом електролізу.

Залежно від виробничого процесу ринок металевого магнію поділяється на процес Pidgeon, процес DOW і процес YSZ. Сегмент Pidgeon Process домінує на ринку з найбільшою часткою ринкового доходу (80% у 2022 році) [8]. Китай практично повністю переходить до силікотермічного процесу Pidgeon для видобутку металевого магнію. Процес забезпечує стабільний потік, невеликі інвестиції, хорошу якість магнію, короткий період будівництва та економне використання природного газу, вугілля та мазуту. Виробники в магнієвій промисловості застосовують цей процес для якісного виробництва металевого магнію.

Очікується, що сегмент процесу DOW (екстракція магнію у вигляді магній хлориду з морської води з осадженням магнію у вигляді магній гідроксиду і подальшим перетворенням у магній хлорид) зростатиме з найшвидшим ССТЗ протягом прогнозованого періоду через збільшення використання цього процесу на підприємствах Північної Америки. Процес YSZ – це новий процес твердооксидної мембранної технології, який передбачає електролітичне відновлення MgO. Цей процес забезпечує 40% зниження вартості порівняно з методом електролітичного відновлення.

В дослідженні [13] узагальнено, що існує три основних способи отримання металевого магнію методом термічного відновлення кремнієм.

(1) *метод Pidgeon* – прожарювання і змішування доломіту з феросиліцієм і флюоритом для отримання гранул, нагрівання і відновлення у вакуумній печі при 1100 °С для утворення парів магнію та інших речовин, конденсація пари магнію і переробка в магнієвий зливоч; цей метод високоенергоємний та складний в експлуатації;

(2) *Метод Magnetherm* – відновлення кальцинованого доломіту феросиліцієм у герметичній дугової печі з вуглеграфітовою футеровкою та нерухомим графітовим електродом з додаванням бокситу або алюміній оксиду у вигляді флюсу; цей метод має низьку витрату сировини, високий вихід і менше забруднення навколишнього середовища, але характеризується низькою якістю продукції, високим вмістом кремнію, тривалим часом виробництва.

(3) *Метод BolGNAO* – прожарювання доломіту і феросиліцію, відновлення у термічній вакуумній печі, конденсація пари магнію в металевий магній ззовні шляхом електричного нагрівання; цей спосіб знаходиться на стадії розробки і потребує суттєвих вдосконалень.

Сегментація світового ринку магнію за складом продукту. Відповідно до сегментації світового ринку магнію за складом продукту (магнієві сплави, магнієві сполуки, металевий магній), виконаного на основі даних аналітичного звіту [15], провідне стано-

вище у 2023 р. належало сегменту металевий магній (39,2%), йому практично не поступалися сегменти магнієві сплави (31,8%) та магнієві сполуки (29,0%) (рис. 1).

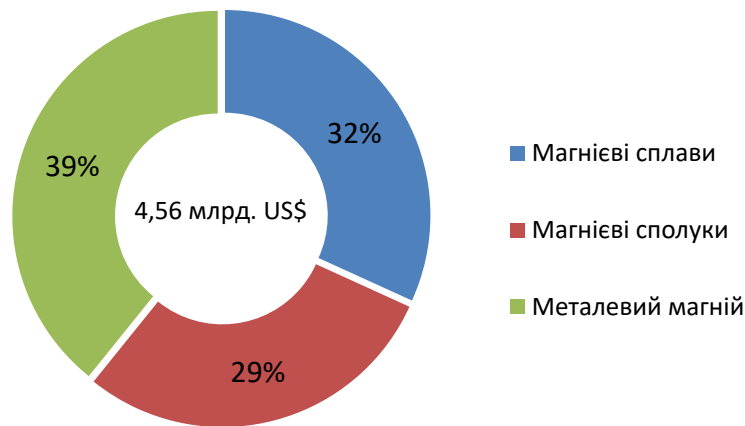


Рисунок 1 – Сегментація світового ринку магнію за складом продукту (2022 р.), %

Джерело: побудовано на основі даних [15]

Сегментація світового ринку магнію за географічними регіонами. У 2024 році обсяг ринку магнію в Азійсько-Тихоокеанському регіоні оцінювався в 1,97 млрд. дол. США та, за прогнозами, до 2034 року він перевищить 3,37 млрд. дол., зростаючи з ССТЗ 5,52% з 2025 по 2034 рік [8]. Частка ринку регіону на світовому ринку у 2024 році становила 35% (рис. 2). Азійсько-Тихоокеанський регіон домінує на світовому ринку магнію, незважаючи на зменшення частки ринку з 47% у 2021 році, завдяки:

- присутності в регіоні основних країн-виробників і споживачів;
- зрослому доходу на душу населення та урбанізації у поєднанні зі збільшенням населення в регіоні;
- значному збільшенню витрат на електромобільні проекти в Індії та Китаї;
- швидкому зростанню потреб військової авіації, аерокосмічної та космічної промисловості, харчової та пакувальної галузі;
- зростання урядових ініціатив та інвестицій у будівельний сектор, особливо в Китаї та Індії (Китай є найбільшим будівельним ринком у світі, і, згідно з прогнозами, у період з 2022 по 2030 рік середній щорічний приріст становить 8,6%; а федеральний уряд Індії має намір побудувати 20 мільйонів доступних будинків [16]);
- значущості сталеливарної промисловості в таких країнах, як Індія та Японія.

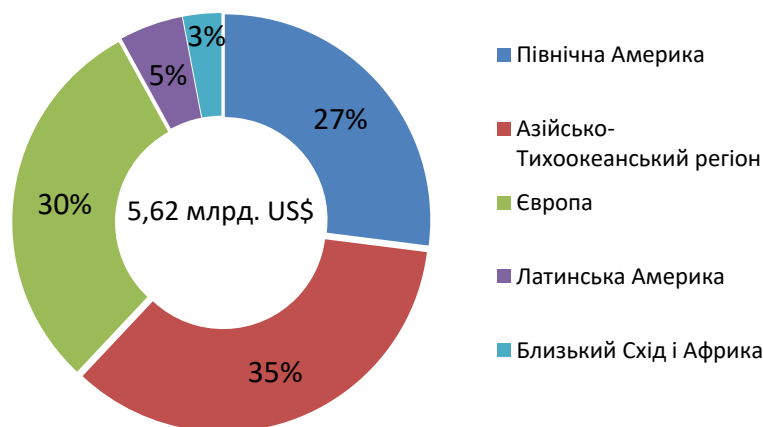


Рисунок 2 – Сегментація світового ринку магнію за географічними регіонами (2024 р.), %

Джерело: побудовано на основі даних [8]

India Brand Equity Foundation прогнозує, що до 2026 року автомобільна промисловість Індії досягне 300 млрд. дол. США, а річне виробництво автомобілів у Індії у 2022 році становило приблизно 23 млн. одиниць [8].

Контролюючи близько 85% світових поставок, виробництво Китаю значно впливає на тенденції ціноутворення та динаміку пропозиції. Китайські компанії підтримують низькі ціни на магній, перешкоджаючи новим учасникам ринку та зміцнюючи позиції Китаю на ринку [1].

Передбачається, що протягом прогнозованого періоду в Європі спостерігатиметься значне зростання ринку магнію. Німеччина є найбільшим у світі споживачем алюмінієвого лиття, головним чином через високий попит на алюмінієві деталі в автомобільному секторі. Зросла потреба в легких компонентах зумовлена потребою в економії палива та сучасними аеродинамічними розробками. У Німеччині, як провідного європейського виробника автомобілів, налічується 41 підприємство з виробництва автомобільних двигунів. Вона домінує на європейському автомобільному ринку і виробляє одну третину всіх автомобілів, проданих на континенті. Такі країни, як Німеччина, Франція та Велика Британія, роблять основний внесок у зростання попиту на магній у Європі. Крім того, очікується, що ініціативи Європейського Союзу щодо досягнення циркулярної економіки збільшать попит.

Світове виробництво магнію перевищило 1 млн. тонн у 8 країнах світу (Китай – 88,0%, росія – 4,6%, Ізраїль – 2,0%, Бразилія – 1,8%, Казахстан – 1,4%, Туреччина – 1,2%, США – 0,7%, Україна – 0,3%) [16]. Домінування Китаю багато в чому зумовлено використанням прогресивного виробничого процесу силікотермічного відновлення доломіту.

Сегментація світового ринку магнію за застосуванням. Відповідно до сегментації ринку за застосуванням (алюмінієві сплави, лиття під тиском, біологічна десульфурація, відновлення інших металів) сегмент алюмінієвих сплавів домінував на ринку магнію в 2024 році з часткою доходу 34% і, за прогнозами, буде зростати з ССТЗ 6,70% в період 2024 – 2030 років (рис. 3) [17]. Це пояснюється властивістю магнію підвищувати міцність сплаву та здатність до деформаційного зміцнення в суміші з іншими металами. Ці сплави здебільшого використовують у виробництві банок для напоїв. Окрім цього, їх можна застосовувати як конструкційні матеріали для виготовлення резервуарів під тиском і танкерів для хімічних речовин. Алюмінієві сплави містять від 1% до 10% магнію, що поліпшує механічні характеристики, а також стійкість до корозії алюмінієвих сплавів.

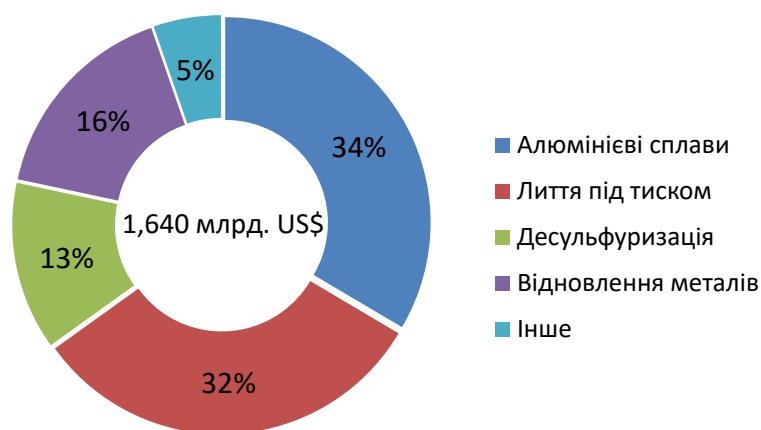


Рисунок 3 – Сегментація світового ринку магнію за застосуванням (2024 р.), %

Джерело: побудовано на основі даних [17]

На ринку магнію очікується значне зростання сегменту лиття під тиском протягом прогнозованого періоду в зв'язку зі збільшенням попиту на литі під тиском деталі в автомобільній промисловості через зрослу зацікавленість споживачів у легких авто-

мобілях. Масштабні інвестиції урядів розвинених країн для покращення інфраструктури сприятимуть зростанню сегменту десульфурації.

За даними дослідження [3] сегментацію світового ринку магнію за застосуванням можна представити за ширшим спектром сегментів (8 сегментів) (введено сегменти хімічна промисловість, ковані деталі, високоміцний чавун та електрохімічні виробництва) (рис. 4).

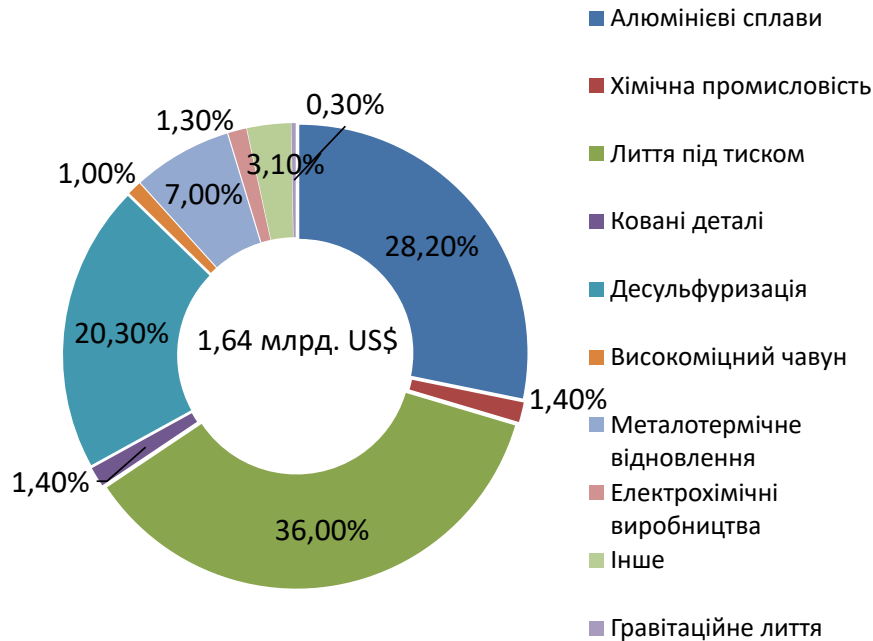


Рисунок 4 – Сегментація світового ринку магнію за кінцевим споживачем (2022 р.), %

Джерело: побудовано на основі даних [3]

За цією детальнішою сегментацією провідні позиції належать сегментам лиття під тиском (36,0%) та алюмінієві сплави (28,2%). Третім і четвертим за часткою доходу є сегменти десульфуризація (20,3%) і металотермічне відновлення (7,0%). Решта сегментів мають частки менше 3,1%.

Сегментація ринку магнію за галузями промисловості. Виходячи з галузей промисловості, ринок металевого магнію класифікується на авіаційну, автомобільну, електронну та інші галузі. Сегмент автомобільної промисловості домінував на ринку з найбільшою часткою ринкового доходу в 38% у 2022 році, та, за прогнозами, буде зростати з ССТЗ 6,70% протягом 2024-2030 років [18]. Домінування забезпечувалось такими обставинами:

- використання металевого магнію в автомобілях значно зменшує загальну вагу транспортних засобів (маса магнію на 36% менша за масу алюмінію і на 78% менша за масу заліза на одиницю об'єму);
- легований металевий магній має найвище співвідношення міцності до маси порівняно з іншими конструкційними металами;
- в автомобільній промисловості поширюється заміна сталевих та алюмінієвих деталей транспортних засобів на магнієві;
- збільшення виробництва та продажів електромобілів (за даними Міжнародного енергетичного агентства, у 2023 році продажі електромобілів досягли рекордних 3 мільйонів, що на 40% більше, ніж у 2020 році; за сценарієм чистих нульових викидів до 2050 року на дорогах буде 300 мільйонів електромобілів, на які припадає понад 60% продажів нових автомобілів, порівняно з лише 4,6% у 2023 році [19];
- використання магнію в транспортних засобах не тільки знижує витрати на транспортні засоби, але й дає змогу змістити центр ваги до задньої частини автомобіля,

що сприяє підвищенню безпеки автомобіля (поліпшення керованості та можливостей повороту, зменшення вібрації та загального шуму).

Очікується, що сегмент електроніки зростатиме з найшвидшим ССТЗ протягом прогнозованого періоду. Магнієві сплави широко застосовують у при виготовленні телевізорів, мобільних телефонів, комп'ютерів і рідкокристалічних дисплеїв. Металевий магній використовується як заміна пластмас, при необхідності використання теплопровідних деталей. Магнієві сплави легкі та міцні, вони мають хороші тепловідвідні характеристики. Тому зростає попит на магнієві сплави в портативних персональних комп'ютерах.

За даними дослідження [18] сегментацію світового ринку магнію з прогнозом на 2027 рік можна здійснити за галузями промисловості (рис. 5). За часткою доходу ринку сегменти розташувались у такій послідовності: автомобільна промисловість – 38,1%, аеронавігаційна промисловість – 26,3%, електроніка – 18,6%, інші галузі промисловості – 17%.

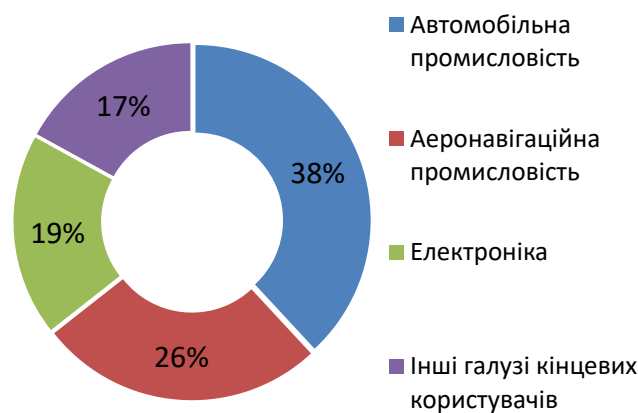


Рисунок 5 – Сегментація світового ринку магнію за галузями промисловості (2027 р.), %

Джерело: побудовано на основі даних [18]

За даними дослідження [19] сегментацію світового ринку за галузями промисловості з прогнозом на 2027 рік можна представити за більшою кількістю сегментів (рис. 6). Лідируватиме сегмент автомобільна промисловість з часткою доходу 33,7%. Сегменти космонавтика та оборона промисловості і електроніка за прогнозом матимуть частки 18,3% та 15,6% відповідно. Практично однакові частки доходу будуть мати сегменти будівництво (10,3%), медична допомога та охорона здоров'я (9,5%) і пакування (7,4%).

Стратегії розвитку світового ринку магнію. Можна підсумувати, що у виробництві та застосуванні магнію спостерігаються деякі невизначеності, пов'язанні з такими обставинами:

- величезними технічними проблемами та проблемами сталого розвитку при виробництві магнію як промислового металу;
- значними можливостями та суттєвими перешкодами для нових застосувань у біомедичних пристроях та енергетичних системах.

Аналіз та узагальнення результатів досліджень [3, 5, 9, 12] дають змогу визначити стратегії розвитку світового ринку магнію:

- без/низьковуглецеве виробництво первинного магнію – процес виробництва Pidgeon потребує значних удосконалень або поступового припинення через значні викиди вуглекислого газу; необхідно збільшити виробництво магнію альтернативними електролітичним або безвуглецевим термічним відновленням;
- збільшення обсягів переробки компонентів магнію в кінці терміну їх експлуатації (EOL product) – для цього важливо здійснювати сортування та збір магнієвого брухту для переробки та отримання вторинного магнію;

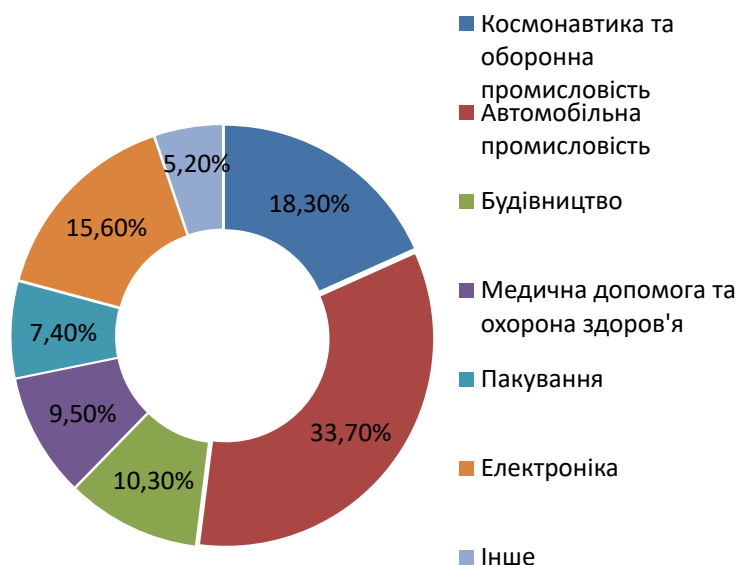


Рисунок 6 – Сегментація світового ринку магнію за галузями промисловості (2027 р.), %

Джерело: побудовано на основі даних [19]

- оцінювання загального життєвого циклу (LCA) для виробництва магнію з точки зору впливу на довкілля – пропонується провести міжнародне оцінювання за участю основних країн-виробників нейтральною організацією/комітетом для надання достовірних даних кінцевим користувачам з метою оцінки забруднення вуглецем, споживання енергії на різних етапах первинного та вторинного виробництва для зміцнення довіри до виробництва магнію як важливого промислового металу;
- розробка, виробництво та впровадження стійких до корозії (нержавних) магнієвих сплавів – фундаментальні дослідження механізмів корозії магнію призведуть до розробки технологій одержання корозійностійких магнієвих сплавів; сучасні дослідження показали перспективність використання сплавів магнію з кальцієм та рідкісноземельними металами;
- розробка вогнестійкого магнієвого сплаву – вогнестійкість є критичною вимогою для аерокосмічних застосувань, включаючи компоненти інтер'єру; було встановлено, що додавання кальцію та рідкісноземельних металів підвищує температуру займання магнієвих сплавів;
- розробка сплавів з високою тепло- та електропровідністю – застосування в електротехніці, електроніці та споживчих товарах часто вимагають тепло- та електропровідності для їх функціональності;
- розробка сучасних матеріалів на основі магнію – нові матеріали, включаючи композити з металевою матрицею (з мікро- та нанорозмірним армуванням), багатокомпонентні концентровані (з високою або середньою ентропією) сплави, функціонально градієнтні матеріали;
- розробка мега-лиття (виробництво великих окремих деталей) – однією з нових розробок для застосування алюмінію є велике тонкостінне лиття під тиском (мега/гіга лиття) для кузовів автомобілів з кращою здатністю до лиття;
- формування магнію за кімнатної температури – одержання магнієвих сплавів із кристалічною структурою за кімнатної температури мікролегуванням кальцієм або церієм зі зміною текстури та поліпшенням зернистості структури;
- адитивне виробництво (виготовлення виробу за даними тривимірної цифрової моделі методом пошарового додавання) – нові процеси для виготовлення невеликих обсягів продуктів магнію з використання системи автоматизованого проєктування та розрахунку готових виробів без застосування жорстких інструментів для персоналізованих медичних пристроїв;

- розробка магній-іонного акумулятора (магнієва батарея, яка використовує катіони магнію в якості активного агента переносу заряду) – Mg-іонний акумулятор є альтернативою Li-іонному акумулятору завдяки меншій вартості;
- зберігання водню – магній гідрид має вищу здатність зберігання водню і нижчу вартість порівняно з іншими металами, що утворюють гідриди.

Висновки.

1. Ринок магнію охоплює пошук нових джерел видобутку магнієвмісної сировини, розробку нових технологій одержання магнію та його сполук, дослідження методів отримання нових магнієвмісних матеріалів, їх властивостей та можливостей застосування. Магній широко використовують у багатьох галузях індустрії, зокрема, в автомобільній промисловості, космонавтиці та оборонній промисловості, будівництві, медицині та охороні здоров'я, харчовій промисловості, електротехніці та електроніці.

2. Обсяг світового ринку магнію у 2024 році оцінювався в 5,62 млрд. дол. США і, за прогнозами, очікується його зростання до 5,92 млрд. дол. у 2025 році і до 9,50 до 2034 року до приблизно 9,05 млрд. дол. із сукупним середньорічним темпом зростання 5,39% з 2025 по 2034 рік. Зростання попиту на магнієву продукцію насамперед зумовлене її застосуванням при литті під тиском і виробництві алюмінієвих сплавів для різних галузей промисловості.

3. Досліджено світовий ринок магнію та виявлено фактори позитивного і негативного впливу на нього. Наведено основні стратегічні тенденції та напрямки подальшого розвитку світового ринку магнію.

4. Відповідно до сегментації світового ринку магнію за типом виробничого процесу провідну позицію у 2022 р. займав сегмент термічного відновлення магній оксиду силіцієм з часткою 80 %; за складом продукту у 2023 р. – сегмент металевого магнію (39,2%); за географічними регіонами у 2024 р. – сегмент Азійсько-Тихоокеанського регіону (35%); за застосуванням у 2024 р. – сегмент алюмінієвих сплавів (34%); за кінцевим споживачем у 2022 р. – також сегмент алюмінієвих сплавів (28,2%); за галузями промисловості у 2022 р. – сегмент автомобільної промисловості (38%)

Бібліографічний перелік

1. Abbasi I. Magnesium Alloys: Trends, Applications, and New Technologies. AZoM. 2024. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. Режим доступу: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleD=1801>. (дата звернення 19.05.2025) – Назва з екрана.
2. Satya Prasad S.V., Prasad S.B., Verma K., Mishra R.K., Kumar V., Singh S. The role and significance of Magnesium in modern day research-A review. Journal of Magnesium and Alloys. 2022. Vol. 10, Iss. 1. P. 1-61. DOI: 10.1016/j.jma.2021.05.012.
3. Zhang J., Miao J., Balasubramani N., Cho D.H., Avey T., Chang C.-Y., Luo A.A. Magnesium research and applications: Past, present and future. Journal of Magnesium and Alloys. 2023. Vol. 11, Iss. 11. P. 3867-3895. DOI: 10.1016/j.jma.2023.11.007.
4. Chen J., Chen B. Progress in Additive Manufacturing of Magnesium Alloys: A Review. Materials. 2024. Vol. 17, Iss. 15. P. 3851. DOI: 10.3390/ma17153851.
5. Tan J., Ramakrishna S. Applications of Magnesium and Its Alloys: A Review. Applied Sciences. 2021. Vol. 11, Iss. 15. P. 6861. DOI: 10.3390/app11156861.
6. Верховлюк А.М. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва: Навч. посібник / А.М. Верховлюк, А.В. Нарівський, В.Г. Могилатенко / За ред. академіка НАН України В.Л. Найдека. – К.: Видавничий дім "Вінніченко", 2016. – 224 с. ISBN: 966-2622023-2.
7. Малишев В.В., Шахнін Д.Б., Габ А.І., Скачкова К.Є. Маркетингові дослідження світового ринку титану. Збірник наукових праць "Металургія". 2024. Вип. 1-2. С. 21-32. DOI: 10.26661/2071-3789-2024-1-2-03.
8. Magnesium Market Size, Share, and Trends 2025 to 2034. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. Режим доступу: <https://www.precedenceresearch.com/magnesium-market>. (дата звернення 19.05.2025) – Назва з екрана.
9. Yang Y., Xiong X., Chen J., Peng X., Chen D., Pan F. Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2022. Journal of Magnesium and Alloys. 2023. Vol. 11, Iss. 8. P. 2611-2654. DOI: 10.1016/j.jma.2023.07.011.
10. Chen J., Chen B. Progress in Additive Manufacturing of Magnesium Alloys: A Review. Materials. 2024. Vol. 17, Iss. 15. P. 3851. DOI: 10.3390/ma17153851.
11. Rahimpour Golroudbary S., Makarava I., Kraslawski A. Environmental Assessment of Global Magnesium Production. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2022. Vol. 44. Iss. 6.

P. 389–406. DOI: 10.1080/08827508.2022.2084734.

12. Aghion E., Golub G. Production Technologies of Magnesium. In: Magnesium Technology. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. DOI: 10.1007/3-540-30812-1_2.

13. Three methods of producing metallic magnesium. 2021. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. Режим доступу: <https://www.fffalloy.com/info/three-methods-of-producing-metallic-magnesium-64877182.html>. (дата звернення 19.05.2025) – Назва з екрана.

14. Rizley J.H., Нюй-Petersen N. Magnesium processing. Encyclopedia Britannica. 2020. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. Режим доступу: <https://www.britannica.com/technology/magnesium-processing>. (дата звернення 19.05.2025) – Назва з екрана.

15. Magnesium Metal Market – Global Industry Analysis and Forecast (2024-2030). [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. Режим доступу: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-magnesium-metal-market/65286/> (дата звернення 19.05.2025) – Назва з екрана.

16. Globalmagnesiumproductionanddemandwillcontinuetogrowinthenext10years. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. Режим доступу: <https://news.metal.com/newscontent/101592227/Global-magnesium-production-and-demand-will-continue-to-grow-in-the-next-10-years/> (дата звернення 19.05.2025) – Назва з екрана.

17. Magnesium Market Size, Share & COVID-19 Impact Analysis, By Application (Aluminum Alloying, Die Casting, Desulfurization, Metal Reduction, and Others) and Regional Forecast, 2020-2027. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. Режим доступу: <https://www.fortunebusinessinsights.com/magnesium-market-104713>. (дата звернення 19.05.2025) – Назва з екрана.

18. Global Metal Magnesium Market by Production Process (Pidgeon Process, Dow Process, and YSZ Process), by Application (Die Casting, Aluminum Alloys, Titanium Reduction, Iron & Steel Making), by End-User Industry (Aeronautical, Automotive, Electronics), by Region and Companies – Industry Segment Outlook, Market Assessment, Competition Scenario, Trends, and Forecast 2023-2032. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. Режим доступу: <https://market.us/report/metal-magnesium-market/> (дата звернення 19.05.2025) – Назва з екрана.

19. Magnesium Metal Market Overview. [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. Режим доступу: <https://www.industryarc.com/Report/16106/magnesium-metal-market.html>. (дата звернення 19.05.2025) – Назва з екрана.

References

1. Abbasi I. Magnesium Alloys: Trends, Applications, and New Technologies. AZoM. 2024. [Electronic resource] : [Website]. Access mode: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleD=1801>. (date of application 19.05.2025) – Title from the screen.

2. Satya Prasad S.V., Prasad S.B., Verma K., Mishra R.K., Kumar V., Singh S. The role and significance of Magnesium in modern day research-A review. Journal of Magnesium and Alloys. 2022. Vol. 10, Iss. 1. P. 1-61. DOI: 10.1016/j.jma.2021.05.012.

3. Zhang J., Miao J., Balasubramani N., Cho D.H., Avey T., Chang C.-Y., Luo A.A. Magnesium research and applications: Past, present and future. Journal of Magnesium and Alloys. 2023. Vol. 11, Iss. 11. P. 3867-3895. DOI: 10.1016/j.jma.2023.11.007.

4. Chen J., Chen B. Progress in Additive Manufacturing of Magnesium Alloys: A Review. Materials. 2024. Vol. 17, Iss. 15. P. 3851. DOI: 10.3390/ma17153851.

5. Tan J., Ramakrishna S. Applications of Magnesium and Its Alloys: A Review. Applied Sciences. 2021. Vol. 11, Iss. 15. P. 6861. DOI: 10.3390/app11156861.

6. Верховлюк А.М. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва: Навч. посібник / А.М. Верховлюк, А.В. Нарівський, В.Г. Могилатенко / За ред. академіка НАН України В.Л. Найдека. – К.: Видавничий дім “Вініченко”, 2016. – 224 с. ISBN: 966-2622023-2.

7. Malyshev V.V., Shakhnin D.B., Hab A.I., Skachkova K.Ye. Marketing Research of the Global Titanium Market. Collection of Scientific Works "Metallurgy". 2024. Issues 1–2. pp. 21–32. DOI: 10.26661/2071-3789-2024-1-2-03.

8. Magnesium Market Size, Share, and Trends 2025 to 2034. [Electronic resource] : [Website]. Access mode: <https://www.precedenceresearch.com/magnesium-market>. (date of application 19.05.2025) – Title from the screen.

9. Yang Y., Xiong X., Chen J., Peng X., Chen D., Pan F. Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2022. Journal of Magnesium and Alloys. 2023. Vol. 11, Iss. 8. P. 2611-2654. DOI: 10.1016/j.jma.2023.07.011.

10. Chen J., Chen B. Progress in Additive Manufacturing of Magnesium Alloys: A Review. Materials. 2024. Vol. 17, Iss. 15. P. 3851. DOI: 10.3390/ma17153851.

11. Rahimpour Golroudbary S., Makarava I., Kraslawski A. Environmental Assessment of Global Magnesium Production. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2022. Vol. 44, Iss. 6. P. 389–406. DOI: 10.1080/08827508.2022.2084734.

12. Aghion E., Golub G. Production Technologies of Magnesium. In: Magnesium Technology. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. DOI: 10.1007/3-540-30812-1_2.
13. Three methods of producing metallic magnesium. 2021. [Electronic resource] : [Website]. Access mode: <https://www.fffalloy.com/info/three-methods-of-producing-metallic-magnesium-64877182.html>. (date of application 19.05.2025) – Title from the screen.
14. Rizley J.H., Høy-Petersen N. Magnesium processing. Encyclopedia Britannica. 2020. [Electronic resource] : [Website]. Access mode: <https://www.britannica.com/technology/magnesium-processing>. (date of application 19.05.2025) – Title from the screen.
15. Magnesium Metal Market – Global Industry Analysis and Forecast (2024-2030). [Electronic resource] : [Website]. Access mode: <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-magnesium-metal-market/65286/> (date of application 19.05.2025) – Title from the screen.
16. Global magnesium production and demand will continue to grow in the next 10 years. [Electronic resource] : [Website]. Access mode: <https://news.metal.com/newscontent/101592227/Global-magnesium-production-and-demand-will-continue-to-grow-in-the-next-10-years/> (date of application 19.05.2025) – Title from the screen.
17. Magnesium Market Size, Share & COVID-19 Impact Analysis, By Application (Aluminum Alloying, Die Casting, Desulfurization, Metal Reduction, and Others) and Regional Forecast, 2020-2027. [Electronic resource] : [Website]. Access mode: <https://www.fortunebusinessinsights.com/magnesium-market-104713>. (date of application 19.05.2025) – Title from the screen.
18. Global Metal Magnesium Market by Production Process (Pidgeon Process, Dow Process, and YSZ Process), by Application (Die Casting, Aluminum Alloys, Titanium Reduction, Iron & Steel Making), by End-User Industry (Aeronautical, Automotive, Electronics), by Region and Companies – Industry Segment Outlook, Market Assessment, Competition Scenario, Trends, and Forecast 2023-2032. [Electronic resource] : [Website]. Access mode: <https://market.us/report/metal-magnesium-market/> (date of application 19.05.2025) – Title from the screen.
19. Magnesium Metal Market Overview. [Electronic resource] : [Website]. Access mode: <https://www.industryarc.com/Report/16106/magnesium-metal-market.html>. (date of application 19.05.2025) – Title from the screen.

Malyshev Viktor, professor, doctor of chemical sciences, International European University, Kyiv

Gab Angelina, associate professor, candidate of chemical sciences, associate professor, International European University, Kyiv

Shakhnin Dmytro, associate professor, candidate of chemical sciences, associate professor, International European University, Kyiv

Palamarenko Andriy, postgraduate student, Zaporizhzhia National University

Skachkova Kseniya, student, Kyiv National University of Culture, Kyiv

MARKETING RESEARCH OF THE GLOBAL MAGNESIUM MARKET

Due to its unique physical, chemical, mechanical and biological properties, magnesium is widely used in many industries, in particular, in the automotive industry, aerospace and defense industry, construction, medicine and healthcare, food industry, electrical engineering and electronics. The industry of production and use of magnesium is constantly developing, is engaged in the search for new modern methods of obtaining magnesium and its compounds, which find new promising applications.

The magnesium market covers the search for new sources of magnesium-containing raw materials, the development of new technologies for obtaining magnesium, research into the properties of new magnesium-containing materials and the possibilities of their use. In 2024, the volume of the global magnesium market was estimated at 5.62 billion USD and, according to forecasts, is expected to grow to 5.92 billion USD in 2025 and to 9.50 billion USD by 2026. by 2034 with a compound annual growth rate of 5.39% from 2025 to 2034.

The global magnesium market was studied and factors of positive and negative impact on it were identified. According to the segmentation of the global magnesium market by type of production process, the leading position in 2022 was occupied by the thermal reduction of magnesium oxide with silicon with a share of 80%; by product composition in 2023 – the

segment of metallic magnesium (39.2%); by geographical regions in 2024 – the segment of the Asia-Pacific region (35%); by application in 2024 – the segment of aluminum alloys (34%); by industry in 2022 – the segment of the automotive industry (38%). The main strategic trends and directions of further development of the global magnesium market are presented.

Keywords: global magnesium market, market trends, market limitations, market development directions, magnesium production methods, market segmentation.

Белоконь Юрій Олександрович, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-9327-5219

Шапуров Олександр Олександрович, професор, доктор економічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-4381-4886

Гречаний Олексій Миколайович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-0524-4998

Проценко Віктор Максимович, старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, доцент кафедри, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-5148-0361

ТЕХНОЛОГІЇ СИНТЕЗУ ВИСОКОЕНТРОПІЙНИХ СПЛАВІВ: СУЧАСНИЙ СТАН І МАЙБУТНІ НАПРЯМКИ

У статті досліджено концептуальні засади високоентропійних сплавів (ВЕС) та різноманітні технології їх отримання. Аналіз традиційних металургійних методів, таких як дугове та індукційне плавлення, засвідчив їхню ефективність у забезпеченні однорідності матеріалу, водночас наголошено на обмежених можливостях щодо точного контролю мікроструктури. Порошкова металургія забезпечує рівномірний розподіл елементів, проте характеризується високими енергетичними витратами. Альтернативні методи, зокрема лазерне сплавлення та осадження з парової фази, відкривають нові перспективи в управлінні структурою сплавів, однак їхнє масштабування ускладнене через вартість обладнання та низьку продуктивність.

Визначено ключові технічні виклики, що гальмують розвиток виробництва ВЕС, зокрема труднощі контролю мікроструктури, нерівномірність розподілу компонентів та значні енергетичні витрати. Для їх подолання запропоновано поєднання традиційних і сучасних методів, а також використання чисельного моделювання для оптимізації виробничих процесів. Вдосконалені підходи до проектування сплавів базуються на фізико-хімічному аналізі компонентів і враховують специфіку експлуатаційних умов.

Розглянуто сучасні методи контролю мікроструктури та механічних характеристик ВЕС. Використання технологій лазерного сплавлення, електроімпульсного спікання та осадження з парової фази сприяє точнішому регулюванню параметрів матеріалів і зменшенню дефектності. Додатково наголошено на важливості розробки нових підходів до контролю фазових перетворень, що сприятиме прогнозованому формуванню структури сплавів.

Розглянуто перспективи масштабування виробництва ВЕС, акцентуючи увагу на необхідності подальших досліджень для підвищення продуктивності та зниження витрат. Запропоновано стратегічні напрями інтеграції ВЕС у промислові галузі, включаючи авіаційну, енергетичну та медичну сфери.

Запропоновано комплексний підхід до виробництва ВЕС, який включає прототипування, тестування та адаптацію технологічних процесів відповідно до промислових вимог. Оцінено потенціал різних методів виробництва з огляду на їхню економічну ефективність та технічну доцільність.

Таким чином, проведене дослідження сприяє поглибленню знань про виробництво ВЕС, що дозволить розширити їхнє застосування у високотехнологічних галузях промисловості.

Ключові слова: високоентропійні сплави, синтез, порошкова металургія, лазерне сплавлення, 3D-друк, механічні характеристики.

Вступ. Високоентропійні сплави (ВЕС) є новітнім напрямом у матеріалознавстві, який привертає увагу завдяки своїм унікальним властивостям. Однак незважаючи на

значний науковий інтерес, існують певні упущення в наукових доробках, які потребують подальших розробок. Однією з основних проблем є відсутність єдиного стандарту методів виробництва ВЕС, а також недостатньо детальне розуміння впливу різних технологій синтезу на кінцеві властивості матеріалів. Це створює труднощі у виробничому процесі, а також обмежує можливості їх широкого впровадження у масове промислове виробництво.

Мотивацією для проведення цього дослідження є необхідність удосконалення існуючих методів синтезу ВЕС, виявлення їхніх недоліків та розробка нових підходів. Наукова новизна статті полягає в розробці науково-практичного підходу до виробництва високоентропійних сплавів, що включає порівняння традиційних і нетрадиційних методів їх виготовлення, аналіз їхніх переваг і недоліків, а також визначення оптимальних шляхів удосконалення технологій. Отримані результати можуть стати основою для широкомасштабного впровадження цих матеріалів у різні галузі промисловості.

Стаття присвячена дослідженню концептуальних основ та технологічних аспектів високоентропійних сплавів (ВЕС), різноманітним методам їх синтезу. Основними завданнями є:

1. Оцінка існуючих методів виробництва ВЕС і їх оптимізація з точки зору енергетичної та економічної ефективності.
2. Визначення основних технічних прогалин, що виникають при виробництві ВЕС, та розробка шляхів їх усунення.
3. Аналіз технологій, що забезпечують високу точність у контролі мікроструктури та механічних властивостей сплавів.
4. Оцінка можливості масштабування впроваджених методів у промислове виробництво.
5. Розробка пропозицій для вдосконалення концепції виробництва ВЕС із урахуванням останніх наукових досягнень у галузі матеріалознавства.
6. Інтеграція науково-технічних аспектів в концепцію виробництва ВЕС.
7. Оцінка потенціалу різних методів у контексті специфічних промислових потреб.

В статті сформовано розуміння технологічних процесів, таких як лазерне сплавлення та осадження з парової фази, що дозволяє значно підвищити точність контролю над складом і мікроструктурою високоентропійних сплавів (ВЕС), забезпечуючи тим самим їхні унікальні механічні характеристики, які відповідають вимогам сучасних технологій, а також дозволяє інтегрувати новітні методи виготовлення в промислове виробництво, зокрема, шляхом покращення контролю температурних і фазових змін у процесі. Крім того, вдосконалено методи проектування сплавів, що базуються на глибокому аналізі їх властивостей та взаємодії матеріалів, враховуючи сучасні вимоги до їх стійкості в умовах агресивних середовищ та підвищених навантажень, що безпосередньо впливає на розвиток інженерних рішень і підвищення ефективності виробничих процесів. Подальшого розвитку набув концептуальний підхід до виробництва ВЕС, що включає не лише розробку технології, а й складний процес прототипування, тестування та масштабування виробництва, де кожен етап орієнтований на інтеграцію інноваційних методів матеріалознавства та точного моделювання властивостей матеріалу, що дозволяє створювати високо технологічні рішення для різних галузей промисловості, зокрема у створенні компонентів для авіації, енергетики та інших високотехнологічних виробництв, де точність, надійність та довговічність матеріалів є критично важливими.

Аналіз досліджень. Дослідженням методів синтезу високоентропійних сплавів займалися наступні науковці: Cao Y., Cheng W., Huang L., Liu S., Pan X., Peng C., Zhao S.

Shaopeng Liu, Hongbo Li, Ke Sun, Han Zhang та Mingxue Shen дослідили мікроструктуру, механічні та трибологічні властивості сплаву CoCrFeMnNi, виготовленого методом L-PBF. Ними встановлено, що збільшення потужності лазера від 120 Вт до 180 Вт сприяє ущільненню матеріалу, збільшує діаметр клітин і змінює текстуру кристалів. Тертя і знос залежать від мікротвердості, а основними механізмами зношування є абразивний, втомний, окислювальний та адгезійний знос[1].

Wei Cheng, Lingfei Ji, Litian Zhang, Hao Wang і Weigao Sun довели доцільність лазерних технологій виготовлення RHEA, які дозволяють створювати масивні структури та покриття. Встановлено, що багатопарове лазерне виготовлення з варіацією

елементного складу прискорює розробку матеріалів. Швидкий термічний цикл сприяє формуванню дрібнозернистої структури та покращує механічні властивості. Однак лазерні методи мають обмеження, пов'язані з дефектами, що впливають на довговічність сплавів у складних умовах [2].

Заслуговує на увагу дослідження Cong Peng та ін. Науковці експериментальним шляхом отримали $(\text{FeCoNi})_{86}\text{Al}_7\text{Ti}_7$ HEA, виготовлений методом селективного електронно-променевого плавлення (SEBM). Сплав продемонстрував високу міцність (2048 МПа) і пластичність (12%) за кімнатної температури. Виявлено анізотропію механічних властивостей та вплив мікроструктури на твердість. Дослідження підкреслює перспективність SEBM для отримання високоміцних HEA з контрольованими фазовими структурами [3].

Наукова праця Yue Cao та ін присвячена виявленню механізмів деформації та їхньому впливу на механічні властивості метастабільних високоентропійних сплавів TiZrHfNb_x , що є важливим для інженерних застосувань. Дослідники розробили серію метастабільних RHEA із різним вмістом Nb та систематично дослідили їхні характеристики на розтяг і трибологічні властивості при 500 °C. Результати експериментів показали, що сплав $\text{TiZrHfNb}_{0.4}$ має чудові характеристики розтягування (межа плинності 445 МПа, міцність на розрив 937 МПа, відносне подовження 58,5%), тоді як $\text{TiZrHfNb}_{0.2}$ демонструє найнижчий коефіцієнт тертя та мінімальний об'єм зносу. Аналіз механізмів деформації виявив, що для розтягування домінуючими факторами є формування деформаційних смуг, фазові перетворення та утворення смуг ковзання. У трибологічних випробуваннях було встановлено, що низькокутові межі зерен і нанокристалічний шар сприяють зменшенню коефіцієнта тертя та зносу [4].

Стаття [5] розкриває дослідження щодо впливу температури спікання на характеристики високоентропійних сплавів (RHEA), зокрема WNbTaV . Зазначено, що ці сплави мають великі перспективи для застосування у високотемпературних конструкційних і бронебійних матеріалах. У дослідженні використано методи кульового помелу і іскрового плазмового спікання (SPS). Виявлено, що сплави спечені при температурі від 1300 °C до 1600 °C мають дві основні фази: збагачену W(Ta) та збагачену Nb(V), що взаємодіють і визначають механічні властивості сплаву. Зміна температури спікання суттєво впливає на еволюцію мікроструктури і механізм зміцнення. Для зразків, спечених при температурі 1500 °C, досягнуто вражаючої комбінації високої межі текучості (2910 МПа) та твердості (9,06 ГПа). Механізми зміцнення включають тверде розчинення, дрібнозернисту структуру та зміцнення дислокацій. Важливо, що температура спікання є критичною для досягнення оптимальних механічних властивостей через взаємодію цих механізмів.

У дослідженні [6] розглядається майже евтектичний HEA $\text{Al}_{11.8}\text{CrCuFeNi}_{21}$, який був оброблений методом високого тиску (HIP) з досягненням майже повної щільності. Після обробки HIP в сплаві переважають однорідні та дрібні зерна B2, з вбудованою міжзерновою фазою, яка містить Cu та Cr. Частинки Fe_{0.3} і внутрішньозернові виділення Cu, Cu_3Ni та Fe–Cr відповідають за досягнення хорошої твердості (~470 HV) та чудової міцності на стиск (~1800 МПа). Деформація матриці B2 та часток Cr_{0.3} і Fe_{0.3} відбувалася головним чином через ковзання дислокацій. Водночас внутрішньозернові частинки Fe–Cr взаємодіяли з дислокаціями, створюючи складні взаємодії і заплутування. Виділення B2 Fe–Cr також деформувалися, утворюючи дефекти упаковки. Висока міцність сплаву пояснюється активацією численних механізмів деформації та зміцнення, а також значним зміцненням через ці процеси.

У статті авторів Shengxi Zhao, Asma Rezaei, Derek J. Fray та Ali Reza Kamali досліджено механотермохімічний синтез високоентропійного оксиду (HEO) та середньоентропійного оксиду (MEO) типу $(\text{FeCoNiCrMn})_3\text{O}_4$ та $(\text{FeCoNiCr})_3\text{O}_4$. Подрібнення в кульовому млині зменшує кристалічні розміри, що сприяє їх частковому розчиненню і допомагає утворенню HEO та MEO при термічній обробці. HEO-900 має високу накопичувальну ємність 1050,6 мАг/г при 100 мА/г, а MEO-900 показує вражаючу продуктивність при щільності струму 500 мА/г. Мікроструктура HEO-900 містить однофазні октаедричні кристали розміру 60–80 нм, тоді як MEO-900 має більший ступінь агломерації [7].

Прогалина в існуючих дослідженнях ВЕС полягає в недостатньому рівні оптимізації виробничих методів з точки зору енергетичної та економічної ефективності, а також у відсутності комплексного підходу до усунення технічних упущень, що виникають при виготовленні високоентропійних сплавів. Дослідження також не дають чітких результатів щодо масштабування методів виробництва на промисловому рівні, а також вимагають вдосконалення контролю мікроструктури та механічних властивостей для забезпечення стабільної якості матеріалів. Крім того, інтеграція останніх наукових досягнень у галузі матеріалознавства в концепцію виробництва ВЕС потребує додаткової уваги та оцінки потенціалу різних методів у контексті специфічних промислових потреб.

Головна частина. Високоентропійні сплави (ВЕС) можуть вироблятися різними методами, які поділяються на традиційні металургійні, порошкову металургію та нетрадиційні технології синтезу. До традиційних методів належить дугове або індукційне плавлення, при якому вихідні метали змішуються в плавильному тиглі та розплавляються при високих температурах (1500–3000°C), що забезпечує утворення однорідного розплаву. Подальше лиття та пластична деформація, зокрема прокатка, кування або екструзія, дозволяють покращити механічні властивості матеріалу. Для отримання високоентропійних покриттів або дрібнодисперсних матеріалів застосовують електронно-променеве або лазерне плавлення, що передбачає використання сконцентрованого джерела енергії для локального розплавлення металів [8].

Методи порошкової металургії включають механохімічне легування, гарячий ізостатичний пресинг та термохімічне пресування. Механохімічне легування передбачає інтенсивне подрібнення порошків у планетарних млинах, що сприяє утворенню твердих розчинів та рівномірному розподілу елементів у структурі матеріалу. Гарячий ізостатичний пресинг полягає у пресуванні порошкової суміші під високим тиском і температурою, що забезпечує отримання матеріалів із низькою пористістю та високою щільністю. Термохімічне пресування є поєднанням хімічних реакцій, зокрема самопоширюваного високотемпературного синтезу (SHS), із одночасним пресуванням, що дозволяє формувати композиційні ВЕС із заданими властивостями [9].

Нетрадиційні методи синтезу включають осадження з парової фази, лазерне сплавлення та електроімпульсне спікання. Осадження з парової фази (PVD, CVD) використовується для отримання високоентропійних покриттів, що демонструють високі механічні та термостійкі характеристики. Лазерне сплавлення (Selective Laser Melting, SLM) є технологією 3D-друку металевих деталей із ВЕС, що використовується в авіаційній, космічній та біомедичній галузях. Електроімпульсне спікання (Spark Plasma Sintering, SPS) застосовує імпульси електричного струму для нагрівання та спікання порошкових матеріалів, що дозволяє отримати ВЕС із дрібнозернистою структурою та високими механічними властивостями [10].

Основні методи синтезу високоентропійних сплавів, їх позитивні сторони та недоліки наведені в таблиці 1.

Високоентропійні сплави (ВЕС) можуть вироблятися різними методами, кожен з яких має свої технологічні особливості, переваги та обмеження. Традиційні методи, такі як дугове або індукційне плавлення, забезпечують високу однорідність сплаву завдяки рівномірному перемішуванню компонентів у розплаві. Це дозволяє здійснювати легування та регулювати хімічний склад сплаву, що є критично важливим для отримання необхідних властивостей. Однак висока енергозатратність цього методу, а також труднощі у контролі мікроструктури можуть призводити до утворення внутрішніх дефектів, таких як пори чи мікротріщини, що негативно впливають на експлуатаційні характеристики матеріалу.

Електронно-променеве та лазерне плавлення також належать до традиційних методів, проте вони надають можливість локального контролю структури матеріалу та формування покриттів з мінімальним вмістом шлаків. Це особливо важливо для створення високоякісних поверхонь та точного регулювання розподілу елементів. Однак ці методи потребують обладнання значної вартості, мають відносно низьку продуктивність і можуть бути непридатними для роботи з деякими хімічними елементами через їх специфічні фізико-хімічні властивості.

Таблиця 1 – Методи синтезу високоентропійних сплавів

Метод	Група методів	Позитивні сторони	Негативні сторони
Дугове або індукційне плавлення	Традиційні	Висока однорідність сплаву, можливість легування, простота реалізації	Висока енергозатратність, обмежений контроль мікроструктури, можливість утворення внутрішніх дефектів
Електронно-променеве або лазерне плавлення	Традиційні	Локальний контроль структури, можливість виготовлення покриттів, мінімальна кількість шлаків	Висока вартість обладнання, низька продуктивність, складність роботи з деякими елементами
Лиття з подальшою пластичною деформацією	Традиційні	Покращення механічних властивостей, рівномірний розподіл елементів, можливість зміни форми	Витрати на додаткову механічну обробку, складність контролю дрібнозернистої структури
Механохімічне легування (механічне сплавлення)	Методи порошкової металургії	Тонке диспергування компонентів, рівномірний розподіл елементів, можливість контролю розміру зерен	Висока тривалість процесу, необхідність подальшого спікання, механічний знос обладнання
Гарячий ізостатичний пресинг (HIP)	Методи порошкової металургії	Висока щільність, низька пористість, рівномірна мікроструктура	Високі енерговитрати, складність обладнання, висока вартість процесу
Термохімічне пресування	Методи порошкової металургії	Поєднання хімічних реакцій та спікання, можливість створення композиційних матеріалів	Складність контролю хімічних реакцій, необхідність точного підбору параметрів
Осадження з парової фази (PVD, CVD)	Нетрадиційні	Висока точність покриттів, рівномірна мікроструктура, низька кількість відходів	Низька швидкість процесу, висока вартість обладнання, обмежені товщини шарів
Лазерне сплавлення (SLM, 3D-друк металів)	Нетрадиційні	Висока точність, можливість виготовлення складних деталей, контроль структури на рівні мікроелементів	Високі витрати на матеріали та обладнання, обмеження в розмірах деталей, тривалість виробництва
Електроімпульсне спікання (SPS)	Нетрадиційні	Висока швидкість процесу, отримання дрібнозернистої структури, рівномірний розподіл фаз	Висока енергоємність, обмежена доступність технології, необхідність точного контролю електричних параметрів

Лиття з подальшою пластичною деформацією дозволяє покращити механічні властивості матеріалу за рахунок рівномірного розподілу елементів та контрольованої зміни форми виробу. Такий метод сприяє підвищенню міцності та пластичності сплаву. Водночас він вимагає додаткових витрат на механічну обробку та може ускладнювати контроль дрібнозернистої структури матеріалу, що впливає на його однорідність.

Методи порошкової металургії, такі як механохімічне легування та гарячий ізостатичний пресинг (HIP), дозволяють досягти високої щільності матеріалу та рівномірного розподілу елементів у мікроструктурі. Механохімічне легування забезпечує рівномірне диспергування компонентів і контроль розміру зерен, що позитивно впливає на механічні характеристики. Однак цей процес є тривалим, вимагає додаткового спікання для досягнення необхідної щільності та супроводжується механічним зносом обладнання. Гарячий ізостатичний пресинг, у свою чергу, сприяє мінімізації пористості та утворенню рівномірної мікроструктури, але є енерговитратним і потребує спеціалізованого обладнання, що підвищує собівартість виробництва.

Термохімічне пресування є ще одним методом порошкової металургії, який поєднує хімічні реакції та процес спікання, що дає змогу створювати композиційні матеріали з унікальними властивостями. Проте цей метод потребує точного контролю параметрів процесу, оскільки хімічні реакції можуть неконтрольовано впливати на кінцеві характеристики сплаву.

Нетрадиційні методи, такі як осадження з парової фази (PVD, CVD), лазерне сплавлення (SLM) та електроімпульсне спікання (SPS), відкривають нові можливості для створення ВЕС з високою точністю та контрольованою мікроструктурою. Осадження з парової фази забезпечує рівномірність покриття та мінімізує кількість відходів, проте має низьку швидкість осадження та високу вартість обладнання. Лазерне сплавлення дозволяє виготовляти складні деталі з точним контролем мікроструктури, але супроводжується високими витратами на матеріали, обладнання та значними обмеженнями за розмірами деталей. Електроімпульсне спікання відзначається швидким процесом та формуванням дрібнозернистої структури, що покращує механічні властивості матеріалу. Однак цей метод потребує точного контролю електричних параметрів та є енергоємним, що обмежує його масове використання.

Вибір методу виробництва ВЕС залежить від вимог до кінцевого матеріалу, доступних технологічних ресурсів та економічної доцільності. Традиційні методи підходять для масового виробництва завдяки відносній простоті реалізації, тоді як методи порошкової металургії та нетрадиційні технології дозволяють досягти більшої точності в контролі мікроструктури, що є важливим для високотехнологічних застосувань.

Розглянемо еталонні високоентропійні сплави. Сплав CoCrFeMnNi , відомий як сплав Кентора, утворюється методом дугового або індукційного плавлення. Процес включає завантаження вихідних металів у тигель, їх плавлення в індукційній або дуговій печі, подальше лиття у форми та термічну обробку для покращення механічних властивостей. Даний сплав характеризується високою пластичністю, корозійною стійкістю та рівномірною мікроструктурою, що робить його придатним для авіаційної промисловості (лопатки турбін), медицини (імпланти) та енергетики (деталі з високою корозійною стійкістю) [11]. Сплав TiZrNbHfTa виробляється за допомогою електронно-променевого або лазерного плавлення, що передбачає випаровування та осадження металів на підкладку у вакуумній камері. Це дозволяє отримати матеріал із високою жаростійкістю, стабільністю у вакуумі та хорошими механічними характеристиками. Даний сплав застосовується у космічній промисловості, ядерній енергетиці та біомедичних матеріалах [12]. ВЕС AlCoCrFeNi отримують за технологією лиття з подальшою пластичною деформацією, що передбачає плавлення компонентів, заливку в форму, прокатку або кування, а також термічну обробку. Такий підхід дозволяє покращити механічні властивості та забезпечити контроль мікроструктури, що робить матеріал придатним для автомобільної промисловості, авіації та теплостійких конструкцій [13].

Еталонні ВЕС, методи їх синтезу, етапи виробничого процесу, матеріали, обладнання та логістичні можливості наведені в таблиці 2.

Механохімічне легування використовується для створення сплаву CoCrFeNiAl , що відрізняється дрібнозернистою структурою та рівномірним розподілом елементів. Процес включає інтенсивне механічне змішування порошків, пресування та спікання. Готовий матеріал застосовується у зносостійких покриттях, електроніці та інструментальній промисловості [14]. Метод гарячого ізостатичного пресингу (HIP) дозволяє отримати ВЕС FeNiCrCoMo із високою щільністю та низькою пористістю. Основні етапи включають підготовку порошку, пресування під високим тиском і температурою, повільне охолодження та термічну обробку. Такий матеріал використовується в ядерній енергетиці, машинобудуванні та медичній галузі [15].

Термохімічне пресування застосовується для отримання ВЕС TiAlNbMo , що поєднує хімічні реакції та спікання. У процесі виробництва порошки змішуються, відбувається їх нагрівання з ініціацією хімічних реакцій, а потім здійснюється пресування та термообробка. Отримані матеріали використовуються для створення газотурбінних двигунів, авіаційних покриттів та теплозахисних екранів.

Таблиця 2 – Техніко-економічна характеристика еталонних високоентропійних сплавів

Приклад сплаву та характеристика	Метод	Етапи виробничого процесу	Еталонне обладнання	Необхідні матеріали та їх кількість	Можлива логістика продажу (галузі, продукти)
1	2	3	4	5	6
CoCrFeMnNi Висока пластичність, корозійна стійкість, однорідна мікроструктура	1. Дугове або індукційне плавлення	1. Завантаження металів у тигель. 2. Плавлення в дуговій або індукційній печі. 3. Рафінування та гомогенізація. 4. Лиття в форму. 5. Термічна обробка.	1. Індукційна плавильна піч Inductotherm VIP® Power-Trak. 2. Дугова плавильна піч ABB ArcSave®. 3. Ливарні форми з графіту або кераміки. 4. Термічна піч Nabertherm HT 04/16.	Co, Cr, Fe, Mn, Ni – по 20% кожного (загальна маса залежить від обсягу виробництва).	Авіація (лопатки турбін), медицина (імпланти), енергетика (корозійно-стійкі деталі).
TiZrNbHfTa Висока міцність, жаростійкість, стабільність у вакуумі	2. Електронно-променеве або лазерне плавлення	1. Підготовка порошку або пластин. 2. Випаровування та осадження металів на підкладку. 3. Контроль температури. 4. Повільне охолодження.	1. Електронно-променева установка Sciaky EBAM 110. 2. Лазерна плавильна система TRUMPF TruLaser Cell 8030. 3. Вакуумна камера Leybold HERAEUS. 4. Система контролю температури Optris CT Laser.	Ti, Zr, Nb, Hf, Ta – по 20% кожного (загальна маса залежить від обсягу виробництва).	Космічна промисловість, ядерна енергетика, біомедичні матеріали.
AlCoCrFeNi Покращені механічні властивості, можливість зміни форми, контрольоване зерно	3. Лиття з подальшою пластичною деформацією	1. Плавлення сплаву. 2. Лиття у форму. 3. Прокатка або кування. 4. Термообробка. 5. Контроль мікроструктури.	1. Ливарна піч OTTO JUNKER Induction Furnace. 2. Прокатний стан SMS group Quarto Mill. 3. Кувальний прес Schuler MH-1250. 4. Термічна піч Carbolite Gero HTF. 5. Мікроскоп для контролю мікроструктури Zeiss Axio Observer.	Al, Co, Cr, Fe, Ni – у співвідношенні 20% кожного (загальна маса залежить від обсягу виробництва).	Автомобільна промисловість, авіація, теплостійкі компоненти.
CoCrFeNiAl Дрібнозерниста структура, рівномірний розподіл елементів, покращена твердість	4. Механо-хімічне легування (механічне сплавлення)	1. Змішування порошків. 2. Інтенсивне механічне перемішування (сплавлення). 3. Спінання або пресування. 4. Термообробка.	1. Планетарний кульовий млин Retsch PM 400. 2. Гідравлічний прес Carver 3851. 3. Піч для спікання Linn High Therm VMK. 4. Термічна піч Nabertherm LHT 02/17 LB.	Co, Cr, Fe, Ni, Al – порошки по 20% кожного (загальна маса залежить від обсягу виробництва).	Зносостійкі покриття, електроніка, інструментальна промисловість.
FeNiCrCoMo Висока щільність, низька пористість, покращена корозійна стійкість	5. Гарячий ізостатичний пресинг (HIP)	1. Підготовка порошку. 2. Пресування під високим тиском і температурою. 3. Повільне охолодження. 4. Термообробка.	1. Установка HIP Quintus Technologies QIH 21. 2. Вакуумна камера Pfeiffer Vacuum. 3. Система контролю тиску Wika IPT-20. 4. Термічна піч Nabertherm LHT 04/17 LB.	Fe, Ni, Cr, Co, Mo – порошки у необхідних пропорціях (загальна маса залежить від обсягу виробництва).	Ядерна енергетика, машинобудування, медицина.
TiAlNbMo Поєднання хімічних реакцій та спікання, створення композитних структур	6. Термо-хімічне пресування	1. Змішування порошків. 2. Хімічні реакції в процесі нагріву. 3. Пресування під високим тиском. 4. Термообробка.	1. Пресувальна установка KOBELCO Hot Isostatic Press. 2. Термopіч Thermo Fisher Lindberg/Blue M. 3. Вакуумна система Edwards nXDS10i. 4. Система контролю температури Omega CN16DPT-305.	Ti, Al, Nb, Mo – порошки по 25% кожного (загальна маса залежить від обсягу виробництва).	Газотурбінні двигуни, авіаційні покриття, теплозахисні екрани

Закінчення табл. 2

1	2	3	4	5	6
TiN, AlTiN Висока твердість, зносостійкість, термостабільність	7. Осадження з парової фази (PVD, CVD)	1. Підготовка підкладки. 2. Випаровування цільового мате- ріалу. 3. Осадження парової фази на підкладку у вакуумній камері. 4. Формування тонкого покриття.	1. PVD-система компанії Oerlikon Balzers, модель INNOVENTA kila. 2. CVD-реактор від компанії Aixtron, модель AIX 2800G4. 3. Вакуумна система від Pfeiffer Vacuum, модель HiPace 700. 4. Система контролю товщини покриття від KLA-Tencor, модель P-7.	Титан (Ti), алюміній (Al) – кіль- кість залежить від бажаної товщини покриття та площі підкладки.	Інструмен- тальна промис- ловість (різальні інструменти), автомобільна промисло- вість (деталі двигунів), електроніка (захисні покриття).
AlCoCrFeNi Висока точність, можливість виготовлення складних геоме- трій, контроль мікроструктури	8. Лазерне сплавлення (SLM, 3D-друк металів)	1. Підготовка CAD-моделі деталі. 2. Розпилення порошку на робочу платформу. 3. Лазерне сплавлення порошку шар за шаром відпо- відно до моделі. 4. Охолодження та постобробка деталі.	1. Лазерна система SLM Solutions, модель SLM@280. 2. Система подачі порошку від компанії GTV Verschleißschutz, модель PF 2/2. 3. Програмне забезпечення для підготовки моделі від Materialise, модель Magics. 4. Система контролю процесу від Renishaw, модель InfiniAM Central.	Порошки Al, Co, Cr, Fe, Ni – у спів- відношенні 20% кожного; загальна маса залежить від розміру деталі.	Аерокосмічна промис- ловість (структурні компоненти), медицина (імплантати), енергетика (деталі турбін).

Метод осадження з парової фази (PVD, CVD) дає змогу отримати сплави TiN, AlTiN, що характеризуються високою твердістю, зносостійкістю та термостабільністю. Процес передбачає випаровування цільового матеріалу та осадження парової фази на підкладку у вакуумній камері. Такі покриття широко

застосовуються в інструментальній промисловості (для різального інструменту), автомобільній промисловості (деталі двигунів) та електроніці (захисні покриття) [16].

Нарешті, лазерне сплавлення (SLM, 3D-друк металів) дозволяє отримати складні за геометрією вироби зі сплав AlCoCrFeNi. Процес складається з підготовки CAD-моделі, пошарового розпилення порошку на платформу, лазерного сплавлення відповідно до заданої форми та подальшої постобробки. Такий підхід забезпечує високу точність та контроль мікроструктури, що робить матеріал придатним для аерокосмічної промисловості, медицини та енергетики [17].

Подальше вдосконалення технологій виготовлення високоентропійних сплавів (ВЕС) вимагає застосування багатофакторного підходу, орієнтованого на підвищення ефективності процесів, зменшення енерговитрат та покращення якості кінцевих продуктів. Одним із основних аспектів є зниження енергетичних витрат на етапі плавлення металів. Традиційні методи, такі як дугове та індукційне плавлення, характеризуються значними енерговитратами, що не тільки знижує економічну ефективність, а й має вплив на екологічну складову виробництва. Для цього важливо досліджувати альтернативні джерела енергії, зокрема сонячну та вітрову енергію, які можуть використовуватися для часткового забезпечення енергетичних потреб виробництва, що дозволить досягти сталого розвитку та зниження викидів.

Ще одним важливим напрямом є оптимізація мікроструктури високоентропійних сплавів. Складні фізико-хімічні процеси, що відбуваються під час плавлення, можуть призводити до утворення дефектів у мікроструктурі, таких як пори та мікротріщини, що впливають на механічні властивості матеріалів. Інтеграція новітніх технологій, зокрема методів мікроскопії та безконтактних технологій візуалізації, дозволить на етапі виробництва здійснювати більш точний контроль за складом та структурою сплавів, що зменшить ймовірність утворення дефектів.

Для покращення якості матеріалів та підвищення їхніх експлуатаційних характеристик, актуальним є розвиток порошкової металургії. Використання методів гарячого ізостатичного пресування (HIP) та термохімічного пресування дозволяє досягти високої щільності та рівномірного розподілу елементів у матеріалі, що значно підвищує його механічні властивості. Однак, хоча ці методи демонструють високу ефективність, їх застосування супроводжується високими енерговитратами та значною вартістю обладнання. Тому розробка нових матеріалів для обладнання, що дозволяють знизити енергетичні витрати, та вдосконалення технологій пресування, сприятиме зниженню собівартості кінцевої продукції.

Ще однією перспективною технологією є 3D-друк металами, зокрема лазерне сплавлення (Selective Laser Melting – SLM), що дає можливість виготовляти складні деталі без використання традиційних форм. Ця технологія має великий потенціал, оскільки дозволяє зменшити витрати на матеріали та виготовлення інструментів, однак, вона вимагає високих витрат на обладнання та матеріали. Вдосконалення лазерних технологій, а також підвищення точності та швидкості процесу друку, дозволить підвищити ефективність виробництва та знизити вартість кінцевих виробів.

Слід також зробити акцент на механохімічному легуванні. Це інноваційна технологія, яка дозволяє отримувати матеріали з рівномірним розподілом компонентів і покращеними механічними властивостями. Проте цей процес зазвичай потребує тривалого часу та високих температур для спікання порошків, що збільшує енергетичні витрати. Покращення конструкції планетарних млинів та оптимізація параметрів процесу легування можуть призвести до зниження часу обробки та енергетичних витрат, що, в свою чергу, зробить цей метод більш економічно ефективним.

Урахування екологічних вимог та зменшення впливу виробничих процесів на навколишнє середовище є важливим аспектом у розробці нових технологій виготовлення ВЕС. Використання методів, які знижують кількість відходів і покращують переробку, є критичним для досягнення високої екологічної ефективності виробництва. Інноваційні методи осадження з парової фази та електроімпульсне спікання є перспективними у цьому контексті, оскільки вони дозволяють зменшити утворення шлаків і знизити викиди.

Автоматизація та цифровізація виробничих процесів відкривають нові можливості для моніторингу та контролю на всіх етапах виготовлення ВЕС. Використання систем штучного інтелекту та машинного навчання дозволить оптимізувати параметри виробництва, знижувати ймовірність помилок і покращувати якість продукції, що в кінцевому підсумку сприятиме зниженню витрат і підвищенню ефективності технологій виготовлення високоентропійних сплавів.

Розвиток технологій виготовлення ВЕС потребує інтеграції новітніх інженерних рішень, удосконалення існуючих технологічних процесів, а також активної роботи над зниженням енергетичних витрат і покращенням якості кінцевої продукції. Це дозволить досягти не тільки економічної ефективності, але й забезпечити сталий розвиток галузі, що відповідає екологічним вимогам сучасності.

Для всебічного розвитку наукових досліджень високоентропійних сплавів, впровадження їх у виробництво галузей промисловості п'ятого технологічного укладу є актуальним питанням сьогодення. Тому виникає нагальна потреба формування концепції виробництва високоентропійних сплавів.

Концепція виробництва високоентропійних сплавів (ВЕС) базується на використанні матеріалів, які складаються з п'яти і більше основних елементів у високих концентраціях, при цьому жоден з елементів не є домінуючим. Високоентропійні сплави володіють унікальними фізико-хімічними властивостями, що включають високу стійкість до корозії, зносостійкість, термостійкість, а також міцність, що робить їх перспективними для застосування в таких галузях, як аерокосмічна, енергетична, автомобільна промисловість та інших. Реалізація концепції виробництва таких матеріалів потребує інтеграції науково-технічних, економічних та правових аспектів, що забезпечують ефективність і конкурентоспроможність продукції.

Основними етапами концепції виробництва ВЕС є: розробка сплавів, вибір та комбінування елементів, що відповідають вимогам конкретної промисловості; розробка

технології виготовлення, що включає процеси плавлення, формування, злиття та подальшої обробки матеріалів для досягнення необхідних властивостей сплаву; тестування та контроль якості для перевірки надійності та ефективності матеріалів за допомогою лабораторних випробувань; а також впровадження технологій для масового виробництва після отримання дозволів на серійний випуск продукції.

Структурно-логічний підхід до реалізації концепції виробництва ВЕС передбачає комплексну організацію всіх етапів з урахуванням технічних, економічних та екологічних аспектів. Структурні елементи процесу включають: розробку технології та дизайну сплавів, що передбачає визначення необхідних фізико-хімічних властивостей матеріалів та оцінку економічної ефективності їх застосування в промисловості; підготовку виробничих потужностей, яка включає вибір обладнання для плавлення, лиття та подальшої обробки матеріалів, а також налаштування виробничих ліній для забезпечення стабільної якості продукції; тестування та стандартизацію, що полягає в проведенні серії тестів для визначення механічних, термальних і хімічних властивостей сплавів, а також розробці стандартів і сертифікації продукції для її відповідності міжнародним нормам; масштабування виробництва для впровадження масштабованих потужностей та розвитку технологій, що дозволяють знизити собівартість продукції.

Логіка впровадження процесів включає кілька фаз. Перша фаза – дослідження та проектування, що передбачає створення базових досліджень для вивчення властивостей ВЕС та аналіз їх потенціалу для застосування в різних галузях. Друга фаза – прототипування та тестування, що включає створення лабораторних зразків сплавів і проведення тестів на реальних умовах експлуатації. Третя фаза – виробниче впровадження та масштабування, що полягає у визначенні найбільш економічно вигідних способів виробництва та масштабуванні до промислового рівня, а також у розробці плану постачання та реалізації продукції.

Економічно-правовий аспект реалізації концепції виробництва високоентропійних сплавів є ключовим для забезпечення ефективного розвитку виробництва. Економічний аспект включає оцінку вартості виробництва з урахуванням вартості сировини, енергетичних витрат, виробничих потужностей та робочої сили. Важливим також є залучення фінансування, яке може здійснюватися через державні гранти, кредити або інвестиційні програми. Крім того, створення маркетингової стратегії просування ВЕС на ринку та оцінка конкурентних переваг є важливими складовими успішної реалізації продукції.

Правовий аспект включає захист інтелектуальної власності, що передбачає реєстрацію патентів на нові матеріали та технології виготовлення ВЕС, а також дотримання екологічних стандартів, що регулюють викиди, утилізацію відходів та охорону навколишнього середовища в процесі виробництва. Сертифікація продукції є необхідною для підтвердження її відповідності міжнародним стандартам. Крім того, юридичне оформлення інвестиційних проектів і партнерств сприяє розвитку співпраці з державними та приватними підприємствами, що забезпечує економічну ефективність виробництва.

Загалом, концепція виробництва високоентропійних сплавів передбачає інтеграцію інноваційних технологій, ефективне управління виробничими процесами та врахування економічних і правових аспектів. Реалізація цієї концепції забезпечить розвиток нових матеріалів, що відповідають вимогам сучасної промисловості, підвищить технічні характеристики продукції та сприятиме економічному зростанню в галузі.

Реалізація концепції виробництва високоентропійних сплавів на рівні держави та металургійних підприємств складається з кількох ключових етапів, що охоплюють різні аспекти технологічного, економічного та правового характеру.

На рівні держави першим етапом є розробка національної стратегії розвитку нових матеріалів, що включає аналіз поточного стану металургійної та матеріалознавчої промисловості. Визначення потреб у нових матеріалах та можливостей для інтеграції високоентропійних сплавів у стратегічні галузі, зокрема енергетику, аерокосмічну промисловість та автомобільну промисловість, є необхідним для формування пріоритетних напрямів розвитку. Далі важливою складовою є підтримка інновацій та науково-дослідних розробок через фінансування досліджень у галузі матеріалознавства, створення науково-інноваційних центрів, що об'єднують наукові установи та виробничі підприємства для спільної роботи над новими технологіями. Водночас держава

повинна розробити нормативно-правову базу, що включає стандарти для виробництва та застосування високоентропійних сплавів, а також забезпечити механізми сертифікації та контролю за їх якістю. Важливим кроком є підтримка екологічних ініціатив щодо виробництва цих матеріалів, що дозволить знизити їх негативний вплив на навколишнє середовище.

Держава також повинна створити сприятливий інвестиційний клімат, пропонуючи податкові пільги для підприємств, що інвестують у розвиток технологій виробництва високоентропійних сплавів, та сприяти залученню міжнародних інвестицій через угоди та партнерства. Підготовка кадрів також є ключовим елементом, що включає створення навчальних програм у вищих навчальних закладах, а також перепідготовку робітників для металургійних підприємств.

На рівні металургійних підприємств важливо розпочати з оцінки технічних можливостей для впровадження нових технологій виробництва високоентропійних сплавів. Підприємства повинні визначити готовність своїх виробничих потужностей до адаптації нових процесів та вибору відповідного технологічного обладнання. Наступним етапом є розробка та оптимізація технології виробництва, що включає випробування лабораторних партій сплавів і вдосконалення процесів для забезпечення стабільної якості продукції. У цьому контексті важливими є інвестиції в науково-дослідницьку діяльність і модернізацію виробничих ліній для підвищення ефективності та зниження витрат.

Окремо слід зазначити важливість сертифікації продукції за міжнародними стандартами, що дозволяє забезпечити високу якість сплавів та підтвердити їх відповідність вимогам ринку. Крім того, створення системи контролю якості на всіх етапах виробництва дозволить стабільно постачати продукцію вітчизняним та міжнародним замовникам. Маркетинг і стратегічне планування є наступними важливими етапами, що включають оцінку ринків збуту для високоентропійних сплавів, розробку стратегій для входу на ці ринки та встановлення партнерських відносин з іншими підприємствами, що використовують ці матеріали.

Моніторинг змін у технологіях та вимогах ринку дозволить підприємствам адаптувати виробництво до нових умов, а інновації та розширення виробничих потужностей дадуть можливість задовольнити зростаючий попит. Таким чином, реалізація концепції виробництва високоентропійних сплавів потребує комплексного підходу, включаючи інвестиції, наукові дослідження, модернізацію виробництва та забезпечення конкурентоспроможності продукції на міжнародних ринках.

Висновки. У статті розглянуто концептуальні основи високоентропійних сплавів (ВЕС) та методи їх виробництва, що є ключовими для подальшого розвитку матеріалознавства. Проведений аналіз існуючих технологій показав, що традиційні металургійні підходи, такі як дугове та індукційне плавлення, забезпечують високу однорідність сплаву, але мають обмежену точність контролю мікроструктури. Методи порошкової металургії дозволяють отримувати ВЕС із рівномірним розподілом елементів, однак їх використання супроводжується високими енергетичними витратами. Нетрадиційні технології, такі як лазерне плавлення та осадження з парової фази, відкривають нові можливості щодо контролю структури матеріалу, проте їх широкомасштабне впровадження стримується вартістю обладнання та обмеженою продуктивністю.

Визначено основні технічні прогалини у виробництві ВЕС, зокрема труднощі у контролі мікроструктури, нерівномірність розподілу елементів та енергетичні витрати. Для їх усунення запропоновано комбіновані методи, що інтегрують традиційні та сучасні технології, а також передбачають використання чисельного моделювання для оптимізації процесів. Запропоновано вдосконалені методи проектування сплавів, які базуються на аналізі фізико-хімічних властивостей компонентів та враховують умови експлуатації матеріалів.

Проаналізовано технології контролю мікроструктури та механічних властивостей ВЕС. Використання методів лазерного плавлення, електроімпульсного спікання та осадження з парової фази дозволяє суттєво підвищити точність регулювання параметрів сплавів та зменшити кількість дефектів. Водночас розробка нових підходів до контролю фазових перетворень у процесі виробництва сприятиме отриманню матеріалів із передбачуваними характеристиками.

Оцінено перспективи масштабування виробництва ВЕС. Незважаючи на високий потенціал новітніх методів, їх впровадження у промислові умови вимагає подальших досліджень щодо підвищення продуктивності та зниження витрат. Запропоновано стратегічні напрямки для розширення застосування ВЕС у промисловості, зокрема в авіаційній, енергетичній та медичній галузях.

Вперше проведено інтеграцію науково-технічних аспектів у концепцію виробництва ВЕС, що включає прототипування, тестування та адаптацію технологічних процесів під специфічні промислові потреби. Здійснено комплексну оцінку потенціалу різних методів виробництва у контексті їх економічної ефективності та технічної доцільності.

Таким чином, проведене дослідження вдосконалює розуміння процесів виробництва ВЕС, що сприятиме їх ефективнішому використанню у високотехнологічних галузях промисловості.

References

1. Solidification and tribological behavior of CoCrFeMnNi high entropy alloy fabricated by laser powder bed melting / S. Liu et al. *Journal of Alloys and Compounds*. 2025. P. 179137. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.179137>
2. Refractory high-entropy alloys fabricated using laser technologies: A concrete review / W. Cheng et al. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.037>
3. Electron beam melting of (FeCoNi)₈₆Al₇Ti₇ high-entropy alloy / C. Peng et al. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. P. 170752. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170752>
4. On the mechanism of plastic deformation in metastable TiZrHfNb refractory high entropy alloys during tensile and sliding friction at 500 °C / Y. Cao et al. *Materials Science and Engineering: A*. 2024. P. 147618. URL: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.147618>
5. Huang L., Chen S., Pan Y. Dual-phase WNbTaV refractory high-entropy alloy with exceptional strength and hardness fabricated via spark plasma sintering. *Materials Today Communications*. 2025. Vol. 43. P. 111805. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.111805>
6. Pan X., Wang X., Qiu C. Microstructural development and mechanical behavior of a near-eutectic high entropy alloy Al_{1.8}CrCuFeNi₂ fabricated by hot isostatic pressing. *Intermetallics*. 2024. Vol. 171. P. 108361. URL: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2024.108361>
7. Mechano-thermochemical preparation of nanostructured (FeCoNiCr/Mn)₃O₄ high and medium entropy oxides: Structural, microstructural, magnetic and Li-ion storage characterization / S. Zhao et al. *Chemical Engineering Journal*. 2024. P. 156230. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.156230>
8. Arun S., Radhika N., Saleh B. Advances in vacuum arc melting for high entropy alloys: A review. *Vacuum*. 2024. Vol. 226. P. 113314. URL: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2024.113314>
9. Microstructure and mechanical properties of NbMoTaW porous refractory high entropy alloy processed by powder metallurgy / B. Zhang et al. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2025. Vol. 128. P. 107063. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2025.107063>
10. Influence of heat treatment on the microstructural evolution of CoCrFeNi high-entropy alloy prepared by Selective Laser Melting / C. Yang et al. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.02.101>
11. Enhanced corrosion resistance and gas pore- induced pitting mechanisms of CoCrFeMnNi high entropy alloy fabricated by underwater directed metal deposition with feedstock modification / M. Chen et al. *Corrosion Science*. 2025. Vol. 245. P. 112716. URL: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2025.112716>
12. Persistent slip observed in TiZrNbHfTa: A body-centered high-entropy cubic alloy / M. Tanaka et al. *Scripta Materialia*. 2021. Vol. 200. P. 113895. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2021.113895>
13. Effect of manufacturing route on microstructure and micromechanical properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy / A. Kurdi et al. *Journal of Alloys and Compounds*. 2024. P. 177477. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.177477>
14. Mechanical alloying synthesis and spark plasma sintering consolidation of CoCrFeNiAl high-entropy alloy / W. Ji et al. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. Vol. 589. P. 61–66. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.11.146>
15. Multiscale plastic deformation in additively manufactured FeCoCrNiMo high-entropy alloys to achieve strength–ductility synergy at elevated temperatures / D. Lin et al. *International Journal of Plasticity*. 2024. P. 104142. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2024.104142>
16. Strategy for achieving high-performance PVD nano-multilayered AlTiN/TiN coated milling tool: Fine platelet-grained WC–Co substrate and interface regulation / Z.-q. Zhong et al. *Surface and Coatings Technology*. 2022. Vol. 435. P. 128265. URL: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128265>

17. Moradi-Ganjeh M., Farzadi A., Ramazani A. Atomic scale melting/solidification behavior and structural evolutions of AlCoCrFeNi high-entropy alloy in selective laser melting process. *Journal of Materials Research and Technology*. 2023. Vol. 27. P. 6811–6821. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.11.149>

Belokon Yurii, professor, doctor of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-9327-5219

Shapurov Olexandr, professor, doctor of economics sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-4381-4886

Hrechanyi Oleksii, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0003-0524-4998

Protsenko Viktor, senior researcher, candidate of technical sciences, associate professor, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-5148-0361

TECHNOLOGIES FOR THE SYNTHESIS OF HIGH-ENTROPY ALLOYS: CURRENT STATE AND FUTURE DIRECTIONS

The article explores the conceptual foundations of high-entropy alloys (HEAs) and various technologies for their production. The analysis of traditional metallurgical methods, such as arc and induction melting, highlights their effectiveness in ensuring material homogeneity while emphasizing their limited capabilities in precise microstructure control. Powder metallurgy provides a uniform element distribution but is characterized by high energy consumption. Alternative methods, including laser melting and vapor phase deposition, offer new prospects for controlling alloy structures; however, their scalability is hindered by equipment costs and low productivity.

Key technical challenges impeding the advancement of HEA production have been identified, including difficulties in microstructure control, uneven component distribution, and significant energy consumption. To address these challenges, a combination of traditional and modern methods is proposed, along with the use of numerical modeling to optimize production processes. Advanced alloy design approaches are based on the physicochemical analysis of components and take into account operational conditions.

Modern methods for controlling the microstructure and mechanical properties of HEAs are reviewed. The application of laser melting, electro-pulse sintering, and vapor phase deposition technologies enables more precise regulation of material parameters and defect reduction. Additionally, the importance of developing new approaches to phase transformation control is emphasized, as this will facilitate the predictable formation of alloy structures.

The prospects for scaling up HEA production are examined, highlighting the need for further research to enhance productivity and reduce costs. Strategic directions for integrating HEAs into industrial sectors, including aerospace, energy, and medicine, are proposed.

A comprehensive approach to HEA production is suggested, incorporating prototyping, testing, and the adaptation of technological processes to meet industrial requirements. The potential of various production methods is assessed in terms of their economic efficiency and technical feasibility.

Thus, this study enhances the understanding of HEA manufacturing processes, contributing to their broader application in high-tech industries.

Keywords: high-entropy alloys, synthesis, powder metallurgy, laser fusion, 3D printing, mechanical characteristics.

Скачков Віктор Олексійович, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-4447-4641

Варченко Дмитро Анатолійович, аспірант, Запорізький національний університет, ORCID: 0009-0007-0993-0545

Карпенко Ганна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3504-0283

Кириченко Олексій Геннадійович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-3032-1919

СУЧАСНИЙ СТАН НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ПРОБЛЕМИ ВПЛИВУ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ПОКАЗНИКИ МІЦНОСТІ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ

Перспективним завданням сучасної наукової діяльності молодих науковців є створення та виробництво конкурентоспроможної техніки, у тому числі газотурбінних двигунів для літаків та гелікоптерів], розробка яких має базуватися на основі матеріалів нового покоління, енергоефективних, ресурсозберігаючих.

Суперсплави на основі нікелю-алюмінію-хрому є критично важливими матеріалами для високих навантажень, високоефективне застосування в аерокосмічній галузі, виробництво електроенергії та транспортні галузі. Ці сплави відрізняються своєю здатністю зберігати опір повзучості до їх температури плавлення, крім того в цілому вони мають високу міцність

Монокристалічні нікелеві суперсплави використовуються в аерокосмічній промисловості в якості лопаток газових турбін, в той час як сплави, що деформуються, обмежуються дисками турбін і допоміжними додатками. Ці сплави спеціально розроблені для роботи в умовах високих температур (вище 600°C), де більшість традиційних матеріалів втрачає свої властивості.

Розробка монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів зі зниженою щільністю ведеться у двох основних напрямках: оптимізація хімічного складу та зменшення вмісту важких елементів, таких як вольфрам (W), реній (Re), що дозволяє знизити щільність без значного погіршення механічних властивостей.

Проаналізовано дослідження які використовували сплави наступного хімічного складу (у мас. %): LDS-1101 містить: більше Co (9,85%) і Mo (7,1%), що позитивно впливає на термічну міцність (більше Re (2,95%), що покращує повзучість при високих температурах, значна кількість Ta (6,25%), підвищує жароміцність, але може збільшити щільність). LEK94 має: вищий вміст Al (6,5%) і Ti (1,0%), що добре для формування γ'-фази (укріплення), але не компенсує відсутність Mo та високий Ta у LDS-1101.

Розробка сплавів нового покоління пов'язана з багатьма ризиками та викликами, особливо ризиками постачання якісної сировини. Це одна з причин, чому проведення значних досліджень нікелевих сплавів останнього покоління практично неможливе для окремих осіб, і єдині люди, які можуть зробити свій внесок у цю галузь досліджень, – це великі технологічні дослідницькі компанії, що працюють в оборонній або космічній галузях, або інші дослідницькі інститути.

Типові сплави 2-го покоління містять лише 3% ренію за вагою. У 3-му поколінні цей вміст зріс приблизно до 6%. У 4-му поколінні міститься невелика кількість Ru, яка становить 5% за вагою. Елементарна концентрація Ta, Co, Al та W досить постійна з часом. Мо та Ti використовуються лише в незначних кількостях. Концентрація Cr у суперсплавах зменшувалася з продовженням покоління, але все ж таки зростала знову ж таки у сплаві 6-го покоління TMS-238, а також у суперсплавах з низьким вмістом Re.

Ключові слова: сплави на основі нікелю, легуючі домішки, екстримальні умови, хімічний склад

Вступ. Перспективним завданням сучасної наукової діяльності молодих науковців є створення та виробництво конкурентоспроможної техніки, у тому числі газотурбінних двигунів для літаків та гелікоптерів [1], розробка яких має базуватися на основі матеріалів нового покоління, енергоефективних, ресурсозберігаючих. Технологічний прогрес диктує високі вимоги до матеріалів, нікелеві суперсплави займають ключове місце у багатьох високотехнологічних галузях – від авіації та енергетики до медицини та оборонної промисловості. Їхня унікальна комбінація механічної міцності, корозійної стійкості та термостабільності робить їх незамінними в умовах екстремальних температур і навантажень [2].

Суперсплави на основі нікелю-алюмінію-хрому є критично важливими матеріалами для високих навантажень, високоефективне застосування в аерокосмічній галузі, виробництво електроенергії та транспортні галузі. Ці сплави відрізняються своєю здатністю зберігати опір повзучості до їх температури плавлення, крім того в цілому вони мають високу міцність [3]. Розробка композиційних сплавів залежить від розуміння наслідків додавання різних легуючих елементів на мікроструктуру сплаву. Суперсплави на основі нікелю використовуються в газових турбінах через їх механічні властивості при високих температурах. Зростання попиту на більш ефективні двигуни привело до розробки монокристалічних суперсплавів, які уникають шкідливих ефектів меж зерен, що послаблюють матеріал при високих температурах [4].

Однак такі особливості, як динамічна рекристалізація та корозійне розтріскування під напругою, типові для полікристалічних та монокристалічних матеріалів. Монокристалічні сплави використовуються в аерокосмічній промисловості в якості лопаток газових турбін [5], в той час як сплави, що деформуються, обмежуються дисками турбін і допоміжними додатками. Проте зростаючий попит на паливну ефективність в авіаційній промисловості залучає дослідників до розробки високоефективних суперсплавів з більш високою тугоплавкістю [6].

Нікелеві суперсплави – це високолеговані металічні матеріали, основою яких є нікель. Вони легуються такими елементами, як хром, кобальт, молібден, алюміній, титан, ванадій та інші. Ці сплави спеціально розроблені для роботи в умовах високих температур (вище 600°C), де більшість традиційних матеріалів втрачає свої властивості [7].

З розвитком гіперзвукових технологій, термоядерної енергетики та космічних польотів очікується ще більший попит на суперсплави. Ведуться активні дослідження в напрямку наноструктурованих та композиційних нікелевих матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками. [13-16]

Протягом останніх років олововмісні сплави зазнали численних модифікацій, що сприяло створенню нових суперсплавів з покращеними характеристиками та здатністю функціонувати при значно вищих температурах. Ці вдосконалення досягнуті переважно шляхом оптимізації складу легуючих елементів та впровадження інноваційних виробничих методів. Зміни включають:

- поліпшення термостійкості завдяки додаванню спеціальних легуючих компонентів.
- контроль мікроструктури та фазового складу для підвищення механічних властивостей.
- застосування новітніх методів обробки, таких як адитивні технології, вакуумне плавлення та високоточна термомеханічна обробка.

Удосконалення параметрів виробництва дозволяють не лише підвищити продуктивність таких сплавів, а й значно розширити їхнє застосування в авіаційній, космічній, енергетичній та інших технологічно інтенсивних галузях.

До основних характеристик нікелевих суперсплавів можна віднести: високу жароміцність; стабільність при довготривалому нагріванні; відмінну стійкість до окиснення та корозії; добру оброблюваність та зварюваність (у деяких марках); здатність до зміцнення шляхом термічної обробки. В таблиці 1 наведені деякі види сплавів та їх хімічний склад.

Нікелеві суперсплави мають широкий спектр застосувань завдяки їхній високій жароміцності, стійкості до корозії та механічній стабільності в екстремальних умовах. Ось ключові галузі їх використання:

Таблиця 1 – Хімічний склад та покоління нікелевих суперсплавів, які можна побачити у відкритих джерелах [8]

Сплав	Ni	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Ta	Hf	Re	Ru	Пок.	
TMS-196	Осн	4,6	5,6	2,4	5	5,6		5,6	0,1	6,4	5	5	[9]
TMS-173	Осн	3	5,6	2,8	5,6	5,6		5,6	0,1	6,9		5	[10]
TMS-238	Осн	4,6	6,5	1,1	4	5,9		7,6	0,1	6,4	5	6	[11]
TMS-138	Осн	3	6	3	6	6		6	0,1	5	2	4	[7]
TMS-169	Осн	4,6	6,1	2,4	5	5,6		5,6	0,1	6,4	5	5	[7]
TMS-162	Осн	3	5,8	3,9	5,8	5,8		5,6	0,1	4,9	6	5	[12]

– авіація та космічна техніка: використовуються в турбінних лопатках, камерах згоряння та соплах реактивних двигунів, де температура перевищує 1000°C (нікелеві суперсплави забезпечують стабільність структури та стійкість до руйнування);

– енергетика: застосовуються у газових турбінах, теплообмінниках та котельних установках;

– хімічна промисловість: використання у корозійностійкому обладнанні, що працює у агресивних середовищах, таких як кислоти або високотемпературні гази;

– медицина: деякі біосумісні нікелеві сплави застосовуються для імплантів, протезів та стоматологічних інструментів, забезпечуючи міцність та гіпоалергенні властивості;

– оборонна промисловість: використовуються у бронетехніці, ракетних двигунах та високонавантажених технологічних системах, що потребують максимальної термостійкості та механічної міцності.

На світовому ринку нікелевих суперсплавів домінують кілька ключових виробників:

– США: Special Metals, Haynes International, ATI;

– Європа: VDM Metals (Німеччина), Aubert & Duval (Франція);

– Азія: Китай та Індія активно розширюють виробництво, орієнтуючись на внутрішній ринок та експорт.

Нікель є стратегічним ресурсом, що привертає глобальну увагу. Основні родовища розташовані в Індонезії, Філіппінах, Канаді та Австралії. Залежність від імпорту нікелю створює ризики для багатьох країн, що стимулює розвиток рециклінгу та пошук альтернативних матеріалів у сплавах.

Аналіз проблем. Розробка монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів зі зниженою щільністю ведеться у двох основних напрямках: оптимізація хімічного складу та зменшення вмісту важких елементів, таких як вольфрам (W), реній (Re), що дозволяє знизити щільність без значного погіршення механічних властивостей.

До першого відносяться жароміцні нікелеві сплави (ЖНС), що містять тугоплавкі перехідні метали Mo, W, Ta, Re, Ru у кількості, обмеженій тільки їх граничною сумарною розчинністю в γ -твердому розчині і рівноважною з ним γ -фазі. Другий напрямок – це жароміцні нікелеві сплави, економно леговані тугоплавкими металами (або їх не містять), що обумовлює отримання зниженої щільності.

Відповідно до міжнародної класифікації до теперішнього часу розроблено кілька поколінь ЖНС для лиття монокристалічних лопаток авіаційних двигунів. ЖНС першого покоління містять традиційні легуючі елементи, такі як Al, Ti, Cr, Mo, W, Ta, Nb, Hf. До складу ЖНС другого та третього поколінь вводять легуючий елемент Re у кількості 2-4 % та 5-6 % відповідно.

До четвертого і п'ятого поколінь відносяться ЖНС, що містять реній та додатково леговані рутенієм. Типовими представниками сплавів цього класу є відомі зарубіжні сплави EPM-102/MX-4/PWA-1497 (GE, Pratt & Whitney and NASA, США) [23], TMS-138, TMS-162, TMS-196 (NIMS and IHI, Японія) [24-26] та вітчизняні сплави ВЖМ4 та ВЖМ6 [27,28], які мають підвищені значення тривалої міцності та температурної працездатності. Однак при цьому збільшення жароміцності сплавів супроводжується суттєвим підвищенням щільності.

У багатьох науково-дослідних центрах ведуться роботи зі створення ливарних жароміцних сплавів з більш зниженою щільністю проти ЖНС третього, четвертого і п'ятого поколінь.

Так фірмою MTU (Німеччина) розроблено монокристалічний жароміцний нікелевий сплав LEK94 [29], який розглядається як матеріал лопаток ротора турбін середнього тиску двигуна TP400-D6 європейського літака A400M.

Серед інших досягнень у цій галузі слід виділити монокристалічні ЖНС серії LDS (NASA, США). Хімічний склад, щільність та рівень тривалої міцності сплавів LEK94 та LDS-1101 наведено в роботі [30]. За результатами проведених досліджень авторами визначені механічні властивості сплавів при 1000 °С за час 100 год: LDS-1101 має кращу жароміцність: $\sigma_{1000/100} = 243$ МПа (проти 203 МПа у LEK94) $\sigma_{1000/100} = 159$ МПа (проти 129 МПа). Щільність LDS-1101 трохи більша – 8,57 г/см³ проти 8,27 г/см³ у LEK94. Слід зазначити, що в даний час відсутні відомості про аналогічні вітчизняні монокристалічні жароміцні нікелеві сплави.

У дослідженні використовували сплави наступного хімічного складу (у мас. %): LDS-1101 містить: більше Co (9,85%) і Mo (7,1%), що позитивно впливає на термічну міцність (більше Re (2,95%), що покращує повзучість при високих температурах, значна кількість Ta (6,25%), підвищує жароміцність, але може збільшити щільність). LEK94 має: вищий вміст Al (6,5%) і Ti (1,0%), що добре для формування γ' -фази (укріплення), але не компенсує відсутність Mo та високий Ta у LDS-1101.

Сплав LDS-1101 має кращі механічні характеристики при високих температурах, ніж LEK94, завдяки вищому вмісту легуючих елементів (Co, Mo, Re, Ta). Незважаючи на трохи більшу щільність, LDS-1101 є більш перспективним для роботи в умовах високих термонавантажень, що видно на рисунку 1.

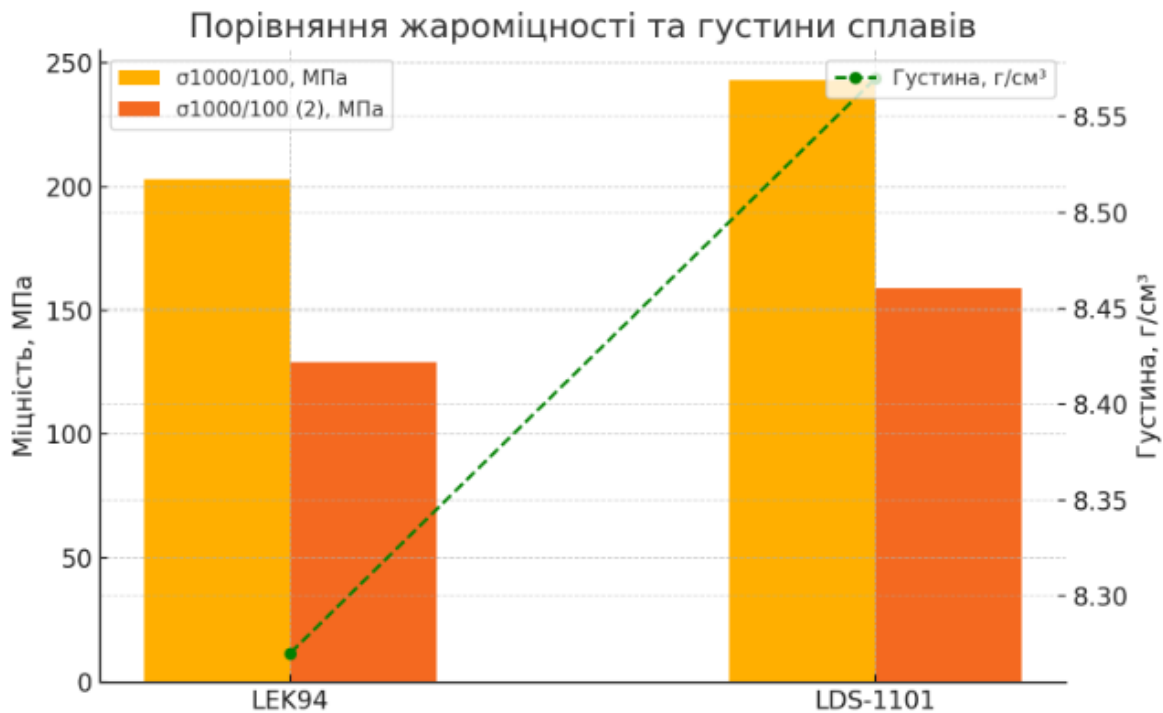


Рисунок 1 – Порівняльна діаграма сплавів LEK94 та LDS-1101 ($\sigma_{\frac{\tau}{\delta}}$ – межа повзучості, напруга, що викликає задану деформацію δ при даній температурі t , тобто регламентує величину залишкової деформації за певний час τ)

За результатами досліджень виявлено, що сплав LDS-1101 значно перевершує LEK94 за жароміцністю при температурі 1000 °С як для першого, так і для другого показника. Лінія щільності показує, що LDS-1101 має трохи вищу щільність, однак це не критично з огляду на значно кращі міцнісні властивості.

Сплав LDS-1101 є ефективнішим для використання в умовах високих температур.

Ливарні полі- та монокристалічні жароміцні нікелеві сплави та тенденції їх легування. Аналіз зарубіжних публікацій, а також загальні тенденції розвитку матеріалознавства показують, що нині інтенсивно ведуться розробки та дослідження в галузі ливарних жароміцних сплавів зі спеціальними властивостями, сировини, вихідних компонентів для їх виробництва та технологій їх переробки у високотехнологічну наукомістку продукцію великою часткою інноваційної складової. Такі розробки в області жароміцних сплавів і сталей проводять фірми США, Японії, ЄС, Китаю, Індії, ПСА, Південна Америка, [21-23,30] що орієнтуються на перехід від досліджень до їх комерційного використання [31].

Досягнення оптимального складу ЖНС здійснювалося на основі принципів збалансованого легування, які забезпечували задані значення характеристик нікелевих сплавів, що визначають рівень жароміцності. До них відносяться [33]:

- об'ємний вміст (60-70 %) високодисперсних (0,3-0,5 мкм) частинок γ' - фази кубоподібної форми для зміцнення матричного γ – твердого розчину;
- об'ємний вміст нерівноважних фаз евтектичного походження – для зменшення мікропористості має бути мінімальним;
- температура повного розчинення γ' - фази у γ - твердому розчині (γ' - солвус), яка є не лише характеристикою термічної стабільності гетерофазної γ/γ' – структури, а й визначає, у першому наближенні, жароміцні властивості сплавів: з підвищенням міцність ЖНС.

Розробка жароміцних нікелевих ливарних сплавів також базується на наступних положеннях [32-35]:

- багатокомпонентне легування γ - твердого розчину та γ' - фази для забезпечення високої фазової та структурної стабільності сплавів;
- зміцнення меж зерен для сплавів з рівноосною та спрямованою структурами, що досягається за рахунок карбідних виділень, а також мікролегуванням В та Zr;
- зведення до мінімуму ймовірності утворення ТПУ-фаз, (γ - γ' -фаз, фаз Лавеса), карбідів типу M_6C .

При оптимальному фазовому складі сплавів, а саме, вміст у сплаві 60-65 % γ' -фази, розмірі (0,35-0,45 мкм) та кубічної морфології зміцнюючої частинок γ' - фази, рівень жароміцності та температурної працездатності сплавів тим вище, чим більше вони леговані тугоплавкими елементами. Тугоплавкі елементи (вольфрам, тантал, реній) підвищують температурну сферу існування γ' -фази та ефективно гальмують дифузійні процеси, що контролюють високотемпературну повзучість [36, 37]. Однак, застосування тугоплавких елементів обмежено через надмірне збільшення щільності сплавів, а також можливості утворення в структурі надлишкових фаз на основі ОЦК-твердих розчинів елементів у вольфрамі або топологічно щільно упакованих фаз (ТПУ-фази), що призводять до значного зниження жароміцності та пластичності [38-40].

Численні структурні дослідження та аналіз експлуатаційних пошкоджень лопаток з рівноосною структурою показують, що в більшості випадків зародження тріщин та їх розвиток в'язане з межами зерен, міцність яких визначає властивості матеріалу та їх поведінку при експлуатації [39, 38]. Усунення із структури виливки поперечних складових меж зерен, розташованих перпендикулярно діючим напругам, за рахунок застосування процесу спрямованої кристалізації дозволяє значно підвищити механічні властивості жароміцних сплавів [41, 38].

Розробка спеціально легованих сплавів для спрямованої кристалізації (ЖС6УРК ВЖЛ20-ВНК, ЖС26-ВНК, ЖС30-НК, ЖС32-ВНК) та процесу спрямованої кристалізації дозволило у сплавах четвертого покоління реалізувати температуру газу перед робочими лопатками першого ступеня ≈ 1700 К.

Властивості сплавів для спрямованої кристалізації та області їх застосування представлені в таблиці 2 [23].

Найміцнішим при всіх температурах є сплав ЖС32-ВНК. Сплави з вищою щільністю зазвичай мають вищу границю повзучості. При підвищенні температури границя повзучості зменшується у всіх сплавів. Сплави ЖС26-ВНК і ЖС30-НК показують хорошу термостійкість до 1100 °С.

Таблиця 2 – Властивості жароміцних сплавів з рівноосною та спрямованою структурою

Параметр	ЖС6УРК	ВЖЛ20-ВНК	ЖС26-ВНК	ЖС30-НК	ЖС32-ВНК
$\sigma_{\frac{900}{100}}$, МПа	350	350	400	400	480
$\sigma_{\frac{1000}{100}}$, МПа	170	170	200	200	250
$\sigma_{\frac{1100}{100}}$, МПа	65	-	85	80	120
Густина, г/см ³	8,4	8,0	8,54	8,63	8,8

За властивостями сплави із спрямованою структурою не поступаються зарубіжним сплавам аналогічного призначення MAR-M200, MARM247, CM247 та інше. [44].

Відзначаються що тривалий вплив температур ≥ 1100 °С, природно впливає на ресурс (двигуни ПС-90А, Д18Т, РД-33 та ін.) Вирішення цієї проблеми лежить в галузі застосування сплавів з підвищеними характеристиками жароміцності або ефективних систем охолодження механізмів.

Вплив легуючих елементів та їхнього складу на властивості сплавів 5-го та 6-го покоління.

Нікелеві суперсплави поділяються на покоління залежно від складу легуючих елементів, які суттєво впливають на їхні властивості. Було проведено низку досліджень, спрямованих на аналіз впливу хімічного складу на характеристики суперсплавів 5-го та 6-го покоління.

У роботі [45] розглянуто нікелевий суперсплав 5-го покоління TMS-196, розроблений для покращення стійкості до окислення у порівнянні зі сплавами 3-го та 4-го покоління, що відзначаються доброю стійкістю до повзучості. Його хімічний склад був модифікований на основі TMS-173, де зменшено концентрацію ренію (Re)–елемента, що може негативно впливати на окислюваність, та збільшено вміст хрому (Cr), який формує захисну оксидну плівку Cr_2O_3 . Крім того, цей процес сприяв утворенню оксидної окалини Al_2O_3 , що додатково запобігає подальшому руйнуванню поверхні сплаву. Дослідження показало, що такі зміни значно підвищують окислювальну стійкість нового суперсплаву TMS-196. Зменшення вмісту Re, елемента, який покращує властивості повзучості, очікувалося б, що міцність на повзучість та термін служби сплаву відстануть від свого попередника. Однак це питання було вирішено шляхом коригування складу Mo та W. Було виявлено, що це коригування допомагає зберегти відмінні властивості повзучості шляхом введення негативної невідповідності решітки дуже високої величини на межі розділу $\gamma-\gamma'$. Завдяки відмінним властивостям повзучості, високої негативної невідповідності решітки та вищій стійкості до окислення, яких було досягнуто за допомогою TMS-196, було помічено, що його міцність на повзучість та термін служби значно збільшились, а також спостерігалось покращення робочої температури сплаву. Опір окисленню TMS-196 виявився порівняним з нікелевими суперсплавами 2-го покоління, такими як Rene-N5, нікелевий суперсплав з високою стійкістю до окислення. Зміна/втрата маси, що відбувалася під час повзучості, також була низькою завдяки цій підвищеній стійкості до окислення. Це збільшення стійкості до окислення було головним чином пов'язане зі збільшенням вмісту Cr.

В іншому дослідженні [45] досліджували вплив елементного складу шляхом порівняння широкого спектру нікелевих суперсплавів усіх поколінь. Дослідження підтвердили чіткий вплив складу таких елементів, як Ru та Cr, на властивості надсплавів 5-го та 6-го покоління. Надсплави п'ятого покоління характеризуються високим вмістом Ru (до 6 мас.%). Було виявлено, що висока кількість Ru підвищує мікроструктурну стабільність та пригнічує утворення фази TCP, що сприяє високому вмісту елемента Re, що підсилює повзучість.

Фази топологічно щільної упаковки (TCP), також відомі як фази Франка-Каспера (FK), є однією з найбільших груп інтерметалевих сполук, відомих своєю складною кристалографічною структурою та фізичними властивостями.

Мікроструктурна стабільність, що забезпечується високим вмістом Ru, також дозволила додавати до складу інші тугоплавкі елементи. Таким чином, сприяючи покращенню властивостей повзучості сплавів, збільшений вміст Ru та інших тугоплавких елементів значно посилює негативну щільність кристалічної решітки, яка присутня між матрицею та межею зміцнювальних фаз γ' . Таким чином, склад Ru вважався таким, що відіграє життєво важливу роль у розробці та вдосконаленні суперсплавів 5-го та 6-го поколінь. Дослідження також показало, що у випадку деяких сплавів, таких як TMS-196 та TMS-169, підвищений вміст Cr забезпечив цим сплавам вищу стійкість до окислення та термомеханічні втоми (TMF) властивості.

В іншому дослідженні [46] вивчали вплив складу Re на властивості сплавів та те, як їхній склад допоміг досягти переваги нікелевих суперсплавів 5-го та 6-го поколінь. Найважливішим ефектом Re було покращення повзучих властивостей нікелевих сплавів. Зі збільшенням вмісту Re з кожним новим поколінням спостерігалось значне покращення повзучих властивостей та робочої температури сплавів. Гарним прикладом цього є збільшення межі повзучості, терміну служби та робочої температури у сплавах CMSX-4 2-го покоління, CMSX-10 3-го покоління та TMS-169 5-го покоління, причому ці властивості покращуються з кожним наступним поколінням. Більше того, було також помічено, що помірна кількість Re покращує втомну міцність та підвищує корозійну стійкість. Також було помічено, що Re допомагає уповільнити укрупнення зміцнювальних осадів. Також було помічено, що Re сильно сегрегується в матрицю γ , і Re не був присутній у кількостях, які можна виявити в осадженій фазі γ' .

Властивості повзучості, що демонструються сплавом, можуть значною мірою залежати від швидкості дифузії легуючих елементів за високих температур. Ось чому повільна швидкість дифузії Re, що спостерігається за дуже високих температур, допомогла покращити властивості повзучості у нікелевих суперсплавах 5-го та 6-го поколінь. Але додавання Re стимулювало утворення фаз TCP, які шкідливі для характеристик суперсплавів.

Однак нікелеві суперсплави 4-го та 5-го поколінь вирішили цю проблему, додавши помірний або високий рівень добавок Ru. Було виявлено, що Ru стабілізує мікроструктуру та гальмує утворення фази TCP, тим самим покращуючи повзучість і, окрім пригнічення утворення фази TCP, дуже високий вміст Ru у суперсплавах 5-го та 6-го поколінь та мікроструктурна стабільність, яку він надає цим сплавам, дозволяють подальше додавання до складу Re та деяких інших вогнетривких елементів, тим самим значно покращуючи властивості повзучості.

Також було помічено, що високий вміст Re викликає більшу негативну щільність решітки на межі розділу фаз γ та γ' . А покращена негативна щільність значно допомогла збільшити міцність на повзучість та термін служби цих нікелевих суперсплавів. Ці пункти щодо Ru та його ефектів також були підтверджені іншим дослідженням [7, 47]. В іншому дослідженні [48] говорилося про нікелевий суперсплав 5-го покоління під назвою TMS-162, який був розроблений з використанням TMS-138 як базового сплаву. У цьому дослідженні детально пояснює, як збільшення вмісту Ru та Mo, що спостерігається в TMS-162, разом вплинуло на властивості сплаву, а саме на його властивості повзучості. Порівняно з TMS-138, у суперсплаві TMS-162 вміст Mo та Ru збільшився на 1 та 4 мас.% відповідно. Було помічено, що збільшення цих елементів значно покращило властивості повзучості, уповільнюючи швидкість повзучості. Швидкість повзучості в TMS-162 була порівняно значно нижчою разом з найдовшим часом до розриву через дрібніші та менші дислокації мережі на межі розділу γ - γ' . Було виявлено, що Ru допомагає пригнічувати утворення фази TCP, а також допомагає включити додатковий вміст Mo без порушення мікроструктурної стабільності.

В дослідженні [47] також зазначалося, що вищезазначені фактори в поєднанні з можливістю додавання більшої кількості тугоплавких елементів до сплавів завдяки високому вмісту Ru та мікроструктурній стабільності, яку він забезпечує, не тільки значно покращують властивості повзучості, але й збільшують робочу температуру нікелевих суперсплавів 5-го покоління щонайменше на 50°C порівняно з суперсплавами 4-го покоління. З кожним зростаючим поколінням нікелевих суперсплавів склад елементів змінюється, і до суміші додається багато тугоплавких елементів та рідкісноземельних елементів.

Це особливо точно у випадку нікелевих суперсплавів 5-го та 6-го покоління, які мають високий вміст Re та Ru. Хоча ці додавання та зміни до складу легуючих елементів покращують мікроструктурну стабільність, повзучість, втому, фізичні та інші властивості, вони також можуть зробити сплав менш теплопровідним. Суперсплави п'ятого покоління мають лише трохи більше ніж приблизно 5% теплопровідності нікелю.

Дослідження також показало, що сплави п'ятого покоління мають нижчий вміст Cr порівняно зі сплавами попереднього покоління, і це мало дещо негативний вплив на їх стійкість до окислення. Це особливо спостерігалось у випадку сплавів п'ятого покоління, таких як TMS-173 та TMS-162. Суперсплав п'ятого покоління TMS-196 був розроблений спеціально для вирішення цієї проблеми. Роль Cr у стійкості до окислення також була підтверджена іншим дослідженням [17]. Це дослідження показало, що шляхом збільшення вмісту Cr та зменшення вмісту Mo та W ми можемо зберегти властивості повзучості та одночасно покращити стійкість до окислення [18].

В роботі [49] на основі проведених досліджень був представлений вплив, який може мати зміна елементного складу Ta, Ru та Nb на властивості повзучості нікелевого суперсплаву 5-го покоління під назвою TMS-173. Усі сплави демонструють повільне зростання напруження до приблизно 800 год, після чого ріст стає різко інтенсивнішим. TMS-173 має найвищий рівень напруження після 1200 год – понад 30%. TMS-173-Ta показує найнижчі значення напруження протягом усього періоду – менш ніж 15% після 1400 год. Додавання Nb або Ru до сплаву TMS-173 зменшує рівень напруження у порівнянні з базовим сплавом. Для цього було створено різні варіації сплаву TMS-173 шляхом маніпулювання складом елементів Ta, Ru та Nb.

Елементний склад варіацій та вихідного базового сплаву TMS-173 наведено в таблиці 3.

TMS-173 має значно високу міцність та відносно кращу довжину до повзучості. Але після дуже тривалих випробувань на повзучість при підвищеній температурі в тканині сплаву спостерігалось утворення фази TCP. Фази TCP можуть негативно впливати на повзучість та інші високотемпературні властивості сплаву.

Таким чином, в одному з варіантів вміст Ru збільшено з 5 до 6 мас.%, щоб побачити, як пригнічення фази TCP та стабілізація мікроструктури Ru може вплинути на властивості повзучості сплаву. В іншому варіанті було виявлено, чи може зменшення вмісту Ta дати подібний результат і вплинути на повзучість. Також було виявлено, що Ta присутній у фазах TCP. І, нарешті, також було досліджено, як компенсація зменшення вмісту Ta шляхом додавання Nb вплине на властивості повзучості, використовуючи варіант з дещо зменшеним вмістом Ta з додаванням Nb. Усі зразки після термічної обробки показали подібну структуру осадження, а розміри зерен γ' виявилися майже однаковими, з великими евтектичними областями розміром близько 0,3 мм.

Таблиця 3 – Елементарний склад (у мас. %) різних використаних сумішей сплавів [49]

%	Co	Cr	Mo	W	Al	Nb	Ta	Hf	Re	Ru	Ni
TMS -173 (TMS138++)	6	3	3	5,6	5,6		5,6	0,1	7	5	Осн.
TMS-173+Ru	6	3	3	5,6	5,6		5,6	0,1	7	6	Осн.
TMS-173-Ta+Nb	6	3	3	5,6	5,6	0,5	5	0,1	7	5	Осн.
TMS-173-Ta	6	3	3	5,6	5,6		5,2	0,1	7	5	Осн.

В роботі розглянуто графік [49] який показує залежність напруження (%) від часу (годин) для різних сплавів на основі TMS-173. Усі сплави демонструють повільне зростання напруження до приблизно 800 год, після чого ріст стає різко інтенсивнішим. TMS-173 має найвищий рівень напруження після 1200 год – понад 30%. Модифікація сплаву TMS-173 додаванням елементів (особливо Ta або Ru) знижує накопичення напруження з часом, що може свідчити про покращення термостійкості або зменшення повзучості.

Заміна Ta на Nb, збільшення вмісту Ru та зменшення вмісту Ta призвели до значного збільшення часу до розриву при повзучості, причому зразок TMS-173 зі зниженим вмістом Ta показав найвищий час до розриву (майже на 30% більше). Збільшення часу до розриву спостерігалось, оскільки всі зміни успішно зменшили утворення фази TCP зі

зменшенням вмісту Ta, що найбільше пригнічувало утворення фази TCP. І, як наслідок, у цьому зразку фази TCP не утворилися. За умов 1100°C та 137 МПа зразок, де вміст Ta був зменшений та заміщений на Nb, демонстрував найдовший час до розриву при повзучості (приблизно на 50% більше, ніж у базовому сплаві).

В інших зразках спостерігалось більше укрупнення осаду γ' , ніж у зразку, що містить Nb, що призводило до руйнування після формування крystalічної структури. Ось чому, незважаючи на те, що зразки зі збільшеним вмістом Ru і зменшеним вмістом Ta не мали фаз TCP, а зразок з Nb їх мав, зразок, що містить Nb, все ще мав довшу стійкість при температурі 1100°C та тиску 137 МПа. Також було видно, що два зразки, які не мали фаз TCP, утворювали широко розташовані мережі міжфазних дислокацій γ - γ' порівняно зі зразком, що містить Nb.

В іншому дослідженні [50] досліджувалися правила складання складу для нікелевих суперсплавів та їхній вплив на властивості повзучості сплавів. Для вивчення складу сплаву була розроблена однорідна кластерна формула для $[\text{Al-Ni}_{12}](\text{Al}, \text{Cr})_m$.

Дослідження зосереджено на суперсплавах нікелю з 1-го по 6-те покоління сімейства TMS для аналізу правил формування складу розроблених сплавів за допомогою кластерного підходу. Залежно від цього було встановлено, як розташування решітки на межі розділу між фазами γ та γ' впливає на термін служби внаслідок повзучого руйнування. Більше того, в цьому дослідженні також досліджувалося, як фаза γ' зміцнюються цими розривами між ґратками. Під час вивчення сімейства TMS нікелевих суперсплавів, що належать до всіх шести поколінь, кластерна формула була використана для дослідження зміни Z , що є загальним числом атомів для одиниці кластерної формули. Спостерігалось зменшення значення Z (приблизно від значення Z 17 до 15,5) зі збільшенням покоління нікелевих суперсплавів від 1-го до 3-го, а потім збільшення (приблизно до $Z \times 16$) при переході від нікелевих суперсплавів 3-го до 6-го поколінь.

Два інші сімейства суперсплавів SC Ni, що належать до серії PWA та CMSX, також були піддані аналізу з використанням кластерної формули. Було виявлено, що значення Z слідує тій самій тенденції як у сімействах PWA, так і в CMSX, як і в сімействі TMS суперсплавів SC Ni. Було виявлено, що склад елементів, що належать до серії Al, є постійним значенням у всіх суперсплавах, що належать до сімейства TMS, незалежно від їхнього покоління. Вважалося, що основна робота елементів, що належать до серії Al, полягає у формуванні нанопреципітатів γ' та підтримці великої об'ємної частки осажденої фази γ' . На відміну від елементів серії Al, спостерігалось, що склад елементів, що належать до серії Cr, позначених у кластерній формулі атомним номером G_{Cr} , значно варіюється від сплавів 1-го до 6-го покоління.

Було виявлено, що точне налаштування складу елементів, що належать до серії Cr, здебільшого допомагає досягти помірної кількості невідповідностей решітки γ/γ' для досягнення оптимальної стійкості до повзучості. Також було помічено, що додавання Ru втричі збільшує нестабільність, спричинену високим вмістом Re в мікроструктурі, що значно покращує властивості повзучості. Таким чином, елементів Ru, так і Re у відповідних кількостях спостерігалось в суперсплавах SC Ni кінця 4-го–6-го поколінь. Отже, склад усіх елементів із серії Al, Cr та Ni має бути регульований одночасно, щоб досягти рівноваги між механічними властивостями та стійкістю до корозії або окислення.

Автори [53] вивчали вплив Re на властивості сплавів та те, як їхній склад допоміг у перевазі нікелевих надсплавів 5-го та 6-го поколінь. Найважливішим ефектом Re було покращення властивостей повзучості нікелевих надсплавів. Зі збільшенням вмісту Re з кожним новим поколінням спостерігалось значне покращення властивостей повзучості та робочої температури сплавів. Гарним прикладом цього є збільшення межі повзучості, терміну служби та робочої температури сплавів CMSX-4 2-го покоління, CMSX-10 3-го покоління та TMS-169 5-го покоління, причому ці властивості покращувалися з кожним наступним поколінням.

Висновки. Розробка сплавів нового покоління пов'язана з багатьма ризиками та викликами, особливо ризиками постачання якісної сировини. Це одна з причин, чому проведення значних досліджень нікелевих сплавів останнього покоління практично неможливе для окремих осіб, і єдині люди, які можуть зробити свій внесок у цю галузь досліджень, – це великі технологічні дослідницькі компанії, що працюють в оборонній або космічній галузях, або інші дослідницькі інститути.

Вирішення цього питання може допомогти нам краще керувати ресурсами та проводити розробку нових сплавів з максимальною ефективністю та високооптимізованим способом.

В статті розглядаються кількісні оцінки порівняльних ризиків, пов'язаних з сплавами, основним інтересом яких є реній. Порівняння ризиків постачання проводиться на основі хімічного складу сплаву. Це переважно полікристалічні старі сплави, «деформовані», «порошково оброблені», «традиційно литі», а також «спрямовано затверділі» сплави з низьким вмістом Re. Al та Cr утворюють захисний оксидний шар, який робить елемент стійким до корозії. Re та Ru покращують міцність на повзучість. Ru додатково збільшує міцність на розрив за високих температур. У всіх суперсплавах Ni становить приблизно понад 50% маси.

Типові сплави 2-го покоління містять лише 3% ренію за вагою. У 3-му поколінні цей вміст зріс приблизно до 6%. У 4-му поколінні міститься невелика кількість Ru, яка становить 5% за вагою. Елементарна концентрація Ta, Co, Al та W досить постійна з часом. Мо та Ti використовуються лише в незначних кількостях. Концентрація Cr у суперсплавах зменшувалася з продовженням покоління, але все ж таки зростала знову ж таки у сплаві 6-го покоління TMS-238, а також у суперсплавах з низьким вмістом Re.

Детальний огляд різних робіт, що вивчали властивості, розробку та вдосконалення нікелевих суперсплавів 5-го та 6-го поколінь, дав нам глибоке розуміння цих сплавів, як вони виготовляються, які їхні властивості, причини їхньої унікальної поведінки, які фактори впливають на їхню експлуатаційні характеристики, як їх можна покращити, і як можна виготовляти нові сплави. Дослідження, зосереджені на нікелевих суперсплавах 5-го та 6-го поколінь, дуже рідкісні, але вкрай важливо переглянути всі існуючі роботи, щоб отримати достатні знання з цього питання, щоб ми могли продовжувати подальший розвиток у цій галузі. Поглиблене вивчення та розуміння впливу елементного складу на властивості сплавів, а також матеріальних та фізичних характеристик сплавів є вкрай важливими для досягнення покращень у розробці сплавів нового покоління, а також для вдосконалення існуючих.

Таким чином, Ru вважався таким, що відіграє життєво важливу роль у розробці та вдосконаленні суперсплавів 5-го та 6-го поколінь. Дослідження також показало, що у випадку деяких сплавів, таких як TMS-196 та TMS-169, підвищений вміст Cr забезпечив цим сплавам чудову стійкість до окислення та термомеханічні втоми (TMF) властивості.

Більше того, було також помічено, що помірна кількість Re покращує міцність та підвищує корозійну стійкість. Також було помічено, що Re допомагає уповільнити укрупнення зміцнювальних осадів. Також було помічено, що Re сильно сегрегуюється в матрицю γ , і Re не був присутній у кількостях, які можна виявити в осадженій фазі γ' .

Бібліографічний перелік

1. Гуржій Н.М., Маценко А.В. Аналіз конкурентоспроможності продукції ПАТ «МОТОР СІЧ» на ринку авіадвигунів. *Економіка та управління підприємствами*, 2019. Випуск 20. С. 301 – 304.
2. Дмитренко Е.Д. Основні напрями розвитку авіаційної промисловості України. *Проблеми підвищення ефективності інфраструктури*, 2010. № 25. С. 1–6.
3. Weber J.H. Nickel-based Superalloys: Alloying Methods and Thermomechanical Processing. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology (Second Edition)*, 2001. P. 6149 – 6153.
4. Giridhar Gudivada, Ajoy Kumar Pandey. Recent developments in nickel-based superalloys for gas turbine applications: Review. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023. Volume 963. P. 171-182.
5. Yufei Wei, Shiyao Chen, Yancheng Jin, Mingzong Zhang, Qin Li a, Yanbin Jiang, Lei Guan, Lijun Zhang. Effect of Al/Cr addition on microstructure and mechanical properties of Ni-rich nitinol alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 2025. Volume 36. P. 4490-4500.
6. Mulberry J. Care program. *Flight international*, 2010. P. 41.
7. Gebura M. Chemical Composition and Classification of Single Crystal. *Materialing*, 2009.
8. Dev Jithin S., Senthil Kumaran Selvaraj, K. E. Vijay Vishal, and Sundaramali G. Comparative Analysis between 5th and 6th Generation Superalloys and Previous Generation Superalloys. *Hindawi. Advances in Materials Science and Engineering*, 2022. Volume 2022. P. 3-21.
9. Sato A., Harada H., Yeh A. C. et al. A 5th generation SC superalloy with balanced high temperature properties and processability. *Superalloys 2008 (Eleventh International Symposium)*. P.131–138.

10. Kawagishi K., Sato A., and Harada H. A concept for the EQ coating system for Nickel-based superalloys. *Journal of Occupational Medicine*, 2008. Vol. 60. № 7. P. 31–35.
11. Yokokawa T., Harada H., Kawagishi K., Kobayashi T., Yuyama M., and Takata Y. Advanced Alloy Design Program and Improvement of Sixth-Generation Ni-Base Single Crystal Superalloy TMS-238. *Springer International Publishing*. Berlin, Germany, 2020. P.122–130.
12. Sowa R., Arabasz S., and Parlinska-Wojtan M. Classification and microstructural stability of high generation single crystal Nickel-based superalloys. *Zastita materijala*, 2016. Vol. 57. № 2. P. 274–281.
13. Yuan Y., Kawagishi K., Koizumi Y., Kobayashi T., Yokokawa T. and Harada H. Creep deformation of a sixth generation Ni-base single crystal superalloy at 800° C. *Materials Science and Engineering*, 2014. Vol. 608. P. 95–100.
14. Zhang J. X., Murakumo T., Harada H., Koizumi Y., and Kobayashi T. Creep deformation mechanisms in some modern single-crystal superalloys. *Superalloys 2004* (Tenth International Symposium), 2004. P. 189.
15. Petrushin N.V., Elyutin E.S., Visik E. M. and Golynets S.A. Development of a single-crystal fifth-generation nickel superalloy. *Metallurgy*, 2017. Vol. 17. P. 936–947.
16. Corrosion H. Hot corrosion. *Miner. Met. Mater. Ser.*, 2019. P. 340–360.
17. Kawagishi K., Sato A., Harada H., Yeh A.C., Koizumi Y. and Kobayashi T. Oxidation resistant Ru containing Ni base single crystal superalloys. *Materials Science and Technology*, 2009. Vol. 25. № 2. P. 271–275.
18. Tabata C., Kawagishi K., Uzuhashi J. et al. Quantitative analysis of sulfur segregation at the oxide/substrate interface in Ni-base single crystal superalloy. *Scripta Materialia*, 2021. Vol. 194. P. 113616.
19. Chan J.S, Ferrand H.L. Assessment of nacre-like ceramics in replacement to Ni superalloys in aircraft's engines. Submitted on 23 Nov 2021.
20. Nikolai A. Zarkevich, Timothy M. Smith and John W. Lawson Energy-Composition Relations in Ni₃(Al_{1-x}X_x) Phases. *Crystals*, 2023. № 13. 10 p.
21. Financial Times “The Opec of nickel”: Indonesia’s control of a critical metal. URL: <https://www.ft.com/content/0bbbe7c7-12a1-43ba-8bef-c5c546367a0e>
22. Anglo American to sell its nickel business to China's MMG. URL: <https://www.seaisi.org/details/26226?type=news-rooms>
23. Kablov E.N., Demonis I.M. *Promising Technological Processes for Casting Gas Turbine Engine Blades* // *Aviation Materials. Selected Works of VIAM 1932–2002* / Edited by E.N. Kablov. Moscow: MISIS, VIAM, 2002. P.58–70.
24. Koizumi Y. *Development of next-generation Ni-base single crystal super alloys*. Super alloys 2004. Champion (Pennsylvania): Minerals, Metals & Materials Society, 2004. P. 35–43.
25. High Temperature Materials Center National Institute for Materials Science. Materials Technology Department, Aero-Engine & Space Operations Ishikawajima-Harima Heavy Industries co., Ltd. *Fourth generation nickel base single crystal super alloy TMS-138 / 138A*. Tokyo (Japan): NIMS and IHI. July 2006. P.6. <http://sakimori.nims.go.jp/catalog/TMS-138-A.pdf>
26. Akihiro Sato, Hiroshi Harada, Toshiharu Kobayashi, Takao Murakumo. *Fifth generation nickel base single crystal super alloy TMS-196*. Journal of the Japan Institute of Metals and Materials, July February 2006. P.196-199.
27. Kablov E.N. New Generation Nickel Heat-Resistant Alloys. *Aviation Materials and Technology*, 2012, №. 6, P.36–52.
28. Kablov E.N., Petrushin N.V., Svetlov I.L. Computer Design of a Fourth-Generation Heat-Resistant Nickel Alloy for Single-Crystal Gas Turbine Blades. Cast Heat-Resistant Alloys. The S.T. Kishkin Effect / Edited by E.N. Kablov. Moscow: Nauka, 2006, P.98–115.
29. Uwe Prof. Dr. Glatzel Thomas Dr. Mack Silke Dr. Wöllmer Jürgen Dr. Wortmann *Nickel-Basislegierung für die gießtechnische Herstellung einkristallin erstarrter Bauteile*: pat. DE10100790A1 / T. Mack [et al.]; publ. 18.07.02.
30. Rebecca A. Mac Kay Timothy P. Gabb James L Smialek Michael V. Nathal Low density, high creep resistant single crystal super alloy for turbine airfoils: pat. US7261783 / R.A. MacKay [et al.]; publ. 28.08.07.
31. Ospennikova O.G. Trends in the Development of Low-Density Heat-Resistant Nickel Alloys with Polycrystalline and Single-Crystal Structures (Review). *Aviation Materials and Technology*, 2016, №. 1 (40), P.3–9.
32. Paton B.E. Heat Resistance of Cast Nickel Alloys and Their Oxidation Protection / B.E. Paton [et al.]. Kyiv: Naukova Dumka, 1987. 256 pages.
33. Shalin R.E. Single Crystals of Heat-Resistant Nickel Alloys. *Mashinostroenie*, 1997. 336 pages.
34. Kablov E.N. Cast Heat-Resistant Alloys. Mechanical Engineering Encyclopedia. Mashinostroenie, 2001. Vol. II-3: Non-Ferrous Metals and Alloys. Composite Materials. pp. 519–552.

35. Chester T. Sims, Norman S. Stoloff, William C. Hegel. Superalloys II. High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power. 1st Edition. Wiley-Interscience, 1987. 320 p.
36. Kablov E.N., Svetlov I.L., Petrushin N.V. Nickel Heat-Resistant Alloys for Casting Blades with Directed and Single-Crystal Structures (Part I). *Materials Science*, 1997. № 4. P. 32–38.
37. Kablov E.N., Svetlov I.L., Petrushin N.V. Nickel Heat-Resistant Alloys for Casting Blades with Directed and Single-Crystal Structures (Part II). *Materials Science*, 1997. № 5. P. 14–22.
38. Chester T. Sims, Norman S. Stoloff, William C. Hegel. Superalloys II. Superalloys II. High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power. 2nd Edition. Wiley-Interscience, 1987. 330 p.
39. Rae C.M.F. Topologically close packed phases in an experimental rhenium-containing single crystal super alloy. Super alloys 2000. *Champion (Pennsylvania): Minerals, Metals & Materials Society*, 2000. P. 767–776.
40. Rae C.M.F., Reed R.C. The precipitation of topologically close-packed phases in rhenium-containing super alloys. *Acta Materialia*, 2001. Vol. 49. № 10. P. 4113–4125.
41. Кишкин С.Т. Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов. Москва: Наука, 2006. 407 с.
42. Acharya M.V., Fuch G.E. The effect of long-term thermal exposures on the microstructure and properties of CMSX-10 single crystal Ni-base super alloys. *Materials Science Engineering A*, 2004. Vol. 381. P. 143–153.
43. Davood Safaeian, Mohammad Vaezi. Investment Casting of Gas Turbine Blade by Used of Rapid Technologies. July 2009 AUSTRALIAN JOURNAL OF BASIC AND APPLIED SCIENCES 3(3):2979-2988.
44. Mohit Sigirisetty. Role of Additive Manufacturing in Investment Casting Process. April 2022. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology 10(4). DOI:10.22214/ijraset.2022.41227
45. Sato A., Harada H., Kobayashi T., Murakumo T., Zhang J. and Yokokawa T. Fifth generation Ni-based single crystal superalloy with excellent oxidation resistance and creep strength. *Journal of the Japan Institute of Metals*, 2006. Vol. 70. №. 2. P. 196–199.
46. Kitashima T., Harada H., Ping D. H. and Kobayashi T. Atom probe investigation of ruthenium distributions around rhenium, molybdenum and tungsten in a gamma phase of 5th-generation nickel-base single-crystal superalloys. *Materials Transactions*, 2007. Vol. 48, №. 3. P. 566–569.
47. Wee S., Do J., Kim K. et al. Review on mechanical thermal properties of superalloys and thermal barrier coating used in gas turbines. *Applied Sciences*, 2020. Vol. 10. P. 5476–16.
48. Koizumi Y., Jianxin Z., Kobayashi T. et al. Development of next generation Ni-base single crystal superalloys containing ruthenium. *Journal of the Japan Institute of Metals*, 2003. Vol. 67. № 9. P. 468–471.
49. Kobayashi T., Koizumi Y., Harada H. et al. Influence of alloying elements on the creep strength of a 5th generation single crystal superalloy TMS-173. *Journal of the Japan Institute of Metals*, 2005. Vol. 69. № 2. P. 241–244.
50. Chen C., Wang Q., Dong C., Zhang Y., and Dong H. Composition rules of Ni-base single crystal superalloys and its influence on creep properties via a cluster formula approach. *Scientific Reports*, 2020. Vol. 10. Article ID 21621.
51. Helbig C., Bradshaw A. M., Thorenz A. and Tuma A. Supply risk considerations for the elements in nickel-based superalloys. *Resources*, 2020. Vol. 9. P. 106–116.
52. Sivakumar S., Senthil Kumaran S., Uthayakumar M. and Daniel Das A., Garnet and Al-8yash composite under dry sliding conditions. *Journal of Composite Materials*, 2018. Vol. 52. №. 17. P. 2281–2288.
53. Huang M. and Zhu J. An overview of rhenium effect in single-crystal superalloys/ *Rare Metals*, 2016. Vol. 35. № 2. P. 127–139.

Skachkov Viktor, professor, doctor of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-4447-4641

Varchenko Dmytro, graduate student, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0009-0007-0993-0545

Karpenko Hanna, candidate of technical sciences, associate professor of the department, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0003-3504-0283

Kyrychenko Oleksiy, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-3032-1919

**CURRENT STATION OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL PROBLEMS
IN THE INFLECTION OF CHEMICAL ELEMENTS ON THE INDICATORS
OF THE INDICATORS OF THE INTELLIGENCE
OF LIVARY ALLOYS BASED ON NICKEL**

A promising objective of modern scientific activity for young researchers** is the creation and production of competitive equipment, including gas turbine engines for aircraft and helicopters. Their development must be based on new-generation, energy-efficient, and resource-saving materials.

Nickel–aluminum–chromium-based superalloys are critical materials for high-stress applications with highly efficient use in the aerospace sector, power generation, and transport industries. These alloys are distinguished by their ability to maintain creep resistance close to their melting temperatures and, overall, exhibit high strength.

Single-crystal nickel superalloys are used in the aerospace industry as gas turbine blades, while wrought alloys are typically limited to turbine disks and auxiliary components. These alloys are specifically engineered to operate at high temperatures (above 600 °C), where most traditional materials lose their properties.

Development of single-crystal heat-resistant nickel alloys with reduced density follows two primary approaches: optimizing chemical composition and reducing the content of heavy elements such as tungsten (W) and rhenium (Re), which allows for lower density without significantly compromising mechanical properties.

The following alloys were analyzed (in wt.%): LDS-1101: Higher Co (9.85%) and Mo (7.1%) content enhances thermal strength; higher Re (2.95%) improves high-temperature creep resistance; significant Ta (6.25%) increases heat resistance but may raise density, LEK94: Higher Al (6.5%) and Ti (1.0%) promote γ' -phase formation (strengthening), but lack of Mo and high Ta content found in LDS-1101 are not fully compensated.

Development of next-generation alloys involves numerous risks and challenges**, particularly in sourcing high-quality raw materials. This is one reason why substantial research into state-of-the-art nickel alloys is nearly impossible for individuals. Contributions to this field are typically made by large technological research companies in the defense or aerospace sectors, or by advanced research institutions.

Typical 2nd-generation superalloys contain around 3 wt.% Re. In 3rd-generation alloys, this increases to approximately 6%. 4th-generation alloys include a small amount of Ru (5 wt.%). The concentrations of Ta, Co, Al, and W have remained relatively stable over time, while Mo and Ti are used in minor quantities. Cr content decreased through successive generations but increased again in the 6th-generation TMS-238 alloy and in low-Re superalloys.

Keywords: nickel-based alloys, alloying elements, extreme conditions, chemical composition

Скачков Віктор Олексійович, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-4447-4641

Курінний Максим Сергійович, аспірант, Запорізький національний університет, ORCID: 0009-0004-5752-8954

Бехтер Руслан Васильович, головний металург АТ «Івченко-Прогрес»

Гнатишак Андрій Русланович, аспірант, Запорізький національний університет, ORCID: 0009-0007-3248-1733

АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ФАЗОУТВОРЕННЯ В СКЛАДНОЛЕГОВАНИХ СПЛАВАХ

Робота присвячена дослідженню процесів утворення фаз у жароміцних нікелевих сплавах, які є критично важливими для авіаційної та енергетичної промисловості. Ці сплави застосовуються в екстремальних умовах високих температур (до 1373K) і механічних навантажень, зокрема в турбінних лопатках авіаційних двигунів, де потрібна виняткова міцність і стійкість. У багатокомпонентних системах взаємодія численних елементів призводить до появи твердих розчинів (γ -матриця), інтерметалідів (γ' -фаза), карбідів (MC , $M_{23}C_6$), боридів (M_3B_2) та оксидних плівок. Термодинамічні принципи, зокрема мінімізація вільної енергії Гіббса, визначають стабільність цих фаз, тоді як кінетичні фактори, такі як дифузія атомів, впливають на швидкість їх утворення. Основні фази в нікелевих сплавах включають γ -матрицю – твердий розчин на основі нікелю з графцетрованою кубічною структурою, що забезпечує пластичність; γ' -фазу ($Ni_3(Al,Ta)$) – інтерметалід, який займає до 70% об'єму в сплавах, таких як CMSX-4, і є основним зміцнювачем; карбіди, що підвищують опір зносу; бориди, що зміцнюють межі зерен; та оксидні плівки, які захищають від окислення, знижуючи його швидкість на 30–40% при 1373K. Кожен легуючий елемент відіграє специфічну роль: нікель формує основу, алюміній і тантал утворюють γ' -фазу, хром, молібден і вольфрам сприяють появі карбідів, бор зміцнює межі зерен, а реній і рутеній уповільнюють дифузію, підвищуючи опір повзучості. Рідкоземельні елементи (Ce, Y, La, Nd) формують захисні оксидні плівки, покращуючи жаростійкість. Термообробка оптимізує розмір частинок γ' -фази (30–40 нм), підвищуючи міцність на 10–15%. Регулювання складу сплаву забезпечує баланс фаз, уникаючи шкідливих топологічно щільно упакованих фаз, таких як σ -фаза. Контроль швидкості охолодження впливає на сегрегацію елементів, а управління дифузією, зокрема за допомогою ренію, який уповільнює дифузію на 20–30%, підвищує довговічність (Rhenium effect).

Ключові слова: фазоутворення, жароміцні сплави, нікель, γ' -фаза, карбіди, бориди, дифузія, термообробка, легуючі елементи, опір повзучості, корозійна стійкість.

Вступ. Фазоутворення є одним із ключових процесів у матеріалознавстві, що визначає мікроструктуру, механічні, фізичні та експлуатаційні властивості сплавів. Фазоутворенням називають процес формування різних фаз у сплаві, де фаза – це однорідна частина системи, яка має однаковий хімічний склад, кристалічну структуру та властивості, і відокремлена від інших частин межами розділу [1]. Фази можуть бути твердими (наприклад, тверді розчини, інтерметаліди, карбіди), рідкими або газоподібними, але в контексті сплавів зазвичай розглядаються тверді фази [2]. У багатокомпонентних системах, які містять три і більше компонентів (наприклад, Ni-Al-Cr), фазоутворення ускладнюється через складну взаємодію елементів, що призводить до утворення різноманітних фаз, таких як тверді розчини, інтерметалічні сполуки, карбіди, бориди, оксиди тощо [3]. Ці фази впливають на такі властивості, як міцність, пластичність,

жаростійкість, корозійна стійкість і опір повзучості – повільна деформація під навантаженням при високих температурах [4]. Сучасні дослідження показують, що стабільність фаз залежить від ентальпії змішування (ΔH_{mix}) і ентропії змішування (ΔS_{mix}), які визначають перевагу утворення твердих розчинів чи інтерметалідів у багатокомпонентних системах [5]. Наприклад, негативна ΔH_{mix} сприяє утворенню впорядкованих фаз, таких як γ' -фаза, тоді як висока ΔS_{mix} стабілізує тверді розчини при температурах вище 1273K [5].

Жароміцні сплави на основі нікелю – це багатокомпонентні матеріали, спеціально розроблені для роботи в екстремальних умовах, зокрема при температурах до 1373K і вище. Їх застосовують для виготовлення таких деталей, як лопатки турбін авіаційних двигунів, газові турбіни електростанцій і компоненти ракетних двигунів [6]. Їхня унікальність полягає в здатності зберігати високу міцність, опір повзучості та стійкість до корозії й окислення в агресивних середовищах [7]. Наприклад, сплави типу CMSX-4, René 41 або Inconel 718 містять численні легуючі елементи, які формують складну мікроструктуру, що включає γ -матрицю (твердий розчин на основі Ni), γ' -фазу (інтерметалід $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ta})$), карбіди (MC , M_{23}C_6), бориди (M_3B_2) та оксидні плівки, які підвищують жаростійкість [8]. У системі Ni-Al-Cr-Mo-W-Ta-Co-Ru-Re-B-Ce-Y-La-Nd, яку ми розглядаємо, кожен елемент відіграє певну роль: Ni формує основу, Al і Ta сприяють утворенню γ' -фази, Cr, Mo, W і Ta утворюють карбіди, Co, Ru і Re підвищують стабільність γ -матриці, B зміцнює межі зерен, а рідкоземельні елементи (Ce, Y, La, Nd) покращують жаростійкість [6]. Зокрема, реній (Re) уповільнює дифузійні процеси в γ -матриці, зменшуючи швидкість укрупнення γ' -частинок, що дозволяє сплаву витримувати тривалі навантаження при 1373K [10]. Рутеній (Ru) знижує ймовірність утворення крихких топологічно щільно упакованих (ТЩУ) фаз, таких як σ -фаза, на 20–30%, що сприяє стабільності мікроструктури [11].

Процеси фазоутворення в багатокомпонентних системах підпорядковуються термодинамічним і кінетичним законам [1]. Термодинаміка визначає, які фази є стабільними за певних умов (температури, тиску, складу), а кінетика – як швидко ці фази утворюються, що залежить від дифузії атомів [2]. На думку авторів [1], основою фазоутворення є мінімізація вільної енергії системи (G), яка складається з ентальпії (H) – теплового вмісту системи, та ентропії (S) – міри безладу:

$$G = H - TS,$$

де T – температура в Кельвінах [1].

У багатокомпонентних системах, таких як Ni-Al-Cr-Mo-W, ентропійний внесок (TS) відіграє ключову роль при високих температурах, сприяючи стабільності твердих розчинів, тоді як ентальпія визначає перевагу утворення інтерметалідів, таких як Ni_3Al [5].

Рівновага між фазами досягається, коли хімічні потенціали кожного компонента (μ_i) однакові в усіх фазах [1]:

$$\mu_i^{\text{фаза 1}} = \mu_i^{\text{фаза 2}}$$

Хімічний потенціал (μ_i) – це часткова похідна вільної енергії за кількістю частинок компонента i , яка визначає, як елемент розподіляється між фазами [2]. Наприклад, у двокомпонентній системі Pb-Sn при евтектичній температурі 456K рідка фаза (61,9% Sn), α -Pb (19% Sn) і β -Sn (98% Sn) перебувають у рівновазі, що ілюструє розподіл елементів між фазами [1].

У складних системах, таких як Ni-Al-Cr, прогнозування рівноваги ускладнене через численні взаємодії, тому застосовують методи чисельного моделювання, такі як CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams), які базуються на термодинамічних базах даних [3]. Метод CALPHAD дозволяє моделювати фазовий склад у системах із десятками компонентів, наприклад, прогнозуючи розподіл ренію між γ -матрицею та γ' -фазою, що впливає на жароміцність сплаву [12]. Сучасні бази даних, такі як Thermo-Calc, враховують ефекти взаємодії рідкоземельних елементів, таких як церій (Ce) і ітрій (Y), які сприяють формуванню стабільних оксидних плівок, зменшуючи окислення при 1373K [13].

Діаграми стану є важливим інструментом для аналізу фазоутворення. Вони показують фазовий склад сплаву залежно від температури, тиску та складу [9]. У двокомпонентних системах, таких як Cu-Ni, діаграма стану проста: Cu і Ni мають однакову

кристалічну структуру (ГЦК) і утворюють твердий розчин із повною розчинністю [9]. У системі Fe-C діаграма стану складніша через обмежену розчинність вуглецю в залізі, що призводить до утворення карбідів (Fe_3C) [9]. У багатокомпонентних системах, таких як Ni-Al-Cr, діаграми стану стають тривимірними, і для їх аналізу часто використовують комп'ютерне моделювання, наприклад, метод CALPHAD [3]. Додавання рідкоземельних елементів, таких як лантан (La) або неодим (Nd), модифікує діаграми стану, зменшуючи розмір γ' -частинок до 10–20 нм, що підвищує міцність сплаву за рахунок ефекту дисперсійного зміцнення [14].

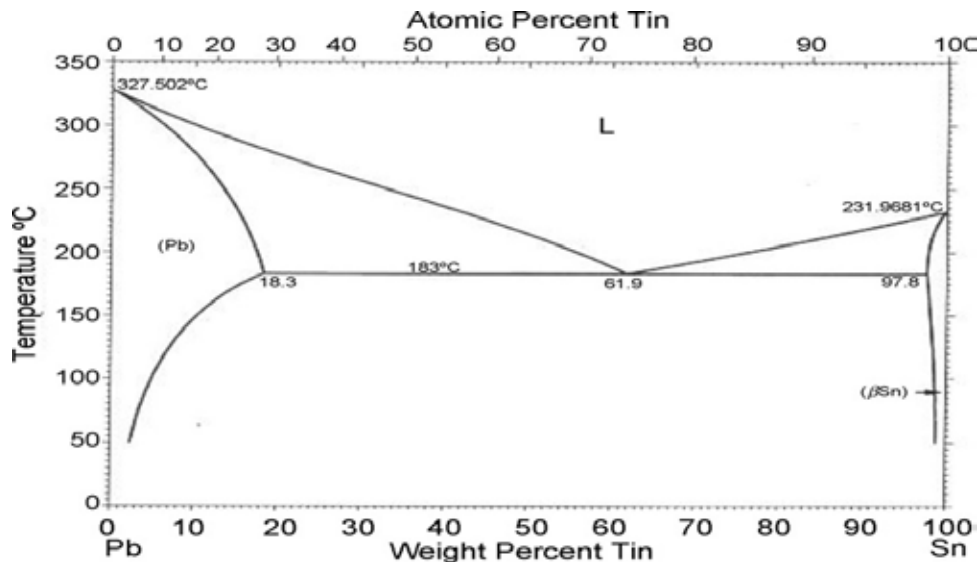


Рисунок 1 – Діаграма стану Pb-Sn

Кристалізація представляється переходом металу з рідкого стану в твердий із утворенням кристалічної структури, який супроводжується утворенням дендритів (гіллястих структур) або евтектичних структур [2]. Структуроутворення включає фазові перетворення, такі як евтектичні (з рідкої фази виділяється дві тверді фази), перитектичні (з рідкої і твердої фази виділяється інша тверда фаза) та евтектоїдні (одна тверда фаза розпадається на дві тверді фази), а також дифузійні процеси, які визначають кінетику утворення мікроструктури [2]. У багатокомпонентних жароміцних сплавах на основі нікелю фазоутворення ускладнюється через велику кількість елементів, що взаємодіють між собою [6]. Згідно з дослідженням М.Дж. Доначі, у сплаві CMSX-4 (Ni-6%Cr-9%Co-5%Al-1%Ti-6%W-6%Ta-3%Re) γ' -фаза займає до 70% об'єму, що забезпечує високу жароміцність [4]. Рідкоземельні елементи, такі як ітрій (Y), сприяють утворенню дрібнодисперсних оксидів (Y_2O_3), які діють як бар'єри для дифузії кисню, знижуючи швидкість окислення поверхні сплаву на 30–40% при температурах 1273–1373K [15]. У цій статті ми розглянемо фазоутворення в багатокомпонентних жароміцних сплавах на основі нікелю, зокрема в системі Ni-Al-Cr-Mo-W-Ta-Co-Ru-Re-B-Ce-Y-La-Nd, зосередившись на розподілі хімічних елементів по фазах, дифузійних процесах, евтектичних і евтектоїдних перетвореннях, а також їхньому впливі на властивості сплавів.

Загальні принципи фазоутворення в багатокомпонентних системах

Фазоутворення в багатокомпонентних системах є складним процесом, що залежить від термодинамічних і кінетичних факторів [1]. Термодинаміка визначає стабільність фаз через мінімізацію вільної енергії (G) [2]. У рівновазі система прагне до стану з найнижчою вільною енергією, що досягається, коли хімічні потенціали (μ_i) кожного компонента однакові в усіх фазах [1]. Наприклад, у системі Ni-Al при температурі 1273K Ni утворює γ -фазу (твердий розчин), а при додаванні Al у концентрації 10–15% утворюється γ' -фаза (Ni_3Al), яка є стабільною завдяки нижчій вільній енергії порівняно з іншими можливими фазами, такими як β -NiAl [3].

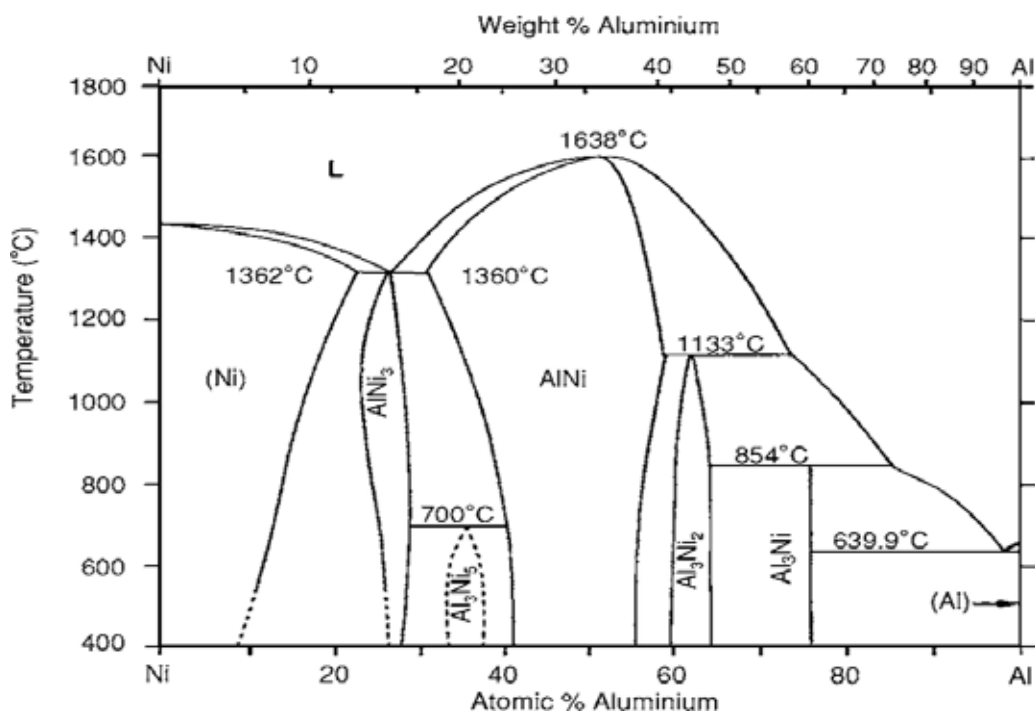


Рисунок 2 – Діаграма стану Ni-Al

Дослідження показують, що додавання ренію (Re) і рутенію (Ru) сприяє зниженню енергії дефектів упаковки γ -матриці, що зменшує ймовірність утворення дефектів у кристалічній решітці та сприяє стабільності γ' -фази при температурах до 1373K. Наприклад, у сплавах із 3% Re енергія дефектів упаковки знижується на 15–20%, що покращує опір повзучості за рахунок зменшення рухливості дислокацій [16].

Кінетика фазоутворення залежить від дифузії – процесу переміщення атомів у матеріалі, який визначає швидкість утворення і росту фаз [2]. Дифузія в твердих сплавах відбувається повільно через щільну упаковку атомів у кристалічній решітці, і її швидкість залежить від температури, типу решітки та природи атомів. Наприклад, у ГЦК-структурі (як у Ni) дифузія відбувається шляхом стрибків атомів у вакансії (порожні вузли решітки), що потребує енергії активації [9]. У рідкому стані дифузія значно швидша через більшу рухливість атомів [2]. У системах із високим вмістом Re дифузія сповільнюється через великий атомний радіус, що сприяє довговічності сплаву [9]. Зокрема, реній зменшує швидкість дифузії в γ -матриці на 20–30%, що уповільнює коалесценцію γ' -частинок і підвищує стійкість до повзучості при тривалій експлуатації при 1373K [17].

У багатокомпонентних системах фазоутворення ускладнюється через взаємодію багатьох елементів [3]. Наприклад, у системі Ni-Al-Cr утворюються γ -фаза (Ni-Cr), γ' -фаза (Ni_3Al) і карбіди (Cr_3C_2), якщо присутній вуглець [6]. Додавання інших елементів, таких як Mo, W, Ta, може призвести до утворення топологічно щільно упакованих (ТЩУ) фаз, таких як μ -фаза або σ -фаза, які є крихкими і знижують пластичність [7]. ТЩУ-фази – це інтерметалічні сполуки з високою щільністю атомів, що мають складну кристалічну структуру, наприклад, σ -фаза типу $(\text{Cr}, \text{Mo})_x(\text{Ni}, \text{Co})_y$ [7]. Рутеній (Ru) зменшує ймовірність утворення σ -фази, змінюючи хімічний склад γ -матриці, що знижує локальну концентрацію Cr і Mo та підвищує пластичність сплаву на 10–15% [18]. Крім того, Ru сприяє рівномірному розподілу ренію, що зменшує утворення μ -фази на 15–25%, забезпечуючи стабільність мікроструктури при тривалій експлуатації [18].

Фазові перетворення в багатокомпонентних системах включають:

- *Кристалізацію*: перехід із рідкого стану в твердий, що супроводжується утворенням дендритів або евтектичних структур [2].

- *Твердофазні перетворення*: наприклад, виділення γ' -фази з γ -матриці при охолодженні або витримці [6].

– *Дифузійні процеси*: перерозподіл елементів між фазами, що визначає кінетику утворення мікроструктури [2].

– *Евтектичні та евтектоїдні перетворення*: утворення складних структур, таких як ламелярні або глобулярні, що впливають на властивості металу [9].

У жароміцних сплавах на основі нікелю фазоутворення спрямоване на створення мікроструктури, яка забезпечує баланс між міцністю, пластичністю і жаростійкістю [6]. Наприклад, γ' -фаза зміцнює сплав, карбіди перешкоджають ковзанню меж зерен, а оксидні плівки захищають від окислення [8]. Рідкоземельні елементи, такі як церій (Ce), сприяють утворенню захисних оксидних плівок (CeO_2), які зменшують швидкість окислення при 1373K на 30–40%, що значно подовжує термін служби сплаву в газотурбінних двигунах. Наприклад, у сплавах із 0,01% Ce оксидні плівки мають вищу адгезію, що знижує відшарування під час термічних циклів [19].

Розподіл хімічних елементів по фазах

Розподіл хімічних елементів по фазах є ключовим фактором, що визначає фазовий склад і властивості багатокомпонентних сплавів. У рівновазі розподіл елементів підпорядковується принципу рівності хімічних потенціалів: для кожного компонента і має виконуватися умова:

$$\mu_i^{\text{фаза 1}} = \mu_i^{\text{фаза 2}} = \mu_i^{\text{фаза 3}},$$

що мінімізує вільну енергію системи (G) [1]. У багатокомпонентних системах, таких як жароміцні сплави на основі нікелю, розподіл елементів залежить від їхньої спорідненості до різних фаз, термодинамічних умов і кінетичних факторів, таких як дифузія [2].

Загальні принципи розподілу елементів

У сплавах елементи розподіляються між фазами залежно від їхньої розчинності та термодинамічної стабільності [9]. Наприклад, у системі Ni-Al при низьких концентраціях Al (до 5%) алюміній розчиняється в γ -матриці (твердий розчин Ni), але при концентраціях 10–15% утворюється γ' -фаза (Ni_3Al), яка є стабільною завдяки сильним хімічним зв'язкам між Ni і Al [3]. У багатокомпонентних системах, таких як Ni-Al-Cr, Cr частково розчиняється в γ -матриці, але при додаванні вуглецю може утворювати карбіди, такі як Cr_3C_2 або M_{23}C_6 [6]. Хром також сприяє утворенню захисних оксидних плівок Cr_2O_3 , які забезпечують стійкість до гарячої корозії в агресивних середовищах, таких як газові турбіни при 1273–1373K. Плівки Cr_2O_3 мають високу щільність і низьку проникність для кисню, що зменшує швидкість корозії на 25–35% порівняно зі сплавами без хрому [20].

У жароміцних сплавах на основі нікелю, таких як Ni-Al-Cr-Mo-W-Ta-Co-Ru-Re-B-Se-Y-La-Nd, кожен елемент відіграє певну роль у фазоутворенні [6].

Нікель (Ni): основа сплаву, формує γ -матрицю – твердий розчин із кубічною гранецентрованою (ГЦК) структурою, в якій атоми розташовані у вершинах куба та в центрах його граней. ГЦК-структура забезпечує високу пластичність і стійкість до деформації при високих температурах [9].

Кобальт (Co, до 10–15%), хром (Cr, 5–10%), молібден (Mo, 2–6%), вольфрам (W, 4–6%): розчиняються в γ -матриці, підвищуючи міцність твердого розчину [6]. Co зменшує енергію дефектів упаковки, що покращує опір повзучості при температурах 1273–1373K [3]. Cr підвищує корозійну стійкість, а Mo і W зміцнюють матрицю через великий атомний радіус [6]. Кобальт також стабілізує γ -матрицю, зменшуючи ймовірність утворення крихких фаз, таких як σ -фаза, що покращує пластичність сплаву [21].

Алюміній (Al, 4–6%), тантал (Ta, 4–6%), реній (Re, 1–3%): сприяють утворенню γ' -фази ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ta})$) – інтерметалічної сполуки з впорядкованою ГЦК-структурою типу L_{12} , де атоми Ni займають граневі позиції, а Al і Ta – кутові. γ' -фаза є основним зміцнювачем у жароміцних сплавах, оскільки вона когерентна з γ -матрицею, що створює напруження на межі фаз і перешкоджає руху дислокацій [6]. Тантал частково заміщує алюміній у γ' -фазі, підвищуючи її термодинамічну стабільність при температурах до 1373°C, що дозволяє сплаву витримувати тривалі навантаження. Дослідження показують, що додавання 6% Ta збільшує температуру розчинення γ' -фази на 20–30 градусів, що значно підвищує жароміцність [22].

Хром (Cr), молібден (Mo), вольфрам (W), тантал (Ta): крім розчинення в γ -матриці, ці елементи утворюють карбіди типу M_{23}C_6 (Cr, Mo) і MC (TaC, WC) [6]. Карбіди – це

сполуки металів із вуглецем, які мають високу твердість і жаростійкість; $M_{23}C_6$ має складну кубічну структуру, а MC – структуру типу NaCl [7]. Вони розташовуються на межах зерен, перешкоджаючи їх ковзанню при високих температурах, що підвищує опір повзучості [6]. Тантал формує стабільні MC-карбіди (TaC), які зберігають свою морфологію при температурах до 1473K, що сприяє довговічності сплаву в умовах високотемпературного навантаження [23].

Рутеній (Ru, 1–3%), реній (Re, 1–3%): розчиняються переважно в γ -матриці, уповільнюючи дифузію і підвищуючи стійкість до повзучості. Re зменшує швидкість коалесценції γ' -фази – процесу укрупнення частинок шляхом їхнього злиття при температурах вище 1273K [6]. Рутеній сприяє рівномірному розподілу ренію в γ -матриці, що зменшує ймовірність утворення ТЩУ-фаз, таких як μ -фаза, на 15–25%, що покращує пластичність сплаву при високих температурах [11].

Бор (B, 0,01–0,05%): утворює бориди типу M_3B_2 (де M – Cr, Mo, W) – сполуки металів із бором, які мають високу твердість і розташовуються на межах зерен, запобігаючи крихкому руйнуванню при високих температурах [6]. Межі зерен – це поверхні розділу між кристалітами (зернами), які є слабкими місцями в матеріалі через концентрацію дефектів [9]. Надлишок бору (понад 0,05%) може спричинити утворення низькотемпературних евтектик, що знижують жароміцність. Дослідження показують, що оптимальна концентрація бору (0,02–0,03%) підвищує міцність меж зерен на 10–15%, що знижує ймовірність міжзеренної корозії [24].

Рідкоземельні елементи (Ce, Y, La, Nd, 0,005–0,02% кожного): додаються для підвищення жаростійкості шляхом утворення оксидних плівок (наприклад, Y_2O_3 , CeO_2) на поверхні сплаву, що захищають від окислення при 1373K. Ці плівки діють як бар'єр, зменшуючи дифузію кисню до поверхні металу [8]. Ітрій (Y) також покращує адгезію оксидних плівок до поверхні сплаву, зменшуючи їх відшарування під час термічних циклів, що подовжує термін служби сплаву на 20–30% у порівнянні зі сплавами без Y. Наприклад, у сплавах із 0,01% Y оксидні плівки мають вищу когезію, що знижує швидкість окислення при циклічному нагріванні [15].

Вплив нерівноважних умов. Нерівноважні умови, такі як швидке охолодження, порушують рівноважний розподіл елементів [2]. У сплаві типу René 41 (Ni-19%Cr-11%Co-10%Mo-3%Ti-1.5%Al) при швидкому охолодженні з 1473°C Cr і Mo збагачують межі дендритів (до 20% Cr), а центр залишається збідненим (15% Cr), що викликає напруження – внутрішні механічні деформації в матеріалі, які можуть призводити до тріщин [4]. У сплаві CMSX-4 (Ni-6%Cr-9%Co-5%Al-6%W-6%Ta-3%Re) Cr і Al формують захисні оксидні плівки типу Cr_2O_3 і Al_2O_3 , які забезпечують стійкість до гарячої корозії – руйнування матеріалу під дією високих температур і агресивних середовищ, таких як солі або сірка [8]. Нерівноважні умови можуть також спричинити утворення метастабільних фаз, таких як мартенситоподібні структури, хоча в нікелевих сплавах вони рідкісні через високу стабільність ГЦК-структури [9]. Наприклад, швидке охолодження CMSX-4 із 1573K призводить до сегрегації танталу в MC-карбіди, що підвищує їх об'ємну частку на 5–7%, зміцнюючи межі зерен [23].

Вплив на властивості. Розподіл елементів у жароміцних сплавах визначає їхні властивості. γ' -фаза забезпечує високу міцність при температурах до 1373K, карбіди і бориди підвищують опір повзучості, а оксидні плівки захищають від окислення [6]. Однак надлишок карбідів або утворення ТЩУ-фаз, таких як μ -фаза $(Ni,Co)_7(W,Mo)_6$, може знизити пластичність [7]. Точний баланс складу є ключовим для досягнення оптимальних властивостей [6]. Наприклад, оптимальне співвідношення Al і Ta (4–6% кожного) забезпечує максимальну об'ємну частку γ' -фази (до 70%), що підвищує міцність сплаву при збереженні пластичності [22].

Дифузійні процеси на рівні мікроструктури

Загальні принципи дифузії. Дифузійні процеси є основою фазоутворення і структуроутворення в багатокомпонентних сплавах, визначаючи розподіл елементів і кінетику фазових перетворень [2]. Дифузія характеризується переміщенням атомів у матеріалі, викликаний градієнтом концентрації, температури або іншими факторами, що описується першим законом Фіка:

$$J_i = -DVC_i,$$

де J_i – потік атомів компонента i (кількість атомів, що проходять через одиницю площі за одиницю часу);

D – коефіцієнт дифузії;

∇C_i – градієнт концентрації (зміна концентрації на одиницю відстані) [9].

Коефіцієнт дифузії (D) залежить від температури і описується рівнянням Арреніуса:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right),$$

де D_0 – передекспоненційний множник; Q – енергія активації дифузії; R – газова стала; T – температура в Кельвінах [9].

У рідині дифузія швидка ($D \approx 10^{-5}$ м²/с), а в твердому стані значно повільніша ($D \approx 10^{-9}$ – 10^{-14} м²/с при 1273К), що впливає на швидкість фазових перетворень [2]. Дифузія в твердих сплавах відбувається кількома механізмами:

– *Вакансійний механізм*: атоми стрибають у вакансії (порожні вузли решітки), що є основним механізмом у ГЦК-структурах, таких як γ -матриця Ni.

– *Міжвузловий механізм*: атоми рухаються через міжвузлові позиції, що характерно для малих атомів, таких як вуглець.

– *Дифузія по межах зерен*: швидша, ніж у об'ємі, через більшу концентрацію дефектів на межах зерен ($D_{\text{меж}} \approx 10^{-9}$ м²/с порівняно з $D \approx 10^{-12}$ м²/с в об'ємі при 1273К) [9].

Дослідження показують, що термообробка, зокрема старіння при 1173–1273К, значно впливає на дифузійні профілі, сприяючи рівномірному розподілу елементів, таких як Al і Ta, у γ' -фазі, що підвищує її когерентність із γ -матрицею [25].

У багатокомпонентних жароміцних сплавах на основі нікелю дифузійні процеси визначають формування мікроструктури [6]. У γ -матриці Ni при 1273К коефіцієнт дифузії для Cr становить $D \approx 10^{-12}$ м²/с, для W і Re – ще нижче ($D \approx 10^{-13}$ м²/с), що обумовлено їхньою великою атомною масою [3]. У сплавах типу CMSX-4 при кристалізації γ -матриці Cr і W дифундують до меж дендритів, формуючи карбіди $M_{23}C_6$ і MC, тоді як Al і Ta дифундують у γ' -фазу [4].

Реній (Re) і рутеній (Ru) уповільнюють дифузію в γ -матриці, що зменшує швидкість коалесценції γ' -частинок – процесу укрупнення частинок шляхом їхнього злиття при 1373К, підвищуючи опір повзучості [6]. Згідно з дослідженнями, додавання 3% Re знижує швидкість дифузії в γ -матриці на 20–30%, що подовжує термін служби сплаву при високих температурах. Наприклад, у CMSX-4 із 3% Re коалесценція γ' -частинок сповільнюється на 25%, що дозволяє сплаву витримувати навантаження при 1373К до 10 000 годин [17].

Бор (B) дифундує до меж зерен швидше ($D_{\text{меж}} \approx 10^{-9}$ м²/с по межах зерен, порівняно з $D \approx 10^{-12}$ м²/с в об'ємі γ -матриці), утворюючи бориди M_3B_2 , які зміцнюють межі, але при надлишку B (понад 0,05%) можуть спричинити крихкість [6]. Рідкоземельні елементи (Ce, Y, La, Nd) мають низьку дифузійну рухливість ($D \approx 10^{-14}$ м²/с у γ -матриці), концентруються на межах зерен і сприяють утворенню оксидів, що захищають від окислення [8]. Наприклад, ітрій (Y) дифундує до поверхні сплаву, формуючи Y_2O_3 , що знижує швидкість окислення на 30% при циклічному нагріванні до 1373К [15].

В процесі старіння сплаву при 1173К Al і Ta дифундують до γ' -фазі, формуючи дрібнодисперсні частинки (20–50 нм), що підвищують міцність [6]. В умовах старіння відбувається контрольоване виділення зміцнюючих фаз для підвищення міцності [9]. Co, Mo і W дифундують повільніше, що забезпечує рівномірний розподіл у γ -матриці. У сплавах типу René 41 при 1073К дифузія Cr і Mo до меж зерен призводить до утворення $M_{23}C_6$, але повільна дифузія Re (через його великий атомний радіус) запобігає утворенню шкідливих топологічно щільноупакованих фаз, таких як σ -фаза [6]. Термообробка при 1223К протягом 10–20 годин сприяє формуванню оптимального розміру γ' -частинок (30–40 нм), що підвищує міцність на 10–15% порівняно з необробленими сплавами [25].

Вплив на властивості. Дифузійні процеси впливають на ліквідацію (неоднорідність складу), ріст фаз, утворення карбідів і боридів [2]. Повільна дифузія Re і Ru підвищує довговічність сплаву, а швидка дифузія B і Y по межах зерен покращує жаростійкість, але потребує точного контролю складу, щоб уникнути крихкості [6]. Наприклад, надлишок

бору може спричинити утворення низькотемпературних евтектик, що знижують жароміцність на 5–10% [24].

Евтектичні процеси.

Загальні принципи евтектичних перетворень. Евтектичні процеси є важливим типом фазових перетворень у багатокомпонентних сплавах, що впливають на їхню мікроструктуру [9]. Евтектичне перетворення – це інваріантний процес, при якому рідина при фіксованій температурі одночасно кристалізується в дві або більше твердих фаз із утворенням характерної мікроструктури, наприклад, ламелярної (пластинчастої) або глобулярної [9]. При евтектичному перетворенні число ступенів свободи за правилом фаз Гіббса $F=0$. Безпосередньо правило фаз Гіббса для фіксованого тиску виражається формулою:

$$F = C - P + 1,$$

де C – число компонентів; P – число фаз.

Ламелярна структура складається з чергування тонких пластин двох фаз, а глобулярна – з округлих частинок однієї фази в матриці іншої [9]. У двокомпонентних системах евтектика утворюється, наприклад, у системі Pb-Sn при 456K: рідка фаза (61,9% Sn) розпадається на дві тверді фази α -Pb (19% Sn) та β -Sn (98% Sn), формуючи ламелярну структуру, де фази чергуються у вигляді тонких пластин [1]. Евтектичні структури впливають на властивості сплаву: ламелярні структури підвищують твердість і міцність, але знижують пластичність, тоді як глобулярні структури забезпечують кращу зносостійкість і ударну в'язкість [9]. У багатокомпонентних системах евтектичне перетворення складніше через більшу кількість фаз і можливі проміжні реакції [3].

У жароміцних сплавах на основі нікелю, легованих Ni-Al-Cr-Mo-W-Ta-Co-Ru-Re-B-Se-Y-La-Nd, евтектика утворюється при температурах 1523–1573K, наприклад, у сплаві CMSX-4: рідка фаза переходить у γ -матрицю і MC-карбіди (TaC, WC). Залишкова рідка фаза при 1423K кристалізується в $\gamma+\gamma'$ -фазу [4]. Згідно з дослідженнями С.Т. Сімса, структура евтектики γ /MC – глобулярна, тобто складається з округлих частинок карбідів у γ -матриці, що підвищує зносостійкість, але знижує пластичність через крихкість карбідів на межах зерен. У сплавах із високим вмістом Ta і W (6% кожного) частка евтектики може досягати 5–10%, що впливає на механічні властивості [7]. Тантал (Ta) підвищує стабільність MC-карбідів у евтектичних структурах, що сприяє збереженню їхньої морфології при високих температурах. Наприклад, MC-карбіди (TaC) мають температуру плавлення близько 4073K, що дозволяє їм залишатися стабільними в евтектичних структурах при температурах до 1573K, підвищуючи опір повзучості на 10–15% [26].

Рідкоземельні елементи (Ce, Y, La, Nd) зменшують температуру евтектики на 10–20°C, сприяючи утворенню дрібнодисперсних оксидів на межах фаз, що покращує жаростійкість [8]. Наприклад, церій (Ce) сприяє формуванню оксидів CeO₂, які діють як бар'єри для дифузії кисню, знижуючи швидкість окислення поверхні на 30–40% при 1373K [19]. Бор (B) впливає на евтектичне перетворення, сприяючи утворенню боридів M₃B₂ на межах зерен, що зміцнює їх, але надлишок B (понад 0,05%) може призвести до утворення низькотемпературної евтектики (близько 1373K), яка знижує жароміцність [6]. Дослідження показують, що бор у концентрації 0,02–0,03% оптимізує евтектичну структуру, зменшуючи частку низькотемпературних фаз на 5–7%, що сприяє стабільності мікроструктури [24]. У сплавах типу René 41 (Ni-19%Cr-11%Co-10%Mo-3%Ti-1,5%Al) евтектика формується при 1553K: рідка фаза переходить у $\gamma+M_{23}C_6$, а залишкова рідка фаза при 1453K утворює $\gamma+\gamma'$ -фазу [4]. Переохолодження – охолодження нижче рівноважної температури кристалізації – збільшує частку евтектики і змінює склад карбідів, що може знизити пластичність [9].

Вплив на властивості. Евтектичні процеси формують складні структури, які впливають на баланс міцності та пластичності [9]. У жароміцних сплавах глобулярна евтектика γ /MC підвищує зносостійкість, але може знизити ударну в'язкість через крихкість карбідів [7]. Легування B, Ce, Y, La, Nd потребує точного контролю для уникнення небажаних фаз [6]. Наприклад, додавання 0,01% Y підвищує зносостійкість евтектичних структур на 10% за рахунок утворення дрібнодисперсних оксидів [15].

Евтектоїдні процеси.

Загальні принципи евтектоїдних перетворень. Евтектоїдні процеси є важливим типом фазових перетворень у твердому стані, що впливають на мікроструктуру сплавів. Евтектоїдне перетворення – це інваріантний процес ($F=0$), при якому одна тверда фаза при фіксованій температурі розпадається на дві тверді фази з утворенням ламелярної структури. Наприклад, у системі Fe-C при 1000K γ -Fe (0,76% C) розпадається на α -Fe (0,02% C) та Fe₃C (6,67% C), утворюючи перліт – ламелярну структуру, де шари α -Fe (ферит) чергуються з Fe₃C (цементит). Ферит – це твердий розчин вуглецю в α -Fe з об'ємноцентрованою кубічною (ОЦК) структурою, а цементит – карбід із орторомбічною структурою, який є твердим і крихким. Евтектоїдні структури підвищують твердість і міцність, але можуть знижувати пластичність через ламелярну морфологію [9]. У багатокомпонентних системах евтектоїдні перетворення рідкісні через високу стабільність первинних фаз, але можуть відбуватися за певних умов [3].

У жароміцних сплавах на основі нікелю евтектоїдні процеси менш поширені через високу стабільність γ -матриці, але можуть відбуватися за певних умов [6]. У системі Ni-Al-Cr-Mo-W-Ta-Co-Ru-Re-B-Ce-Y-La-Nd евтектоїдне перетворення можливе при охолодженні з 1173–1273K, наприклад, у сплавах із високим вмістом Cr і Mo: γ -фаза розпадається на γ' -фазу та M₂₃C₆ [4]. Згідно з дослідженнями М.Дж. Доначі, у сплавів типу Inconel 718 (Ni-19%Cr-18%Fe-5%Nb-3%Mo) при 973K можливе часткове перетворення γ -матриці в γ' -фазу та δ -фазу (Ni₃Nb), хоча це не класичний евтектоїд [4]. δ -фаза – це орторомбічна інтерметалічна сполука, яка може знижувати пластичність при надлишковій кількості. Легуючі елементи, такі як Mo і W, уповільнюють дифузію, що пригнічує евтектоїдне перетворення, зберігаючи γ -фазу [6]. Реній (Re) і рутеній (Ru) підвищують стабільність γ -матриці, запобігаючи утворенню шкідливих фаз, таких як σ -фаза – одна з ТЩУ-фаз типу (Cr,Mo)_x(Ni,Co)_y, яка є крихкою і знижує пластичність [3]. Наприклад, додавання 3% Ru знижує ймовірність утворення σ -фази на 20–30%, що сприяє збереженню пластичності при температурах 1073–1273K [11].

Бор (B) і рідкоземельні елементи (Ce, Y, La, Nd) впливають на межі зерен, зменшуючи ймовірність евтектоїдного розпаду, але сприяють утворенню боридів і оксидів [6]. Бор зменшує ймовірність евтектоїдного розпаду, зміцнюючи межі зерен шляхом утворення боридів M₃B₂, що підвищує стійкість до тріщиноутворення. Наприклад, у сплавах із 0,02% B міцність меж зерен зростає на 10–15%, що знижує ризик міжзеренної корозії при 1173K [24]. При швидкому охолодженні з 1473K евтектоїдні перетворення пригнічуються, і утворюються метастабільні фази, такі як γ' -фази або мартенситоподібні структури. Мартенсит – це метастабільна фаза, що утворюється при швидкому охолодженні бездифузійним (зсувним) механізмом, але в Ni-сплавах мартенситоподібні структури рідкісні через стабільність ГЦК-структури [9]. Рідкоземельні елементи, такі як ітрій (Y), сприяють стабілізації γ -матриці, формуючи оксиди Y₂O₃ на межах зерен, що знижують дифузію і пригнічують евтектоїдні перетворення [15].

Вплив на властивості Евтектоїдні процеси формують ламелярні структури, які підвищують твердість, але можуть знижувати пластичність [9]. У жароміцних сплавах легування Re, Ru і B допомагає контролювати ці процеси, запобігаючи утворенню крихких фаз [6]. Наприклад, додавання 0,02% B знижує ймовірність утворення δ -фази в Inconel 718 на 5–10%, що зберігає пластичність сплаву при 973K [24].

Висновки. Фазоутворення в багатокомпонентних сплавах, зокрема жароміцних сплавах на основі нікелю, таких як Ni-Al-Cr-Mo-W-Ta-Co-Ru-Re-B-Ce-Y-La-Nd, є складним процесом, що визначається взаємодією термодинамічних і кінетичних факторів. Термодинамічна рівновага (рівність μ_i) визначає розподіл елементів між фазами: тверді розчини (γ -матриця), інтерметаліди (γ'), карбіди (MC, M₂₃C₆) і бориди (M₃B₂) формуються залежно від спорідненості елементів. У жароміцних сплавах системи Ni-Al-Cr-Mo-W-Ta-Co-Ru-Re-B-Ce-Y-La-Nd такі елементи як Ni, Co, Cr, Mo, W, Ru, Re формують γ -матрицю, Al, Ta і частково Re утворюють γ' -фазу, Cr, Mo, W, Ta – карбіди, а B, Ce, Y, La, Nd зміцнюють межі зерен і підвищують жаростійкість. Дифузійні процеси (закон Фіка) впливають на кінетику: повільна дифузія Re і Ru ($D \approx 10^{-13}$ м²/с) підвищує опір повзучості, а швидка дифузія B і Y по межах зерен ($D_{\text{меж}} \approx 10^{-9}$ м²/с) покращує жаростійкість. Наприклад, додавання 3% Re знижує швидкість коалесценції

γ' -фази на 25%, що подовжує термін служби сплаву до 10 000 годин при 1373 К.

Евтектичні процеси формують ламелярні або глобулярні структури, що впливають на зносостійкість і пластичність, а евтектоїдні перетворення, які утворюють ламелярні структури, рідкісні в Ni-сплавах через стабільність γ -матриці. У сплавах типу CMSX-4 легування Re, Ru і рідкоземельними елементами забезпечує робочу температуру до 1373К, але потребує точного контролю складу для уникнення ТЩУ-фаз і крихкості. Наприклад, додавання 0,01% Y підвищує адгезію оксидних плівок, знижуючи швидкість окислення на 30% при циклічному нагріванні. Сучасні методи, такі як CALPHAD, дозволяють точно прогнозувати фазовий склад і оптимізувати склад сплавів для авіаційних і енергетичних застосувань. Наприклад, CALPHAD-моделювання дозволяє прогнозувати об'ємну частку γ' -фази з точністю до 5%, що допомагає розробляти сплави з оптимальним балансом міцності та пластичності. Загалом, фазоутворення в багатокомпонентних сплавах залежить від балансу термодинамічних і кінетичних факторів, а контроль складу, дифузії та умов обробки є ключовим для досягнення оптимальних властивостей у високотемпературних застосуваннях. Дослідження фазових перетворень, включаючи кристалізацію та твердофазні перетворення, залишаються важливими для розробки нових матеріалів із покращеними характеристиками.

Бібліографічний перелік

1. Мазур В. І., Мазур О. В. Введення в теорію сплавів : учебное пособие по дисциплинам "Материаловедение", "Металловедение и термическая обработка металлов". Дніпропетровськ : Лира, 2009. 264 с. ISBN 978-966-383-204-3.
2. Smallman R. E., Bishop R. J. Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering. 6th ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 1999. 448 p.
3. Cahn R. W., Haasen P. Physical Metallurgy. 4th ed. Amsterdam : Elsevier, 1996. 2880 p.
4. Donachie M. J., Donachie S. J. Superalloys: A Technical Guide. 2nd ed. Materials Park, OH : ASM International, 2002. 439 p.
5. Zhang Y., Zhou Y. J., Lin J. P. et al. Solid-Solution Phase Formation Rules for Multi-component Alloys. Advanced Engineering Materials. 2008. Vol. 10, No. 6. P. 534–538.
6. Reed R. C. The Superalloys: Fundamentals and Applications. Cambridge : Cambridge University Press, 2006. 372 p.
7. Sims C. T., Stoloff N. S., Hagel W. C. Superalloys II: High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power. New York : Wiley, 1987. 614 p.
8. Lai G. Y. High-Temperature Corrosion and Materials Applications. Materials Park, OH : ASM International, 2007. 461 p.
9. Callister W. D., Rethwisch D. G. Materials Science and Engineering: An Introduction. 9th ed. Hoboken, NJ : Wiley, 2014. 984 p.
10. Pollock T. M., Tin S. Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure, and Properties. Journal of Propulsion and Power. 2006. Vol. 22, No. 2. P. 361–374.
11. Yeh A. C., Tin S. Effects of Ru and Re Additions on the High-Temperature Stability of Ni-Based Superalloys. Metallurgical and Materials Transactions A. 2006. Vol. 37, No. 9. P. 2621–2631.
12. Saunders N., Miodownik A. P. CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams): A Comprehensive Guide. Oxford : Pergamon, 1998. 479 p.
13. Lukas H. L., Fries S. G., Sundman B. Computational Thermodynamics: The CALPHAD Method. Cambridge : Cambridge University Press, 2007. 324 p.
14. Gessinger G. H. High-Temperature Materials: Nickel-Based Superalloys. Materials Science and Engineering. 1984. Vol. 65, No. 1. P. 119–132.
15. Wu Q., Song Y. et al. Role of Yttrium in the Oxidation Resistance of Ni-Based Superalloys. Corrosion Science. 2008. Vol. 50, No. 6. P. 1678–1685.
16. Caron P., Khan T. Evolution of Ni-Based Superalloys for Single Crystal Gas Turbine Blade Applications. Aerospace Science and Technology. 1999. Vol. 3, No. 8. P. 513–523.
17. Warren P. J., Cerezo A. Rhenium Distribution in Ni-Based Superalloys and Its Effect on Creep Properties. Materials Science and Engineering: A. 1998. Vol. 250, No. 1–2. P. 88–92.
18. O'Hara K. S., Suzuki W. M. et al. The Effects of Ruthenium Additions on the Microstructure and Properties of Ni-Based Superalloys. Superalloys 2004. Warrendale, PA : TMS, 2004. P. 911–920.
19. Pint B. A. Oxidation Behavior of Ni-Based Superalloys with Reactive Element Additions. Oxidation of Metals. 1997. Vol. 48, No. 3–4. P.303–328.
20. Gleeson B. Thermal Barrier Coatings for Aeroengine Applications. Journal of Propulsion and Power. 2006. Vol. 22, No. 2. P. 375–383.

21. Erickson G. L. The Development and Application of CMSX-10. Superalloys 1996. Warrendale, PA : TMS, 1996. P. 35–44.
22. MacKay R. A., Nathal M. V. The Role of Tantalum in Ni-Based Superalloys. Superalloys 1992. Warrendale, PA : TMS, 1992. P.207–216.
23. Liu L. R., Jin T. et al. Effect of Tantalum on the Microstructure and Properties of Ni-Based Superalloys. Materials Science and Engineering: A. 2008. Vol. 479, No. 1–2. P.351–357.
24. Zhang J., Singer R. F. Effect of Boron on the Microstructure and Properties of Ni-Based Superalloys. Acta Materialia. 2004. Vol. 52, No. 16. P.4801–4810.
25. Chen W., Chaturvedi M. C. Effect of Boron on the Microstructure and Mechanical Properties of Ni-Based Superalloys. Materials Science and Engineering: A. 1997. Vol. 229, No. 1–2. P. 163–168.
26. Kattner U. R. Thermodynamic Modeling of Multicomponent Phase Equilibria. JOM. 1997. Vol. 49, No. 12. P.14–19.
27. Porter D. A., Easterling K. E., Sherif M. Y. Phase Transformations in Metals and Alloys. 3rd ed. Boca Raton, FL : CRC Press, 2009. 520 p.

References

1. Mazur V. I., Mazur O. V. *Introduction to the Theory of Alloys: A Textbook for the Disciplines "Materials Science", "Metallography and Heat Treatment of Metals"*. Dnipropetrovsk: Lira, 2009. 264 p. ISBN 978-966-383-204-3.
2. Smallman R. E., Bishop R. J. Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering. 6th ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 1999. 448 p.
3. Cahn R. W., Haasen P. Physical Metallurgy. 4th ed. Amsterdam : Elsevier, 1996. 2880 p.
4. Donachie M. J., Donachie S. J. Superalloys: A Technical Guide. 2nd ed. Materials Park, OH : ASM International, 2002. 439 p.
5. Zhang Y., Zhou Y. J., Lin J. P. et al. Solid-Solution Phase Formation Rules for Multi-component Alloys. Advanced Engineering Materials. 2008. Vol. 10, No. 6. P. 534–538.
6. Reed R. C. The Superalloys: Fundamentals and Applications. Cambridge : Cambridge University Press, 2006. 372 p.
7. Sims C. T., Stoloff N. S., Hagel W. C. Superalloys II: High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power. New York : Wiley, 1987. 614 p.
8. Lai G. Y. High-Temperature Corrosion and Materials Applications. Materials Park, OH : ASM International, 2007. 461 p.
9. Callister W. D., Rethwisch D. G. Materials Science and Engineering: An Introduction. 9th ed. Hoboken, NJ : Wiley, 2014. 984 p.
10. Pollock T. M., Tin S. Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure, and Properties. Journal of Propulsion and Power. 2006. Vol. 22, No. 2. P. 361–374.
11. Yeh A. C., Tin S. Effects of Ru and Re Additions on the High-Temperature Stability of Ni-Based Superalloys. Metallurgical and Materials Transactions A. 2006. Vol. 37, No. 9. P. 2621–2631.
12. Saunders N., Miodownik A. P. CALPHAD (Calculation of Phase Diagrams): A Comprehensive Guide. Oxford : Pergamon, 1998. 479 p.
13. Lukas H. L., Fries S. G., Sundman B. Computational Thermodynamics: The CALPHAD Method. Cambridge : Cambridge University Press, 2007. 324 p.
14. Gessinger G. H. High-Temperature Materials: Nickel-Based Superalloys. Materials Science and Engineering. 1984. Vol. 65, No. 1. P. 119–132.
15. Wu Q., Song Y. et al. Role of Yttrium in the Oxidation Resistance of Ni-Based Superalloys. Corrosion Science. 2008. Vol. 50, No. 6. P. 1678–1685.
16. Caron P., Khan T. Evolution of Ni-Based Superalloys for Single Crystal Gas Turbine Blade Applications. Aerospace Science and Technology. 1999. Vol. 3, No. 8. P. 513–523.
17. Warren P. J., Cerezo A. Rhenium Distribution in Ni-Based Superalloys and Its Effect on Creep Properties. Materials Science and Engineering: A. 1998. Vol. 250, No. 1–2. P. 88–92.
18. O'Hara K. S., Suzuki W. M. et al. The Effects of Ruthenium Additions on the Microstructure and Properties of Ni-Based Superalloys. Superalloys 2004. Warrendale, PA : TMS, 2004. P. 911–920.
19. Pint B. A. Oxidation Behavior of Ni-Based Superalloys with Reactive Element Additions. Oxidation of Metals. 1997. Vol. 48, No. 3–4. P.303–328.
20. Gleeson B. Thermal Barrier Coatings for Aeroengine Applications. Journal of Propulsion and Power. 2006. Vol. 22, No. 2. P. 375–383.
21. Erickson G. L. The Development and Application of CMSX-10. Superalloys 1996. Warrendale, PA : TMS, 1996. P. 35–44.
22. MacKay R. A., Nathal M. V. The Role of Tantalum in Ni-Based Superalloys. Superalloys 1992. Warrendale, PA : TMS, 1992. P.207–216.
23. Liu L. R., Jin T. et al. Effect of Tantalum on the Microstructure and Properties of Ni-Based Superalloys. Materials Science and Engineering: A. 2008. Vol. 479, No. 1–2. P.351–357.

24. Zhang J., Singer R. F. Effect of Boron on the Microstructure and Properties of Ni-Based Superalloys. *Acta Materialia*. 2004. Vol. 52, No. 16. P.4801–4810.
25. Chen W., Chaturvedi M. C. Effect of Boron on the Microstructure and Mechanical Properties of Ni-Based Superalloys. *Materials Science and Engineering: A*. 1997. Vol. 229, No. 1–2. P. 163–168.
26. Kattner U. R. Thermodynamic Modeling of Multicomponent Phase Equilibria. *JOM*. 1997. Vol. 49, No. 12. P.14–19.
27. Porter D. A., Easterling K. E., Sherif M. Y. *Phase Transformations in Metals and Alloys*. 3rd ed. Boca Raton, FL : CRC Press, 2009. 520 p.

Skachkov Viktor, professor, doctor of technical sciences, Zaporizhia National University, ORCID: 0000-0002-4447-4641

Kurinyi Maksym, PhD student, Zaporizhia National University, ORCID: 0009-0004-5752-8954

Bekhter Ruslan, chief metallurgist of JSC "Ivchenko-Progres"

Hnatyshak Andrii, PhD student, Zaporizhia National University, ORCID: 0009-0007-3248-1733

ANALYSIS OF PHASE FORMATION PROCESSES IN COMPLEX ALLOYS

The study focuses on the phase formation processes in heat-resistant nickel alloys, which are critically important for the aviation and energy industries. These alloys operate under extreme conditions of high temperatures (up to 1373K) and mechanical stresses, particularly in turbine blades of aircraft engines, where exceptional strength and durability are required.

In multicomponent systems, the interaction of numerous elements leads to the formation of solid solutions (γ -matrix), intermetallic compounds (γ' -phase), carbides (MC, $M_{23}C_6$), borides (M_3B_2), and oxide films. Thermodynamic principles, particularly Gibbs free energy minimization, determine the stability of these phases, while kinetic factors, such as atomic diffusion, influence their formation rate.

The main phases in nickel alloys include: γ -matrix – a solid solution based on nickel with a face-centered cubic structure, ensuring plasticity; γ' -phase ($Ni_3(Al, Ta)$) – an intermetallic compound occupying up to 70% of the alloy volume in materials like CMSX-4 and serving as the primary strengthening phase; carbides, which enhance wear resistance; borides, which strengthen grain boundaries; oxide films, which protect against oxidation and reduce its rate by 30–40% at 1373K.

Each alloying element plays a specific role: nickel forms the base; aluminum and tantalum contribute to γ' -phase formation; chromium, molybdenum, and tungsten promote carbide formation; boron strengthens grain boundaries; rhenium and ruthenium slow diffusion, increasing creep resistance; rare-earth elements (Ce, Y, La, Nd) form protective oxide films, improving heat resistance.

Heat treatment optimizes the γ' -phase particle size (30–40 nm), increasing strength by 10–15%. Adjusting the alloy composition ensures phase balance, preventing harmful topologically close-packed phases, such as the σ -phase. Cooling rate control affects element segregation, and diffusion management, particularly using rhenium, which slows diffusion by 20–30%, enhances durability (Rhenium effect).

Keywords: phase formation, heat-resistant alloys, nickel, γ' -phase, carbides, borides, diffusion, heat treatment, alloying elements, creep resistance, corrosion resistance.

Таратута Костянтин Васильович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-6671-9670

Бондаренко Юлія Володимирівна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-3978-1604

Явтушенко Ганна Володимирівна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-1112-5426

ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ВОЛОЧІННЯ ДРОТУ ЧЕРЕЗ ПОДВІЙНІ ВОЛОКИ

Робота присвячена процесу визначення напруження волочіння дроту, при його протягуванні через подвійні волокни розташовані послідовно, без проміжних накопичувальних пристроїв. При виробництві дроту малого перерізу способом холодного волочіння спостерігається значний знос волочильних волок (філь'єр). Це призводить до відхилень готового профілю, як за формою так і за розмірами. У зв'язку з цим потрібно удосконалювати технологію волочіння, за рахунок застосування засобів зменшення зносу філь'єр. Для зменшення зносу волок необхідно враховувати як технічні так і технологічні фактори виробництва.

До основних напрямків щодо збільшення ресурсу волочильного інструменту можна віднести: використання нових зносостійких матеріалів при виробництві волок; зниження тертя у зоні деформації за рахунок використання нових мастильних матеріалів, забезпечення стабільного процесу подачі мастила, використання способів вібраційного волочіння та волочіння з протинатягом; забезпечення ефективного процесу охолодження волок; використання обладнання для якісної підготовки дроту до волочіння, удосконалення технологічних режимів волочіння.

Основне завдання дослідження спрямоване на аналіз напружено-деформаційного стану металу при волочінні дроту з протинатягом, що створюється за рахунок застосування додаткової (чорнової) волоки. Зазначені дослідження дозволять розробляти раціональні маршрути волочіння, зменшити знос волок та збільшити продуктивність процесу.

Традиційний спосіб виробництва дроту зазвичай не передбачає застосування протинатягу на чистових операціях. Виняток складає прямоточні волочильні стани працюючі з протинатягом. Протинатяг на цих волочильних станах створюється за рахунок регулювання частоти обертання тягнучих барабанів. Однак застосування протинатягу на волочильних станах інших типів дозволить суттєво вплинути на техніко-економічні показники виробництва.

Отримані у дослідженні результати показують, що застосування протинатягу при волочінні дроту створює додаткові розтягуючі напруження у металі. Створення пружних та пружно-пластичних деформацій від протинатягу дозволяє знизити стискаючі напруження в зоні тертя.

Ключові слова: волочіння, дріт, протинатяг, напруження волочіння.

Вступ. Волочіння круглого дроту є найбільш поширеним в даний час процесом, при якому заготовка за допомогою зусилля волочіння протягується через робочий канал волоки, зменшуючи свій діаметр. При цьому за рахунок зменшення розмірів поперечного перерізу дроту відбувається відповідне збільшення його довжини та швидкості руху.

Для дотримання вимог стосовно якості готового дроту та збільшення продуктивності виробництва у технології холодного волочіння досліджуються різноманітні напрямки удосконалення технологічного процесу та волочильного обладнання.

Узагальнюючі напрямки удосконалення процесу волочіння дроту можна розділити на наступні категорії: модернізація обладнання, оптимізація технологічних режимів волочіння, поліпшення мастильних матеріалів, використання нових матеріалів та покриттів для волочильного інструменту [1-3 та ін.].

Модернізація волочильного обладнання зосереджена на впровадженні сучасних волочильних станів оснащених автоматизованими системами управління та моніторингу. Це дозволяє точно контролювати силу натягу та швидкість волочіння, мінімізувати зношування волочильного інструменту, забезпечувати стабільну якість продукції [4-6].

Оптимізація технологічних режимів направлено на удосконалення технологічних параметрів, таких як кут волочіння, швидкість, ступінь обтиснення дроту. Цей напрямок дозволяє знизити внутрішні напруження у матеріалі, скоротити енерговитрати, підвищити міцність дроту [7, 8].

Поліпшення мастильних матеріалів направлено на зниження тертя між дротом та волочильним інструментом. Зазначені заходи призводять до зменшення ймовірності пошкодження поверхні, збільшують термін служби волочильного інструменту, підвищують стабільність процесу волочіння дроту. Сучасні сухі та рідкі мастила з добавками наноматеріалів демонструють високу ефективність [9 – 11].

Удосконалення волочильного інструменту за рахунок застосування збірних інструменту, або виготовлення волок з твердосплавними, алмазними та нітридними покриттями. Зазначений напрямок дозволяє зменшити знос волок, збільшити точність обробки, виготовляти дріт з різноманітних матеріалів [12- 14].

Серед зазначених напрямків удосконалення процесу волочіння окремо слід зазначити використання процесів вібраційного волочіння та використання протинатягу дроту. Ці заходи мають значний вплив на енергосилові параметри процесу волочіння та знос волочильного інструменту [15- 17].

Аналіз досліджень і публікацій. Визначення параметрів процесу волочіння дроту залишається актуальним на протязі багатьох років. Існуючі традиційні технології потребують постійного удосконалення, через нові вимоги як до якості так і до властивостей готової продукції. Основним процесом при виробництві дротів залишається процес волочіння.

У процесі волочіння зусилля витрачається на подолання [18]:

- а) сил, що витрачаються на здійснення основної пластичної деформації;
- б) сил контактного тертя у волочильному каналі;
- в) сили протинатягу;
- г) сил, які витрачаються на здійснення додаткових зрушень.

Для виведення формул, що дозволяють визначити напруження волочіння, найчастіше використовують три методи [19, 20]: метод спільного вирішення рівнянь рівноваги та пластичності, енергетичний метод, метод показників.

Найбільше формул для розрахунку напруження волочіння отримано першим методом. Вигляд і складність цих формул визначаються перш за все прийнятим при виведенні законом контактного тертя, формою поздовжнього профілю робочої зони, а також способом обліку зміцнення металу та впливу довжини зони деформації [21].

Однією з формул, яка враховує вплив напруження протинатягу, є формула Тарнавського А.Л. [22]

$$\sigma_{\text{вл}} = \sigma_T \left\{ m + q + [1 + \delta(1 - q)] \ln \mu + (1 - q) D \right\} / (1 + m),$$

$$\text{при } D = 1,6\sqrt{\ln \mu} \left(\sin \alpha \sqrt{tg \alpha} + f^2 \sqrt{ctg \alpha} \right); \quad q = \sigma_o / \sigma_T; \quad m = 4 fl_{\kappa} / d_1 \quad (1)$$

де α – кут нахилу твірної каналу волоки до осі, μ – коефіцієнт витяжки металу, f – коефіцієнт тертя, σ_o – напруження протинатягу, σ_T – середнє значення межі плинності

матеріалу у деформаційній зоні, l_k – довжина циліндричної ділянки волоки (калібруючого пояска), d_f – кінцевий діаметр дроту.

Вираз (1) включає напруження протинатягу, та враховує довжину пояска, що калібрує, і кінцевий діаметр дроту.

Формула Зикова Ю.С. [23] враховує поворот ліній струму на вході у осередок деформації та на виході металу з осередку деформації додаванням коефіцієнта $\frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha$.

У формулі (2) напруження протинатягу збільшує загальне значення напруження волочіння.

$$\sigma_{\text{вл}} = \sigma_T \left\{ \left[f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_n \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{\text{ex}}}{\sigma_T} \right) + 1 \right] \ln \mu + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_n \right\} + \sigma_o, \quad (2)$$

де $\sigma_{\text{ex}} = \sigma_o + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha_n \cdot \sigma_T$, α_n – приведений кут волочильного каналу.

Найбільш теоретично обґрунтованою можна вважати формулу Перліна І.Л. [18]. Вона має наступний вигляд:

$$\sigma_{\text{вл}} = \frac{1}{\cos^2 \left(\frac{\alpha + \rho}{2} \right)} \sigma_T \frac{\delta + 1}{\delta} \left[1 - \left(\frac{S_1}{S_0} \right)^\delta \right] + \sigma_0 \left(\frac{S_1}{S_0} \right)^\delta, \quad (3)$$

де $\alpha = \cos^2 \rho (1 + f \operatorname{ctg} \alpha_n) - 1$; ρ – кут тертя; α_n – приведений кут волочильного каналу.

Для практичних розрахунків часто застосовують спрощені формули Перліна І.Л. При малих значеннях кута α_n та коефіцієнта тертя складові рівняння (3) спрощуються та набувають вигляду $\cos^2 \rho \approx 1$, $\delta = f \cdot \operatorname{ctg} \alpha_n$, $\frac{1}{\cos^2 \left(\frac{\alpha + \rho}{2} \right)} \approx 1$.

У цьому випадку формула (3) набуває наступного вигляду.

$$\sigma_{\text{вл}} = \sigma_T \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha_n}{f} \right) \left[1 - \left(\frac{S_1}{S_0} \right)^{\frac{f}{\operatorname{tg} \alpha_n}} \right] + \sigma_0 \left(\frac{S_1}{S_0} \right)^{\frac{f}{\operatorname{tg} \alpha_n}}. \quad (4)$$

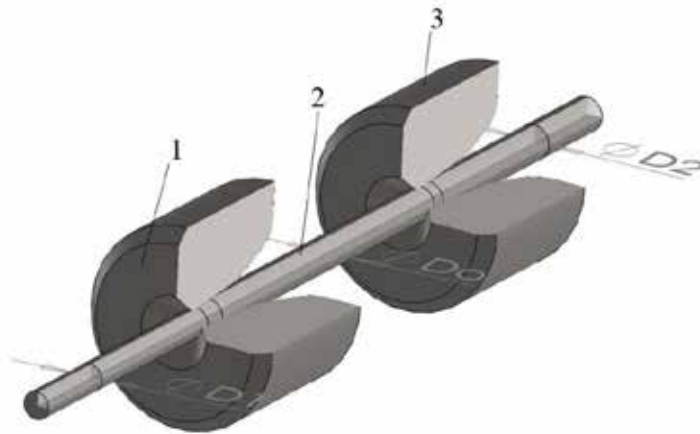
Якщо припустити, що $\left(\frac{S_1}{S_0} \right)^{\frac{f}{\operatorname{tg} \alpha_n}} \cong 1 - \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha_n} \ln \frac{S_0}{S_1}$, то формула І.Л. Перліна отримає подальше спрощення.

$$\sigma_{\text{вл}} = \ln \frac{S_0}{S_1} \left[\sigma_T (1 + f \operatorname{ctg} \alpha_n) + \sigma_0 \left(1 - \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha_n} \right) \right]. \quad (5)$$

З формули (5) видно, що при $f > \operatorname{tg} \alpha_n$, напруження протинатягу буде знижувати загальне напруження волочіння, а якщо $f < \operatorname{tg} \alpha_n$ – збільшувати. Можливий випадок, коли напруження протинатягу не впливатиме на зміну напруження волочіння. Таким чином, очевидно неоднозначний вплив напруження протинатягу на загальне напруження волочіння. Для оцінки цього впливу необхідно знати точні значення коефіцієнта тертя та кута нахилу твірної волоки. Подальше вдосконалення формул щодо визначення напруження волочіння необхідно проводити в області уточнення перерахованих вище факторів.

Результати дослідження. Нижче представлений дещо інший теоретичний підхід до оцінки впливу протинатягу при теоретичному вирішенні задачі визначення напруження волочіння.

Дослідження виконані на установці, що здійснює волочіння через дві послідовно встановлені волокни, чорнову та чистову. Причому чорнова волокна створює протинатяг у чистовій волочі. Для регулювання величини протинатягу використовувалась заготовка різного перерізу, тобто при збільшенні перерізу заготовки величина напруження протинатягу збільшується.



1 – чистова волокна (переріз), 2 – дріт, 3- чорнова волокна (переріз)

Рисунок 1 – Модель процесу волочіння дроту з протинатягом через подвійні волокни

З огляду на наявність експериментальних даних, отримаємо формули, визначення напруження волочіння через подвійні волокни, використовуючи метод спільного розв'язання спрощених рівнянь рівноваги і пластичності.

При отриманні формули зроблено такі припущення:

- а) напруження σ_x і нормальні контактні напруження p є головними напруженнями, напруження σ_x рівномірно розподілено по всій площі перерізу профілю і не залежить від координати r ;
- б) напруження контактної тертя визначається законом $\tau_x = fp$;
- в) межа плинності деформованого металу по всій довжині зони деформації постійна і дорівнює її середньому значенню σ_T ;
- г) зони позаконтактної деформації на вході у волокно та на виході з неї відсутні.
- д) чорнова та чистова волокни не з'єднані між собою.

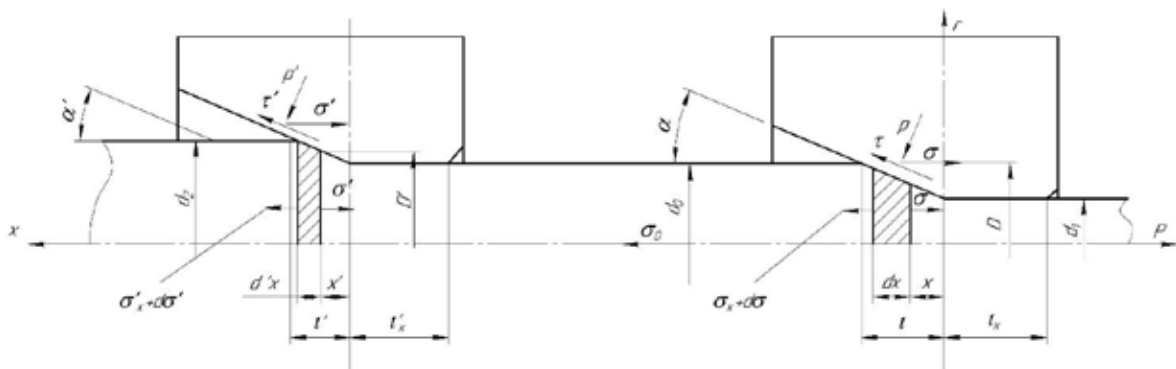


Рисунок 2 – Схема осередку деформації при волочінні дроту з протинатягом через подвійні волокни

Спочатку отримаємо рівняння напруження волочіння у чистовій волоці, враховуючі, що остання не впливає на процес волочіння у чорновій волоці.

Виділимо в осередку деформації чистової волоки (рис. 2) вертикальними перерізами на відстанях x і $x+dx$ від початку координат елемент металу довжиною dx , по бічних площях якого F_x і F_x+dF_x діють усереднені напруження розтягування σ_x і $d\sigma_x$, а по контактній поверхні – нормальні p і дотичні напруження. Диференціальне рівняння рівноваги сил, прикладених до елемента чистової волоки щодо осі волочіння, виглядає таким чином:

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(F_x + dF_x) - \sigma_x F_x + p\pi D_x dx \operatorname{tg} \alpha + \tau \pi D_x dx = 0, \quad (4)$$

де D_x – діаметр перерізу на відстані x ; F_x – площа перерізу на відстані x ; dF_x – зміна площі перерізу осередку деформації чистової волоки; α – кут нахилу твірної каналу чистової волоки.

Нехтуючи через малість величини $d\sigma_x dF_x$, з урахуванням виразів $F_x = \pi D_x^2 / 4$; $dF_x = \pi D_x dD_x / 2$; $dD_x = 2dx \cdot \operatorname{tg} \alpha$; $dF_x = \pi D_x dx \cdot \operatorname{tg} \alpha$, рівняння (4) приводимо до наступного вигляду:

$$d\sigma_x + (\sigma_x + p + \tau \cdot \operatorname{ctg} \alpha) \frac{dF_x}{F_x} = 0. \quad (5)$$

Приймаємо наближення $\sigma_r = -p$. Рівняння (5) включає дві невідомі σ_r і p . В якості другого рівняння застосуємо рівняння пластичності вісесиметричної задачі у спрощеному вигляді:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_T, \quad (6)$$

де σ_1 , σ_3 – відповідно максимальне та мінімальне головне напруження, σ_T – межа плинності матеріалу дроту.

Прийнявши відповідно до прийнятих припущень $\sigma_1 = \sigma_x$ і $\sigma_3 = \sigma_r = -p$, $\tau_x = fp$ рівняння (5) після інтегрування набуде вигляду:

$$\ln \left(d\sigma_x - \frac{\delta + 1}{\delta} \sigma_T \right) = \delta \cdot \ln F_x + C, \quad (7)$$

де $\delta = f \cdot \operatorname{ctg} \alpha$ – коефіцієнт, що враховує вплив тертя.

Постійна інтегрування знаходиться з умов на вході в осередок деформації чистової волоки. При $x=l$, $F_x=F_0$, $\sigma_x=\sigma$ з (7) отримаємо:

$$C = \ln \left(\sigma - \frac{\delta + 1}{\delta} \sigma_T \right) - \delta \cdot \ln F_0, \quad (8)$$

де σ – горизонтальне напруження в площині входу металу в осередок деформації чистової волоки.

Після перетворень отримаємо:

$$\sigma_x = \sigma_T \frac{\delta + 1}{\delta} \left[1 - \left(\frac{F_x}{F_0} \right)^\delta \right] + \sigma \left(\frac{F_x}{F_0} \right)^\delta. \quad (9)$$

Напруження на вході у осередок деформації в чистовій волоці визначаємо з умови:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot \xi = \sigma_0 \left(\frac{\sigma_{\text{вл.1}} - \sigma_{\text{вл.2}}}{\sigma_0} \right), \quad (10)$$

де $\xi = \frac{\sigma_{вл.1} - \sigma_{вл.2}}{\sigma_0}$ – коефіцієнт, що враховує зміну напруження волочіння в чистовій

волоці за рахунок протинатягу, $\sigma_{вл.1}$, $\sigma_{вл.2}$ – експериментальні значення напруження волочіння в чистовій волоці відповідно з протинатягом та за відсутності протинатягу.

Якщо $\sigma_{вл.1} < \sigma_{вл.2}$, то коефіцієнт ξ отримує негативне значення, і якщо $\sigma_{вл.1} > \sigma_{вл.2}$, то коефіцієнт ξ – величина позитивна.

Приймаючи $x=0$, $F_x=F_b$, $F_0/F_l=\mu$ і додаючи складову, що враховує напруження зрізу на вході у волоку – $\sigma_{ср.}$ [22] з виразу (9) отримуємо:

$$\sigma_{вл.1} = \sigma_T \left(\frac{\delta+1}{\delta} \right) \cdot (1 - \mu^{-\delta}) + \sigma_0 \cdot \xi \mu^{-\delta} + \sigma_{ср.}, \quad (11)$$

де $\sigma_{ср.}$ – напруження зрізу на вході у чистову волоку.

Враховуючи, що напруження протинатягу створюється чорною волокою, прийmemo:

$$\sigma_0 = \sigma' \quad (12)$$

де σ' – напруження волочіння у чорновій волоці.

Напруження волочіння у чорновій волоці визначаємо за формулою (3) при нульовому значенні останнього складника:

$$\sigma' = \frac{1}{\cos^2 \left(\frac{\alpha' + \rho'}{2} \right)} \sigma'_T \frac{\delta'+1}{\delta'} \left[1 - \left(\frac{S_2}{S_0} \right)^\delta \right] \quad (13)$$

де ρ' – кут тертя у чорновій волоці; α' – кут волочильного каналу чорної волоки, $\delta' = f' \cdot \operatorname{ctg} \alpha'_n$ – коефіцієнт, що враховує вплив тертя у чорновій волоці, α'_n – приведений кут волочильного каналу чорної волоки, f' – коефіцієнт тертя у чорновій волоці, σ'_T – середнє значення межі плинності матеріалу у деформаційній зоні чорної волоки.

Напруження $\sigma_{ср.}$ що входить до (11) із [24] дорівнює $\sigma_{ср.} = 0,77 \cdot \sigma_T \cdot \operatorname{tg} \alpha$.

Якщо прийняти спрощення, рекомендоване І.Л. Перлиним [18], $\mu^\delta = \delta \ln \mu$, то отримаємо остаточну формулу:

$$\sigma_{вл.1} = \sigma_T \left[\delta \left(1 - \frac{\xi \cdot \sigma_0}{\sigma_T} \right) + 1 \right] \cdot \ln \mu + 0,77 \sigma_T \cdot \operatorname{tg} \alpha + \sigma_0 \cdot \xi, \quad (14)$$

де $\sigma_{вл.1}$, σ_0 – відповідно напруження волочіння в чистовій волоці та напруження протинатягу; σ_T – середня межа плинності металу в осередку деформації чистової волоки.

Середня межа плинності дорівнює алгебраїчної напіврізності між величинами межі плинності металу на вході у осередок деформації та на виході.

Наявність експериментальних значень σ_T та σ_0 дозволяють з достатньою точністю визначити коефіцієнт ξ .

Частина експериментальних даних щодо впливу протинатягу на напруження волочіння в чистовій волоці представлено в табл. 1.

Висновки. Досліди показують, що напруження волочіння в чистовій волоці за відсутності протинатягу більше, ніж за наявності протинатягу, при цьому коефіцієнт ξ залишається постійним. Це можна пояснити тим, що пропорційно до збільшення протинатягу знижується напруження волочіння в чистовій волоці. Напруження волочіння знижується, якщо $\xi < 0$. Це свідчить про те, що наявність протинатягу сприяє зниженню напруження волочіння в чистовій волоці.

Таким чином, отриману теоретичну залежність для напруження волочіння, можна використовувати для розрахунку напруження волочіння з урахуванням впливу протинатягу дроту.

Таблиця 1 – Параметри процесу волочіння дроту марки БСТОМ з протинатягом у подвійних волоках

Діаметр дроту до волочіння, мм	Діаметр дроту після чорнової волоки, мм	Діаметр дроту після волочіння, мм	Коефіцієнт витяжки у чорновій волоці	Коефіцієнт витяжки у чистовій волоці	Швидкість волочіння, м/с	Межа плинності металу до та після волочіння, Н/мм ²		Середня межа плинності в осередку деформації, Н/мм ²	Напруження протинатягу, Н/мм ²	Напруження волочіння в чистовій волоці з протинатягом та без протинатягу, Н/мм ²			Коефіцієнт
d_2	d_0	d_1	μ_2	μ_1	v	σ_{T2}	σ_{T1}	σ_T	σ_2	$\sigma_{вл0}$	$\sigma_{вл.1}$	ζ	
2,48	2,31	1,97	1,15	1,38	0,8	418	535	477	167	226,2	291,8	-0,393	
					1,5				161,8	196,6	265,2	-0,424	
					2				157,5	178,5	253,0	-0,473	
					2,5				155,1	165,8	244,5	-0,507	
1,97	1,91	1,63	1,06	1,37	0,8	541	608	582	125,9	334,9	370,8	-0,285	
					1,5				123,0	293,7	340,0	-0,376	
					2				120,7	270,9	326,0	-0,457	
					2,5				119,9	257,2	318,1	-0,508	
1,63	1,57	1,33	1,08	1,39	0,8	641	610	631	238,3	356,1	462,4	-0,446	
					1,5				225,5	306,2	416,2	-0,488	
					2				217,1	273,5	392,1	-0,546	
					2,5				211,4	250,0	375,5	-0,594	

Бібліографічний перелік

1. Effect of Process Parameters in Copper-Wire Drawing / G. A. Santana Martinez et al. Metals. 2020. Vol. 10, no. 1. P. 105. URL: <https://doi.org/10.3390/met10010105>
2. Vega G., Haddi A., Imad A. Investigation of process parameters effect on the copper-wire drawing. Materials & Design. 2009. Vol. 30, no. 8. P. 3308–3312. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.12.006>
3. Simulation of a copper micro-wire drawing for electronics / A. V. Volkov et al. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 537. P. 032054. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/537/3/032054>
4. Fabrication of wire drawing machine / Nihal Kumar Dasoju et al. International Journal of Science and Research Archive. 2023. Vol. 9, no. 2. P. 123–134. URL: <https://doi.org/10.30574/ijsra.2023.9.2.0507>
5. Experimental Measurements of System Dynamics Between Two Stages of Wire Drawing Machine / G. Tasevski et al. Archive of Mechanical Engineering. 2015. Vol. 62, no. 1. P. 61–72. URL: <https://doi.org/10.1515/meceng-2015-0004>
6. Experimental Determination and Calculation of the Wire Drawing Force in Monolithic Dies on Straight-Line Drawing Machines / L. V. Radionova et al. Machines. 2023. Vol. 11, no. 2. P. 252. URL: <https://doi.org/10.3390/machines11020252>
7. Підвищення ефективності технологічних процесів волочіння і прокатки в умовах раціонального використання сил сухого і напіврідинного тертя під впливом зовнішніх вібрацій / Ю. Малиновський та ін. Problems of Friction and Wear. 2024. № 1(102). С. 101–125. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(102\).18434](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(102).18434)
8. Грибков Е. П., Малигін С. О., Бережна О. В. Математичне моделювання напружено-деформованого стану під час волочіння порошкового дроту з металевим сердечником. Обробка матеріалів тиском. 2024. № 1(53). С. 34–42. URL: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1\(53\)34](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1(53)34)

9. Tribological performance of modified graphene as an additive in copper wire drawing lubricant / X. Lang et al. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1108/ilt-10-2024-0399>
10. Experimental-numerical analysis to determine the efficiency of industrial lubricants in wire drawing process / T. Gomes dos Santos et al. *Revista de Metalurgia*. 2023. Vol. 59, no. 1. P. e234. URL: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.234>
11. Trukhanovich A. A., Ledneva A. A. Lubricants for dry wire drawing. *Steel in Translation*. 2009. Vol. 39, no. 6. P. 510–511. URL: <https://doi.org/10.3103/s0967091209060187>
12. Tang Q. S., Yang Y. H. Fabrication and Application of CVD Diamond-Coated Copper Wire Drawing Die. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 328-330. P. 1182–1187. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.328-330.1182>
13. Lo S.-W., Lu Y.-H. Wire drawing dies with prescribed variations of strain rate. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. Vol. 123, no. 2. P. 212–218. URL: [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(02\)00033-x](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(02)00033-x)
14. Yang X. Friction and wear behaviors of Al_2O_3 -based ceramic composite using as wire drawing dies. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2006. Vol. 42, supp. P. 121. URL: <https://doi.org/10.3901/jme.2006.supp.121>
15. Добров И. В. Новый метод определения коэффициента трения при волочении // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2000. № 4. С. 51-54.
16. Experimental study on titanium wire drawing with ultrasonic vibration / S. Liu et al. *Ultrasonics*. 2018. Vol. 83. P. 60–67. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.08.003>
17. Ultra-fine high-carbon steel wire drawing with ultrasonic vibration / H. Cao et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 531. P. 012027. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/531/1/012027>
18. Перлин И.Л. Ерманок М.З. Теория волочения. *Металлургия*, 1971. 447 с.
19. Добров И.В., Гарнави Н.Я., Гарнави О.Н. Математическое моделирование формоизменения пластического материала в конусном калибре // *Теория и практика металлургии*, 2000. № 3. С. 53-56.
20. Ніколаєв В. О. Теорія волочіння металу. Навчальний посібник. – Запоріжжя, ЗДІА, 2000. 155с.
21. Troost Alex, Akin Okan, Boffin Reinhold. Zi ehkraft founeln beim Drahf ziehen // *Draht*. 1992. № 9. P. 732 – 735
22. Тарнавский А.Л. Эффективность волочения с противонатяжением. – М.:Металлургия, 1959. 151с.
23. Теория волочения сплошных профилей. Учебное пособие / Ю.О. Зыков. – Киев: УМК ВО, 1991. 116с.
24. G. D. S. McLellan.// *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1948, 158. № 111. P. 347-356.

References

1. Effect of Process Parameters in Copper-Wire Drawing / G. A. Santana Martinez et al. *Metals*. 2020. Vol. 10, no. 1. P. 105. URL: <https://doi.org/10.3390/met10010105>
2. Vega G., Haddi A., Imad A. Investigation of process parameters effect on the copper-wire drawing. *Materials & Design*. 2009. Vol. 30, no. 8. P. 3308–3312. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.12.006>
3. Simulation of a copper micro-wire drawing for electronics / A. V. Volkov et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 537. P. 032054. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/537/3/032054>
4. Fabrication of wire drawing machine / Nihal Kumar Dasoju et al. *International Journal of Science and Research Archive*. 2023. Vol. 9, no. 2. P. 123–134. URL: <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2023.9.2.0507>
5. Experimental Measurements of System Dynamics Between Two Stages of Wire Drawing Machine / G. Tasevski et al. *Archive of Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 62, no. 1. P. 61–72. URL: <https://doi.org/10.1515/meceng-2015-0004>
6. Experimental Determination and Calculation of the Wire Drawing Force in Monolithic Dies on Straight-Line Drawing Machines / L. V. Radionova et al. *Machines*. 2023. Vol. 11, no. 2. P. 252. URL: <https://doi.org/10.3390/machines11020252>
7. Increasing the efficiency of drawing and rolling technological processes in conditions of rational use of dry and semi-liquid friction forces under the influence of external vibrations / Yu. Malinovsky et al. *Problems of Friction and Wear*. 2024. No. 1(102). P. 101–125. URL: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.1\(102\).18434](https://doi.org/10.18372/0370-2197.1(102).18434)

8. Gribkov E. P., Malygin S. O., Berezhna O. V. Mathematical modeling of the stress-strain state during drawing of a flux-cored wire with a metal core. *Materials Processing by Pressure*. 2024. No. 1(53). P. 34–42. URL: [https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1\(53\)34](https://doi.org/10.37142/2076-2151/2024-1(53)34)
9. Tribological performance of modified graphene as an additive in copper wire drawing lubricant / X. Lang et al. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1108/ilt-10-2024-0399>
10. Experimental-numerical analysis to determine the efficiency of industrial lubricants in wire drawing process / T. Gomes dos Santos et al. *Revista de Metalurgia*. 2023. Vol. 59, no. 1. P. e234. URL: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.234>
11. Trukhanovich A. A., Ledneva A. A. Lubricants for dry wire drawing. *Steel in Translation*. 2009. Vol. 39, no. 6. P. 510–511. URL: <https://doi.org/10.3103/s0967091209060187>
12. Tang Q. S., Yang Y. H. Fabrication and Application of CVD Diamond-Coated Copper Wire Drawing Die. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 328-330. P. 1182–1187. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.328-330.1182>
13. Lo S.-W., Lu Y.-H. Wire drawing dies with prescribed variations of strain rate. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002. Vol. 123, no. 2. P. 212–218. URL: [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(02\)00033-x](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(02)00033-x)
14. Yang X. Friction and wear behaviors of Al_2O_3 -based ceramic composite using as wire drawing dies. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2006. Vol. 42, supp. P. 121. URL: <https://doi.org/10.3901/jme.2006.supp.121>
15. Dobrov I. V. A New Method for Determining the Friction Coefficient in Drawing // *Metallurgical and Mining Industry*. 2000. No. 4. P. 51–54.
16. Experimental study on titanium wire drawing with ultrasonic vibration / S. Liu et al. *Ultrasonics*. 2018. Vol. 83. P. 60–67. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2017.08.003>
17. Ultra-fine high-carbon steel wire drawing with ultrasonic vibration / H. Cao et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 531. P. 012027. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/531/1/012027>
18. Perlin I.L., Ermanok M.Z. *Drawing Theory*. Metallurgy, 1971. 447 p.
19. Dobrov I.V., Garnavi N.Ya., Garnavi O.N. Mathematical modeling of plastic material shaping in a cone gauge // *Theory and practice of metallurgy*, 2000. No. 3. P. 53–56.
20. Nikolaev V. O. *Theory of metal drawing*. Textbook. – Zaporizhzhia, ZDIA, 2000. 155p.
21. Troost Alex, Akin Okan, Boffin Reinhold. Zi ehkraft founeln beim Drahf ziehen // *Draht*. 1992. № 9. P. 732 – 735
22. Tarnavsky A.L. Efficiency of drawing with counter-tension. *Metallurgy*, 1959. 151 p.
23. *Theory of drawing solid sections*. Study guide / Yu.O. Zykov. Kyiv: UMK VO, 1991. 116 p.
24. G. D. S. McLellan. // *Journal of the Iron and Steel Institute*. 1948, 158. № 111. P. 347–356.

Taratuta Kostyantyn, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID 0000-0002-6671-9670

Bondarenko Yulia, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-3978-1604

Yavtushenko Hanna, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0003-1112-5426

DETERMINATION OF ENERGY PARAMETERS OF THE WIRE DRAWING PROCESS THROUGH DOUBLE DRAWINGS

This study focuses on determining the wire drawing tension when the wire is pulled through double dies arranged in series without any intermediate storage devices. Significant wear of the drawing dies (spindles) is observed in the production of small-section wire by cold drawing. This leads to deviations in the finished profile in terms of both shape and size. To address this issue, it is necessary to improve the drawing technology by implementing measures to reduce die wear. To achieve this, technical and technological production factors must be considered.

The main ways to increase the service life of the drawing tool are: using new wear-resistant materials to produce dies; reducing friction in the deformation zone using new lubricants and ensuring a stable lubricant supply; using vibration drawing and drawing with counter tension;

ensuring an effective cooling process for the dies; using equipment to prepare the wire for drawing; and improving the drawing process.

The main objective of this study is to analyse the stress-strain state of the metal during wire drawing with counter-tension, created by additional (rough) drawing. These studies will facilitate the development of rational drawing routes, reduce drawing wear and increase process productivity.

Traditional wire production methods usually do not involve the use of counter-tension in finishing operations. An exception is direct-flow drawing mills that operate with counter-tension. On these drawing mills, counter-tension is created by adjusting the speed of the drawing drums. However, using counter-tension on other types of drawing mill will significantly impact the technical and economic performance of production.

The results of the study show that using counter-tension during wire drawing creates additional tensile stresses in the metal. Creating elastic and elastic-plastic deformations from counter-tension reduces compressive stresses in the friction zone.

Keywords: drawing, wire, counter-tension, drawing stress.

Грідяєв Володимир Васильович, старший викладач, доктор філософії, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-7767-4490

Манідіна Євгенія Анатоліївна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-4090-9991

Савельєв Дмитро Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри охорони праці та цивільної безпеки Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», ORCID: 0000-0002-0738-3273

Румянцев Владислав Ростиславович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-4404-3454

Карпенко Ганна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3504-0283

КОМПЛЕКСНА БЕЗПЕКА ЕЛЕКТРИЧНИХ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ В УМОВАХ ВОРОЖИХ ОБСТРІЛІВ: ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКА, ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА ТА ЦИВІЛЬНИЙ ЗАХИСТ

У статті розглянуто питання комплексної безпеки силових трансформаторів в умовах збройної агресії та регулярних обстрілів критичної енергетичної інфраструктури. Акцентовано увагу на необхідності інтеграції трьох взаємопов'язаних складових: електробезпеки, пожежної безпеки та заходів цивільного захисту. Детально проаналізовано наявні методи фізичного захисту трансформаторів. Найбільш доступним та результативним способом захисту трансформаторів від атак дронів-камікадзе є використання бетонних укриттів. Вони надійно захищають від уламків, вибухової хвилі та теплового впливу у разі загорянь поблизу. Проте застосування таких конструкцій потребує обов'язкового врахування одного ключового чинника – дотримання температурного балансу трансформатора. В роботі особливу увагу приділено вивченню впливу таких захисних конструкцій на тепловий режим роботи трансформаторів.

За результатами тривимірного теплотехнічного моделювання трансформатора типу ТМ-1000/10 з урахуванням теплообміну з навколишнім середовищем встановлено, що за відсутності належної вентиляції температура трансформаторного мастила може перевищувати 100 °С вже через одну годину роботи, що істотно підвищує ризик термічного ушкодження ізоляції, виникнення пожежі або повного виходу з ладу енергообладнання. Показано, що основним фактором надійної роботи трансформатора в умовах захисного укриття є забезпечення достатнього повітрообміну. Змодельовано залежність необхідної витрати повітря від допустимого підвищення температури для трансформатора ТМ-1000/10.

Встановлено, що при невеликому допуску на підвищення температури (2–5 °С) потрібні значні витрати повітря – понад 10 000 м³/год, що може бути складно реалізувати у практичних умовах. У діапазоні 10–15 °С витрата повітря знижується до 3000–4000 м³/год – це характерно для систем природної або штучної вентиляції. Додатково розглянуто вплив швидкості повітряного потоку на зниження температурної різниці трансформатора в умовах природної вентиляції. Отримані результати дозволяють кількісно оцінити негативний вплив обмеженого повітрообміну через бетонні укриття на тепловий режим трансформатора і вказують на необхідність врахування вентиляційних умов при проектуванні систем енергозабезпечення в умовах додаткового захисту.

Ключові слова: силовий трансформатор, бетонне укриття, пожежна безпека, електробезпека, вентиляція, тепла модель, гібридна війна

Вступ. В умовах сучасних гібридних і відкритих збройних конфліктів, коли критична інфраструктура часто стає об'єктом атак, особливого значення набуває захист енергетичної системи. Силові трансформатори, як ключові елементи електромережі, вразливі до уражень ракетами, дронами-камікадзе та артилерійськими ударами. Їх виведення з ладу призводить до масштабних відключень електроенергії, порушення роботи промисловості, транспорту та об'єктів цивільного призначення [1,2].

Силові трансформатори зазвичай встановлюються на відкритих майданчиках підстанцій. Вони мають великі габарити, складну конструкцію та використовують масло як охолоджувач і ізолятор. Пряме попадання снаряду або уламків може спричинити: витік і загоряння мастила, руйнування корпусу й активної частини, коротке замикання або повне знищення обладнання.

Оскільки виготовлення та постачання потужного трансформатора може зайняти від кількох місяців до року, кожна втрата – критична.

Відомі такі основні підходи до захисту трансформаторів від ворожих обстрілів [1-3]:

1. Пасивний фізичний захист – це один з найбільш ефективних методів, який використовує:

- бетонні укриття або захисні екрани, які здатні витримати уламки або удар малої ракети;

- земляні вали або габіони, які розсіюють вибухову хвилю та уламки;

- броньовані капсули для трансформаторів (як частина нового підходу до модульного захисту).

2. Маскування і дезорієнтація противника: використання камуфляжних сіток, теплових пасток, імітаторів трансформаторів дозволяє знизити ймовірність прямого влучання. Це особливо актуально при атаках дронів, які орієнтуються на теплові сигнатури.

3. Активні системи ППО: встановлення поблизу критичних підстанцій елементів протиповітряної оборони (ЗРК, ПЗРК, засобів РЕБ) дає змогу знищувати повітряні загрози на підльоті. Найбільшу ефективність демонструє комбінація фізичного захисту та ППО.

4. Резервування і мобільність: використання мобільних трансформаторних підстанцій дозволяє оперативно замінити пошкоджене обладнання та підтримати роботу мережі до відновлення стаціонарного об'єкта.

Постановка завдання. Таким чином, захист трансформаторів це завдання, яке вимагає міждисциплінарної кооперації: енергетиків, інженерів, військових та науковців. Уже зараз в Україні та за кордоном розробляються інноваційні модульні конструкції укриттів, інтелектуальні системи виявлення загроз, інерційні масляні бар'єри, які можуть зменшити наслідки вибуху. Разом із тим, залишається недостатньо опрацьованим напрям аналізу теплонавантаження трансформаторів в умовах часткового або повного укриття, що може мати критичний вплив на їхню працездатність. Захисні конструкції, з одного боку, мають екранувати трансформатори від ударних і термічних чинників, а з іншого – не повинні погіршувати їхнє тепловідведення до навколишнього середовища. Це ставить завдання пошуку оптимального балансу між рівнем фізичного захисту та ефективністю теплових процесів. Отже, необхідно розробити математичну модель оцінки температурного режиму трансформатора з урахуванням параметрів укриття, теплофізичних характеристик середовища та режимів експлуатації. Такий підхід дозволить прогнозувати граничні умови нагріву та уникати аварійних ситуацій, спричинених перегрівом трансформаторного обладнання.

Результати дослідження. Як показав практичний досвід, найбільш ефективним і простим способом захисту трансформаторів від дронів-камікадзе є бетонні укриття (рис. 1). Ці конструкції ефективно стримують уламки, вибухову хвилю, тепловий вплив при загоряннях поблизу. Водночас, використання таких засобів вимагає чіткого врахування одного критично важливого аспекту – температурного балансу трансформатора.

У процесі експлуатації трансформатора відбувається утворення тепла в його обмотках і магнітопровідних елементах. Наслідками порушення температурного режиму під час роботи трансформатора можуть бути такі:



Рисунок 1 – Бетонне укриття трансформатора

- перевищення граничної температури обмоток призводить до прискореного старіння ізоляції та зниження ресурсу трансформатора;
- ризик аварійного відключення або спрацювання захисту за температурою;
- підвищення тиску в маслосистемі, що може спричинити витік або пошкодження корпусу.

– виникнення пожежі при розігріві мастила вище допустимих меж.

Отже тепло, яке утворюється має бути ефективно відведене, щоб запобігти перегріванню обладнання.

Внутрішнє охолодження трансформатора забезпечується циркуляцією мастила. А передача тепла від трансформатора до навколишнього середовища здійснюється переважно завдяки конвекції повітря навколо зовнішніх поверхонь бака, охолоджувальних труб та інших елементів конструкції, а також через теплове випромінювання. Інтенсивність теплообміну визначається температурною різницею між поверхнею трансформатора та навколишнім повітрям, геометричними параметрами охолоджуваних елементів та умовами доступу повітря до них. Чим більше відкритий доступ повітря до охолоджуваних поверхонь, тим ефективніше відбувається охолодження [5].

Отже, конвекція є основним механізмом теплообміну в трансформаторах. Кількість теплоти, що передається конвекцією, Q , Вт, описується таким виразом:

$$Q = h \cdot A \cdot (t_1 - t_2) \quad (1)$$

де h – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К); A – площа поверхні теплообміну, м²; t_1 – температура на нагрітій поверхні, °С; t_2 – температура на охолоджувальній поверхні трансформатора, °С.

Температура на охолоджувальній поверхні трансформатора зазвичай визначається як температура навколишнього середовища. Наявність бетонних укриттів або інших конструктивних обмежень може перешкоджати вільному повітрообміну, що знижує ефективність природної вентиляції та підвищує температуру навколишнього середовища і може привести до порушення роботи трансформатора.

Таким чином, основним чинником ефективності охолодження трансформатора є інтенсивність теплообміну через конвекцію, яка безпосередньо залежить від температурного градієнта та умов доступу повітря до поверхонь теплообміну.

Для кількісного оцінювання цього впливу необхідно провести умовне моделювання теплових процесів, що відбуваються під час роботи трансформатора.

Для оцінки впливу вентиляції на тепловий режим силового трансформатора проведено моделювання динаміки нагрівання трансформаторного мастила при роботі в умовах з наявною вентиляцією та без неї.

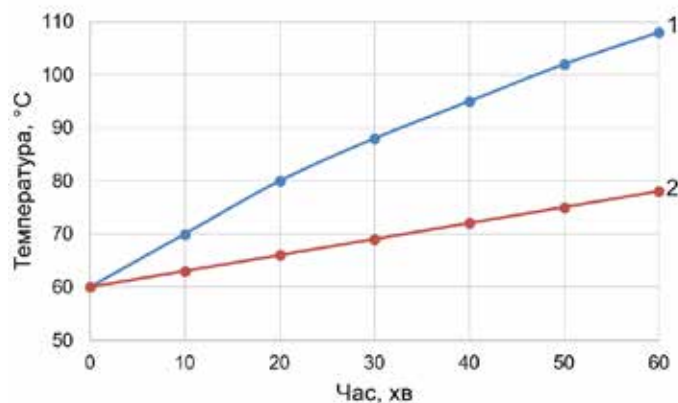
З огляду на домінуючу роль конвекції у відведенні тепла від трансформатора, для оцінки впливу вентиляції на тепловий режим трансформатора використано спрощену теплотехнічну модель. Вона базується на балансовому рівнянні надходження і відведення теплоти [7]:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_{\text{втрат}} - hA(t - t_{\text{пов}})}{m \cdot c} \quad (2)$$

де $P_{\text{втрат}}$ – сумарні теплові втрати у трансформаторі, Вт; h – коефіцієнт теплопередачі, що змінюється залежно від умов вентиляції, Вт/(м²·К); A – площа поверхні теплообміну, м²; t – температура мастила, °С; $t_{\text{пов}}$ – температура повітря навколо трансформатора, °С; m – маса трансформаторного мастила, кг; c – питома теплоємність трансформаторного мастила, кДж/(кг·К).

Для визначення динаміки температури трансформаторного мастила було змодельовано зміну температури впродовж 60 хвилин експлуатації як з ефективною вентиляцією (зовнішнє охолодження не обмежене), так і без неї (укриття перешкоджає повітрообміну). Для моделювання теплового режиму було обрано типовий маслонаповнений силовий трансформатор з природним охолодженням типу ТМ-1000/10, призначений для роботи у розподільчих електромережах, рис. 2. Основні технічні характеристики трансформатора [8]: номінальна потужність – 1000 кВА; номінальна напруга – 10/0,4 кВ; тип охолодження – ONAN (масляне, природна циркуляція мастила та повітря); втрати холостого ходу – 1,5 кВт; втрати короткого замикання – 10,5 кВт; маса трансформаторного мастила – приблизно 800 кг; питома теплоємність мастила – 1900 Дж/(кг·К); загальна площа охолоджувальної поверхні – близько 15 м²; матеріал бака – сталь з радіаторними трубами; габаритні розміри трансформатора (без укриття) – 2100×1300×1700 мм.

Вибір цього типу трансформатора зумовлений його широким застосуванням у міських та сільських підстанціях, де питання охолодження особливо актуальні при розміщенні обладнання в обмежених умовах (захисні бетонні конструкції, укриття, вузькі технічні приміщення).



1 – без застосування вентиляції; 2 – із застосуванням вентиляції

Рисунок 2 – Динаміка підвищення температури трансформаторного мастила за умов наявності та відсутності вентиляції

Відповідно до рис. 2 обидві криві стартують з однакової початкової температури трансформаторного мастила (близько 60 °С), що відповідає типовій температурі після короткого періоду безнавантаженої роботи або перед запуском навантаження. Крива 1, яка відповідає випадку без вентиляції укриття протягом 60 хв температурний профіль демонструє суттєво різні темпи зростання залежно від ефективності теплообміну

з навколишнім середовищем. Температура підвищується лінійно, досягаючи приблизно 108 °С через 60 хвилин роботи.

Такий стрімкий ріст вказує на низький коефіцієнт теплопередачі h , обумовлений поганим повітрообміном (наявністю бетонних укріттів, обмеженого простору тощо). Лінійність графіка (крива 1, рис. 2) свідчить про домінування теплових втрат над процесами тепловідведення, тобто кількість теплоти, що надходить у мастило, значно перевищує кількість теплоти, що виводиться з системи. Температури вище 95–100 °С є небезпечними: це підвищує ризик прискореного старіння ізоляції, утворення газів розкладу, а також виникнення аварійних режимів роботи [4]. Це створює умови для виникнення локального загоряння або навіть вибуху трансформаторного бака.

У випадку використання вентиляції укріття, крива 2, рис. 2) температура також підвищується, але значно повільніше, досягаючи лише 78 °С за той самий період. Це вказує на вищий коефіцієнт h – за рахунок природної конвекції повітря, що безперешкодно охолоджує зовнішні поверхні бака трансформатора. Крива 2, рис. 2, має сповільнене зростання, що свідчить про наближення системи до теплової рівноваги – відведення тепла майже зрівнюється з його надходженням. Це означає, що система охолодження працює ефективно, забезпечуючи стабільний тепловий режим, без ризику перегріву.

Окремо було змодельовано залежність різниці температур між трансформатором із вентиляцією та без неї (Δt) від швидкості повітряного потоку. Відомо, що коефіцієнт теплопередачі для примусової конвекції збільшується зі зростанням швидкості повітря приблизно як [9]:

$$h \sim v^n, \quad n \in [0,5; 0,8] \quad (3)$$

Саме це обумовлює зниження Δt при посиленні вентиляції. Для підтвердження цього прорахуємо зміну різниці температур від швидкості повітря в діапазоні 0,1–0,2 м/с, що є типовим для трансформаторних підстанцій з природною або штучною вентиляцією, рис. 3.

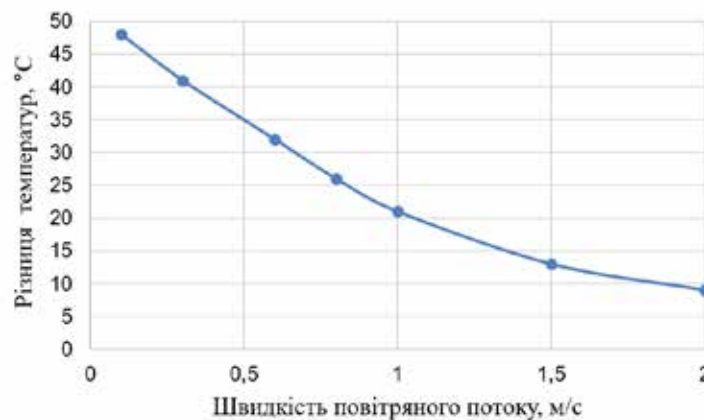


Рисунок 3 – Залежність температурної різниці Δt між трансформатором з та без вентиляції від швидкості повітряного потоку

Таким чином, отримані результати (рис. 2, рис. 3) дозволяють кількісно оцінити негативний вплив обмеженого повітрообміну (наприклад, через бетонні укріття) на тепловий режим трансформатора і вказують на необхідність врахування вентиляційних умов при проєктуванні систем енергозабезпечення в умовах додаткового захисту.

Оцінити обсяг повітря, який необхідно прокачувати через бетонне укріття силового трансформатора ТМ-1000/10 для підтримання теплового балансу та уникнення перегріву, можна з врахуванням теплової потужності трансформатора за наступною формулою:

$$Q = \frac{\rho \cdot L \cdot c \cdot \Delta t}{3600} \quad (4)$$

де Q – теплова потужність, Вт; ρ – густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$; L – об’ємна витрата повітря, $\text{м}^3/\text{год}$; C – питома теплоємність повітря, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$; Δt – допустиме підвищення температури, $^{\circ}\text{C}$.

Допустима температура в укритті трансформатора залежить від типу трансформатора, його класу ізоляції, стандартів, за якими він виготовлений, а також умов експлуатації [4].

На рис. 4 змодельовано залежність необхідної витрати повітря від допустимого підвищення температури для трансформатора ТМ-1000/10.

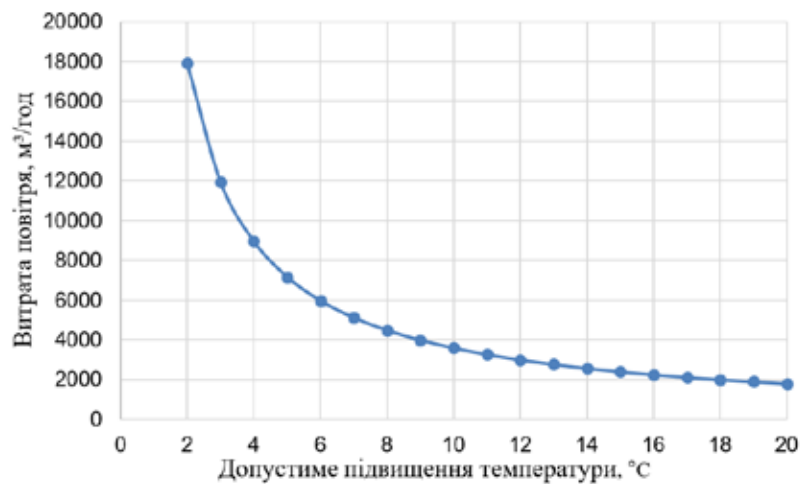


Рисунок 4 – Залежність необхідної витрати повітря від допустимого підвищення температури

Відповідно до рисунку 3 встановлено, що при невеликому допуску на підвищення температури ($2\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$) потрібні значні витрати повітря – понад $10\,000\text{ м}^3/\text{год}$, що може бути складно реалізувати у практичних умовах. У діапазоні $10\text{--}15\text{ }^{\circ}\text{C}$ витрата повітря знижується до $3000\text{--}4000\text{ м}^3/\text{год}$ – це характерно для систем природної або штучної вентиляції.

Таким чином, підбір параметрів вентиляції укриття трансформатора має здійснюватися з урахуванням обмежень, пов’язаних з допустимим тепловим навантаженням та можливостями вентиляційної системи.

Висновки. У контексті сучасної гібридної війни трансформатори є пріоритетною цілью для ворога, оскільки їх пошкодження викликає масштабні перебої електропостачання. Їх складність, великі габарити та тривалий цикл заміни роблять кожну втрату особливо значущою. Найефективніший підхід до захисту трансформаторів – поєднання фізичного захисту, активної ППО, маскування та резервування. Найбільш дієвим засобом проти дронів-камікадзе доведено використання бетонних укриттів, які стримують уламки та тепловий вплив. Встановлено, що укриття можуть істотно зменшити ефективність природної вентиляції, що призводить до перегріву трансформатора. Проведене моделювання показало, що температура мастила в трансформаторі ТМ-1000/10 без вентиляції може перевищити $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ за годину – що є критичним і загрожує аварійним відключенням, пожежами або пошкодженням ізоляції. Отже, потрібне врахування теплотехнічних параметрів при проєктуванні укриттів трансформаторів. Теплотехнічні розрахунки демонструють, що для збереження теплового балансу потрібно забезпечити вентиляцію з об’ємною витратою повітря від 3000 до $10\,000\text{ м}^3/\text{год}$, залежно від допустимого підвищення температури.

Бібліографічний перелік

1. Росія нищить українські трансформатори. Як їх захистити і чим вони важливі. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/features-63801303>
2. Юрченко В., Соколовський І. Шляхи удосконалення інженерно-технічних заходів цивільного захисту об’єктів критичної інфраструктури в умовах особливого

періоду. *Науковий вісник: Державне управління*, 2023. № 1 (13). С. 291-312. [https://doi.org/10.33269/2618-0065-2023-1\(13\)-291-312](https://doi.org/10.33269/2618-0065-2023-1(13)-291-312).

3. Захист критичної інфраструктури в умовах надзвичайних ситуацій: монографія / С.І. Азаров, В.Л. Сидоренко, С.А. Єременко, А.В. Пруський, А.М. Демків; за заг. ред. П.Б. Волянського. Київ, 2021. 375 с.

4. Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання). URL: <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf>.

5. ДСТУ 3463-96 Керівництво з навантаження силових масляних трансформаторів (ГОСТ 14209-97, ІЕС 354-91). З Поправкою (ІПС № 11-1999). URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_3463-96_kerivnictvo_z_navantazhennya_silovikh_maslyanikh.pdf.

6. Вплив температурних умов на роботу сухого трансформатора. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/4f109eec-a190-48aa-8cfb-503aed70df34/download>.

7. IEC 60076-2:2011 Power transformers. Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers. International Electrotechnical Commission. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/15221/c6a77584aa9145539aadd9eb505ea4c1/IEC-60076-2-2011.pdf>.

8. Каталог продукції ПАТ "Запоріжтрансформатор" (ZTR). URL: <https://ztr.ua>.

9. Incropera, F. P., DeWitt, D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. – 6th ed. John Wiley & Sons, 2007. 997 p.

References

1. Russia is destroying Ukrainian transformers: how to protect them and why they matter. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/features-63801303>

2. Yurchenko V., Sokolovskyi I. Ways to improve engineering and technical civil protection measures for critical infrastructure facilities during special periods. *Scientific Bulletin: Public Administration*, 2023. No. 1 (13), pp. 291–312. [https://doi.org/10.33269/2618-0065-2023-1\(13\)-291-312](https://doi.org/10.33269/2618-0065-2023-1(13)-291-312)

3. Protection of critical infrastructure in emergency situations: monograph / S.I. Azarov, V.L. Sydorenko, S.A. Yeremenko, A.V. Pruskyi, A.M. Demkiv; general ed. by P.B. Volianskyi. Kyiv, 2021. 375 pages.

4. Rules for Electrical Installations (first revised, reworked, supplemented and adapted edition for Ukraine). URL: <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf>

5. DSTU 3463-96 Guidelines for loading oil-immersed power transformers (GOST 14209-97, IEC 354-91). With Amendment (IPS No. 11-1999). URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_3463-96_kerivnictvo_z_navantazhennya_silovikh_maslyanikh.pdf

6. The impact of temperature conditions on the operation of dry transformers. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/4f109eec-a190-48aa-8cfb-503aed70df34/download>

7. IEC 60076-2:2011 Power transformers. Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers. International Electrotechnical Commission. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/15221/c6a77584aa9145539aadd9eb505ea4c1/IEC-60076-2-2011.pdf>.

8. Product Catalog of PJSC "Zaporizhtransformator" (ZTR) URL: <https://ztr.ua>.

9. Incropera, F. P., DeWitt, D. P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. – 6th ed. John Wiley & Sons, 2007. 997 p.

Gridiaiev Volodymyr, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0001-7767-4490.

Manidina Yevheniia, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0003-4090-9991.

Saveliev Dmitry, candidate of technical science, associate professor of the department of labor protection and civil security, Dnipro University of Technology, ORCID: 0000-0002-0738-3273

Rumyantsev Vladislav, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-4404-3454

Karpenko Hanna, candidate of technical sciences, associate professor of the department, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0003-3504-0283

**COMPREHENSIVE SAFETY OF ELECTRICAL POWER TRANSFORMERS
UNDER HOSTILE SHELLING: ELECTRICAL SAFETY, FIRE SAFETY,
AND CIVIL PROTECTION**

The article examines the comprehensive safety of power transformers under conditions of armed aggression and ongoing shelling of critical energy infrastructure. Emphasis is placed on the necessity of integrating three interrelated components: electrical safety, fire safety, and civil protection measures. Existing methods of physical protection for transformers are thoroughly analyzed. Particular attention is given to the impact of such protective structures on the thermal operating conditions of transformers.

Based on three-dimensional thermal modeling of a TM-1000/10 transformer, accounting for heat exchange with the environment, it was found that without adequate ventilation, the temperature of the transformer oil can exceed 100 °C within just one hour of operation. This significantly increases the risk of thermal degradation of insulation, fire, or complete equipment failure.

The study shows that ensuring sufficient air exchange is the key factor for the reliable operation of a transformer under protective enclosures. A model was developed to determine the relationship between the required air flow rate and the permissible temperature rise for the TM-1000/10 transformer.

It was established that with a small allowable temperature rise (2–5 °C), the required air flow rate exceeds 10,000 m³/h, which may be challenging to implement in practice. In the range of 10–15 °C, the air flow rate decreases to 3,000–4,000 m³/h, which is typical for natural or forced ventilation systems.

Keywords: power transformer, concrete shelter, fire safety, electrical safety, ventilation, thermal model, hybrid warfare

Кожемякін Геннадій Борисович, кандидат технічних наук, доцент, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-2960-1331

Белоконь Каріна Володимирівна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-2000-4052

Румянцев Владислав Ростиславович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-4404-3454

ЗНЕШКОДЖЕННЯ ВИСОКОМІНЕРАЛІЗОВАНИХ СТИЧНИХ ВОД МЕТАЛУРГІЙНИХ ВИРОБНИЦТВ НА ПРОМІЖНОМУ ТВЕРДОМУ ТЕПЛОНОСІЇ

Одним із головних джерел забруднення навколишнього середовища на металургійних підприємствах є високомінералізовані стічні води. Підвищення вмісту солей у цих водах спричинене використанням розчинних речовин у металургійних процесах, хімічною обробкою води в замкнених системах охолодження обладнання, очищенням стічних травильних розчинів і промивних вод у прокатних цехах. Крім того, мінеральні домішки потрапляють у стоки під час контакту рідин із твердими або розчиненими солевмісними матеріалами. Одним із ключових завдань екологічної безпеки металургії є ефективне очищення таких стічних вод від розчинених мінералів.

Найпоширенішими технологіями видалення солей із води є методи зворотного осмосу, електродіалізу, іонного обміну та термічного знесолення. Проте в більшості випадків результатом таких процесів є концентровані розсоли. Раціональнішим варіантом є видалення солей у твердій формі, що значно полегшує їх подальше транспортування, утилізацію або захоронення. З огляду на це, перспективними вважаються термічні методи очищення.

Випарювання мінералізованих стоків на металургійних підприємствах призводить до накопичення в них високих концентрацій солей. При цьому, окрім традиційного карбонатного та сульфатного накипу, можуть утворюватися також силікатні, залізисті й інші відкладення на теплообмінних поверхнях. Щоб уникнути цих проблем, доцільно застосовувати тверді матеріали як проміжний теплоносіє. У таких установках зазвичай використовуються металеві кулі, нагріті гарячими газами, на поверхні яких кристалізуються солі, що потім видаляються.

Проаналізовано теплотехнічні особливості процесу випарювання із застосуванням твердого теплоносія та встановлено залежності коефіцієнта тепловіддачі від основних параметрів процесу. На основі експериментальних досліджень розроблено метод утилізації високомінералізованих стічних вод, який дозволяє ефективно використовувати низькопотенційні вторинні енергетичні ресурси.

Ключові слова: знешкодження, стічні води, мінеральні домішки, безпека, зворотній осмос.

Одними з основних та досить поширених забруднювачів навколишнього природного середовища на металургійних підприємствах є так звані високомінералізовані стічні води (ВМСВ). Даний вид рідких відходів забруднений такими мінеральними речовинами як солі кальцію, натрію, магнію та ін. На металургійних підприємствах підвищення концентрації солей у воді відбувається за рахунок застосування розчинних речовин у металургійній технології, хімічної підготовки води в оборотних системах охолодження металургійних агрегатів, очищення стічних відпрацьованих травильних розчинів та промивних вод у прокатних виробництвах. Крім того, мінеральні забруднення надходять у стічні води при контакті рідин з різними продуктами, що містять солі

у твердому стані або в розчині (наприклад, при очищенні різних газів). Незважаючи на широке впровадження оборотного водопостачання та нових маловідходних технологій, обсяг забруднених стічних вод залишається значним. Тому важливою проблемою є чищення стічних вод металургійних підприємств від мінеральних забруднень.

Значна різноманітність солявого складу ВМСВ, а також відмінності у потужності та призначенні установок для їх знешкодження унеможливають застосування єдиного універсального методу очищення, який би забезпечував максимальну економічну ефективність за будь-яких умов. Найбільш поширеними методами є знесолення методом зворотного осмосу, електродіаліз, іонний обмін та термічне знесолення. Але майже всі вони передбачають видалення забруднень у вигляді концентрованих розсолів. Оптимальним рішенням для очищення ВМСВ є не отримання висококонцентрованих розсолів, а вилучення солей у твердому стані, що значно зручніше як для транспортування, так і для подальшого захоронення. Перспективними з цієї точки зору є термічні методи.

Можна виділити три методи термічного знешкодження ВМСВ: випар на поверхні теплообміну; адіабатний випар; випар при контакті з теплоносієм. Установки для випарювання можна розділити на установки, в яких розчин контактує з поверхнею нагріву і установки, в яких розчин не контактує з нею.

Мінералізовані стічні води металургійних виробництв характеризуються великою різноманітністю компонентів і різним їх вмістом. Їх випарювання призводить до утворення відносно великих концентрацій солей. У цих випадках, окрім найбільш поширених карбонатного і сульфатного накипу, на поверхні, що передають тепло, можуть також відкладатися силікатні, залізисті і інші накипи. Наявність в деяких ВМСВ масл і нафтопродуктів створює також додаткові труднощі при їх знешкодженні.

Рівень концентрації стічних вод в установках миттєвого адіабатного випарювання має свої обмеження, оскільки його підвищення спричиняє інтенсивніше осадження солей на нагрівальній поверхні. Значно вищого ступеня концентрації можна досягти у випарних установках, де рідина не контактує безпосередньо з нагрівальною поверхнею. У таких апаратах тепло передається контактним способом без дотику розчину до нагрівальної поверхні.

Контактні установки класифікуються залежно від типу теплоносія – газоподібного, рідкого чи твердого. Установки з контактними теплообмінниками, що не допускають утворення відкладень на поверхні нагріву, поділяються на одноступінчасті та багатоступінчасті.

До одноступінчастих належать установки, де випарювання відбувається або безпосередньо в теплоносії, або шляхом попереднього нагріву розчину у контактному апараті з подальшим його надходженням у зону адіабатного випарювання. Недоліком їх є відносно великої питома витрата тепла $\sim (2800-8000)$ кДж/кг випаруваної води.

У багатоступінчастих установках, питома витрата тепло складає порядку $(1000-1500)$ кДж/кг в залежності від параметрів установки.

Одним з напрямів підвищення ефективності термічного знешкодження концентрованих розчинів є створення установок, в яких розчин нагрівається або випаровується при контакті з рідким гідрофобним теплоносієм. Як теплоносії використовуються парафін, мінеральні масла та ін. Проте у них є ряд недоліків, таких як: необхідність використання великої кількості гідрофобної рідини; труднощі сепарації теплоносія і стічної води; складнощі відділення кристалів солей і інших твердих часток від в'язкого теплоносія; низька інтенсивність теплообміну внаслідок малих відносних швидкостей руху рідини і малої теплопровідності гідрофобного теплоносія.

Для усунення вище викладених недоліків, як проміжний теплоносіє, доцільно використовувати тверді матеріали [1]. Витрати енергії в цих установках випарювання розчинів про застосуванні твердого теплоносія можуть складати близько $500-550$ кДж/кг.

У таких установках в якості твердого теплоносія використовуються, як правило, нагріті гарячими газами металеві кулі, с наступним зануренням їх у випаровуваний розчин. У результаті на поверхні куль випадають солі, які відділяються в барабанному млині при безперервній циркуляції. До недоліків такої системи відносяться низька

ефективність випарювання в зануреному шарі внаслідок ефекту Лейденфроста і велика витрата електроенергії на циркуляцію куль в системі.

У установці для сушки і концентрації рідких розчинів [2] розчин безперервно подають на поверхню елементів, які продуваються гарячим газом. У результаті розчин висихає, а твердий продукт разом з елементами виводиться і очищається. Недоліки такої установки полягають у великій енергоємності при безперервній циркуляції і низькій інтенсивності випарювання при безперервній подачі розчину.

Вищезгадані недоліки значною мірою можуть бути усунені при періодичній подачі розчину на інертний теплоносій. Внаслідок цього збільшується інтенсивність випарювання через зменшення шару рідини на теплоносії. При цьому після висушування завантаження гарячим газом процес можна повторити, нарощуючи тим самим шар продукту на елементах завантаження, що зменшує енергоємність при її циркуляції.

Як проміжний інертний теплоносій використовуються металеві кулі. Вони зручні при обробці в кульовому млині, мають хорошу теплопровідність, маса відкладених солей складає (8 – 10) % від маси завантаження.

Процес випарювання ВМСВ можна розділити на три етапи:

1. Нагрів куль гарячим газом;
2. Зрошування куль, що призводить до їх охолодження і часткового випару ВМСВ;
3. Випар розчину з поверхні проміжного теплоносія. Лімітуючи стадії за часом і умовам теплопередачі являються перша і третя.

На початку випарювання температура куль після зрошування дорівнюватиме температурі мокрого термометра.

Критерій Нуссельта :

$$Nu = 0,61 \cdot Re^{0,67} \quad (1)$$

Критерій Рейнольдса по газу:

$$Re = \frac{w_z \cdot d_z}{\nu_z} \quad (2)$$

Коефіцієнт теплопередачі газу до теплоносія:

$$\alpha_z = \frac{Nu \cdot A}{d_z}, \quad (3)$$

де A – коефіцієнт теплопровідності.

Тепловий потік при нагріві:

$$Q_l = K \cdot \Delta t \cdot F_{\text{тепл}} \quad (4)$$

де $F_{\text{тепл}}$ – поверхня теплообміну.

Коефіцієнт теплопередачі при нагріві :

$$K_l = \alpha_l \cdot \mu_l \quad (5)$$

де α_l – коефіцієнт тепловіддачі при нагріві; μ – поправка на кондукцію, залежна від критерію Біо, $Bi = \frac{\alpha_l \cdot R}{\lambda}$, R – радіус куль (при $Nu \leq 0,1$ нею нехтують).

Час нагріву куль:

$$\tau_n = Q_l / q_l \quad (6)$$

Коефіцієнт тепловіддачі при сушці [3]:

$$Nu = 3,97 \cdot 10^{-2} \cdot Ar^{0,438} \cdot Re^2 \cdot Cu^{0,61} (H_0/d)^{-1} \quad (7)$$

де H_0 – висота шару куль; d – діаметр куль; Cu – коефіцієнт, залежний від температури сухого і мокрого термометра, $Cu = (T_c + T_m)/T_m$.

Коефіцієнт тепловіддачі від куль до рідини:

$$\alpha_{\text{ж}} = \frac{Nu \cdot \lambda}{\nu \cdot \varepsilon} \quad (8)$$

Тепловий потік:

$$Q_2 = K_2 \cdot \Delta t \cdot F_{\text{менл}} \quad (9)$$

Коефіцієнт теплопередачі при нагріві:

$$K_2 = \alpha_2 \cdot \mu \quad (10)$$

де α_2 – коефіцієнт тепловіддачі при сушці;

Таким чином, коефіцієнт тепловіддачі при сушці змоченого теплоносія визначається з (8) як:

$$\alpha' = 3,97 \cdot 10^{-2} \frac{g^{-0,438} d_{\text{ш}}^{-1,314}}{v^{0,438}} \frac{w^2 d_{\text{ш}}^3}{v^2} \left(\frac{T_c + T_m}{T_c} \right) \frac{d}{H_0} \quad (11)$$

Коефіцієнт тепловіддачі при нагріві куль з (7) як:

$$\alpha'' = 0,61 \left(\frac{w_c d_{\text{ш}}}{v} \right)^{0,67} \frac{\lambda}{d_{\text{ш}}} \quad (12)$$

Коефіцієнт тепловіддачі усього процесу :

$$\alpha = \alpha' \frac{\tau_c}{\tau_{\text{ш}}} + \alpha'' \frac{\tau_{\text{н}}}{\tau_{\text{ш}}} \quad (13)$$

де τ_c , $\tau_{\text{ш}}$, $\tau_{\text{н}}$ – відповідно час сушки, нагріву і повного циклу.

Експериментальні дослідження процесу знешкодження ВМСВ на проміжному твердому теплоносії проводилися на лабораторній установці, зображеній на рис. 1.

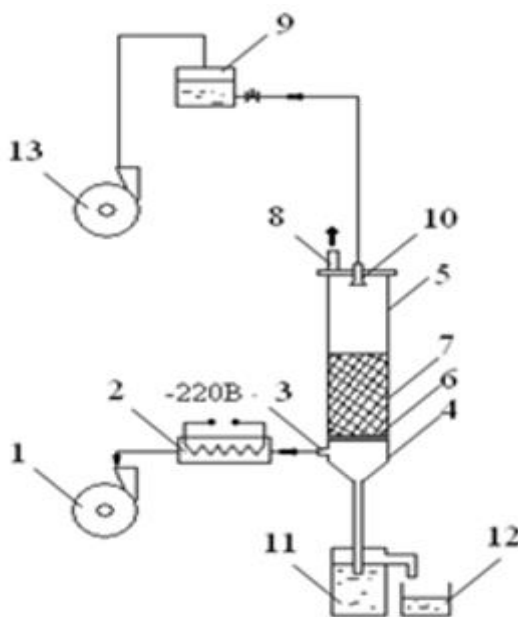


Рисунок 1 – Лабораторна установка для випаровування мінералізованих стічних вод

Вона складається з пристрою для подачі повітря 1, електрообігрівача 2, і випарної колони 3, в якій знаходиться інертний теплоносій 7, у вигляді металевих куль діаметром (8-15) мм. Хід експерименту складається з трьох стадій: нагріву куль, зрошування насадки і випару вологи. Повітря, що подається вентилятором 1 нагрівається у нагрівачі 2 і через патрубок 3 і грати 6 подається в камеру 5 і відводиться через патрубок 8. Розчин з резервуару 9 під тиском, створюваним компресором 13, подається в колону 3, де частина його випаровується, а частина стікає через розподільну камеру 4 і гідро-

затвор 11 в мірну посудину 12. Вода, що залишилася на теплоносії, випаровується нагрітим повітрям, що поступає.

Отримані експериментальні дані дозволяють визначити коефіцієнт тепловіддачі.

Теоретичний коефіцієнт тепловіддачі ($\text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$) визначається по формулах (9) – (11). Дані розрахунків показані в таблиці 1.

Контрольовані параметри: V – витрата повітря, $\text{м}^3/\text{год}$; t_0 – температура повітря перед вентилятором, $^{\circ}\text{C}$; $t_{1\text{н}}$ – температура повітря на вході у випарник на початку циклу, $^{\circ}\text{C}$; $t_{2\text{н}}$ – температура повітря на виході на початку циклу, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{3\text{н}}$ – температура нижнього шару куль на початку циклу, $^{\circ}\text{C}$; $t_{4\text{н}}$ – температура верхнього шару куль на початку циклу, $^{\circ}\text{C}$; $t_{4\text{к}}$ – температура нижнього шару куль у кінці циклу, $^{\circ}\text{C}$; $t_{3\text{к}}$ – температура верхнього шару куль у кінці циклу, $^{\circ}\text{C}$; $t_{1\text{к}}$ – температура повітря на вході у випарник у кінці циклу, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{2\text{к}}$ – температура повітря на виході у кінці циклу, $^{\circ}\text{C}$; $\tau_{\text{с}}$ – час сушки куль, хв; $\tau_{\text{н}}$ – час нагріву куль, хв.

Як розчин використовувалася стічна вода газоочищення титаномангнієвого виробництва з солевмістом близько 100 г/л.

Таблиця 1 – Дослідження технологічних параметрів процесу випаровування ВМСВ

№	$t_{1\text{н}}$	$t_{1\text{к}}$	$t_{2\text{н}}$	$t_{2\text{к}}$	$t_{3\text{н}}$	$t_{3\text{к}}$	$t_{4\text{н}}$	$t_{4\text{к}}$	t_0	V	$\tau_{\text{с}}$	$\tau_{\text{н}}$	α	α'	α''	$\alpha_{\text{т}}$
1	182	181	92	121	55	149	40	110	20	18	8	3	101	85	113	106
2	180	181	80	129	42	157	54	110	21	18	7,5	3	95	94	121	11
3	190	202	101	126	37	153	99	110	22	16	6	4	80	85	134	114
4	204	204	85	132	40	170	45	115	21	16	6,5	3,5	84	85	126	115
5	205	202	90	130	47	154	40	110	21	16	8	3	77	57	103	93
6	193	210	87	130	40	157	40	110	21	16	8,5	2,5	77	84	126	118
7	205	205	83	122	40	152	45	110	22	16	8	3	82	57	100	90
8	205	206	98	130	66	155	54	110	22	15,5	6,5	3,5	82	100	106	102
9	202	210	99	128	69	155	59	110	23	15	7,5	3	81	57	102	80
10	208	204	105	125	82	154	65	110	21	14,8	6	4	87	64	116	101
11	189	189	110	127	90	142	66	110	20	14,8	5,5	1,5	88	98	132	124
12	192	210	103	130	66	154	69	110	20	14,8	6,5	2	82	98	128	121
13	214	208	105	131	73	153	64	110	21	13,5	7	3	74	106	94,2	103
14	185	185	90	125	77	143	66	110	20	14,8	8	3	95	134	99	132
15	175	200	95	120	99	153	73	110	20	14,8	5,5	3	101	136	99	122
16	200	199	98	123	80	154	75	110	20	14,8	5,5	3,5	97	132	94	120

На основі лабораторних досліджень розроблений спосіб [4] і принципова схема (рис. 2) установки по знешкодженню ВМСВ.

У пристрої шар твердого проміжного теплоносія у вигляді металевих куль розміщується на ґратах 2 нагрівальної камери 1. Ґрати встановлені на пружинах 3 і механічно зв'язані з віброприводом для забезпечення вібраційного руху. Рухома частина камери жорстко з'єднана з нерухомою компенсаторами 4. Через патрубок 5 подається гарячий газ, який проходить крізь шар твердого теплоносія 6, забезпечуючи його нагрів, після чого газ виводиться через патрубок 7. Подача робочого розчину здійснюється насосом 9 через форсунки 8 періодично, залежно від ступеня висихання шару куль. Завершення процесу випаровування стічної води визначається підвищенням температури відхідного газу вище 100°C .

Подача розчину на шар теплоносія викликає часткове випаровування рідини, що призводить до охолодження металевих куль. На поверхні куль утворюється плівка кристалізованих солей, покрита вологою. По мірі висихання волога випаровується, а товщина кристалічного шару збільшується.

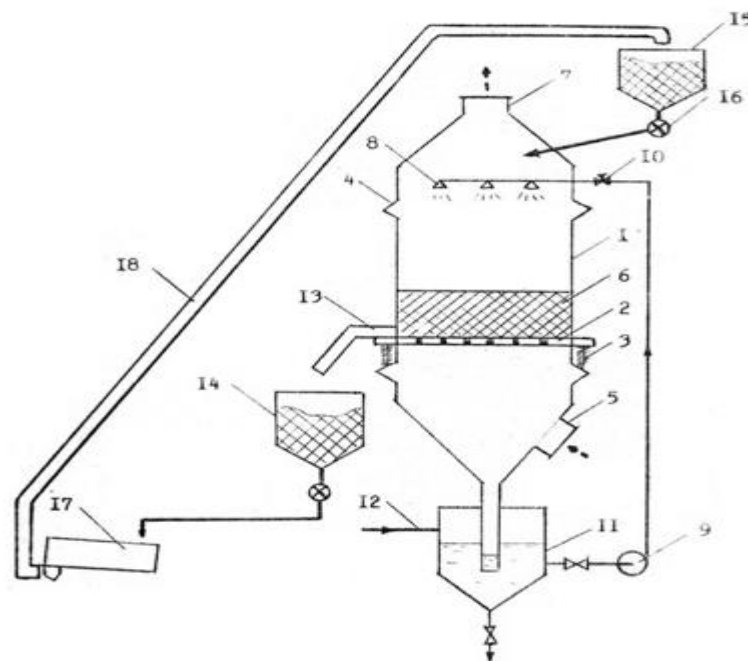


Рисунок 2 – Принципова схема установки для знешкодження високомінералізованих стічних вод металургійних виробництв

Оскільки кількість відкладених солей за один цикл невелика, процес подачі розчину повторюють багаторазово. Після накопичення критичної товщини кристалічного шару кульки у камері 1 замінюють. Зібрані в бункері 14 кульки очищаються від сольових відкладень у барабанному млині 17 для утилізації.

Отримані значення коефіцієнта тепловіддачі лежать в межах (80 -120) Вт/(м²·К), що порівняно з установками з киплячим шаром, коефіцієнт тепловіддачі яких знаходиться в межах (65-100) Вт/м²·К. Витрати енергії в досліджуваному процесі складає порядку (1600-1800) кДж/кг випаруваної вологи.

Знизити витрати на випарювання можливо за рахунок використання вторинних низькопотенційних ресурсів с температурою 180-300оС, більшість з яких наразі не використовуюється. До них відносяться гази, які відходять від металургійних агрегатів, ТЕЦ, методичних та нагрівальних печей, газоочисток та ін.

Бібліографічний перелік

1. Design and experiment on solid heat carrier heating device heated by high temperature flue gas for pyrolysis of biomass: Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering/W. Shaoqing, etc. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4) : 89-95S.
2. Procédé et appareil pour sécher ou concentrer des suspensions ou solutions liquides: pat. FR2458301 France ; décl. 05.06.1980 ; publ. 02.01.1981.
3. Коломієць Р.В. Конвективний теплообмін в аерофонтанній сушарці: Збагачення корисних копалин: Науково- технічний збірник. Дніпро: НГУ, 2014. – Вип. 58(99) – 59(100).
4. Спосіб знешкодження високомінералізованих стічних вод випарюванням: пат. 10997 Україна. U200503375 ; заявл. 11.04.2005 ; опубл. 15.12.2005, Бюл. № 12.

References

1. Design and experiment on solid heat carrier heating device heated by high temperature flue gas for pyrolysis of biomass: Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering/W. Shaoqing, etc. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4) : 89-95S.
2. Procédé et appareil pour sécher ou concentrer des suspensions ou solutions liquides: pat. FR2458301 France ; décl. 05.06.1980 ; publ. 02.01.1981.
3. Kolomiets R.V. Convective Heat Transfer in an Aerofountain Dryer. Mineral Processing: Scientific and Technical Bulletin. Dnipro: National Mining University, 2014. – Issue 58(99) – 59(100).
4. Method for the Neutralization of Highly Mineralized Wastewater by Evaporation: Patent No. 10997 Ukraine. U200503375; filed April 11, 2005; published December 15, 2005, Bulletin No. 12.

Kozhemiakin Gennadii, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-2960-1331

Belokon' Karina, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0003-2000-4052

Rumyantsev Vladislav, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-4404-3454

NEUTRALIZATION OF HIGHLY MINERALIZED WASTEWATER FROM METALLURGICAL PRODUCTION USING AN INTERMEDIATE SOLID COOLANT

One of the main sources of environmental pollution at metallurgical plants is highly mineralized wastewater. The increase in the salt content in these waters is due to the use of soluble substances in metallurgical processes, chemical water treatment processes in closed equipment cooling systems, cleaning of waste pickling solutions and wash water in rolling shops. In addition, mineral impurities enter the wastewater when liquids come into contact with solid or dissolved salt-containing materials. One of the key tasks of environmental protection in metallurgy is the effective purification of such wastewater from dissolved minerals.

The most common technologies for removing salts from wastewater are reverse osmosis, electrodialysis, ion exchange and thermal desalination. However, in most cases, concentrated brines are formed as a result of such processes. A more rational option is to isolate salts in solid form, which significantly facilitates their further transportation, disposal or burial. Given this, thermal methods of wastewater treatment are considered promising. Evaporation of mineralized wastewater at metallurgical plants leads to accumulation of high concentrations of salts in them. In addition to traditional carbonate and sulfate scale, silicate, ferrous and other deposits can also form on heat exchange surfaces. To avoid these problems, it is advisable to use solid materials as an intermediate heat carrier. Such installations usually use metal balls heated by hot gases, on the surface of which salts crystallize, which are then removed. The heat engineering features of the evaporation process using a solid heat carrier are analyzed and the dependences of the heat transfer coefficient on the main process parameters are established. Based on experimental studies, a method for neutralizing highly mineralized wastewater is proposed, which allows for the effective use of low-potential secondary energy resources.

Keywords: neutralization, wastewater, mineral impurities, safety, reverse osmosis

Кухар Володимир Валентинович, доктор технічних наук, професор, проректор з науково-дослідної роботи, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»», м. Запоріжжя, Україна, ORCID: 0000-0002-4863-7233

Чупринов Євген Валерійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри металургійних технологій, Державний університет економіки і технологій, м. Кривий Ріг, Україна, ORCID: 0000-0001-8605-3434

Навольнєв Ігор Юрійович, аспірант кафедри металургії та організації виробництва, ТОВ «Технічний Університет «Метінвест Політехніка»», м. Запоріжжя, Україна, ORCID: 0009-0002-0477-7522

ВПЛИВ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШИХТИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ПАР НА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ І ПРОДУКТИВНІСТЬ ВИПАЛЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ: ПРОМИСЛОВА ОЦІНКА ТА ПРОГНОЗУВАННЯ

У статті досліджено енергоспоживання випалювальної машини, що забезпечує повний цикл термообробки залізрудних окатишів – від сушіння та підігріву до випалу, рекуперації та охолодження. Особливу увагу приділено впливу фізико-хімічних властивостей шихти, зокрема вологості, дисперсного складу та використання поверхнево-активних речовин (ПАР), на загальні питомі витрати електроенергії та природного газу, а також на продуктивність агрегату. Промислові випробування проведено на одному з провідних гірничозбагачувальних комбінатів Кривбасу у зв'язку з переходом з базового (власного) концентрату на сировину іншого підприємства регіону, оброблену неіоногенною ПАР. Встановлено, що підвищена дисперсність і гідрофільність нового концентрату потребували додаткового зволоження шихти, що суттєво вплинуло на теплові режими машини та загальне енергоспоживання. На основі зібраних експериментальних даних побудовано регресійні моделі, які дозволяють кількісно прогнозувати питомі витрати електроенергії й газу залежно від змін технологічних параметрів. Показано, що ключовими факторами впливу є вологість шихти та добова продуктивність випалювального агрегату. Зафіксовано зростання питомих витрат електроенергії на 17,73 % і природного газу на 33,25 % при одночасному зниженні продуктивності на 9,55 %. Результати є актуальними для фахівців у галузях енергоменеджменту, електроенергетики та теплотехніки в металургії, зокрема при розробці заходів з оптимізації енерговитрат у промислових умовах.

Ключові слова: залізрудні окатиші; випалювальна машина; поверхнево-активні речовини (ПАР); шихта; енергоспоживання; природний газ; електроенергія; дисперсність концентрату; вологість; продуктивність; промислові випробування; регресійне моделювання

Вступ. Забезпечення енергоефективності процесів виробництва залізрудних окатишів є одним із актуальних викликів розвитку гірничо-металургійної галузі в умовах глобальних тенденцій на декарбонізацію виробництва та перехід до "зеленої" металургії [1]. Ефективне використання енергоресурсів сприяє поліпшенню економічної стійкості підприємств і зниженню негативного впливу на довкілля шляхом скорочення викидів парникових газів. Наприклад, у роботах [2, 3] зазначено, що виробництво залізрудних окатишів, яке є важливим проміжним продуктом для металургійної переробки, розглядається як один із пріоритетних напрямків для впровадження енергоощадних рішень у сталевиробній промисловості.

Процес отримання окатишів включає процес збагачення руд і отримання концентрату, формування сирих окатишів шляхом огрудування та їх сушіння [4, 5]. Основними

джерелами енергоспоживання є електроенергія для роботи змішувачів, огрудкувачів, тягодуттєвого обладнання, конвеєрів, укладальників та іншого обладнання, а також тепла енергія для видалення вологи під час сушіння. Враховуючи комплексну складність технологічного обладнання, необхідно забезпечувати пильний контроль його стану для мінімізації виробничих ризиків [6, 7]. Ефективність процесів сушіння сирих окатишів істотно залежить від фізико-хімічних властивостей шихти, зокрема вологості концентрату і сирих окатишів, гранулометричного складу, вмісту в'язучих матеріалів та реологічних характеристик суміші [8–11], які формуються на попередніх стадіях. Однією з таких стадій є подрібнення залізородної сировини, ефективність якого визначається, зокрема, зносостійкістю тіл для подрібнення; як показано у [12], підвищення їх довговічності сприяє стабілізації гранулометричних і фізико-хімічних параметрів концентрату, що позитивно впливає на подальшу ефективність виробництва окатишів. Реологічні властивості вологого концентрату істотно впливають на формування сирих окатишів, їх густину та міцність, що підтверджується результатами досліджень [13], де встановлено взаємозв'язок між моментом активації поверхні залізородного концентрату і фізико-механічними характеристиками «сирих» окатишів. Також дослідниками [14] встановлено, що реологічні характеристики залізородних суспензій залежать від вмісту твердих часток і гранулометричного складу, а додавання дрібних фракцій до грубозернистої пульпи суттєво знижує її в'язкість.

За даними [15], питомі витрати теплової енергії на сушіння мінеральних концентратів зазвичай становлять 800–1500 ккал на кілограм видаленої води (0,93–1,74 кВт·год/кг), що підкреслює вплив вологості (вогкості) концентрату на енергомісткість процесу. В роботі [16] встановлено, що при сушінні латеритної руди у промислових обертових сушарках з високою початковою вологістю (~27%) спостерігаються значні теплові втрати через корпус сушарки, що досягають 3,5% витраченої енергії палива (5,8 ГДж/год), що зумовлюється особливостями теплообміну та характеристиками вихідної сировини. З метою підвищення ефективності сушіння та зниження енерговитрат розробляються нові технології, зокрема мікрохвильове сушіння залізородних окатишів, яке, за даними [17], забезпечує прискорене видалення вологи за рахунок зниження енергії активації процесу і підвищення ефективної дифузії вологи у порівнянні з традиційним конвективним методом [15, 18]. Витрати енергії та теплові втрати у процесах збагачування оптимізують аналогічно до металургійних процесів – шляхом розробки математичних моделей, як це показано в роботі [19] для металургійного обладнання. Температурні режими та енергоспоживання регулюють за допомогою засобів автоматичного керування й систем температурного моніторингу [20].

Вологість шихти та сирих окатишів є одним із головних чинників, що визначає витрати енергії на сушіння [4, 15, 21]: підвищення вологості потребує більше тепла для випаровування та збільшує час сушіння. Це веде до зниження продуктивності обладнання і підвищення частки браку через погіршення міцності сирих окатишів. Гранулометричний склад шихти також суттєво впливає на енергоспоживання [4, 5, 9, 15]: дрібні фракції швидше висушуються, але надлишок дрібних частинок сприяє втратам продукції. Великі окатиші вимагають довшого сушіння, що потребує додаткових витрат енергії та знижує темпи виробництва.

Одним із напрямків удосконалення технології виробництва залізородних окатишів є впровадження нових типів концентратів, оброблених поверхнево-активними речовинами (ПАР) [11, 21]. Ефекти застосування ПАР є досить протиречивими. З одної сторони, застосування ПАР змінює змочуваність і реологічні властивості концентрату, покращуючи його здатність до огрудкування та зменшує злежуваність. При цьому, як показано у [22], обробка концентрату аніонними та неіонними ПАР дозволяє додатково знизити вологість концентрату на 2–4% за рахунок зміни поверхневих властивостей частинок. Водночас обробка концентрату ПАР супроводжується підвищенням вологості шихти та зміною структури поверхні частинок. Дослідниками [23] встановлено, що використання поверхнево-активних флотаційних реагентів (зокрема Atrac) у залізородному концентраті призводить до підвищення пористості та зниження міцності сирих окатишів, що погіршує їх поведінку під час сушіння і може сприяти зростанню енерговитрат через зниження проникності шару і утворення пилу. Підвищена воло-

гість ускладнює процес сушіння, збільшує питомі витрати енергії та може знижувати продуктивність обпалювальної машини. Крім того, зміни у формуванні шару сирих окатишів на конвеєрних машинах можуть призводити до нестабільності технологічного процесу [4, 15]. Поряд із цим використання ПАР забезпечує покращення дисперсності концентрату та стабілізацію гранулометричного складу сирих окатишів. Також спостерігається потенційне зниження витрати в'язучих речовин, зокрема бентоніту, що позитивно впливає на міцність сирих окатишів [11, 24]. Усі ці зміни потребують комплексного врахування при оцінці впливу ПАР на енергоспоживання та продуктивність виробничого процесу.

Проблема прогнозування енергоспоживання є особливо актуальною для гірничозбагачувальних комбінатів, в тому числі рудозбагачувальних фабрик Кривбасу, на яких здійснюється виробництво залізрудних окатишів для металургійної галузі. На цих підприємствах виникають технологічні труднощі, пов'язані з підвищенням вологості концентрату, необхідністю оптимізації витрати бентоніту для забезпечення якості сирих окатишів та застосуванням поверхнево-активних речовин (ПАР). При плановому переході базового Підприємства «А» на концентрат виробництва Підприємства «Б» відбуваються зміни фізико-хімічних характеристик шихти, що призводять до змін продуктивності технологічного обладнання та витрат електроенергії. У зв'язку з цим актуальним є завдання встановлення кількісних залежностей між характеристиками сировини та параметрами енергоспоживання і продуктивності. В цій статті умовні назви "Підприємство «А»" та "Підприємство «Б»" використано з міркувань конфіденційності та дотримання принципу комерційної нейтральності, щоб уникнути ненавмисної реклами або антиреклами конкретних виробників.

Метою роботи було встановлення кількісних залежностей між фізико-хімічними характеристиками шихти (зокрема вологістю, гранулометричним складом та використанням поверхнево-активних речовин) і питомими витратами енергоносіїв (електроенергії та природного газу), а також продуктивністю випалювального агрегату у промислових умовах Підприємства «А» при переході з базового концентрату на модифікований ПАР концентрат виробництва Підприємства «Б».

Матеріали та методи. Перед початком випробувань було підготовлено обладнання всього технологічного комплексу: дозатори, млинові тракти, чашові огрудковувачі, роликовий трипродуктовий грохот Metal7 (з зазорами 16,0 мм та 9,0 мм), грохот ГСТ, димососи, а також проведено перевірку й налагодження вагового обладнання.

Експериментальні дослідження проведено на промисловій випалювальній машині Підприємства А, призначеній для термічної обробки залізрудних окатишів. Установка є безперервною конвеєрною системою з ланцюговим транспортером і візками, які переміщують шар окатишів через зони сушіння, підігріву, випалу, рекуперації та охолодження. Конструкція машини включає інжекційні пальники, газорозподільні камери з газоповітря розподільними пристроями, систему подачі рециркульованого теплоносія та автоматизовану систему регулювання температурних режимів. Рекуперація тепла забезпечує підвищену енергоефективність і зниження витрат палива.

Основні технічні характеристики випалювальної машини (Підприємство «А»): Річна продуктивність – 2,4 млн т; поточна – 300 т/год; питома продуктивність – 0,893 т·м²/год; шар сирих окатишів – 300 мм; кількість візків – 142; газоповітряних камер – 28; швидкість руху візків – 0,6 – 2,5 м/хв; маса візка – 10,3 т; розподіл зон: сушіння, нагрів, випал, рекуперація (макс. зона –рекуперація 37,5 %); максимальна температура випалу – 1350 °С; теплоносій на виході – до 550 °С; питома витрата теплоти – 533,68 МДж/т; природного газу – 17,9 м³/т; електроенергії – 30,7 кВт·год/т; температура окатишів на виході – 100 °С; потужність привода – 32 кВт; загальна маса – 4600 т.

Вихідні матеріали та умови проведення випробувань. Промислові випробування проводили у зв'язку з виробничою необхідністю повного переходу з концентрату Підприємства «А» на концентрат, вироблений Підприємством «Б». Обидва концентрати мали високий вміст заліза (понад 67 %), однак концентрат Підприємства «Б» вирізнявся підвищеною дисперсністю (фракція –0,056 мм: 98,0–98,6 %; фракція +0,056 мм (відповідно залишок): 1,4–2,0 %). Під час попередніх випробувань було встановлено, що підвищена дисперсність концентрату Підприємства «Б» негативно впливає на огруд-

ковуваність (комкуємість) шихти, що спричиняє збільшення обсягу сирого повернення та зниження стабільності формування шару окатишів. Для компенсації цієї проблеми застосовували попередню обробку концентрату Підприємства «Б» поверхнево-активною речовиною (ПАР) Clearon S955 – неіоногенною сполукою на основі етоксильованого ізотридеканола, яка застосовується переважно для покращення фільтрації та зневоднення концентрату після збагачення. У досліджуваному випадку ПАР також забезпечувала покращену змочуваність і агрегацію частинок концентрату, що сприяло стабілізації процесу огрудкування тонкодисперсного концентрату Підприємства «Б». Водночас зниження природної вологості концентрату після зневоднення вимагало додаткового зволоження у змішувачі та огрудковувачі, що в підсумку призвело до збільшення загальної вологості шихти. Це, у свою чергу, впливає на збільшення енергетичних витрат на сушіння окатишів.

Були підготовлені і закладовані шихтові матеріали (бентоніт, вапняк), організовано транспортування і складування концентрату Підприємства «Б» на склад збагачувальної фабрики Підприємства «А» із дотриманням вимог до чистоти і роздільності партій. Для стабілізації механічних властивостей сирих окатишів було скориговано витрату бентоніту у складі в'язучого компоненту.

Випробування тривали вісім діб. Упродовж перших двох днів випалювальна машина працювала на базовому концентраті Підприємства «А» для стабілізації технологічного режиму та фіксації контрольних показників. Починаючи з 21:00 другого дня було повністю введено концентрат Підприємства «Б» (оброблений ПАР), який завантажували після спустошення бункерів і використовували до завершення експерименту. Усі ключові технологічні параметри (витрати сировини, газу, електроенергії, температури, характеристика продукції) фіксувалися погодинно, позмінно та усереднено за добу, що забезпечило можливість порівняльного аналізу впливу типу концентрату на ефективність процесу.

Методи та засоби вимірювання. Вологість концентрату визначали зважуванням проб до та після сушіння у шафі БСЛ-1.0.3 (прямоток, теплоносій – топкові газу) при 105 ± 5 °C до сталої маси. Гранулометричний склад сирих окатишів визначали ситовим методом (згідно ДСТУ 3210-95 / ISO 4701:2017) з використанням віброгрохота 8ГВ-3Я з трьохвальним віброзбуджувачем (діапазон 5–20 мм). Продуктивність фіксували стрічковими вагами Schenck MULTIDOS (похибка 0,1–1,0 %, до 1000 т/год, швидкість ленти – до 0,2 м/с). Облік витрат енергоносіїв: витрати природного газу визначали за лічильниками Elster BK-G1000 у вузлах комерційного обліку, витрати електроенергії – за промисловими електролічильниками НІК 2303 АРЗ (клас точності 1.0). Питомі витрати розраховували з урахуванням змінного випуску продукції на основі хронометрування та добового обліку.

Визначення факторів, що впливають на результат. При проведенні дослідно-промислових випробувань здійснювали щогодинний контроль наступних технологічних параметрів: продуктивності машини (т/год), швидкості руху візків (м/хв), температури в зоні сушіння (°C), розрідження (даПа), кількості сирих окатишів на грохоті (т/год), витрати бентоніту (кг/т), витрати обпаленого повернення (т/год), вологості сирих окатишів (%), питомої витрати електроенергії (кВт·год/т), питомої витрати природного газу (м³/т) та ін. Дані систематизовували у таблицях щоденного обліку (із розрахунком усереднених значень за добу), для встановлення змін у роботі обладнання при переході від використання базової сировини до концентрату Підприємства «Б», модифікованого ПАР. Провели класифікацію факторів (див. табл. 1), що впливають на результат у вигляді продуктивності машини, витрат електричної енергії та розходу природного газу.

Враховуючі отримані ефекти, побудували діаграму Ісікава, яка показує вплив класифікованих технологічних факторів на результат (рис. 1).

Для зменшення кількості факторів впливу застосовували метод експертних оцінок, що дозволило скоротити їх кількість до 10 (у випадку віднесення продуктивності до фактору впливу, кількість факторів збільшується до 11). Логіка скорочення кількості факторів полягала у тому числі в нівелюванні впливом технологічних факторів, значення яких не отримали відчутних змін при переході з однієї сировини на іншу, тобто, за інших рівних умов, їх вплив є рівнозначним.

Таблиця 1 – Класифікація факторів впливу

Обладнання (Machine)	Матеріали (Material)	Методи (Method)	Вимірювання (Measurement)
Випалювальна машина, інжекційні пальники, ГПРП, грохот Metal7, грохот ГСТ, димососи, шафа БСЛ-1.0.3, віброгрохот 8ГВ-3Я	Бентоніт (витрата, фракція, вологість, набухання), вапняк, обпалене повернення, вологість концентрату та сирих окатишів, фракція –0,056 мм, вміст Fe, SiO ₂ , CaO+MgO, ПАР Clearon S955	Порядок подачі концентратів, дозування, стабілізація параметрів, використання тимчасової карти режимів	Визначення вологості (шафа), ситовий аналіз (сита Ø200 мм), стрічкові ваги Schenck, лічильники Elster BK-G1000, електролічильники НІК 2303 AP3
Людський фактор (Man)	Управління (Management)	Обслуговування (Maintenance)	Середовище (Mother Nature)
Персонал, ознайомлений з методикою; ручне та/або автоматизоване керування режимами; хронометрування	Організація транспортування, складування, розробка карт, перевірка дозаторів і бункерів	Профілактика, налаштування вузлів і приладів, техобслуговування	Температура в зоні сушіння, розрідження в горні та камерах, тиск у ГПК, вологість середовища

На рис. 1 фактори впливу, які враховували у подальших розрахунках (при створенні регресійних моделей), виділені жирним шрифтом. В процесі отримання рівнянь регресії за методикою Data Analysis додатково перевіряється вплив кожного з обраних факторів, що дозволяє з'ясувати нівелювання впливу деяких факторів на результат із відповідним додатковим скороченням складових математичної моделі.



Рисунок 1 – Причинно-наслідкова діаграма Ісикава («8М») впливу об'єктивних факторів на продуктивність випалювальної машини, витрати електричної енергії та розхід природного газу

Результати. У ході промислових випробувань було зібрано та систематизовано подовові середні значення технологічних параметрів, що охоплюють два періоди: використання базового концентрату Підприємства «А» (дні 1–2) та перехід на концентрат Підприємства «Б» з обробкою ПАР (дні 3–8). В табл. 2 та 2а наведено значення

ключових факторів впливу (X) та результативних показників (Y), включно з середньодобовими значеннями, повним діапазоном коливань кожного з параметрів (*min...max*), а також зведеними середніми по кожному з етапів.

Дані в табл. 2 та 2а структуруються відповідно до формул регресійного аналізу (1) та (2), що покладені в основу математичних моделей залежності вихідних параметрів від ключових факторів впливу. Зміна сировини супроводжувалась варіаціями у витратах основних компонентів шихти, фізико-хімічних властивостях концентрату, параметрах формування сирих окатишів та ефективності процесу випалювання.

На рис. 2 наведено графічне представлення динаміки трьох ключових показників – продуктивності, питомої витрати електроенергії та природного газу – впродовж восьми діб. Добовий формат подання дозволяє простежити відгук технологічної системи на зміну сировини та зафіксувати перехідний характер третьої доби, яка супроводжувалась найбільшими відхиленнями. Ця інформація врахована при побудові усереднених значень для кожного з періодів.

Таблиця 2 – Результати промислового експерименту з отримання залізородних окатишів при переході з концентрату Підприємства «А» на концентрат Підприємства «Б», оброблений ПАР

Назва фактору (X) або параметру (Y)	Одиниці вимірювання	Формула		Діапазон (min...max)
		(1)	(2)	
Вигляд рівняння регресії (формули)				
1. $Y_n(1) = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_4 + b_5 \cdot X_5 + b_6 \cdot X_6 + b_7 \cdot X_7 + b_8 \cdot X_8 + b_9 \cdot X_9 + b_{10} \cdot X_{10}$				
Витрати бентоніту	кг/т	X_1	X_1	14,55...15,88
Витрати обпаленого повернення	т/год	X_2	X_2	13,5...16,54
Витрати вапняку	кг/т	X_3	X_3	5,3...8,96
Вміст Fe	%	X_4	X_4	67,81...69,86
Вміст вологи у сирому окатиші	%	X_5	X_5	8,37...9,33
Міцність на роздавлювання	кг/окатиш	X_6	X_6	1,3...1,48
2. $Y_n(2) = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_3 \cdot X_3 + b_4 \cdot X_4 + b_5 \cdot X_5 + b_6 \cdot X_6 + b_7 \cdot X_7 + b_8 \cdot X_8 + b_9 \cdot X_9 + b_{10} \cdot X_{10} + b_{11} \cdot X_{11}$				
Міцність на скидання	раз	X_7	X_7	3,83...4,18
Клас 10-14 мм	%	X_8	X_8	59,82...64,12
Висота шару сирих окатишів	мм	X_9	X_9	315...357
Тиск у вакуумній камері	даПа	X_{10}	X_{10}	271...482
Продуктивність (n = 3)	т/год	$Y_3(1)$	X_{11}	243,6...298,0
Питома витрата електроенергії (n = 1)	кВт/т·год	$Y_1(1)$	$Y_1(2)$	33,99...56,35
Питома витрата газу (n = 2)	м³/т·год	$Y_2(1)$	$Y_2(2)$	4.14...10.7

Аналіз табл. 3 свідчить про те, що при побудові регресійних моделей (1) і (2) для прогнозування питомих витрат електроенергії (Y_1), природного газу (Y_2) і продуктивності агрегату (Y_3), частина факторів виявилася статистично незначущою. Це підтверджується нульовими значеннями відповідних коефіцієнтів b у рівняннях регресії.

Зокрема, у моделі (1), побудованій без врахування продуктивності як фактора, значення коефіцієнтів b_4 , b_6 та b_7 для $Y_1(1)$, $Y_2(1)$ та $Y_3(1)$ дорівнюють нулю. Це вказує на те, що фактори «вміст Fe» (X_4), «міцність на роздавлювання» (X_6) та «міцність на

скидання» (X_7) не зробили суттєвого внеску в пояснення варіацій у споживанні енергоносіїв у досліджуваних умовах. Ймовірно, у межах експерименту ці параметри залишалися відносно стабільними, або їхній вплив був слабшим порівняно з вологою, витратами бентоніту чи поверненням.

Таблиця 2а – Результати промислового експерименту з отримання залізорудних окатишів при переході з концентрату Підприємства «А» на концентрат Підприємства «Б», оброблений ПАР

Сировина	День	Середньодобові значення												
		X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11} / Y_3 (1)	Y_1 (1, 2)	Y_2 (1, 2)
«А»	1	14,55	13,50	5,30	69,86	8,37	1,44	4,18	63,73	356	482	298	34,71	4,14
	2	14,55	15,88	5,30	69,86	8,38	1,48	4,13	64,12	357	472	298	33,99	4,22
Середнє за день 1-2		14,55	14,69	5,3	69,86	8,375	1,46	4,155	63,925	356,5	477	298	34,35	4,18
«Б» (з ПАР)	3	15,48	15,86	8,96	67,81	9,33	1,32	4,03	62,43	315	271	243,6	56,35	10,7
	4	15,88	15,58	8,96	67,81	8,70	1,30	3,83	59,82	329	284	272,6	36,71	4,59
	5	15,67	14,58	8,96	67,83	8,87	1,32	4,00	60,05	334	280	275,1	37,09	4,45
	6	15,00	13,71	8,96	67,82	8,80	1,31	3,98	59,82	337	282	275,3	36,78	4,56
	7	15,00	15,50	8,96	67,83	8,85	1,35	4,03	61,13	334	281	275,3	37,55	4,55
	8	15,00	16,54	8,96	67,87	8,80	1,34	4,02	60,03	334	287	275,3	38,18	4,59
Середнє за день 3-8		15,34	15,3	8,96	67,83	8,89	1,32	3,98	60,55	330,5	280,83	269,53	40,44	5,57

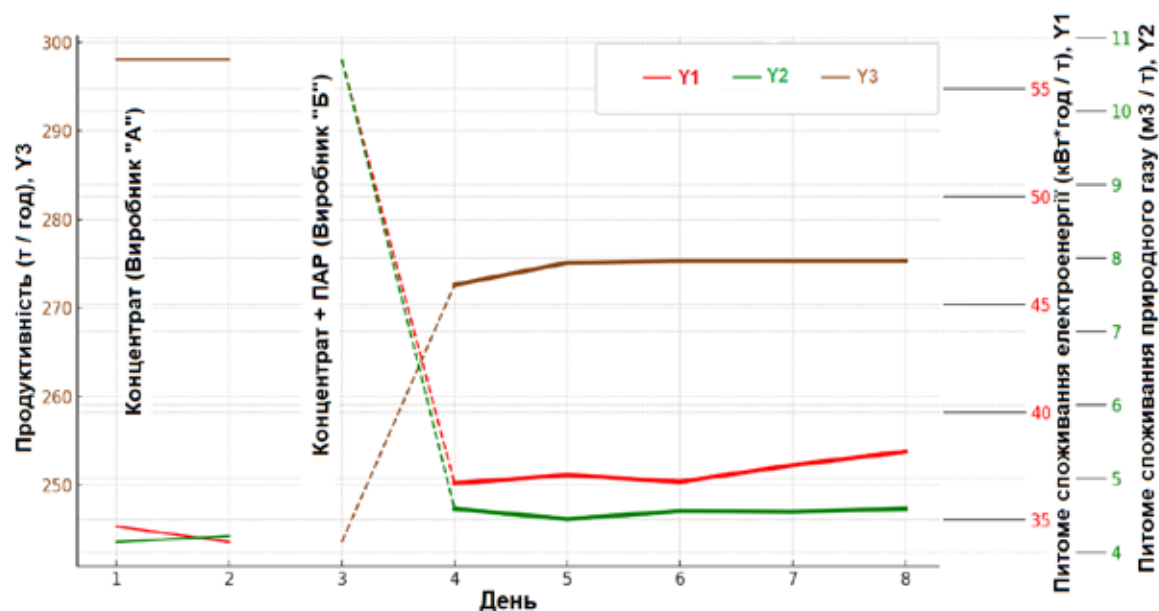


Рисунок 2 – Зміна продуктивності, питомих витрат енергії та природного газу при виробництві окатишів

Після математичної обробки результатів, наведених у табл. 2, отримали коефіцієнти рівнянь регресії (1) та (2), див. табл. 3. Коефіцієнти детермінації для всіх рівнянь склали $R^2 > 0,99$.

Таблиця 3 – Коефіцієнти до рівнянь регресії (1) та (2) з табл. 2
для прогнозування продуктивності та енергетичних витрат

Y	b_0	b_1	b_2	b_3 b_4	b_5 b_6	b_7	b_8	b_9	b_{10}	b_{11}
Без врахування продуктивності як фактору (формула (1))										
$Y_1(1)$	383,256	-4,216	-0,03	-9,773 0	18,846 0	0	-1,763	-0,712	-0,056	-
$Y_2(1)$	218,84	-1,691	-0,086	-6,795 0	3,851 0	0	-0,736	-0,278	-0,081	-
$Y_3(1)$	-847,902	7,26	0,627	29,624 0	-12,953 0	0	3,519	1,552	0,429	-
З врахуванням продуктивності як фактору (формула (2))										
$Y_1(2)$	149,703	-0,2	0,23	0 0	0 0	13,821	-0,21	0,003	0,05	-0,619
$Y_2(2)$	27,135	0,073	0,061	0 0	0 0	0,835	0,095	0,09	0,015	-0,247

У моделі (2), де враховано продуктивність у вигляді фактору (X_{11}), вплив ще більшої кількості факторів було нівельовано: зокрема, для $Y_1(2)$ та $Y_2(2)$ нульовими стали коефіцієнти при X_3 , X_4 , X_5 та X_6 . Це свідчить про те, що після врахування продуктивності як впливового макропараметра, залишковий внесок таких показників, як «витрати вапняку» (X_3), «вміст Fe» (X_4), «вологість сирих окатишів» (X_5) або «міцність на роздавлювання» (X_6), став статистично незначним. Інакше кажучи, ефект цих факторів було «поглинуто» продуктивністю, яка сама суттєво впливає на енерговитрати, знижуючи або підсилюючи їх через механізм сталих фонових теплових втрат.

Таким чином, нульові коефіцієнти вказують не на відсутність фізичного впливу, а на домінування інших, сильніших факторів у межах цього конкретного експериментального плану. Це типовий результат багатофакторного аналізу, коли взаємозв'язки між параметрами можуть перебивати або маскувати вплив менш потужних змінних.

У ході промислових випробувань було встановлено, що концентрат Підприємства «Б» характеризується вищим вмістом дрібнодисперсної фракції ($-0,056$ мм) порівняно з базовим концентратом Підприємства «А». Така зміна гранулометричного складу призвела до зниження природної огрудкованості шихти, ускладнивши формування стабільних сирих окатишів. З метою компенсації гірших грануляційних властивостей було застосовано поверхнево-активні речовини (ПАР) у поєднанні з цілеспрямованим додатковим зволоженням концентрату. Зростання витрат бентоніту (з 14,55 до 15,34 кг/т) було зумовлене необхідністю посилити зв'язувальні властивості шихти через нижчу природну огрудкованість концентрату Підприємства «Б», викликану його вищою дисперсністю та гіршою агрегацією частинок.

У результаті таких заходів середній вміст води в концентраті зріс з 9,4 % до 9,9 %, і, як наслідок, в сирих окатишах – з 8,38 % до 8,89 %. Це свідчить як про підвищену гідрофільність обробленого концентрату, так і про технологічну необхідність забезпечення стабільного процесу огрудкування шляхом зволоження. Водночас підвищення вологовмісту у шихті суттєво ускладнило подальшу стадію сушіння.

Після переходу на концентрат Підприємства «Б» було зафіксовано зниження середньої продуктивності випалювальної машини на 9,6 % – з 298 до 269,5 т/год. Найнижчий показник продуктивності (243,6 т/год) припав на третю добу експерименту, коли здійснювалась адаптація теплового режиму до нових умов. Саме в цей період відзначено пікове споживання енергоносіїв: 56,35 кВт·год/т електроенергії та 10,7 м³/т природного газу. Надалі витрати стабілізувалися, однак залишалися вищими за базові.

Загалом, середнє зростання питомих витрат електроенергії становило +17,7 % (з 34,35 до 40,44 кВт·год/т), а природного газу – +33,3 % (з 4,18 до 5,57 м³/т). Основною причиною цього вбачається необхідність у більш тривалому сушінні через підвищену вологість і гіршу проникність шару сирих окатишів, сформованого з дрібнішого мате-

ріалу. Крім того, зміна реологічних властивостей суміші та зниження початкової механічної міцності окатишів вимагали застосування більш обережних температурних режимів із подовженими циклами нагріву.

Дисперсні властивості концентрату Підприємства «Б», що відрізняються від базового матеріалу, зумовили необхідність його модифікації з використанням ПАР. Узагальнені причинно-наслідкові зв'язки впливу такого втручання на процес огрудковування та енерговитрати наведено на схемі рис. 3 («Проблема – Дія – Результат»).



Рисунок 3 – Схема «Проблема – Дія – Результат»

Результати проведеного аналізу узагальнені у табл. 4.

Таблиця 4 – Аналіз результатів промислового експерименту з отримання залізорудних окатишів при переході з концентрату Підприємства «А» на концентрат Підприємства «Б», оброблений ПАР

Параметр	Базовий концентрат (Виробник «А»)	Концентрат + ПАР (Виробник «Б»)	Δ (абс.)	Δ (%)
Розхід бентоніту, кг/т	14,55	15,34	$\uparrow 0,79$	$\uparrow 5,43$ %
Вологість сирого окатишу, %	8,375	8,89	$\uparrow 0,515$	$\uparrow 6,15$ %
Питомі витрати електроенергії, кВт/т·год	34,35	40,44	$\uparrow 6,09$	$\uparrow 17,73$ %
Питомі витрати природного газу, м ³ /т·год	4,18□	5,57	$\uparrow 1,39$	$\uparrow 33,25$ %
Продуктивність, т/год	298	269,53	$\downarrow 28,47$	$\downarrow -9,55$ %

Додатковим чинником зростання енерговитрат могла стати тимчасова нестабільність теплових режимів у перехідний період. У цей час оператори могли застосовувати знижені температури чи швидкість подачі газу для запобігання руйнуванню окатишів, що, у поєднанні зі зниженням продуктивності, призвело до зростання питомих витрат енергії через сталі фонові теплові втрати агрегату.

Таким чином, застосування ПАР у складі технології обробки концентрату Підприємства «Б» сприяло покращенню змочуваності та агрегації частинок, однак водночас зумовило підвищення вологості суміші, погіршення умов сушіння та зростання витрат енергоносіїв у перехідному періоді.

У межах проведених випробувань оцінку впливу ПАР на результати виділити важко, оскільки зміна концентрату супроводжувалася одночасною зміною низки інших, як фізико-хімічних так і технологічних факторів. Крім того, відсутні дані про лабораторне визначення гідрофільності концентратів, що обмежує можливість кількісної оцінки ефекту змочуваності. Таким чином, перспективним напрямом подальших досліджень може бути проведення цільових тестів із контрольованим дозуванням ПАР, що дозволить точно виявити його вплив на властивості шихти. Крім того, необхідні випробування концентратів з варіативною вологістю, що допоможе уточнити роль зволоження в механізмі зміни енерговитрат.

Висновки. Проведено промислові випробування на Підприємства «А» із переходом від власного концентрату до концентрату Підприємства «Б», обробленого ПАР. Експерименти включали два етапи: дні 1–2 – базовий концентрат Підприємства А, дні 3–8 – концентрат Підприємства Б з ПАР. Порівняно з базовим періодом, нова сировина викликала зміну фізико-хімічних властивостей шихти, що вплинуло на стабільність формування та сушіння окатишів. Отримані результати відображають загальний вплив модифікації концентрату на тепловий режим і енергоспоживання повного циклу роботи випалювального агрегату, включаючи сушіння, випал, рекуперацію та охолодження.

Отримано узагальнені залежності між характеристиками сировини та технологічними показниками. Для їх кількісного опису застосовано регресійний аналіз. Побудовані моделі дозволили прогнозувати питомі витрати енергоносіїв і продуктивність випалювальної машини. Водночас з'ясовано, що такі фактори, як вміст Fe та міцність сирих окатишів, мали статистично незначний вплив порівняно з вологістю і продуктивністю.

Встановлено, що використання концентрату Підприємства «Б» з ПАР вимагало додаткового зволоження концентрату (вміст вологи збільшили в середньому з 9,4% до 9,9%, тобто на +0,5%), що призвело до зростання питомої витрати електроенергії з 34,35 до 40,44 кВт·год/т (на +17,73 %) та збільшення питомої витрати природного газу – з 4,18 до 5,57 м³/т (на +33,25 %). Відповідно зафіксовано зниження середньої продуктивності випалювальної машини з 298,0 до 269,5 т/год (на –9,55 %). Також було виявлено підвищення вологості сирих окатишів з 8,375 до 8,89 % (на +6,15 %) і збільшення витрати бентоніту з 14,55 до 15,34 кг/т (на +5,43 %). Отримані результати свідчать про зростання енерговитрат та зниження ефективності процесу при використанні концентрату Підприємства «Б», що пояснюється його підвищеною дисперсністю та необхідністю зволоження, що ускладнює процес сушіння і впливає на стабільність теплового режиму.

Загалом результати дослідження вказують на необхідність індивідуального налаштування режимів сушіння при переході на нові типи концентратів. У подальших дослідженнях доцільно проводити лабораторні випробування із варіюванням вмісту ПАР та вологості для точнішої оцінки їхнього впливу на енерговитрати та якість продукції. Окрему увагу слід приділити стабілізації теплових режимів у перехідні періоди, що може суттєво покращити енергоефективність виробництва.

Бібліографічний перелік

1. Hirlekar O., Kolte A. and Vasa L. Transition in the mining industry with green energy: Economic dynamics in mining demand. *Resources Policy*, 2025. Vol. 100. Art. № 105409. doi: 10.1016/j.resourpol.2024.105409.
2. Hooey L., Riesbeck J., Wikström J.-O. and Björkman B. Role of ferrous raw materials in the energy efficiency of integrated steelmaking. *ISIJ International*, 2014. Vol. 54. № 3. P. 596–604. doi: 10.2355/isijinternational.54.596.
3. He K., and Wang L. A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. Vol. 70. P. 1022–1039. doi: 10.1016/j.rser.2016.12.007.
4. de Moraes S. L., de Lima J. R. B., and Ribeiro T. R. Iron Ore Pelletizing Process: An Overview. *Iron Ores and Iron Oxide Materials*, 2018. V. Shatokha, Ed. London, U.K.: IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.73164.
5. Miranda T., Montero I., Sepúlveda F. J., Arranz J. I., Rojas C. V. and Nogales S. A review of pellets from different sources/ *Materials*, 2015. Vol. 8. № 4. P. 1413–1427. doi: 10.3390/ma8041413.
6. Kruzhilko O., Maystrenko V., Tkalych I., Polukarov Yu., Kalinchyk V. P., Neklonskyi I. and Ryzhchenko O. Study of the harmful factors influence on the occupational risk level: The example of the Ukrainian mining industry. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2022. Vol. 110. № 1. P. 35–41. doi: 10.5604/01.3001.0015.7029.
7. Kruzhilko O., Volodchenkova N., Maystrenko V., Bolibrukh B., Kalinchyk V. P., Zakora A., Feshchenko and Yeremenko S. Mathematical modelling of professional risk at Ukrainian metallurgical industry enterprises. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2021. Vol. 108. №. 1. P. 35–41. doi: 10.5604/01.3001.0015.4797.
8. Azimova L. and Mirbabayeva N. Method for reducing fuel consumption when roasting pellets from magnetite iron ore concentrate/ *Engineering Headway*, 2024. Vol. 7. P. 45–50. doi: 10.4028/p-hG5G1U.

9. Iljana M., Paananen T., Mattila O., Kondrakov M. and T. Fabritius. Effect of iron ore pellet size on metallurgical properties. *Metals*, 2022. Vol. 12. № 2. P. 302. doi: 10.3390/met12020302.
10. Savchenko I., Shapoval O., Bakharev V., Chupilko T., Babaryka M. and Dzyna N. Mathematical model of rheological processes of composite materials deformation. *Proc. 2022 IEEE 4th Int. Conf. Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, Oct. 2022. P. 01–06, doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005658.
11. Eisele T. C. and Kawatra S. K. A review of binders in iron ore pelletization. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2010. Vol. 24. № 1. P. 1–90. doi: 10.1080/08827500306896.
12. Koval A. D., Efremenko V. G., Brykov M. N., Andrushchenko M. I., Kulikovskii R. A. and Efremenko A. V. Principles of development of grinding media with increased wear resistance. Part 2. Optimization of steel composition to suit conditions of operation of grinding media. *Journal of Friction and Wear*, 2012. Vol. 33. № 2. P. 153–159. doi: 10.3103/S1068366612020079.
13. Kumeda K., Nakamura H., Ohsaki S., Watano S., Fujiwara S., Iwami Y. and Murao A. Relationship between the agitation torque of the wet iron ore powder and pellet properties. *ISIJ International*, 2025. Vol. 65. № 1. P. 62–69. doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2024-281.
14. Kumar S., Singh M., Singh J. and et al. Rheological characteristics of uni/bi-variant particulate iron ore slurry: Artificial neural network approach. *Journal of Mining Science*, 2019. Vol. 55. № 2. P. 201–212. doi: 10.1134/S1062739119025468.
15. Mujumdar A. S. Drying in mineral processing. *Handbook of Industrial Drying*. 2nd ed., rev. and expanded. Vol. 2. A. S. Mujumdar, Ed. New York, NY, USA: Marcel Dekker, 1995. P. 921–929.
16. Sheehan M. E. A systems and resistance analysis of heat loss through an industrial flighted rotary ore dryer. *Proc. 13th Int. Heat Transfer Conf. (IHTC-13)*, Kyoto, Japan, 2006. P. 9. doi: 10.1615/IHTC13.p24.110.
17. Athayde M., Cota M. and Covcevich M. Iron ore pellet drying assisted by microwave: a kinetic evaluation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2018. Vol. 39. № 4. P. 266–275. doi: 10.1080/08827508.2017.1423295.
18. Souza A. S. E., de Souza Pinto T. C., Sarkis A. M., de Pádua T. F. and Béttega R. Energy Analysis of the Convective Drying of Iron Ore Fines. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 2023. Vol. 29. № 3. P. 189–200. doi: 10.2298/CICEQ220208026S.
19. Kurpe O. H., Kukhar V. V., Klimov E. S. and S. M. Chernenko. Improvement of process parameters calculation for coil rolling at the steckel mill. *Proc. 2020 Int. Russian Conf. Materials Science and Metallurgical Technology (RusMetalCon)*, 2019. Vol. 989. P. 609–614. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.989.609.
20. Khrebtova O., Shapoval O., Markov O., Kukhar V., Hrudkina N. and Rudych M. Control systems for the temperature field during drawing, taking into account the dynamic modes of the technological installation. *Proc. 2022 IEEE 4th Int. Conf. Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 2022. P. 1–6. doi: 10.1109/MEES58014.2022.10005724.
21. Souza Pinto T. C., Souza A. S., Batista M. J. N., Sarkis A. M., Leal Filho L. S. and Pádua T. F. Characterization and drying kinetics of iron ore pellet feed and sinter feed. *Drying Technology*, 2021. Vol. 39. № 10. P. 1359–1370. doi: 10.1080/07373937.2020.1747073.
22. Patra A. S., Makhija D., Mukherjee A. K., Tiwari R., Sahoo C. R. and Mohanty B. D. Improved dewatering of iron ore fines by the use of surfactants. *Powder Technology*, 2016. Vol. 287. P. 43–50. doi: 10.1016/j.powtec.2015.09.030.
23. Forsmo S. P. E., Forsmo S.-E., Björkman B. M. T. and Samskog P.-O. Studies on the influence of a flotation collector reagent on iron ore green pellet properties. *Powder Technology*, 2008. Vol. 182. № 3. P. 444–452. doi: 10.1016/j.powtec.2007.07.015.
24. Kawatra S. K. and Claremboux V. Iron ore pelletization: Part I. Fundamentals. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2022. Vol. 43. № 4. P. 529–544. doi: 10.1080/08827508.2021.1897586.

Kukhar Volodymyr, professor, doctor of technical sciences, Department of Metallurgy and Organization of Production, Technical University “Metinvest Polytechnic”, LLC, Zaporizhzhia, Ukraine, ORCID: 0000-0002-4863-7233

Chuprinov Evgeny, candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Metallurgical Technologies Department of Metallurgical Technologies, State University of Economics and Technology, Kryvyi Rih, Ukraine, ORCID: 0000-0001-8605-3434

Navolniev Igor, PhD student of the Department of Metallurgy and Production Organization, Department of Metallurgy and Organization of Production, Technical University “Metinvest Polytechnic”, LLC, Zaporizhzhia, Ukraine, ORCID: 0009-0002-0477-7522

EFFECT OF FEED MIX PROPERTIES AND SURFACTANT APPLICATION ON ENERGY CONSUMPTION AND PRODUCTIVITY OF AN INDURATION MACHINE: INDUSTRIAL ASSESSMENT AND PREDICTIVE MODELLING

The article investigates the energy consumption of an induration machine, which performs the full cycle of thermal treatment of iron ore pellets – from drying and preheating to induration, heat recovery, and cooling. Particular attention is given to the influence of the physicochemical properties of the feed mix, specifically its moisture content, particle size distribution, and the use of surfactants (surface-active agents), on the overall specific consumption of electric power and natural gas, as well as on the unit's productivity. Industrial-scale trials were conducted at one of the leading iron ore beneficiation plants in the Kryvbas region in connection with a transition from a baseline (in-house) concentrate to raw material produced by another regional plant, which had been pre-treated with a nonionic surfactant. It was found that the increased fineness and hydrophilicity of the new concentrate required additional moisture to be added to the feed mix, which significantly affected the thermal regime of the machine and overall energy consumption. Based on the collected experimental data, regression models were developed to quantitatively predict the specific consumption of electricity and gas as functions of technological parameters. The results demonstrate that the key influencing factors are the moisture content of the feed mix and the daily productivity of the induration unit. An increase of 17.73% in specific electricity consumption and 33.25% in specific natural gas consumption was recorded, accompanied by a 9.55% reduction in throughput. These findings are relevant for professionals in the fields of energy management, power engineering, and thermal analysis in metallurgy, particularly when designing strategies to optimize energy consumption under industrial operating conditions.

Keywords: iron ore pellets; induration machine; surfactants; feed mix; energy consumption; natural gas; electricity; concentrate fineness; moisture content; productivity; industrial trials; regression modeling

Башлій Сергій Вікторович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-9377-4037

Ніколенко Анатолій Васильович, доцент, кандидат технічних наук, Український державний університет науки і технологій, ORCID: 0000-0003-3808-4249;

Коваленко Інна Ігорівна, викладач кафедри інформаційної економіки, підприємництва та фінансів, Запорізький національний університет, ORCID: 0009-0001-1526-4610;

Тітов Анатолій Олександрович, здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти, Запорізький національний університет

Чікаловець Ярослав Сергійович, здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти, ORCID: 0009-0002-3705-5227.

СТРАТЕГІЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НА ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Впровадження стратегії енергозбереження на промислових підприємствах є важливим елементом управління енергоефективністю, що враховує особливості роботи енергосистем підприємства. У цій роботі детально проаналізовано процеси розробки та реалізації таких стратегій, спрямованих на довгострокове раціональне використання енергетичних ресурсів.

Аналіз витрат у сферах виробництва, розподілу та споживання електроенергії свідчить, що більшість втрат (до 90%) припадає саме на сферу споживання, тоді як втрати під час передачі електроенергії становлять лише 9-10%. Це обумовлює необхідність зосередження основних зусиль на підвищенні ефективності саме кінцевого використання енергоресурсів. Ключовим напрямом для цього має стати розробка й комплексна реалізація організаційних, технологічних і техніко-економічних заходів, об'єднаних в єдину стратегію, спрямовану на енергозбереження.

Основна увага зосереджена на визначенні ключових заходів з енергозбереження, які базуються на впровадженні новітніх технологій споживання енергії і впливають на формування обраної стратегії.

Окреслено етапи реалізації стратегії, зокрема розроблено систему показників та алгоритм оцінки ефективності впроваджених заходів. Доведено, що основним принципом обґрунтування енергозберігаючих ініціатив є оптимізація витрат на їх реалізацію.

Ефективний режим енергозбереження є особливо важливим для механізмів зі змінним рівнем навантаження, таких як конвеєри, насоси та вентилятори. Для зниження енергетичних втрат широко використовуються конденсаторні установки та частотно-регульовані приводи.

Пропонується використовувати підхід на основі енергетичного балансу, який дає змогу оптимізувати процеси енергозбереження. Визначено механізм побудови цього балансу, що базується на ітеративному узгодженні обсягів надходження та споживання енергоресурсів всередині підприємства. Такий підхід враховує потреби внутрішніх технологій, виконання виробничих планів і можливість розширення обсягів виробництва, забезпечуючи водночас стабільність енергозабезпечення.

Ключові слова: енергетичний баланс підприємства, енергоефективність підприємства, стратегія впровадження енергозбереження.

Вступ. Серед ключових викликів, із якими стикаються сучасні підприємства промислового сектору України, варто наголосити на високій енергоємності виробничих процесів та неефективному використанні енергетичних ресурсів.

Згідно з даними Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження, країна щороку споживає близько 210 млн тонн паливно-енергетичних ресурсів, що ставить Україну в категорію енергодефіцитних держав. Наразі лише близько 53% потреб в енергоспоживанні покриваються за рахунок власних ресурсів. При цьому Україна змушена імпортувати до 75% необхідного природного газу та 85% сирої нафти й нафтопродуктів. Така ситуація формує залежність від країн-експортерів та створює суттєві ризики для енергетичної і національної безпеки.

Аналіз джерел інформації і постановка проблеми. Аналіз витрат у сферах виробництва, розподілу та споживання електроенергії свідчить, що більшість втрат (до 90%) припадає саме на сферу споживання, тоді як втрати під час передачі електроенергії становлять лише 9-10%. Це обумовлює необхідність зосередження основних зусиль на підвищенні ефективності саме кінцевого використання енергоресурсів. Ключовим напрямом для цього має стати розробка й комплексна реалізація організаційних, технологічних і техніко-економічних заходів, об'єднаних в єдину стратегію, спрямовану на енергозбереження.

Аналіз проведених досліджень у цій сфері свідчить про значний внесок українських і закордонних учених у розвиток механізмів енергозбереження. Серед таких дослідників – О. Амоша, В. Геєць, В. Джеджула, К. Рідле, Р. Тоуд та інші [1-12]. Проте впровадження енергозберігаючих ініціатив усе ще залишається фрагментарним. Для забезпечення системного підходу управління процесами енергоефективності необхідно формалізувати механізми з урахуванням комплексного спектра факторів.

Мета і завдання дослідження. Метою цієї роботи є розробка стратегії енергозбереження, адаптованої до умов функціонування енергозабезпечення промислових підприємств. Така стратегія сприятиме вирішенню ключових питань ефективного використання енергоресурсів у довгостроковій перспективі.

Одним із фундаментальних принципів розвитку бізнесу й держави загалом є підвищення енергоефективності та впровадження рішень з енергозбереження. Висока енергоємність виробничих процесів напряду впливає на собівартість продукції, що суттєво знижує конкурентоспроможність галузей як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках. Енергозбереження передбачає впровадження організаційних, правових, економічних і технічних заходів для оптимального використання паливно-енергетичних ресурсів та мінімізації втрат. Ефективний бізнес базується на збалансованості витрат і доходів, причому витрати на енергопостачання – теплову чи електричну енергію – відіграють тут одну з ключових ролей. Чим нижчими є витрати на енергію, тим ефективнішим може бути підприємство. Зменшення енергоємності прямо корелює зі збільшенням енергоефективності. До основних причин низької енергетичної ефективності українських підприємств належать:

- значний фізичний і моральний знос основних виробничих засобів;
- висока аварійність обладнання;
- низький рівень контролю за використанням енергоресурсів;
- суттєві втрати під час виробничих процесів;
- нестача кваліфікованих фахівців у сфері енергетичного менеджменту;
- низький рівень мотивації працівників до впровадження енерго-зберігаючих рішень.

Ставлення керівництва до енергозбереження, як правило, визначається часткою витрат на енергоресурси у структурі собівартості продукції. Наприклад, у хімічній промисловості ця частка може досягати 40 %, тоді як у машинобудуванні вона, зазвичай, становить 6–15 %. З огляду на це, активність заходів з енергозбереження у хімічній галузі повинна бути суттєво вищою. Енергозберігаючі заходи умовно поділяють на три основні категорії:

1. «Організаційні заходи» – це рішення швидкої віддачі, такі як внутрішній енергоаудит, складання енергетичного паспорта підприємства, розробка і реалізація планів підвищення ефективності технологічних процесів, моніторинг виконання прийнятих рішень, стимулювання персоналу до енергозберігаючої поведінки. Також це може включати право керування отриманими коштами від економії енергоносіїв і введення критеріїв для закупівлі енергоефективного обладнання. Такі заходи характеризуються мінімальними витратами, даючи відчутний ефект вже протягом року.

2. «Технологічні заходи» – орієнтовані на довготривалу модернізацію і швидке впровадження економічно ефективних інвестицій. Вони включають впровадження стандартів енергоефективності у будівлях і обладнанні, застосування систем оборотного водопостачання, використання відпрацьованого тепла для підігріву води, встановлення систем частотного регулювання для підвищення ККД електродвигунів. Реалізація таких ініціатив часто вимагає фінансової підтримки з боку банків чи лізингових компаній.

3. «Інвестиційні заходи» – високовартісні, але дуже ефективні рішення. До них належить перехід на альтернативні джерела енергії та впровадження сучасних енергозберігаючих технологій. Для успішної реалізації таких проєктів потрібна підтримка на державному та регіональному рівнях у вигляді реформ ціноутворення, вдосконалення ринків електроенергії й газу та інтегрованого планування роботи різних джерел енерго-генерації.

Модернізація промислових підприємств повинна базуватися на використанні таких технологій:

- універсальні рішення для забезпечення енергоефективності: двигуни зі змінною частотою обертання, теплообмінники, системи освітлення, парогенератори, охолоджувальні установки, сушильні системи тощо;

- новітнє обладнання для генерації енергії: сучасні котельні, когенераційні та трігенераційні установки;

- заміна застарілого промислового обладнання на нове з низьким споживанням енергії;

- впровадження альтернативних джерел енергії.

Ефективний режим енергозбереження є особливо важливим для механізмів зі змінним рівнем навантаження, таких як конвеєри, насоси та вентилятори.

Для зниження енергетичних втрат широко використовуються конденсаторні установки та частотно-регульовані приводи.

Запровадження стратегії енергозбереження дозволяє підприємствам не лише мінімізувати ризики, а й отримати конкурентну перевагу на ринку. Ця стратегія має стати фундаментом для довгострокового управління енергоспоживанням у рамках загальної економічної та інноваційної політики підприємства.

Німецький дослідник Й. Кальс у своїй праці [19] визначає кілька типових стратегій, які можуть застосовуватися для стратегічного моделювання системи енергозбереження на підприємстві:

1. *Пасивна стратегія.* відсутнє систематичне планування, а управління енергозбереженням не розглядається як окремий об'єкт впливу. формування енергетичної політики та впровадження міжнародних стандартів енергозбереження не є пріоритетними для підприємства і радше виконують допоміжну роль у вирішенні завдань виживання в умовах зростаючої конкуренції.

2. *Стратегія максимізації прибутку в короткостроковій перспективі.* зосереджується на впровадженні заходів енергозбереження з короткими термінами окупності та високою економічною віддачею. рішення обираються переважно стандартизовані, перевірені практикою і ті, що не потребують суттєвих додаткових зусиль, таких як навчання персоналу чи модернізація технологій. малоприбуткові заходи не розглядаються.

3. *Стратегія максимізації прибутку у довгостроковій перспективі.* вимагає глибокого аналізу ринку енергоносіїв та технологічних трендів. у рамках цієї стратегії підприємство інвестує в енергозберігаючі проєкти з довгими термінами окупності, які можуть реалізовуватися протягом десятиліть (наприклад, впровадження нових електростанцій або теплообмінників).

4. *Стратегія реалізації всіх інвестиційно привабливих заходів.* спрямована на комплексний підхід до енергозбереження шляхом впровадження всіх можливих проєктів та технологій, які забезпечують економічну ефективність як у коротко-, так і в довгостроковому періоді.

5. *Максимальна стратегія.* Передбачає, що підприємство може змінювати навіть свої базові цілі задля пріоритету енергозбереження та захисту клімату. У межах цієї стратегії компанія бере участь як у прикладних дослідженнях із тривалими термінами

окупності, так і у фундаментальних дослідженнях, наприклад, у сфері альтернативної енергетики.

Вибір конкретної стратегії залежить насамперед від цілей компанії та її потенційних можливостей щодо реалізації обраного напрямку. Крім того, одним із ключових факторів у цьому процесі за умов економічної автономії підприємств є оцінка економічної ефективності впроваджуваних енергозберігаючих технологій.

До основних переваг від реалізації стратегії енергозбереження на промисловому підприємстві можна віднести:

- підвищення продуктивності обладнання та зниження енерговитрат на одиницю продукції, що водночас покращує її якість.
- економію енергії та інших ресурсів, що сприяє зниженню матеріальних витрат і собівартості продукції.
- скорочення витрат підприємства на сплату за забруднення довкілля завдяки зменшенню споживання паливно-енергетичних ресурсів.

Проте реалізація таких стратегій може супроводжуватися низкою негативних наслідків, серед яких:

- зростання загальної вартості основних фондів підприємства.
- збільшення матеріальних витрат, навіть за умов економії енергоресурсів.
- підвищення експлуатаційних витрат на обслуговування нового обладнання.
- необхідність залучення додаткового персоналу для обслуговування енергозберігаючих систем.

Ефективне впровадження стратегії енергозбереження має передбачати всебічний підхід до управлінських завдань і чітку формалізацію її етапів:

1. Розробка системи цільових показників, обчислених на основі індикаторів (параметрів енергетичного стану підприємства). Ці показники служать базою для планування та оцінювання ефективності реалізації заходів з енергозбереження як на рівні підприємства, так і його структурних елементів (енергозабезпечувальних систем, підрозділів, будівель тощо). Вони характеризують як планові, так і фактичні результати виконання стратегічних завдань і потребують щорічного перегляду з урахуванням ряду факторів: відхилень фактичних показників від запланованих за звітний період, аналізу ефективності впроваджених заходів, змін у рівні технічного та технологічного розвитку, економічної ситуації та інших умов.

2. Планування та реалізація як точкових, так і комплексних заходів у сфері енергозбереження. Впровадження заходів повинно ґрунтуватися на чітко визначеному алгоритмі дій із прогнозованим результатом. Всі дії мають відповідати державним і галузевим нормам, бути узгодженими з попередньо прийнятими на підприємстві програмами та стратегіями. Для кожного заходу необхідно визначити відповідальних осіб, обсяг робіт, джерела фінансування та механізми залучення коштів. З огляду на часові обмеження стратегії формується детальний план-графік виконання заходів.

3. Контроль за процесами енергозбереження. Стратегія передбачає впровадження ефективної системи моніторингу, аналізу та ухвалення рішень. Це забезпечить чіткий розподіл зон відповідальності за виконання поставлених завдань, а також дозволить адаптивно управляти процесами енергозбереження з урахуванням потенційних ризиків та низки технічних, організаційних, соціальних і економічних факторів.

Оцінювати ефективність впровадження заходів з енергозбереження можна через аналіз економії енергії як у кількісному, так і у вартісному вираженні. Для порівняння економічних показників до та після реалізації заходів із загальної величини прибутку підприємства виділяється частка, зміни якої безпосередньо пов'язані з впровадженням цих заходів. Розрахунок відбувається за формулою:

$$\Delta P_t = Cf_t \cdot \Delta Qf_t + Ch_t \cdot \Delta Qh_t + Ce_t \cdot \Delta Qe_t + \Delta E_t - (C_t + n \cdot I_t) + \Delta Z_t \quad (1)$$

де Cf_t – ціна умовно заощадженого палива згідно діючих тарифів у році t , грн./т.у.п.; ΔQf_t – скорочення поставки умовного палива для підприємства в році t , т.у.п./рік.; Ch_t – тариф на закупівлю теплової енергії у році t , грн./ГДж; ΔQh_t – скорочене споживання тепла в році t завдяки реалізації енергозберігаючих заходів, ГДж/рік.; Ce_t – тариф на електроенергію від державної енергосистеми у році t , грн./кВт-год; ΔQe_t – скорочення

електроенергії від енергосистеми в році t завдяки заходам з енергозбереження, кВт·год/рік; ΔE_t – зменшення витрат компанії на екологічні платежі завдяки зниженню шкідливих викидів у році t , грн./рік; C_t , I_t – витрати на придбання, встановлення та експлуатацію обладнання в році t , грн.; n – внутрішня норма дохідності; ΔZ_t – скорочені витрати підприємства на експлуатацію за рахунок впроваджених заходів (крім обслуговування нового обладнання) у році t , грн/рік.

Енергоефективність кожного впровадженого заходу E_j можна обчислити за формулою:

$$E_j = E \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta P}{P}} \right) \quad (2)$$

Енергоефективність після впровадження енергозберігаючих заходів є результатом додавання початкової енергоефективності до коефіцієнта, що залежить від відносного рівня енергозбереження. Цей коефіцієнт демонструє, наскільки зростає енергоефективність у межах певного корисного ефекту при відносному енергозбереженні, обчисленому як $\Delta P/P$.

До ключових показників ефективності стратегії енергозбереження для промислових підприємств можна віднести:

- коефіцієнт корисної дії енергетичних установок;
- коефіцієнт ефективного використання енергії;
- коефіцієнт раціонального застосування енергії за видами та параметрами енергоносіїв;
- питоме (фактичне) споживання енергоносіїв;
- питомі витрати енергоресурсів на одиницю готової продукції, а також деталізовані дані щодо основних видів енергоносіїв (електроенергія, паливо, вода).

Розробка заходів з енергозбереження передбачає оптимізацію витрат на їх реалізацію. Оскільки такі заходи мають довготерміновий характер, це завдання ускладнюється через цінову нестабільність. В умовах інфляції необхідно враховувати перспективи економічного розвитку та зміну цін на паливно-енергетичні ресурси для досягнення оптимального рішення.

Одним із базових організаційних документів для оптимізації процесів енергозбереження вважається енергетичний баланс підприємства. Він має включати не лише традиційні дані про обсяги енергоспоживання, але й інформацію про ефективність використання зовнішніх джерел енергії та оцінку внутрішніх витрат.

Такий підхід дозволяє створити структуру прибуткової частини балансу, яка враховує глобальні та локальні обмеження і дозволяє оптимально підібрати джерела енергопостачання.

Прибуткова частина балансу для підприємства-споживача, своєю чергою, визначає кінцевий результат всього технологічного процесу енергозабезпечення.

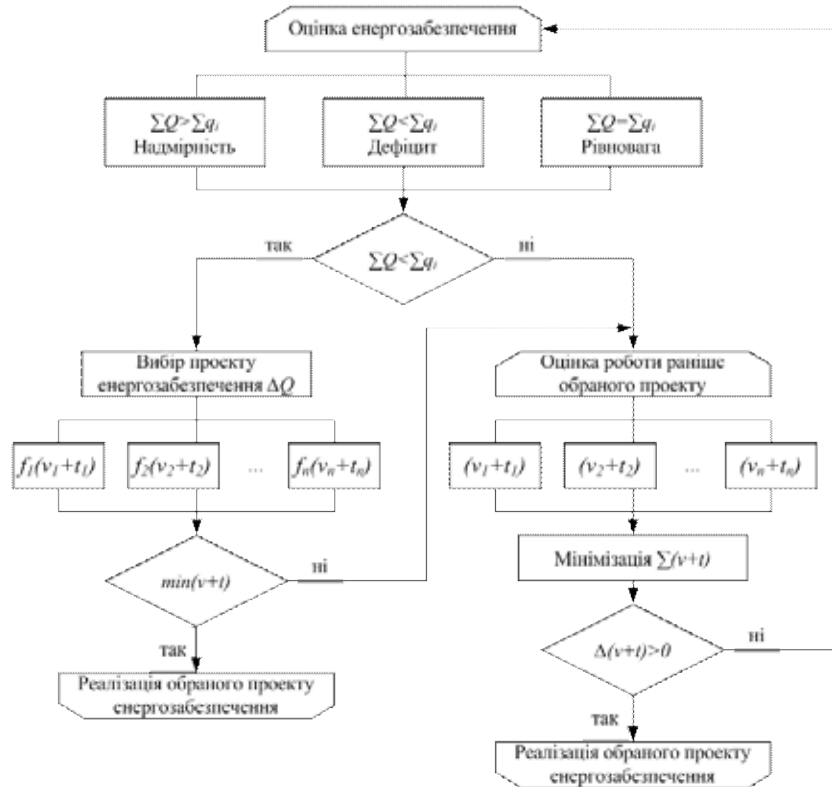
Для більшої деталізації можна аналізувати окремі енергобаланси цехів, виробничих підрозділів або навіть агрегатів і технологічних операцій підприємства. Це створює передумови для побудови ієрархії прийняття рішень у сфері енергозабезпечення.

Для забезпечення безперервної роботи з оптимізації витрат енергії запропоновано алгоритм (рис. 1) формування енергетичного балансу підприємства, включаючи стратегічні проекти з енергозбереження.

Алгоритм передбачає ітераційне узгодження надходжень та витрат ресурсів з урахуванням умов технологічних потреб підприємства, виконання виробничих планів і можливого нарощування об'ємів випуску продукції.

Висновки. У підсумку можна виділити такі особливості реалізації стратегії енергозбереження на промислових підприємствах України:

- системний підхід із чітко прописаним алгоритмом дій;
- постійний моніторинг і оцінка результативності заходів з підвищення енергоефективності;
- адаптивність до внутрішніх та зовнішніх змін;



Q – пропозиція енергоресурсів для підприємства, q_i – попит підприємства на енергоресурси, v_i – витрати енергоресурсів за i -м проектом енергозбереження, t_i – витрати за i -м проектом енергозбереження

Рисунок 1 – Алгоритм формування енергетичного балансу промислового підприємства

– відповідність стратегіям, програмам і управлінським рішенням, прийнятим раніше;
– дотримання вимог нормативно-правових документів і узгодженість із енергетичною політикою підприємства.

Алгоритм формування енергетичного балансу промислового підприємства пропонує моделювання взаємозв'язку між пропозицією енергоресурсів (Q), попитом на них з боку підприємства (q_i), а також витратами енергоресурсів (v_i) та загальними витратами (t_i) в межах i -го проекту енергозбереження.

Зазначені підходи можуть бути застосовані для комплексного вирішення завдань автоматизації, інтеграції, прогнозування та оптимізації процесів енергозбереження на промислових підприємствах. Це обумовлено можливістю використання як національних, так і міжнародних стандартів, що забезпечує гнучкість і ефективність у впровадженні таких рішень.

Бібліографічний перелік

1. Мокін Н., Бондаренко В. Заходи з енергоефективності та екологічна продуктивність українських підприємств. E3S Webof Conferences. 2021. № 233. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123301050>.
2. Kemfert C., Truong T. P., Brauers H. Economic and environmental impacts of energy efficiency policies. Energy Efficiency. 2021. № 14(2). P. 271-287.
3. Nordhaus W.D. Climate clubs: Overcoming free-riding in international climate policy. American Economic Journal: Economic Policy. 2020. No 12(3). P. 1-41.
4. Aghion P., Dechezleprêtre A., Hemous D., Martin R., Van Reenen J. Environmental Regulation And Innovation: A review of the empirical evidence. Annual Review of Economics. 2020. No 12. P. 195-221. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-economics-080819-023912>
5. Геєць В.М. Розвиток та взаємодія економічної та енергетичної політики в Україні. Вісник НАН України. 2016. № 2. С. 46-53.

6. Джеджула В.В. Енергозбереження промислових підприємств: методологія формування, механізм управління : монографія. Вінниця: ВНТУ, 2014. 346 с.
7. Докуніна К.І. Теоретичні аспекти формування економічного механізму енергозбереження. Комунальне господарство міст. 2012. № 106. С. 341-350.
8. Іпполітова І.Я. Формування організаційно-економічного механізму енергозбереження на підприємстві. Глобальні та національні проблеми економіки. 2015. Випуск 8. С. 406-411.
9. Скрипник Д.М. Організаційно-економічний механізм формування енергоефективної моделі розвитку національної економіки: дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 073 Менеджмент. Сумський національний аграрний університет, Суми, 2021. URL: https://science.snau.edu.ua/wp-content/uploads/2021/11/annotation_skrypnyk-D.pdf.
10. Михайленко І.Д. Політика енергозбереження, потенціальні можливості енергозбереження в Україні. Енергосбережение. 2006. № 1. С. 3-8.
11. Микитенко В.В. Енергоефективність промислового виробництва: монографія. Київ: Об'єднаний інститут економіки, 2004. 281 с.
12. Про енергетичну ефективність: Закон України № 1818-IX від 09.11.2023. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#n436>.
13. Неміш П.Д. Сутність, оцінка та напрями підвищення ефективності механізму енергозбереження АПК. Інноваційна економіка. 2013. № 7 (45). С. 46-53.
14. Сердюк Т.В. Організаційно-економічний механізм енергозбереження в промисловості: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. 154 с.
15. International Energy Agency. World Energy Investment 2023. Flagship report. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>.
16. International Energy Agency. Energy efficiency 2022. URL: <https://www.iea.org/news/global-energy-efficiency-progress-is-accelerating-signalling-a-potential-turning-point-after-years-of-slow-improvement>.
17. Energy efficiency in Ukraine. 2021. URL: <https://unece.org/energy-efficiency-ukraine>.
18. Чистов Ю.І. Сутність механізму енергозбереження та його багатогранна природа. Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. Хмельницький: 2010. № 5. С. 341-44.
19. Kals J., Würtenberger K. IT-unterstütztes Energiemanagement in: HMD – Praxis der Wirtschaftsinformatik HMD, Heft 285/2012. P. 73-81.
20. Гнідий М.В. Методологія визначення теоретичного потенціалу енергозбереження на різних рівнях управління економікою. Проблеми загальної енергетики. 2007. № 15. С. 1-21.
21. Вовк Ю. Організаційно-економічний механізм управління раціональним використанням ресурсів [Електронний ресурс]: Соціально-економічні проблеми і держава. 2011. Вип. 1 (40). Режим доступу: <http://sepd.tntu.edu.ua/images/stories/pdf/2011/11vyuvr.pdf>.
22. Проект Плану відновлення України: Матеріали робочої групи «Аудиту збитків, понесених внаслідок війни». Національна рада з відновлення України від наслідків війни. Київ, 2022. 86 с.
23. Воєна Україна. Збитки промисловості через війну: аналітика, економіка. 2022. URL: <https://voxukraine.org/zbytku-promyslovosti-cherez-vijnu/>.
24. Микитенко В.В. Повоєнне відновлення та розвиток критичної інфраструктури України. Вісник економічної науки України. 2023. № 1 (44). С. 124-138. DOI: [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2023.1\(44\).124-138](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2023.1(44).124-138).
25. CID: Center for Innovations Development. Стан та потреби бізнесу в Україні: секторальний розріз. Центр розвитку інновацій, Офіс з розвитку підприємництва та експорту. 2022. URL: <https://cid.center/state-and-needs-of-business-in-ukraine-sectoral-analysis-september-2022/>.
26. Ben Cahill, Allegra Dawes. Developing Renewable Energy in Ukraine. Center for Strategic and International Studies. 2022. URL: <https://www.csis.org/analysis/developing-renewable-energy-ukraine>.

References

1. Mokin N., Bondarenko V. Energy efficiency measures and environmental productivity of Ukrainian enterprises. E3S Web of Conferences. 2021. No. 233. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123301050>.
2. Kemfert C., Truong T. P., Brauers H. Economic and environmental impacts of energy efficiency policies. Energy Efficiency. 2021. No. 14(2). P. 271-287.
3. Nordhaus W.D. Climate clubs: Overcoming free-riding in international climate policy. American Economic Journal: Economic Policy. 2020. No 12(3). P. 1-41.
4. Aghion P., Dechezleprêtre A., Hemous D., Martin R., Van Reenen J. Environmental Regulation And Innovation: A review of the empirical evidence. Annual Review of Economics. 2020. No. 12. P. 195-221. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-economics-080819-023912>

5. Geets V.M. Development and interaction of economic and energy policies in Ukraine. Bulletin of the NAS of Ukraine. 2016. No. 2. P. 46-53.
6. Dzhezdzhula V.V. Energy saving of industrial enterprises: methodology of formation, management mechanism: monograph. Vinnytsia: VNTU, 2014. 346 p.
7. Dokunina K.I. Theoretical aspects of the formation of an economic mechanism of energy saving. Municipal economy of cities. 2012. No. 106. P. 341-350.
8. Ippolitova I.Ya. Formation of an organizational and economic mechanism for energy saving at an enterprise. Global and national problems of the economy. 2015. Issue 8. P. 406-411.
9. Skrypnyk D.M. Organizational and economic mechanism for the formation of an energy-efficient model of national economy development: dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 073 Management. Sumy National Agrarian University, Sumy, 2021. URL: https://science.snau.edu.ua/wp-content/uploads/2021/11/annotation_skrypnyk-D.pdf.
10. Mykhailenko I.D. Energy saving policy, potential energy saving opportunities in Ukraine. Energy Saving. 2006. No. 1. P. 3-8.
11. Mykytenko V.V. Energy efficiency of industrial production: monograph. Kyiv: United Institute of Economics, 2004. 281 p.
12. On energy efficiency: Law of Ukraine No. 1818-IX of 09.11.2023. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#n436>.
13. Nemish P.D. The essence, assessment and directions of increasing the efficiency of the energy saving mechanism of the agricultural complex. Innovative economy. 2013. No. 7 (45). P. 46-53.
14. Serdyuk T.V. Organizational and economic mechanism of energy saving in industry: monograph. Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2005. 154 p.
15. International Energy Agency. World Energy Investment 2023. Flagship report. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023>.
16. International Energy Agency. Energy efficiency 2022. URL: <https://www.iea.org/news/global-energy-efficiency-progress-is-accelerating-signalling-a-potential-turning-point-after-years-of-slow-improvement>.
17. Energy efficiency in Ukraine. 2021. URL: <https://unece.org/energy-efficiency-ukraine>.
18. Chistov Y.I. The essence of the energy saving mechanism and its multifaceted nature. Bulletin of Khmelnytsky National University. Economic Sciences. Khmelnytsky: 2010. No. 5. P. 341-44.
19. Kals J., Würtenberger K. IT-unterstütztes Energiemanagement in: HMD – Praxis der Wirtschaftsinformatik HMD, Heft 285/2012. P. 73-81.
20. Gnidy M.V. Methodology for determining the theoretical potential of energy savings at different levels of economic management. Problems of general energy. 2007. No. 15. P. 1-21.
21. Vovk Yu. Organizational and economic mechanism for managing the rational use of resources [Electronic resource]: Socio-economic problems and the state. 2011. Issue 1 (40). Access mode: <http://sepd.tntu.edu.ua/images/stories/pdf/2011/11/vyryvr.pdf>.
22. Draft of the Recovery Plan of Ukraine: Materials of the working group "Audit of damage incurred as a result of the war". National Council for the Recovery of Ukraine from the Consequences of the War. Kyiv, 2022. 86 p.
23. Vox Ukraine. Industrial losses due to war: analytics, economics. 2022. URL: <https://voxukraine.org/zbytky-promyslovosti-cherez-vijnu/>.
24. Mykytenko V.V. Post-war restoration and development of critical infrastructure of Ukraine. Bulletin of Economic Science of Ukraine. 2023. No. 1 (44). P. 124-138. DOI: [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2023.1\(44\).124-138](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2023.1(44).124-138).
25. CID: Center for Innovations Development. State and needs of business in Ukraine: sectoral breakdown. Innovation Development Center, Office for Entrepreneurship and Export Development. 2022. URL: <https://cid.center/state-and-needs-of-business-in-ukraine-sectoral-analysis-september-2022/>
26. Ben Cahill, Allegra Dawes. Developing Renewable Energy in Ukraine. Center for Strategic and International Studies. 2022. URL: <https://www.csis.org/analysis/developing-renewable-energy-ukraine>.

Bashliy Serhiy, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0001-9377-4037;

Nikolenko Anatoly, associate professor, candidate of technical sciences, Ukrainian State University of Science and Technology, ORCID: 0000-0003-3808-4249;

Kovalenko Inna, lecturer, Department of information economics, entrepreneurship and finance, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0009-0001-1526-4610;

Titov Anatoly, second (master's) level higher education student, Zaporizhzhia National University

Chikalovets Yaroslav, second (master's) level higher education student, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0009-0002-3705-5227.

ENERGY SAVING STRATEGY AT INDUSTRIAL ENTERPRISES

The implementation of an energy saving strategy at industrial enterprises is a key component of energy efficiency management, taking into account the specific operational characteristics of the enterprise's energy systems.

This work provides a detailed analysis of the processes involved in developing and implementing such strategies aimed at the long-term rational use of energy resources.

An analysis of expenditures in the production, distribution, and consumption of electricity reveals that the majority of losses (up to 90%) occur at the consumption stage, while transmission losses account for only 9–10%. This underscores the necessity of focusing primary efforts on improving the efficiency of end-use energy consumption.

A primary direction in this context should be the development and comprehensive implementation of organizational, technological, and techno-economic measures, unified into a single energy saving strategy.

Special attention is devoted to identifying key energy saving measures based on the adoption of advanced energy consumption technologies that influence the formation of the chosen strategy.

The stages of strategy implementation are outlined, including the development of a performance indicator system and an algorithm for assessing the effectiveness of implemented measures. It is demonstrated that the fundamental principle in justifying energy saving initiatives is the optimization of implementation costs.

An effective energy saving regime is particularly important for equipment with variable load levels, such as conveyors, pumps, and fans. Capacitor units and frequency-controlled drives are widely used to reduce energy losses.

A balance-based approach is proposed to optimize energy saving processes. A mechanism for constructing this balance is defined, based on iterative coordination of energy inflows and consumption within the enterprise. This approach takes into account internal technological needs, production plan execution, and potential production expansion—while simultaneously ensuring energy supply stability.

Keywords: energy balance of the enterprise, energy efficiency of the enterprise, strategy for implementing energy saving.

Харченко Олександр Вікторович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0003-3717-3872

Воляр Роман Миколайович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-7299-0053

Юров Михайло Юрович, здобувач PhD, Запорізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЧАСТКИ БРУХТУ НА ОПТИМАЛЬНІ ПАРАМЕТРИ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОЇ ПЛАВКИ

В роботі проведено дослідження впливу частки брухту і інших шихтових матеріалів на оптимальні параметри киснево-конвертерної плавки на основі термодинамічного аналізу системи «метал-шлак-газ» з використанням методу хімічних потенціалів Гіббса. За допомогою програмного комплексу «Excalibur» виконано експериментально-обчислювальне моделювання і системний аналіз комплексу параметрів киснево-конвертерної плавки, які є взаємопов'язаними функціями тиску (включаючи феростатичний тиск металу), температури чавуну, температури і хімічного складу сталеплавильної ванни у конвертері, шлакового режиму плавки, вихідних мас сталевого і чавунного брухту, розмивання футерівки, підігріву матеріалів, маси кисню на плавку, маси флюсуючих матеріалів, а також низки інших технологічних і геометричних параметрів кисневого конвертера. З використанням симплекс-методу лінійного програмування виконано оптимізацію параметрів киснево-конвертерної плавки за декількома варіантами. Побудовані графічні залежності впливу частки мас матеріалів, зокрема брухту, на вміст хімічних елементів в кінцевому напівпродукті і шлаку. Проаналізовано технологію киснево-конвертерної плавки з підвищеним вмістом брухту і зниженим вмістом рідкого чавуну в шихтових матеріалах. Визначено вплив фізичних і хімічних показників шихтових матеріалів на параметри теплової роботи конвертерів, можливість часткової заміни чавуну в шихті металобрухтом з метою економії чавуну і підвищення техніко-економічних показників плавки. Технологію з підвищеним вмістом брухту і зниженим вмістом рідкого чавуну в шихтових матеріалах рекомендовано для виплавки низьковуглецевих марок сталі. Зроблено висновок, що для одержання високоякісної сталі з конвертерного напівпродукту потрібно забезпечити позапічну обробку з глибоким розкисленням і десульфуріацією.

Ключові слова: сталь, киснево-конвертерна плавка, шлак, шихтові матеріали, метод Гіббса, хімічний склад, оптимізація, система «метал-шлак-газ»

Вступ. Одним із завдань киснево-конвертерного сталеплавильного процесу є контроль його результатів за хімічним складом готової сталі, що належить до складних завдань, оскільки пов'язане з протіканням складних фізико-хімічних процесів, частина з яких важко керована або зовсім некерована.

При оптимізації киснево-конвертерного процесу і систем автоматизованого управління плавкою сталі завдання зводиться до прогнозування складів і кількостей продуктів плавки за заданих початкових умов (склад і кількості шихтових матеріалів, що поступають в металургійний агрегат, напівпродукту, синтетичних шлаків, флюсів, легуючих матеріалів, розкислювачів та ін.). При цьому увесь процес виплавки сталі являє послідовність однорідних циклів, наприклад, розплавлення, знеуглецювання, розкислювання, доведення та ін. На початку кожного циклу в агрегаті знаходяться деякі початкові матеріали, у кінці – продукти їх взаємодії, що дозволяє в простому випадку описати усю плавку повторенням одного і того ж програмного блоку. Для спрощення часто розглядається не уся металургійна система в цілому, а лише частина, найбільш

суттєва з точки зору поставленого завдання. Через складний взаємозв'язок параметрів і чинників, що визначають сталеплавильне виробництво, математична модель плавки завжди є складною системою рівнянь, рішення якої стосовно умов реальних процесів зустрічає певні труднощі.

Математична модель плавки служить основою для створення її алгоритму, під яким розуміють повний і точний опис обчислювального процесу, що дозволяє з початкових даних отримувати шуканий результат. Алгоритм плавки зазвичай дещо ширше за математичну модель, оскільки він може включати окрім математичного опису, ще логічні умови, статистичну адаптацію і інші елементи.

До теперішнього часу розроблено багато математичних моделей плавки сталі, які часто ділять на термодинамічні (зазвичай рівноважні або квазірівноважні), кінетичні (в тому числі побудовані з використанням термодинаміки безповоротних процесів), статистичні та ін. Про це свідчать численні міжнародні симпозиуми по сучасних методах комп'ютерного моделювання сталеплавильних процесів. Зокрема на 4-й Європейській міжнародній конференції технологій й використання сталі ESTAD-2019 (Дюсельдорф) [1] і 9-й Європейській міжнародній конференції з киснево-конвертерного виробництва EOSC-2022 (Аахен) [2] дослідниками було відмічено, що стосовно процесів виробництва сталі використання комп'ютерних технологій в останні два десятиліття забезпечило істотний прогрес в частині забезпечення підвищення її якості, а також посиленні методів контролю відповідності металопродукції заданим технічним умовам.

Інтеграція різних аспектів детермінованої фізико-хімічної моделі плавки на основі методу хімічних потенціалів Гіббса у рамках одного пакету призвела до розробки програмного комплексу «EXCALIBUR» [3-4], в якій вперше в повному обсязі реалізовані пряма і зворотна задачі сталеплавильного виробництва, які працюють в тандемі. Алгоритм прямої задачі заснований на термодинамічній моделі багатокомпонентної конденсованої фази і її наступних модифікаціях [5-6], ентальпійном тепловому балансі [7] і обліку кінетичного запізнювання [8]. У алгоритмі зворотної задачі реалізований універсальний метод фазових операторів, окремим випадком якого є диференціальні коефіцієнти засвоєння в металі [2, 9].

У цій роботі програмний комплекс «EXCALIBUR» використовується як інструмент експериментально-обчислювального дослідження впливу частки брухту на оптимальні параметри киснево-конвертерної плавки.

Постановка завдання. На основі розроблених алгоритмів прямої та зворотної задачі провести моделювання процесів в кисневому конвертері, визначити оптимальні параметри плавки в ході продування киснем, зокрема вплив частки брухту і інших шихтових матеріалів на вміст хімічних елементів в металі і шлаку.

Основна частина дослідження. За допомогою програмного комплексу «EXCALIBUR» провели обчислювальний експеримент проплавлення киснево-конвертерної плавки низьковуглецевого напівпродукту за наступних умов:

- середньозважений тиск з урахуванням феростатичного тиску 150 кПа;
- масовий вміст вуглецю в напівпродукті не менше 0,025%;
- дозволені: брухт А (80 т), брухт чавуну (5 т), рідкий чавун переробний при 1350 °С (300 т), боксит (0...2 т), вапно (0...10 т), кисень (0...25 т), футерівка (0...1 т);
- маса кінцевого напівпродукту не менше 350 т;
- температура навколишнього середовища $t_{\text{нав}} = 20$ °С.

Для виконання роботи завантажили проєкт TiTKV.fwp, обрали завдання «Хід продувки O_2 » і перевірили наступні опції: модель металу; модель шлаку; розрахунок кінцевої температури; точний склад кінцевої проби металу; елементний склад шлаку. Отримані дані розрахунків занесені в таблицю 1.

За результатами обчислювального експерименту з використанням програмного комплексу «EXCALIBUR» побудовані графічні залежності. На рис. 1 показано зміну складу металу за вуглецем і кремнієм при збільшенні витрати матеріалів на плавку.

З даних, наведених на графіку рис 1а, збільшення витрати кисню від 0 до 100% призводить до зміни вмісту кремнію з 0,657 до 0,005% та вуглецю від 3,5 до 0,03% в кінцевому напівпродукті. Це пояснюється тим, що при підвищенні маси кисню на плавку зростає ступінь окислення вказаних домішок в металі. Окислення вуглецю

відбувається в основному безпосередньо за рахунок дуття. Реакція окислення вуглецю практично незворотна, тобто монооксид вуглецю, що утворився, безперервно покидає зону реакції, і підвищення температури сприяє прискоренню реакції зневуглецювання. Швидкість окислення вуглецю по ходу продування змінюється в широких межах – від 0,10 до 0,40 %/хв.

На рис. 1б показано зміну складу металу за марганцем і киснем при збільшенні витрати матеріалів на плавку. При збільшенні витрати кисню від 0 до 100% вміст марганцю в кінцевому напівпродукті знижується з 0,4 до 0,06%. Одночасно відбувається збільшення вмісту кисню в металі від 0 до 0,098% (980 ppm).

Таблиця 1 – Вихідні дані і результати розрахунків киснево-конвертерної плавки

Матеріали	Витрата кисню, вапна, бокситу, футерівки, % від загальної маси на плавку					
	0%	20%	40%	60%	80%	100%
Брухт А, т	80	80	80	80	80	80
Брухт чав., т	5	5	5	5	5	5
Чавун пер., т	300	300	300	300	300	300
Боксит, т	0	0,4	0,8	1,2	1,6	2,0
Вапно, т	0	2	4	6	8	10
Футерівка, т	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Кисень, т	0	5	10	15	20	25
Загальна маса ШМ, т	385	393,4	401,8	410,2	418,6	427
Вартість ШМ, у.о.	80800	81318	81836	82354	82872	83390
Склад металу, мас. %						
[C]	3,428	3,041	2,051	1,1	0,28	0,03
[Si]	0,657	0,072	0,121	0,127	0,051	0,005
[Mn]	0,408	0,358	0,37	0,0357	0,266	0,066
[S]	0	0,038	0,037	0,038	0,04	0,041
[P]	0,021	0,021	0,022	0,022	0,021	0,004
[O]	0	0,026	0,01	0,007	0,014	0,098
М мет. т	376,6	372,8	369,2	365,6	361,7	354,6
Склад шлаку, мас. %						
(FeO)		0,166	0,293	0,625	2,879	25,03
(SiO ₂)		58,74	41,79	33,02	28,82	19,53
(MnO)		3,106	2,015	2,12	3,911	5,464
(S)		0,112	0,135	0,116	0,06	0,038
(P ₂ O ₅)		0,003	0,003	0,007	0,089	0,51
(Al ₂ O ₃)		3,316	4,849	5,543	5,59	4,33
(CaO)		28,96	42,66	49,06	49,12	37,76
(MgO)		5,655	8,326	9,562	9,564	7,356
Осн-ть шл.		0,593	1,235	1,795	2,065	2,38
М шлаку, т		8,265	11,14	14,5	19,285	31,34
Молекулярний склад газу, атм						
{CO}		1,491	1,491	1,489	1,466	1,363
{CO ₂ }		0,0065	0,0062	0,0087	0,031	0,134
М газу, т		3,68	12,48	20,82	28,025	31,2
V газу, тис.м ³		38,231	112,472	183,31	243,171	256,636
Температура, °C		1266	1350	1425	1507	1614
Тепл. еф., ГДж		76,3	117,625	157,319	200,815	256,264

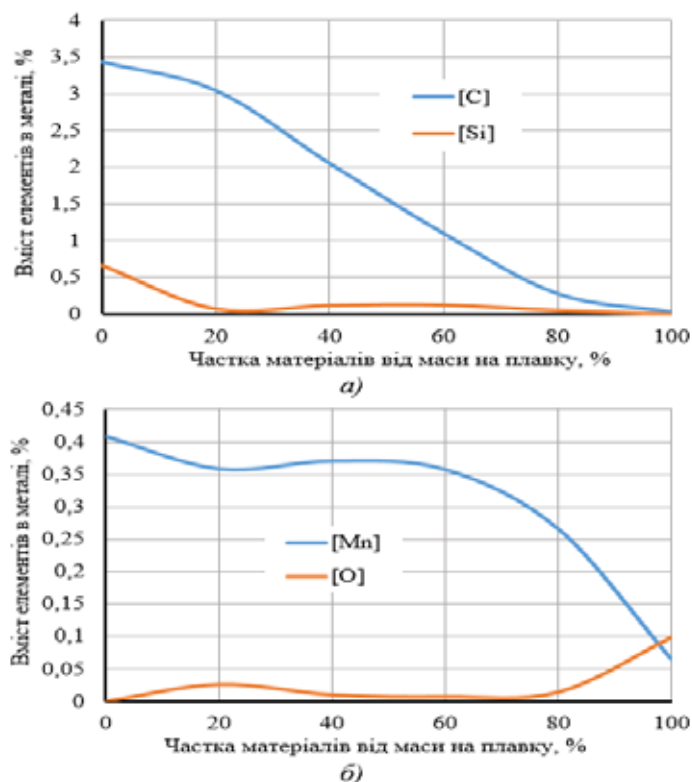


Рисунок 1 – Залежність вмісту вуглецю та кремнію (а), марганцю та кисню (б) у кінцевому напівпродукті від частки кисню, вапна, бокситу, футерівки у відсотках маси на плавку

На кривій вмісту марганцю спостерігається характерний локальний максимум завдяки підвищенню температури металу і шлаку в процесі плавки і зміщенню термодинамічної рівноваги у бік відновлення. Аналогічний ефект спостерігається також для фосфору і кремнію [10-11].

На рис. 2а показано зміну складу шлаку за оксидами заліза, кремнію і кальцію при збільшенні витрати матеріалів на плавку. При збільшенні витрати кисню на плавку відбуваються екзотермічні реакції окислення заліза і кремнію.

Це підтверджується зміною вмісту FeO в шлаку з 0,166 до 25%. Одночасно відносний вміст SiO₂ у шлаку знижується з 58 до 19%, оскільки відбувається збільшення вмісту вапна CaO в шлаку, який частково витісняє FeO з силікату заліза.

На рис. 2б показано зміну складу шлаку за оксидами марганцю, алюмінію і магнію, а на рис. 2в за сіркою і оксидом фосфору при збільшенні витрати матеріалів на плавку.

Відповідно на рис. 3 показано зміну маси шлаку і газу, а на рис. 4 – зміну температури напівпродукту.

Характер зміни більшості кривих на графіках рис. 1 – 4 носить поступальний характер і криві зміни вуглецю та кисню у металі не мають істотних особливостей у вигляді локальних екстремумів.

Разом з тим, на графіках залежності складу шлаку від частки відданих матеріалів є виражені максимуми вмісту CaO, MgO, Al₂O₃ (рис. 2а, б), що пояснюється різким збільшенням вмісту FeO в шлаку при частці відданих матеріалів 80% і вище.

Протягом всієї плавки спостерігається монотонне збільшення маси шлаку і газу від 0 до 31 т (рис. 3). Також по мірі зниження змісту вуглецю зменшується відносна частка CO в газовій фазі. Крім того, має місце зростання основності шлаку з 0,6 до 2,3 одиниць, що відповідає вимогам технологічних параметрів конверторної плавки. Вміст P₂O₅ в шлаку збільшується синхронно зі збільшенням FeO в шлаку і вмістом кисню в металі (рис. 2 в). Середня температура металу росте по ходу плавки до 1614 °C, причому найбільш інтенсивне зростання температури відповідає частці відданих матеріалів 20% і менше (рис. 4).

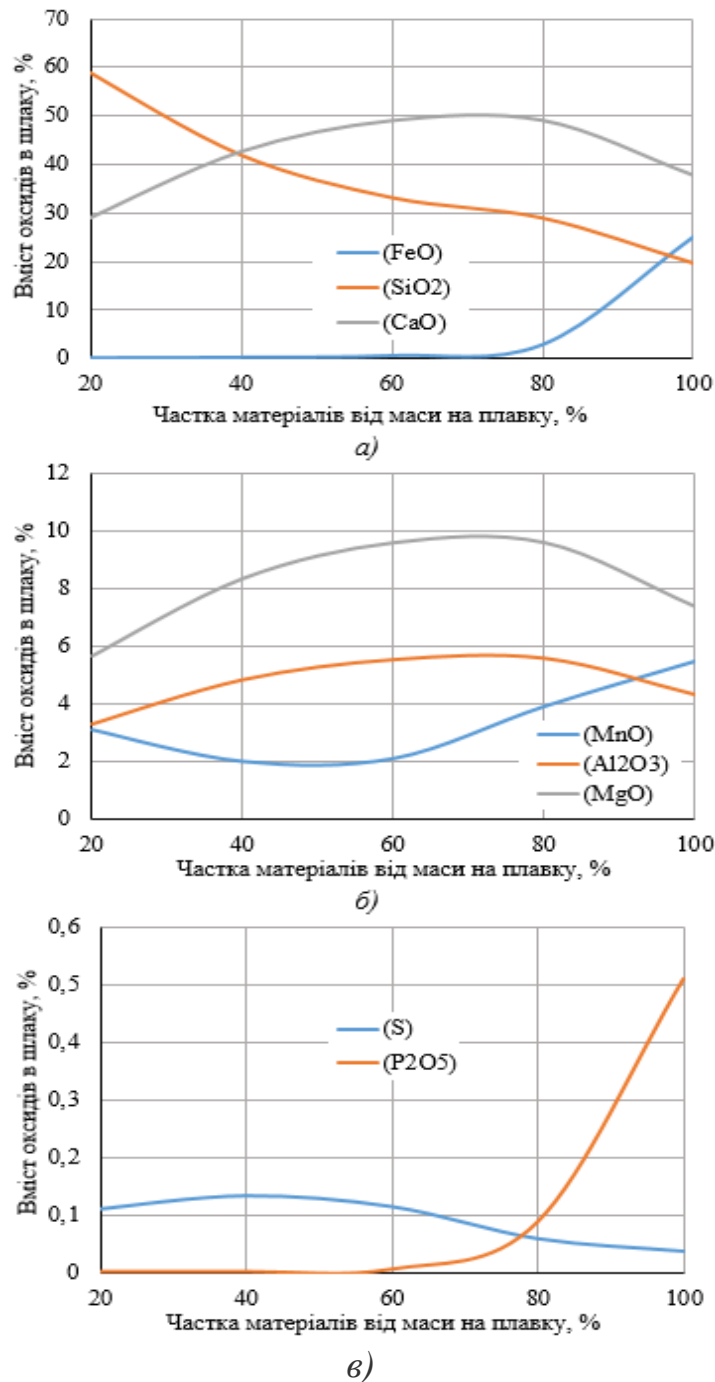


Рисунок 2 – Залежність вмісту оксидів заліза (FeO), кремнію (SiO₂) і кальцію (CaO) (а), марганцю (MnO), алюмінію (Al₂O₃) і магнію (MgO) (б), сірки (S) і оксиду фосфору (P₂O₅) (в) в шлаку від частки кисню, вапна, бокситу, футерівки у відсотках маси на плавку

Дані, отримані в результаті проведення обчислювальних експериментів, порівняли з відомими експериментальними даними. Порівняння показало гарну відповідність розрахункових і експериментальних даних, які підтверджують адекватність термодинамічної моделі, використаної для розрахунку прямої задачі.

Оптимізація витрати кисню і чавуну на киснево-конвертерну плавку з основною футерівкою.

На основі алгоритму зворотної задачі термодинамічного аналізу визначили оптимальний набір матеріалів, зокрема маси чавуну і кисню, при заданому кінцевому стані системи за наступних умов:

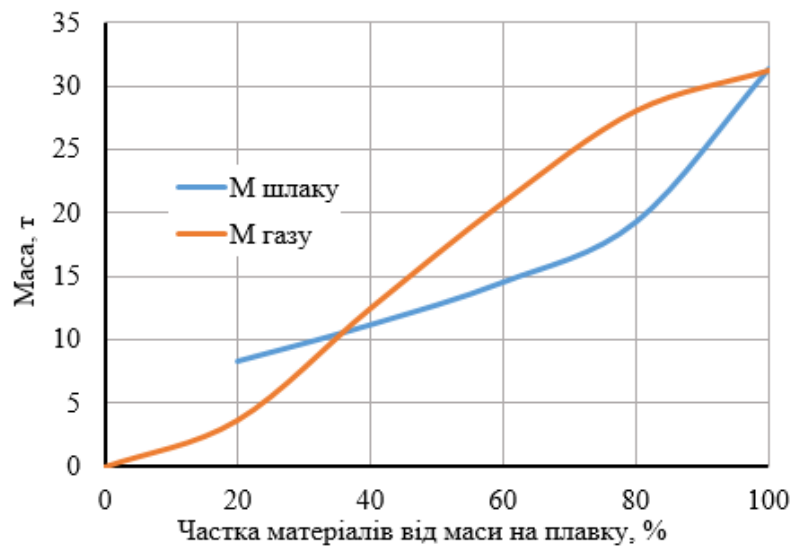


Рисунок 3 – Залежність маси шлаку та маси газу від частки кисню, вапна, бокситу, футерівки у відсотках маси на плавку

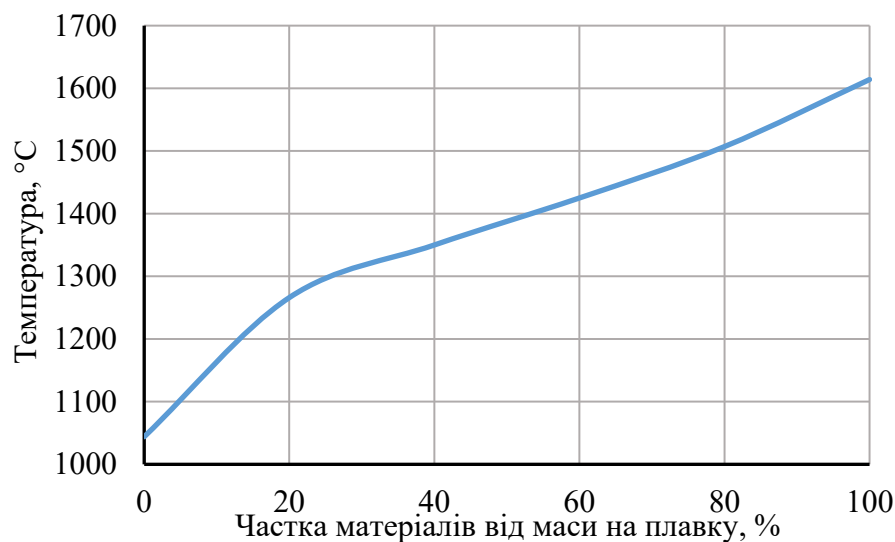


Рисунок 4 – Залежність температури кінцевого напівпродукту від частки кисню, вапна, бокситу, футерівки у відсотках маси на плавку

- середньозважений тиск з урахуванням феростатичного тиску 150 кПа;
- масовий вміст вуглецю в напівпродукті 0,02.0,12%;
- дозволені: брухт А (≤ 100 т) з фіксованою часткою 15.20%, брухт чавуну (5 т), рідкий чавун переробний при 1350 °C (≤ 315 т), боксит (2 т), вапно (≥ 10 т), кисень (20.26 т); футерівка (1 т);
- маса кінцевого напівпродукту не менше 350 т;
- мінімальна кінцева температура напівпродукту 1620 °C;
- температура навколишнього середовища $t_{\text{нав}} = 20$ °C.

Отримані дані розрахунків занесені в таблицю 2.

За результатами обчислювального експерименту з використанням програмного комплексу «EXCALIBUR» побудовані графічні залежності.

На графіку рис. 4 показано зміну вмісту вуглецю, кремнію і марганцю в залежності від фіксованої частки брукту в шихтових матеріалах на плавку. При збільшенні частки брукту та зниженню частки переробного чавуну вміст хімічних елементів-домішок

знижується, що спричиняє необхідність компенсації недостатнього фізичного тепла на плавку за рахунок збільшення приходу тепла екзотермічних реакцій окислення домішок рідкого чавуну і самого заліза в кінцевому напівпродукті.

Таблиця 2 – Вихідні дані і результати оптимізації киснево-конвертерної плавки

Матеріали	Оптимальні маси матеріалів (т) за варіантами					
	а	б	в	г	д	е
Брухт А	62,89	67,386	71,936	76,549	81,23	85,968
Брухт чав.	5	5	5	5	5	5
Чавун пер.	308,595	305,577	302,574	299,645	296,783	293,913
Боксит	2	2	2	2	2	2
Вапно	10	10	10	10	10	10
Кисень	23,783	24,198	24,642	25,079	25,514	25,977
Брухт у ШМ %	15	16	17	18	19	20
Загальна маса ШМ, т	419,268	421,161	423,152	425,273	427,527	429,858
Вартість ШМ, у.о.	82492	82564	82651	82763	82902	83050
Склад металу, мас. %						
[C]	0,049	0,041	0,034	0,03	0,027	0,025
[Si]	0,012	0,008	0,006	0,005	0,004	0,003
[Mn]	0,117	0,095	0,077	0,063	0,053	0,045
[S]	0,04	0,041	0,041	0,041	0,04	0,04
[P]	0,009	0,007	0,005	0,004	0,003	0,002
[O]	0,066	0,077	0,089	0,099	0,109	0,118
М мет. т	350,8	351	351,2	351,4	351,6	351,8
Склад шлаку, мас. %						
(FeO)	14,52	17,84	21,44	24,99	28,45	31,94
(SiO ₂)	21,02	21,1	19,12	18,15	17,23	16,31
(MnO)	4,758	4,946	5,032	5,04	4,996	4,903
(S)	0,042	0,039	0,038	0,039	0,04	0,043
(P ₂ O ₅)	0,403	0,445	0,468	0,474	0,47	0,459
(Al ₂ O ₃)	4,743	4,538	4,323	4,116	3,918	3,72
(CaO)	44,18	42,21	40,18	38,23	36,38	34,53
(MgO)	10,35	9,892	9,421	8,969	8,537	8,105
Осн-ть шл.	2,7	2,67	2,67	2,68	2,69	2,695
М шлаку, т	29,4	30,89	32,28	33,93	35,66	37,57
Молекулярний склад газу, атм						
{CO}	1,403	1,39	1,378	1,366	1,356	1,347
{CO ₂ }	0,093	0,106	0,119	0,13	0,14	0,149
М газу, т	31,4	31,34	31,26	31,17	31,03	30,9
V газу, тис.м ³	262,436	260,42	258,337	256,240	254,152	252,036
Т-ра, °С	1621	1621	1621	1622	1621	1620
Тепл. еф., ГДж	239,322	245,546	251,551	257,444	263,3	269,45

При збільшенні витрати кисню від 23 до 26 т вміст вуглецю в кінцевому напівпродукті знижується в 2 рази від 0,05 до 0,025%. Також збільшення витрати кисню призводить до зміни вмісту кремнію з 0,012 до 0,003%, а марганцю від 0,117 до 0,045%. Це пояснюється тим, що підвищена маса кисню на плавку викликає додаткове окислення вказаних домішок в кінцевому напівпродукті.

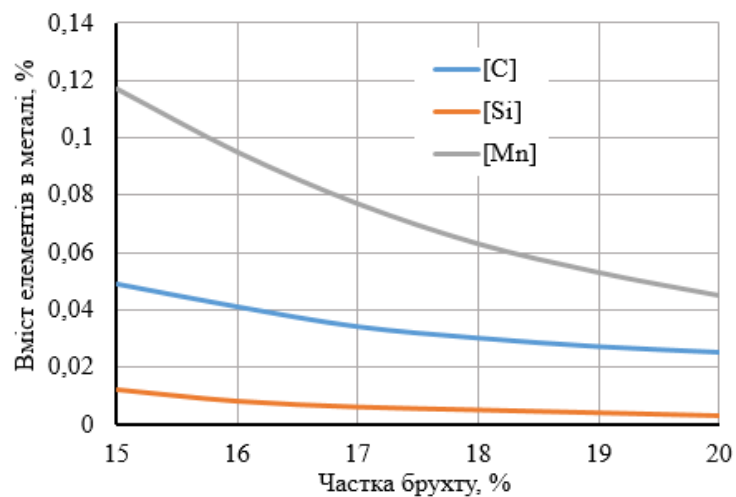


Рисунок 5 – Залежність вмісту вуглецю, кремнію і марганцю в кінцевому напівпродукті від фіксованої частки брухту на плавку

На графіку рис. 6а показано зміну вмісту вуглецю, кремнію і марганцю в залежності від оптимальної витрати кисню на плавку.

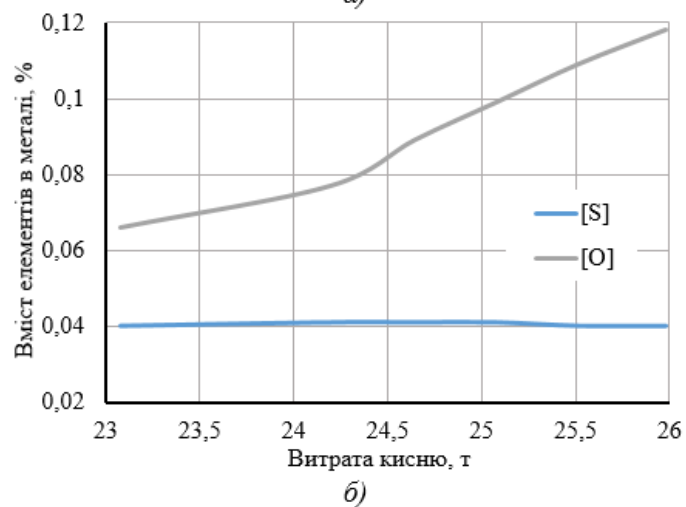
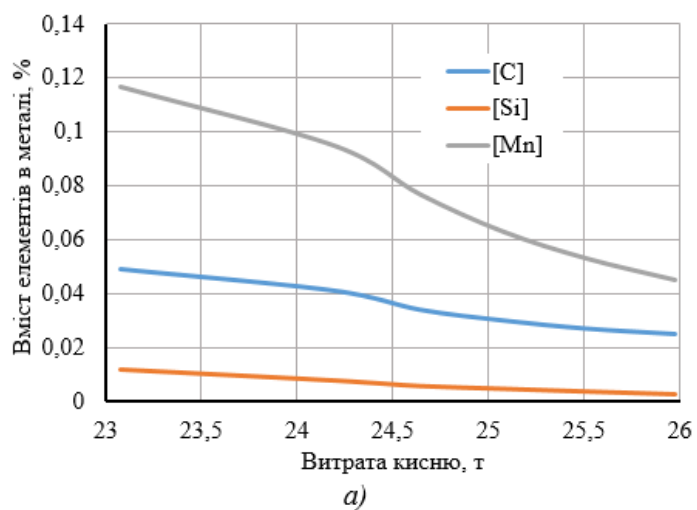


Рисунок 6 – Залежність вмісту вуглецю, кремнію і марганцю (а), сірки і кисню (б) в кінцевому напівпродукті від оптимальної витрати кисню на плавку

При збільшенні витрати кисню від 23 до 26 т відбувається збільшення вмісту кисню в кінцевому напівпродукті з 666 до 1180 ppm (рис. 6 б). Вміст сірки в сталі 0,04% практично не змінюється і залежить від її вмісту в чавуні.

Одночасно спостерігається зростання вмісту FeO в шлаку з 14 до 32% і зниження вмісту CaO з 44 до 34%, як свідчать дані на рис. 7.

Як показано на рис. 8, збільшення фіксованої частки брухту та відповідне зниження частки переробного чавуну призводить до збільшення маси шлаку з 29,4 до 37,5 т, що пов'язано зі збільшенням оптимальної витрати кисню з 23 до 26 т і окисненням значної частки хімічних елементів та заліза, які переходять з металевої до шлакової фази. Це підтверджується зміною вмісту FeO в шлаку з 14,5 до 31,9%. При цьому відносний вміст SiO₂ в шлаку знижується з 21 до 16,3%, також як і залишковий вміст кремнію в металі з 0,012 до 0,003%. Маса газу залишається приблизно на одному рівні 31 т.

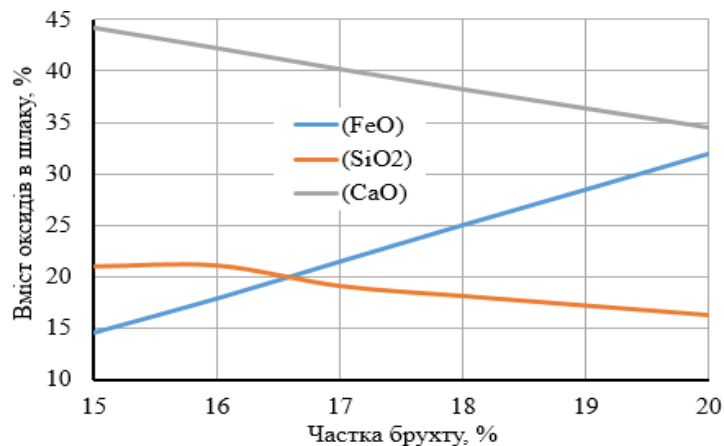


Рисунок 7 – Залежність вмісту оксидів заліза (FeO), кремнію (SiO₂) і кальцію (CaO) в шлаку від фіксованої частки брухту на плавку

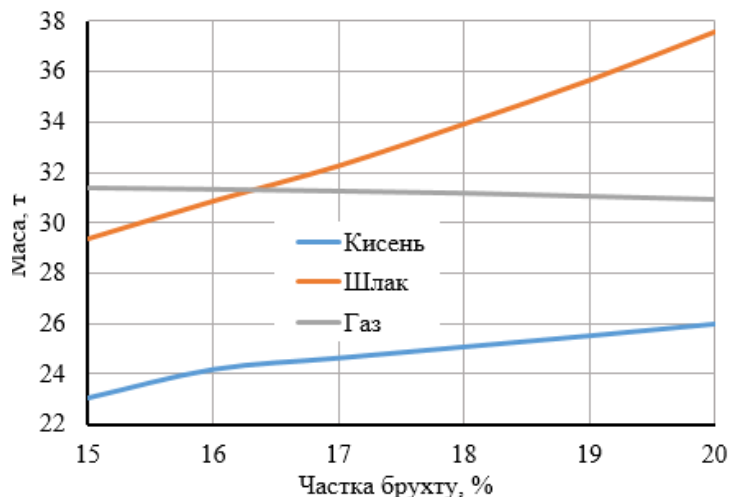


Рисунок 8 – Залежність оптимальної маси кисню, маси шлаку та газу від фіксованої частки брухту в шихті на плавку

На рис. 9 наведено зміну оптимальної маси шихтових матеріалів в залежності від фіксованої частки брухту в шихті на плавку.

Маса кінцевого напівпродукту підтримується на постійному рівні 350-352 т за рахунок оптимізації кількості шихтових матеріалів. При цьому маса брухту збільшується з 63 до 86 т, а маса переробного рідкого чавуну зменшується з 308 до 294 т.

Загальна маса шихтових матеріалів збільшується з 420 до 429 т за рахунок збільшення маси брухту і оптимальної витрати кисню на плавку з 23 до 26 т.

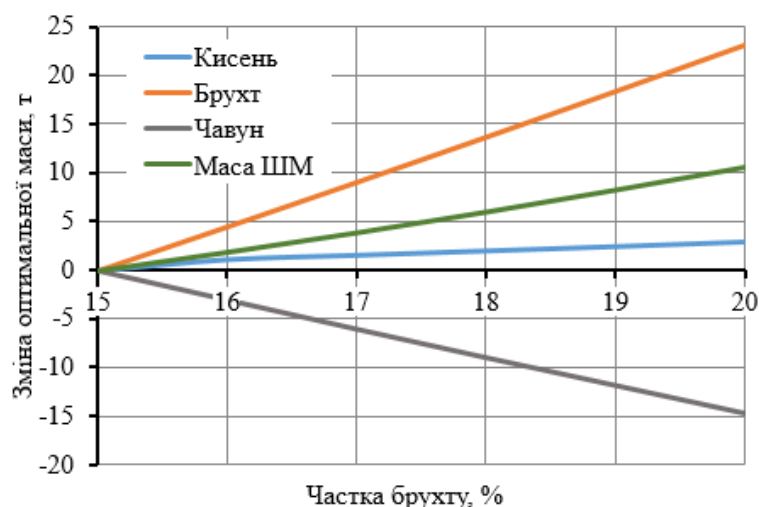


Рисунок 9 – Залежність зміни оптимальної маси шихтових матеріалів від частки брухту в шихті на плавку

Слід відзначити збільшення кількості шлаку з 29,4 до 37,6 т. Температура, як і маса, підтримується на заданому рівні 1620-1622 °С. Тепловий ефект екзотермічних реакцій у міру збільшення маси кисню на плавку збільшуються з 239 до 269 ГДж. У газовій фазі помітним є зниження відношення CO/CO_2 з 15,1 до 9, що відповідає зниженню вмісту вуглецю в кінцевому напівпродукті. При прийнятих співвідношеннях цін на основні шихтові матеріали вартість оптимального набору матеріалів на плавку поступово зростає з 82492 до 83050 у.о. Це дещо погіршує техніко-економічні показники плавки, оскільки при зниженні вмісту вуглецю і підвищенні вмісту кисню істотно зростає питома витрата легуючих матеріалів і розкислювачів для отримання більшості марок сталі.

Висновки.

1. Вирішена пряма та зворотна задачі термодинамічного аналізу системи «метал-шлак-газ» для оптимізації витрати брухту, кисню, чавуну та маси інших шихтових матеріалів киснево-конверторної плавки із застосуванням програми «EXCALIBUR». Проведення обчислювальних експериментів підтверджують адекватність термодинамічної моделі. Вони можуть бути використані для оптимізації дуттєвого режиму реальної конверторної плавки в складі системи автоматизованого управління технологічними процесами сталеплавильного виробництва.

2. Проаналізовано технологію киснево-конверторної плавки з підвищенням вмісту брухту і зниженням вмісту рідкого чавуну в шихтових матеріалах. Визначено вплив фізичних і хімічних показників шихтових матеріалів на параметри теплової роботи конвертерів, можливість часткової заміни чавуну в шихті металобрухтом з метою економії чавуну і підвищення техніко-економічних показників плавки.

3. Запропонована нова методика розрахунку оптимальних шихтових матеріалів відповідно до частки брухту в металошихті. Визначені параметри плавки: кінцева температура, хімічний склад металу і шлаку та маса напівпродукту. Визначені оптимальні маси шихтових матеріалів плавки при заданому кінцевому стані системи.

4. Технологію з підвищенням вмісту брухту і зниженням вмісту рідкого чавуну в шихтових матеріалах можна рекомендувати для виплавки низьковуглецевих марок. Для одержання високоякісної сталі з конверторного напівпродукту потрібно забезпечити позапічну обробку з глибоким розкисленням і десульфурою.

Бібліографічний перелік

1. Sinyakov R. V. The Efficient Control of the BOF Process Under Conditions of Permanent Changing of Technological Parameters. *Proc. The 4th European Steel Technology and Application Days (ESTAD-2019), 24-28 June 2019 – Congress Centre Düsseldorf, Germany*, P. 709.
2. Smirnov O. M., Kharchenko O. V. Differential assimilation coefficients (DAC) in computer steelmaking control systems. *Proc. The 9th EOSC European Oxygen Steelmaking Conference, 6th CTISI Clean Technologies in the Steel Industry, October 17–21, 2022, Aachen, Germany*. <https://eosc-ctsi.com/program.html>.
3. Синяков Р. В., Харченко О. В. Програма «EXCALIBUR» – можливості та перспективи використання у металургійному виробництві. *Зб. наукових праць ДонНТУ. Серія: Металургія*. 2005. Вип 102. С. 82-91.
4. Харченко О. В., Лічконенко Н. В. Комп'ютерна програма «Excalibur». Свідectvo України про реєстрацію авторського права на твір № 111007 від 12.01.2022р.
5. Харченко О. В., Пономаренко О. Г., Корзун Є. Л. Термодинамічна модель багатокомпонентної конденсованої фази. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2004. № 8. С. 135-139.
6. Tao D. P. Prediction of the thermodynamic properties of multicomponent liquid alloys by binary infinite dilute activity coefficients. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2001. Vol. 32. P. 1205-1211.
7. Харченко О. В. Термодинамічне моделювання системи «метал-шлак-газ» з урахуванням ентальпійного теплового балансу. *Метал та лиття України*. 2005. № 6. С. 13-17.
8. Храпко С. О. Кінетика взаємодії фаз у сталеплавильному агрегаті. *Матеріали XI Міжнародної конференції «Сучасні проблеми електрометалургії сталі»*. 2001. С. 35-37.
9. Харченко О. В. Диференціальні коефіцієнти засвоєння в комп'ютерних системах проектування і управління плавкою сталі. *Метал та лиття України*. 2021. Том 29. № 2. С. 23-30.
10. Синяков Р. В. Дослідження поведінки фосфору у кисневому конвертері з використанням програмного комплексу «DesigningMelt». *Метал та лиття України*. 2016. № 11-12. Том 282-283. С. 13-22.
11. Синяков Р. В., Харченко О. В. Автоматизоване проектування та керування киснево-конвертерною плавкою. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2018. № 3. С. 14-26.

References

1. Sinyakov R. V. The Efficient Control of the BOF Process Under Conditions of Permanent Changing of Technological Parameters. *Proc. The 4th European Steel Technology and Application Days (ESTAD-2019), 24-28 June 2019 – Congress Centre Düsseldorf, Germany*, P. 709.
2. Smirnov O. M., Kharchenko O. V. Differential assimilation coefficients (DAC) in computer steelmaking control systems. *Proc. The 9th EOSC European Oxygen Steelmaking Conference, 6th CTISI Clean Technologies in the Steel Industry, October 17–21, 2022, Aachen, Germany*. <https://eosc-ctsi.com/program.html>.
3. Sinyakov R. V., Kharchenko O. V. The program "EXCALIBUR" – possibilities and prospects of application in metallurgical production. *Collection of scientific works of DonNTU. Series: Metallurgy*. 2005. Issue 102. P. 82-91.
4. Kharchenko O. V., Lichkonenko N. V. Computer program "Excalibur". Certificate of Ukraine on registration of copyright for the work No. 111007 dated 12.01.2022.
5. Kharchenko O. V., Ponomarenko O. G., Korzun E. L. Thermodynamic model of a multicomponent condensed phase. *Metallurgical and mining industry*. 2004. No. 8. P. 135-139.
6. Tao D. P. Prediction of the thermodynamic properties of multicomponent liquid alloys by binary infinite dilute activity coefficients. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2001. Vol. 32. P. 1205-1211.
7. Kharchenko O. V. Thermodynamic modeling of the "metal-slag-gas" system taking into account the enthalpy heat balance. *Metal and casting of Ukraine*. 2005. No. 6. P. 13-17.
8. Khrapko S. O. Kinetics of phase interaction in a steelmaking unit. *Proceedings of the XI International Conference "Modern Problems of Steel Electrometallurgy"*. 2001. P. 35-37.
9. Kharchenko O. V. Differential assimilation coefficients in computer systems for designing and controlling steel melting. *Metal and Casting of Ukraine*. 2021. Vol. 29. No. 2. P. 23-30.
10. Sinyakov R. V. Investigation of the behavior of phosphorus in an oxygen converter using the software package "DesigningMelt". *Metal and Casting of Ukraine*. 2016. No. 11-12. Vol. 282-283. P. 13-22.
11. Sinyakov R. V., Kharchenko O. V. Automated design and control of oxygen-converter melting. *Metallurgical and mining industry*. 2018. No. 3. P. 14-26.

Kharchenko Oleksandr, candidate of technical sciences, associate professor, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0003-3717-3872

Roman Volyar, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-7299-0053

Yurov Mykhailo, PhD candidate, Zaporizhzhia National University

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF THE SCRAP PORTION ON THE OPTIMAL PARAMETERS OF THE OXYGEN-CONVERTER MELTING

The study investigates the influence of the proportion of scrap and other charge materials on the optimal parameters of oxygen-converter smelting based on a thermodynamic analysis of the “metal-slag-gas” system using the Gibbs chemical potential method. Utilizing the “Excalibur” software suite, experimental-computational modeling and systematic analysis were performed on a set of interrelated parameters of oxygen-converter smelting. These include pressure (including ferostatic metal pressure), pig iron temperature, temperature and chemical composition of the steelmaking bath in the converter, slag regime, initial mass of steel and pig iron scrap, refractory lining erosion, material preheating, oxygen mass for smelting, flux material mass, and a range of other technological and geometrical parameters of the oxygen converter.

Using the simplex method of linear programming, parameter optimization of the oxygen-converter smelting process was conducted for several scenarios. Graphical dependencies were developed showing the impact of material mass fractions—especially scrap—on the content of chemical elements in the final semi-product and slag. The technology of oxygen-converter smelting with increased scrap content and reduced molten pig iron in the charge materials was analyzed. The influence of the physical and chemical properties of charge materials on the thermal performance of converters was determined, along with the feasibility of partially replacing pig iron with scrap to save resources and enhance the technical and economic efficiency of smelting.

This modified technology, featuring a higher share of scrap and lower share of molten pig iron, is recommended for producing low-carbon steel grades. It is concluded that achieving high-quality steel from converter semi-products requires post-furnace treatment with thorough deoxidation and desulfurization. Additional conclusions were drawn regarding the practical application of the study's findings.

Keywords: steel, oxygen-converter smelting, slag, charge materials, Gibbs method, chemical composition, optimization, system “metal-slag-gas”.

Таратута Костянтин Васильович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0002-6671-9670

Кулік Тетяна Олександрівна, кандидат технічних наук, ТОВ Технічний університет «Метінвест Політехніка», ORCID: 0000-0001-5315-6138

Олійник Віталій Анатолійович, начальник відділу забезпечення проектування ПАТ «Запоріжсталь», ORCID: 0009-0000-3300-9536

МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ВИБОРУ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ, ЩО ОРІЄНТОВАНІ НА НАДІЙНІСТЬ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

Сучасне металургійне виробництво відноситься до високотехнологічної та матеріалоємної галузі. Безперебійна робота й продуктивність металургійного виробництва значною мірою визначаються станом та функціональністю технологічного обладнання. Саме від надійної роботи обладнання залежать ефективність виробничого процесу.

Робота присвячено особливостям вибору системи технічного обслуговування, що орієнтована на надійність в умовах металургійного виробництва. Основне завдання роботи спрямоване на розробку процедур, що дозволяють вибрати стратегію технічного обслуговування та ремонтів. В статті розглядаються переваги та недоліки різних систем технічного обслуговування. Визначаються ключові характеристики цих систем.

В рамках рекомендованої системи обслуговування, що орієнтована на надійність зосереджено увагу на виборі стратегії виконання ремонтних робіт. Для цього в роботі проведено класифікацію відмов металургійного обладнання за трьома рівнями. До першого рівня увійшли відмови по характеру виникнення, до другого рівня – відмови за факторами, до третього – відмови за наслідками та можливістю усунення. Визначення рівня критичності відмов дозволяє провести класифікацію обладнання. Для кожного типу обладнання, враховуючи його рівень «критичності», слід визначити найефективнішу стратегію.

Для вибору стратегії технічного обслуговування доцільно застосовувати діаграми прийняття рішень. Діаграма прийняття рішень представляє графічне уявлення логіки вибору між кількома альтернативними стратегіями на основі заданих ключових умов. Представлена у статті діаграма прийняття рішень допомагає структурувати процес вибору стратегії технічного обслуговування та ремонтів, відображаючи можливі дії, умови та їх наслідки у вигляді послідовних кроків.

Таким чином, вибір стратегії технічного обслуговування та ремонтів металургійного обладнання безпосередньо впливає на безпеку, безперервність виробництва та техніко-економічні показники діяльності підприємства.

Ключові слова: стратегія, відмова, технічне обслуговування, надійність, ефективність.

Вступ. Метод технічного обслуговування, зорієнтований на надійність, є основоположним при формуванні стратегії обслуговування й ремонту устаткування, базується на аналізі ризику виходу з ладу та важливості компонентів. Використання стратегії обслуговування й ремонту, орієнтованої на надійність, сприяє зниженню вірогідності відмов обладнання за умови оптимізації витрат на обслуговування.

У різних секторах промисловості підхід до вибору ефективної системи обслуговування й ремонту має свої особливості, які визначаються ключовими техніко-економічними показниками виробництва. [1-4].

Так у концепції енергоефективного виробництва зосереджують увагу на виборі однієї з трьох систем: ECM (Energy centered maintenance), RCM (Reliability centered maintenance), TPM (Total productive maintenance) [5].

ECM (Energy Centered Maintenance) – це система технічного обслуговування, зосереджена на управлінні та оптимізації енергетичної ефективності обладнання та виробничих систем. На відміну від традиційних стратегій технічного обслуговування та ремонту), ECM розглядає енергію як головний ресурс, що потребує постійного контролю та вдосконалення [6].

TPM (Total Productive Maintenance) – «загальне продуктивне обслуговування» це система комплексного технічного обслуговування обладнання, яка спрямована на максимальне залучення усього персоналу – від операторів до керівників – у процес забезпечення надійної та ефективної роботи обладнання. TPM не просто знижує кількість поломок, а й формує культуру відповідальності за обладнання на всіх рівнях, що веде до сталого зростання ефективності виробництва. [7-9].

RCM (Reliability Centered Maintenance) – обслуговування, що орієнтоване на надійність визначає вимоги щодо обслуговування обладнання з урахуванням оточення, в якому експлуатуються це обладнання. Цей підхід передбачає класифікацію вузлів і компонентів виробничого активу у відповідність до їх критичності та ризиком їх відмови. Обслуговування, орієнтоване на надійність – це процес, який використовується для визначення дій, необхідних для того, щоб обладнання продовжувало виконувати покладені на нього функції у виробничому процесі. [10, 11].

В рамках кожної системи розробляються стратегії технічного обслуговування та ремонтів обладнання направлені на досягнення найбільшої ефективності експлуатації [12, 13].

Для підвищення ефективності системи технічного обслуговування обладнання металургійних підприємств найчастіше застосовується система обслуговування, що орієнтована на надійність. Дослідження вибору стратегії технічного обслуговування є вкрай актуальними, та дозволяють підвищити ефективність технологічного процесу в цілому.

Аналіз досліджень і публікацій. На сьогодні підприємства України вдаються до кількох стратегій технічного обслуговування та ремонту (ТОiP). Першочерговою вважається стратегія реактивного обслуговування устаткування (Breakdown Maintenance). Основним підходом до ремонту обладнання у цій стратегії є ліквідація несправностей устаткування після їх виникнення. Наступною визнається стратегія планово-попереджувального обслуговування (Planned Maintenance), яка полягає у профілактичному обслуговуванні, що базується на завчасно розробленому графіку. Найпоширенішою є стратегія технічного обслуговування, що орієнтована на надійність (Reliability Centered Maintenance). Згадана стратегія зосереджена на визначенні найважливіших компонентів обладнання та оптимізації витрат на їхнє обслуговування.

Питання надійності, в рамках стратегій технічного обслуговування, висвітлюються у міжнародних стандартах, де найбільшу увагу їй приділяє Міжнародна електротехнічна комісія (МЕК), що є однією з трьох глобальних організацій МЕК (IEC), ISO (ISO), МСЕ (ITU), які розробляють міжнародні стандарти щодо надійності для всіх технологічних галузей [14, 15, 16]. Комплекс стандартів МЕК/ТК 56 «Надійність» в частині технічного обслуговування затверджені на рівні Державних стандартів України [17, 18].

Попри те, що рекомендації щодо вибору стратегії технічного обслуговування та ремонтів розглядається як у вітчизняній так і закордонній літературі, вибір конкретної моделі системи технічного обслуговування, яка враховує унікальні риси підприємства, обирається підприємством самостійно. В наявній літературі відсутні рекомендації по вибору стратегії технічного обслуговування для металургійних підприємств в контексті забезпечення принципів надійності.

Результати дослідження. Методологія обслуговування, що орієнтована на надійність, базується на ключовій ідеї, що завдання сервісного обслуговування полягає не у підтримці ідеального стану кожного окремого пристрою, а у гарантуванні безперебійної роботи тих виробничих та технологічних процесів, що є критично важливими для функціонування підприємства.

Процес технічного обслуговування, орієнтованого на надійність включає наступні складові: 1) ініціювання та планування процесу; 2) аналіз функціональних відмов та вибір завдань технічного обслуговування; 3) впровадження системи технічного обслуговування, що орієнтована на надійність; 4) безперервне вдосконалення системи технічного обслуговування.

Перший етап (ініціювання та планування процесу) включає підготовчі заходи, а саме: визначення мети проведення RCM аналізу; визначення змісту аналізу; перевірка наявності у фахівців спеціальних знань щодо методів та досвіду проведення аналізу та практичного досвіду експлуатації обладнання; розробка оперативних процедур та графіку проведення аналізу; опис умов та режимів експлуатації обладнання. Перший етап є вкрай важливим для розуміння подальших кроків побудови системи технічного обслуговування, що орієнтовано на надійність. Зазвичай у першу чергу необхідно скласти опис обладнання на найвищому функціональному рівні, в якому вказують фізичні характеристики, його основне призначення, режими використання, умови та всі види підтримки експлуатації. Опис на нижньому функціональному рівні або на рівні окремих систем має точно встановлювати технічні характеристики функціональних систем, що розглядаються.

Другий етап (аналіз функціональних відмов та вибір завдань технічного обслуговування) включає проведення збору та аналіз всіх доступних експлуатаційних даних; проведення функціонального розбиття; виявлення функцій обладнання (виробу), визначення видів функціональних відмов; визначення наслідків та критичності відмов; вибір технічного обслуговування та визначення його періодичності (включає: моніторинг технічного стану, визначення періодичності ТО та ремонтів, пошук та виявлення відмов).

Функціональне розбиття (класифікація) всього обладнання, задіяного у виробничому процесі, за видами та критичністю відмов можна провести використовуючи схему видів відмов (рис. 1).

В подальшому визначення критичності відмов обладнання дозволить включити його до відповідної категорії критичності.

З кожного рівня відмов доцільно обрати види відмов, що здійснюють найбільший вплив на категоризацію обладнання за критичністю.

Критичність відмов обладнання можливо визначити на підставі бальної оцінки, за формулою:

$$K_v = B_1 \times B_2 \times B_3$$

де: B_1 – бальна оцінка вірогідності виявлення відмов, B_2 – бальна оцінка наслідків відмов, B_3 – бальна оцінка вірогідності відмов.

Відповідно зі збільшенням бальної оцінки, критичність відмов обладнання збільшується.

Аналіз таблиць 1 – 2 показує, що відповідно зі збільшенням бальної оцінки, критичність відмов обладнання збільшується.

Наступними кроками другого етапу є оцінка кожного виявленого виду відмов з метою виявлення найбільш відповідного способу керування їх попередженням, з наступним визначенням виду та періодичності проведення технічного обслуговування. На цьому етапі можливо скористатись діаграмою прийняття рішення по вибору стратегії технічного обслуговування (рис. 2).

Для кожного типу обладнання, враховуючи його рівень «критичності», слід визначити найефективнішу стратегію. Тобто, для конкретного обладнання необхідно вибрати один з чотирьох видів обслуговування: реактивне, превентивне, прогнозне або проактивне.

Реактивний вид технічного обслуговування – це експлуатація до відмови, без регулярного технічного обслуговування. Він підходить для обладнання, що не є критичним, яке легко замінити. Також цей вибір виправданий у випадках, коли ремонт супроводжується незначними витратами, або якщо обладнання старе, практично не підлягає ремонту та функціонує до повної зупинки.

Превентивне обслуговування схоже на систему планово-попереджувальних ремонтів. Рекомендовано для обладнання з низькою «критичністю», що враховує такі аспекти, як низька вартість простою виробництва, швидка заміна запчастин, вузлів чи складових.

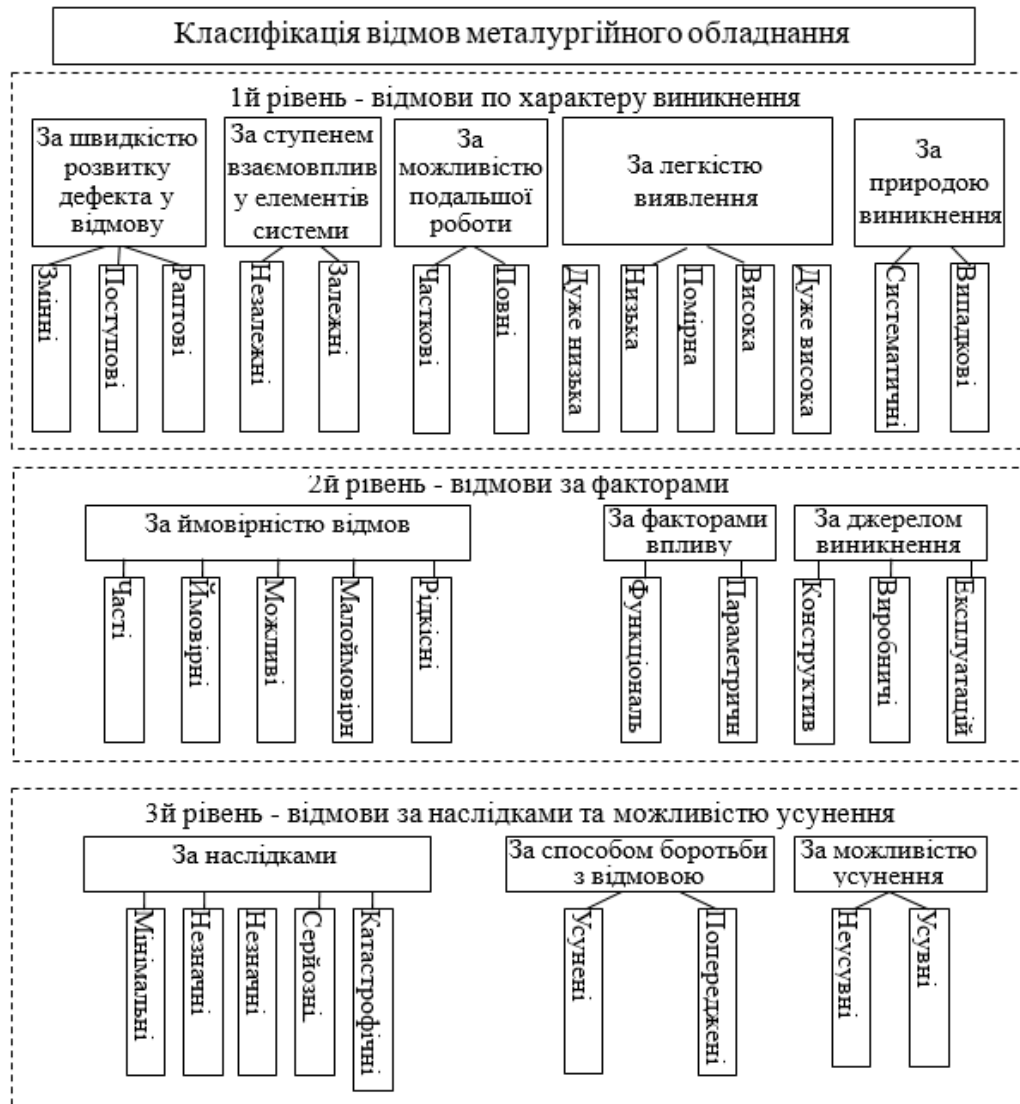


Рисунок 1 – Схема видів відмов металургійного обладнання

Джерело: складено авторами на підставі [10, 14]

Таблиця 1 – Оцінка вірогідності виявлення відмов

Види відмов за вірогідністю виявлення	Вірогідність виявлення відмов	Оцінка вірогідності виявлення відмов в балах
Дуже висока вірогідність виявлення	>	1
Висока вірогідність виявлення	Від 0,95 до 0,85	2
Помірна вірогідність виявлення	Від 0,85 до 0,45	3
Низька вірогідність виявлення	Від 0,45 до 0,25	4
Дуже низька вірогідність виявлення	<	5

Таблиця 2 – Оцінка наслідків відмов та їх вірогідність

Види наслідків відмов	Оцінка наслідків відмов в балах	Види відмов за вірогідністю виникнення	Прогнозна вірогідність відмов	Оцінка вірогідності відмов в балах
Мінімальні	1	Рідкісні	<	1
Незначні	2	Малоймовірні	Від 0,00005 до 0,005	2
Помітні	3	Можливі	Від 0,005 до 0,01	3
Серйозні	4	Ймовірні	Від 0,01 до 0,1	4
Катастрофічні	5	Часті	>	5

Предиктивне (прогнозне) обслуговування базується на діагностиці та контролі стану обладнання в процесі щоденного обслуговування. Воно використовується, якщо ступінь використання обладнання в виробничому процесі оцінюється як висока.

Проактивне обслуговування зосереджується на виявленні та усуненні можливих причин відмови. Воно спрямоване на максимальне продовження терміну служби обладнання між ремонтами, завдяки застосуванню сучасних технологій виявлення та усунення потенційних джерел несправностей.

Незалежно від обраного виду обслуговування, обов'язково аналізуються причини кожної відмови. Це необхідно для запобігання повторенню подібних ситуацій у майбутньому.

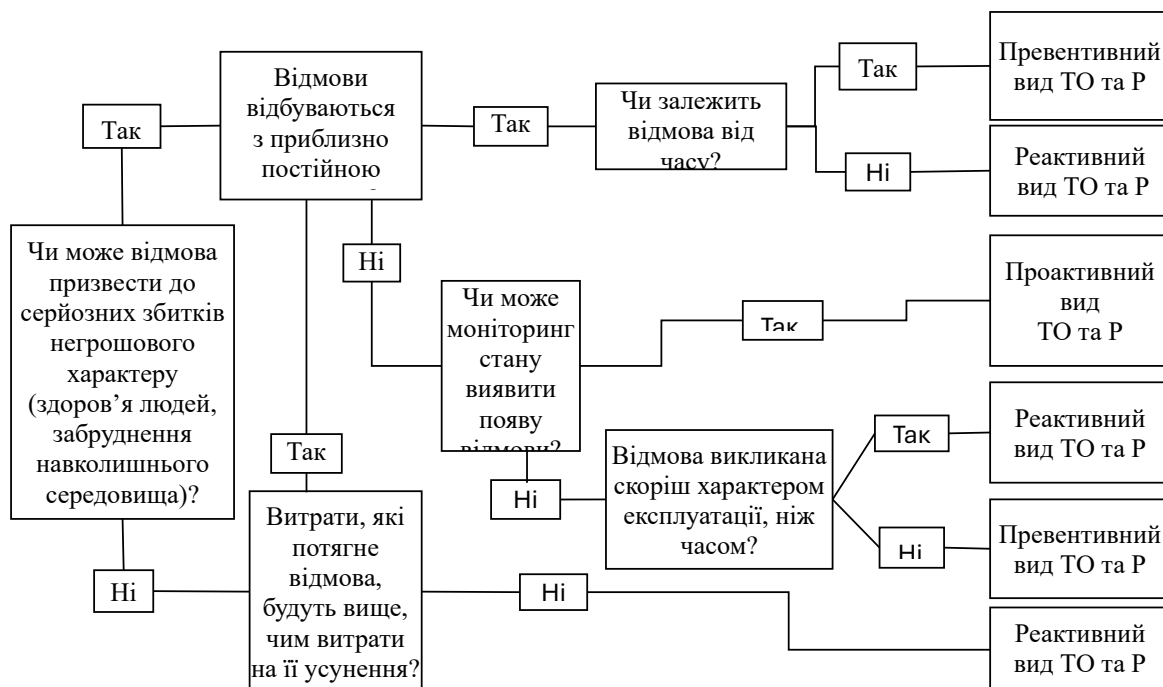


Рисунок 2 – Діаграма вибору стратегії технічного обслуговування

Третій етап (впровадження системи технічного обслуговування, що орієнтована на надійність) включає: визначення пріоритетності заходів; виконання раціональної періодичності виконання задач технічного обслуговування; дослідження початкового технічного стану.

Четвертий етап (безперервне вдосконалення системи технічного обслуговування) включає: моніторинг ефективності системи технічного обслуговування; моніторинг

встановлених вимог по безпеці, ефективності, економічності; обстеження технічного стану в процесі експлуатації.

Детально питання третього та четвертого етапу системи обслуговування, що орієнтоване на надійність щодо металургійного обладнання висвітлені у роботах [20-25].

Окремо слід зазначити, що для ефективного використання обраної системи технічного обслуговування необхідно здійснювати заходи по її постійному вдосконаленню. Для проведення доопрацювань системи технічного обслуговування на підприємстві мають збиратися та систематизуватися наступні дані: дати виникнення відмов та напрацювання до кожної відмови; причини кожної відмови; тривалість усіх видів технічного обслуговування; ефективність перевірок технічного стану (моніторингу); усі види експлуатаційних витрат.

Таким чином, встановлені на початковому етапі заходи по технічному обслуговуванню можуть бути скориговані, в залежності від поточних експлуатаційних вимог, результатів моніторингу технічного стану, зміни характеру відмов окремих вузлів.

Висновки. Представлена у статті методологія базується на загальних принципах системи технічного обслуговування, що орієнтована на надійність. Основним критерієм вибору системи технічного обслуговування є критичність відмов обладнання. Проведена класифікація відмов металургійного обладнання за трьома рівнями: по характеру виникнення відмов, по факторам впливу, за наслідками та можливістю усунення. У відповідності з рекомендованою бальною оцінкою критичності відмов обладнання, можливо проведення класифікації обладнання, з подальшим вибором стратегії технічного обслуговування.

Бібліографічний перелік

1. Backlund F., Akersten P. A. RCM introduction: process and requirements management aspects. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2003. Vol. 9, no. 3. P. 250–264. URL: <https://doi.org/10.1108/13552510310493701>
2. Kianfar A., Kianfar F. Plant function deployment via RCM and QFD. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2010. Vol. 16, no. 4. P. 354–366. URL: <https://doi.org/10.1108/13552511011084517>
3. Cheng Z. H., Wang L. C., Lv L. B. Case Retrieval Mechanism of the Intelligent RCM Analysis System. *Applied Mechanics and Materials*. 2010. Vol. 40-41. P. 686–691. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.40-41.686>
4. Ben-Daya M. You may need RCM to enhance TPM implementation. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2000. Vol. 6, no. 2. P. 82–85. URL: <https://doi.org/10.1108/13552510010328086>
5. Firdaus N., Samat H. A., Mohamad N. Maintenance for Energy efficiency: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 530. P. 012047. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/530/1/012047>
6. Howell M., Alshakhshir F. S. Energy Reduction. *Energy Centered Maintenance—A Green Maintenance System*. Lilburn, GA : The Fairmont Press, Inc., [2017], 2020. P. 1–21. URL: <https://doi.org/10.1201/9781003151371-1>
7. Seiichi Nakajima. *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Productivity Press, 1988. 129 p.
8. Wireman Terry. *Total Productive Maintenance*. New York : Publisher, Industrial Press, Incorporated, 2009. 196 p.
9. Mobley R. K. A Total-Plant Predictive Maintenance Program. *An Introduction to Predictive Maintenance*. 2002. P. 352–388. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-075067531-4/50016-6>
10. Moubray J. *Reliability-centred Maintenance*. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 225 Wildwood Avenue, Woburn, MA 01801-2041 : Butterworth-Heinemann, 1997. 423 p.
11. Ziegel E. R., Moubray J. Reliability-Centered Maintenance. *Technometrics*. 1996. Vol. 38, no. 1. P. 87. URL: <https://doi.org/10.2307/1268924>
12. Технічне обслуговування металургійного обладнання: Навчальний посібник. / Жук А.Я., Желябіна Н.К., Малишев Г.П., Таратута К.В.- Київ: Видавничий дім: «Кондор», 2017р. – 288с. ISBN 978-617-7582-07-5.
13. Аксютенко І. С., Аксютенко П. С. Технології та засоби організації системи технічного обслуговування. *Технічна інженерія*. 2021. № 2(88). С. 72–76. URL: [https://doi.org/10.26642/ten-2021-2\(88\)-72-76](https://doi.org/10.26642/ten-2021-2(88)-72-76)
14. IEC 60300-3-11:2009 – Dependability management – Part 3-11: Application guide – Reliability centred maintenance.

15. IEC 60300-3-14:2004 – Dependability management – Part 3-14: Application guide – Maintenance and maintenance support»
16. Вибір та обґрунтування показників теоретичної надійності металургійного обладнання / К. В. Таратута, О. Ю. Шанько // Металургія. – 2015. – Вип. 2. – С. 109-113.
17. ДСТУ EN 60300-3-14:2022 Керування надійністю. Частина 3-14. Посібник із застосування. Технічне обслуговування та підтримка (EN 60300-3-14:2004, IDT; IEC 60300-3-14:2004, IDT)
18. ДСТУ EN 60300-3-16:2022 Управління надійністю. Частина 3-16. Посібник із застосування. Настанови щодо специфікації послуг підтримки технічного обслуговування (EN 60300-3-16:2008, IDT; IEC 60300-3-16:2008, IDT)
19. Opocenska H., Hammer M. Reliability centred maintenance. *MM Science Journal*. 2016. Vol. 2016, no. 05. P. 1451–1455. URL: https://doi.org/10.17973/mmsj.2016_11_2016161 (date of access: 10.05.2025).
20. Аксютенко І. С., Аксютенко П. С. Технології та засоби організації системи технічного обслуговування. *Технічна інженерія*. 2021. № 2(88). С. 72–76. URL: [https://doi.org/10.26642/ten-2021-2\(88\)-72-76](https://doi.org/10.26642/ten-2021-2(88)-72-76) (дата звернення: 10.05.2025).
21. Кучинський В.А. Основні напрямки підвищення ефективності організації ремонтно-технічного обслуговування обладнання / В.А. Кучинський // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. Технічний прогрес та ефективність виробництва. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2008. – № 20-1. – С. 43-47
22. Kotlyarova V. A Modern approach to the organization of supporting the efficiency of equipment at the industrial enterprise. *Efektivna ekonomika*. 2020. No. 4. URL: <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2020.4.80>
23. Система керування якістю ремонту та технічного обслуговування / В. П. Квасніков, О. В. Кіпров, В. В. Жигинас, Б. М. Сорока // Вісник Інженерної академії України. – 2012. – Вип. 1. – С. 127-129
24. Білодіденко С. В., Біліченко Г. М., Гануш В. І. Періодичність діагностування механічних систем: Навчальний посібник з дисципліни «Технічна діагностика металургійного обладнання» для студентів спеціальності 133 – Галузеве машинобудування (магістерський рівень). – Дніпро: НМетАУ, 2017. – 89 с.
25. Belodedenko S.V., Ibragimov M.S. Models for optimization the preventive maintenance schedules of mechanical systems in metallurgy. *Metallurgical and Mining Industry*. 2017. № 2. P. 26–37.

References

1. Backlund F., Akersten P. A. RCM introduction: process and requirements management aspects. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2003. Vol. 9, no. 3. P. 250–264. URL: <https://doi.org/10.1108/13552510310493701>
2. Kianfar A., Kianfar F. Plant function deployment via RCM and QFD. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2010. Vol. 16, no. 4. P. 354–366. URL: <https://doi.org/10.1108/13552511011084517>
3. Cheng Z. H., Wang L. C., Lv L. B. Case Retrieval Mechanism of the Intelligent RCM Analysis System. *Applied Mechanics and Materials*. 2010. Vol. 40-41. P. 686–691. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.40-41.686>
4. Ben-Daya M., Youmayneed RCM to enhance TPM implementation. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2000. Vol. 6, no. 2. P. 82–85. URL: <https://doi.org/10.1108/13552510010328086>
5. Firdaus N., Samat H. A., Mohamad N. Maintenance for Energy efficiency: A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 530. P. 012047. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/530/1/012047>
6. Howell M., Alshakhshir F. S. Energy Reduction. *Energy Centered Maintenance—A Green Maintenance System*. Lilburn, GA : The Fairmont Press, Inc., [2017], 2020. P. 1–21. URL: <https://doi.org/10.1201/9781003151371-1>
7. Seiichi Nakajima. Introduction to TPM: Total Productive Maintenance. Productivity Press, 1988. 129 p.
8. Wireman Terry. Total Productive Maintenance. New York : Publisher, Industrial Press, Incorporated, 2009. 196 p.
9. Mobley R. K. A Total-Plant Predictive Maintenance Program. An Introduction to Predictive Maintenance. 2002. P. 352–388. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-075067531-4/50016-6>
10. Moubray J. Reliability-centred Maintenance. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 225 Wildwood Avenue, Woburn, MA 01801-2041 : Butterworth-Heinemann, 1997. 423 p.
11. Ziegel E. R., Moubray J. Reliability-Centered Maintenance. *Technometrics*. 1996. Vol. 38, no. 1. P. 87. URL: <https://doi.org/10.2307/1268924>

12. Tekhnichne obsluhovuvannya metalurhiinoho obladnannia: Navchalnyi posibnyk./ Zhuk A.Ia., Zheliabina N.K., Malyshev H.P., Taratuta K.V.- Kyiv: Vydavnychyi dim: «Kondor», 2017r. – 288p. ISBN 978-617-7582-07-5. (in Ukrainian)
13. Aksiutenko I. S., Aksiutenko P. S. Tekhnolohii ta zasoby orhanizatsii systemy tekhnichnoho obsluhovuvannya. Tekhnichna inzheneriia. 2021. № 2(88). S. 72–76. URL: [https://doi.org/10.26642/ten-2021-2\(88\)-72-76](https://doi.org/10.26642/ten-2021-2(88)-72-76) (in Ukrainian)
14. IEC 60300-3-11:2009 – Dependability management – Part 3-11: Application guide – Reliability centred maintenance.
15. IEC 60300-3-14:2004 – Dependability management – Part 3-14: Application guide – Maintenance and maintenance support»
16. Vybir ta obgruntuvannya pokaznykiv teoretychnoi nadiinosti metalurhiinoho obladnannia / K. V. Taratuta, O. Yu. Shanko // Metalurhiia. – 2015. – Vyp. 2. – pp. 109-113. (in Ukrainian)
17. DSTU EN 60300-3-14:2022 Keruvannya nadiinistiu. Chastyna 3-14. Posibnyk iz zastosuvannya. Tekhnichne obsluhovuvannya ta pidtrymka (EN 60300-3-14:2004, IDT; IEC 60300-3-14:2004, IDT) (in Ukrainian)
18. DSTU EN 60300-3-16:2022 Upravlinnia nadiinistiu. Chastyna 3-16. Posibnyk iz zastosuvannya. Nastanovy shchodo spetsyfikatsii posluh pidtrymky tekhnichnoho obsluhovuvannya (EN 60300-3-16:2008, IDT; IEC 60300-3-16:2008, IDT) (in Ukrainian)
19. Opocenska H., Hammer M. Reliability centred maintenance. MM Science Journal. 2016. Vol. 2016, no. 05. pp. 1451–1455. URL: https://doi.org/10.17973/mmsj.2016_11_2016161 (date of access: 10.05.2025).
20. Aksiutenko I. S., Aksiutenko P. S. Tekhnolohii ta zasoby orhanizatsii systemy tekhnichnoho obsluhovuvannya. Tekhnichna inzheneriia. 2021. № 2(88). S. 72–76. URL: [https://doi.org/10.26642/ten-2021-2\(88\)-72-76](https://doi.org/10.26642/ten-2021-2(88)-72-76) (date of access: 10.05.2025). (in Ukrainian)
21. Kuchynskyi V.A. Osnovni napriamky pidvyshchennia efektyvnosti orhanizatsii remontno-tekhnichnoho obsluhovuvannya obladnannia / V.A. Kuchynskyi // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu „Kharkivskyi politekhnichnyi instytut”. Tekhnichniy prohres ta efektyvnist vyrobnytstva. – Kharkiv: NTU “KhPI”. – 2008. – № 20-1. – pp. 43-47 (in Ukrainian)
22. Kotlyarova V. A Modern approach to the organization of supporting the efficiency of equipment at the industrial enterprise. Efektyvna ekonomika. 2020. No. 4. URL: <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2020.4.80>
23. Systema keruvannya yakistiu remontu ta tekhnichnoho obsluhovuvannya / V. P. Kvasnikov, O. V. Kiprova, V. V. Zhyhynas, B. M. Soroka // Visnyk Inzhenernoi akademii Ukrainy. – 2012. – Vyp. 1. – pp. 127-129 (in Ukrainian)
24. Bilodidenko S. V., Bilichenko H. M., Hanush V. I. Periodychnist diahnostuvannya mekhanichnykh system: Navchalnyi posibnyk z dystsipliny «Tekhnichna diahnostyka metalurhiinoho obladnannia» dlia studentiv spetsialnosti 133 – Haluzeve mashynobuduvannya (mahisterskyi riven). – Dnipro: NMetAU, 2017. – 89 p. (in Ukrainian)
25. Belodedenko S.V., Ibragimov M.S. Models for optimization the preventive maintenance schedules of mechanical systems in metallurgy. Metallurgical and Mining Industry. 2017. № 2. P. 26–37.

Taratuta Kostiantyn, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0002-6671-9670

Kulik Tetiana, candidate of technical sciences, Technical University «Metinvest Polytechnic» LLC, ORCID: 0000-0001-5315-6138

Oliinyk Vitalii, head of the design support department of PJSC «Zaporizhstal», ORCID: 0009-0000-3300-9536

METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE SELECTION OF SYSTEMS RELIABILITY-CENTERED MAINTENANCE METALLURGICAL EQUIPMENT

Modern metallurgical production is a high-tech, material-intensive industry. The uninterrupted operation and productivity of this process depend largely on the condition and functionality of the technological equipment used. The efficiency of the production process depends on the reliable operation of the equipment. Various maintenance systems are used to ensure the equipment operates reliably and efficiently.

This work focuses on the features of choosing a maintenance system that prioritises reliability in metallurgical production conditions.

The main objective is to develop procedures that facilitate the selection of maintenance and repair strategies.

The article considers the pros and cons of different maintenance systems. The key characteristics of these systems are identified.

Within the framework of the recommended reliability-focused maintenance system, attention is given to choosing a repair strategy. To this end, the work classifies metallurgical equipment failures into three levels. The first level is based on the nature of the failure, the second level is based on the factors involved, and the third level is based on the consequences and the possibility of elimination. Classifying equipment involves determining the criticality level of failures. Taking into account the level of 'criticality' for each type of equipment, the most effective strategy should be determined.

Decision-making diagrams are useful for selecting a maintenance strategy. These diagrams provide a visual representation of the logic involved in choosing between alternative strategies based on specific conditions. The decision-making diagram presented in the article helps to structure the process of selecting a maintenance and repair strategy by reflecting possible actions and conditions, as well as their consequences, in the form of sequential steps.

Thus, the choice of a maintenance and repair strategy for metallurgical equipment directly affects the safety, continuity of production and technical and economic indicators of the enterprise.

Keywords: strategy, failure, maintenance, reliability, efficiency.

Башлій Сергій Вікторович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-9377-4037;

Коваленко Віктор Леонідович, професор, доктор технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-5950-4412;

Радченко Віталій Васильович, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет, ORCID: 0000-0001-6473-2524;

Верьовкін Олександр Вікторович, начальник електроремонтної служби металообробного виробництва ПАТ "Дніпроважмаш", Дніпро, Україна, ORCID: 0009-0004-4253-9802;

Чабанюк Михайло Юрійович, здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти, Запорізький національний університет, ORCID: 0009-0008-7447-9364.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ В ПРОВІДНИХ КРАЇНАХ СВІТУ

Здійснено порівняльний аналіз ефективності функціонування гідроенергетики у провідних країнах світу. Найкращі показники демонструють держави, де гідроенергетика відіграє роль базового джерела енергопостачання. Важливим фактором підвищення ефективності є наявність гідроакуючих потужностей. Україна належить до країн, що використовують гідроенергетику для забезпечення балансу енергетичної системи.

У сучасних умовах основний акцент у розвитку відновлюваної енергетики, включаючи гідроенергетику, здебільшого робиться на сукупних показниках встановлених потужностей, обсягах нових введених потужностей за рік і, подекуди, на кількості виробленої електроенергії. Однак питання ефективності функціонування гідроенергетики часто залишається поза увагою.

В Україні з 2002 року функціонує Всеукраїнська громадська організація «Асоціація «Укргідроенерго». Стаття спрямована на проведення порівняльного аналізу ефективності функціонування гідроенергетики у провідних країнах світу. Основними завданнями є: визначення ключових факторів, що впливають на ефективність гідроенергетики, аналіз досвіду груп країн-лідерів та розгляд можливості використання цього досвіду для розвитку гідроенергетичного сектора в Україні.

Дослідження базується на методі порівняльного аналізу, оцінюючи ефективність роботи через відношення обсягів виробленої електроенергії до встановленої потужності. Методологічна база включає аналіз природного потенціалу територій (який враховує рельєф і річкову мережу), статистичні дослідження, методи логічного узагальнення та порівняльний аналіз.

Встановлено, що показники ефективності української гідроенергетики зіставні з аналогічними у великих європейських країнах.

Ключові слова: гідроенергетика, використання встановленої потужності, ефективність функціонування гідроенергетики, гідроакуючі потужності, мала гідроенергетика.

Вступ. Упродовж ХХІ століття відновлювана енергетика демонструвала стрімкі темпи розвитку. Завдяки цьому, за підсумками 2017 року, різні галузі відновлюваної енергетики разом забезпечили 24,5 % загальносвітового виробництва електроенергії. Попри високі темпи зростання встановлених потужностей у вітровій та сонячній енергетиці, лідером серед джерел відновлюваної енергії залишається гідроенергетика, яка

виробляє найбільшу частку електроенергії. У 2017 році її частка складала 16,6 % загального обсягу виробленої електроенергії в світі, тоді як на вітрову енергетику припадало 4,0 %, біоенергетику – 2,0 %, сонячну енергетику (фотовольтаїку) – 1,5 %, а на інші види відновлюваної енергетики – 0,4 % [1].

Ефективність функціонування гідроенергетики в провідних країнах світу є важливим показником рівня використання природних ресурсів та впровадження сучасних технологій. Гідроелектростанції забезпечують значну частину світової генерації електроенергії, завдяки чому дозволяють зменшити викиди парникових газів та сприяти загальній екологізації енергетичної галузі. У таких країнах, як Китай, Канада, Бразилія, США та Норвегія, гідроенергетика відіграє ключову роль у забезпеченні енергетичної безпеки та стабільності. Китай, наприклад, є світовим лідером за потужністю гідроелектростанцій, маючи такі об'єкти, як Гребля Трьох Ущелин, яка виробляє величезну кількість енергії. У Канаді гідроенергетика займає суттєву частку в загальному енергобалансі країни завдяки багатим водним ресурсам і інтенсивному розвитку відновлюваної енергетики. Подібна ситуація спостерігається і в Бразилії, де велика кількість річкових систем дозволяє активно використовувати потенціал гідроенергетики. США дотримуються стратегії поєднання різних джерел енергії, проте кілька штатів активно розвивають гідроелектростанції, що надають значний внесок в енергетичну систему країни. Норвегія, своєю чергою, покладається майже виключно на гідроелектроенергію, яка становить основу її енергетичного балансу і робить країну одним із передових з точки зору екологічності. Таким чином, ефективність роботи гідроенергетики в цих країнах визначається високим рівнем технологічного розвитку, стратегічними підходами до управління природними ресурсами та прагненням до енергоефективності й сталого розвитку.

Аналіз джерел інформації і постановка проблеми. У сучасних умовах основний акцент у розвитку відновлюваної енергетики, включаючи гідроенергетику, здебільшого робиться на сукупних показниках встановлених потужностей, обсягах нових введених потужностей за рік і, подекуди, на кількості виробленої електроенергії. Однак питання ефективності функціонування гідроенергетики часто залишається поза увагою. Відсутній порівняльний аналіз щодо ефективності експлуатації гідроенергетичних об'єктів у різних країнах і регіонах. На сьогодні гідроенергетика має низку суттєвих переваг: вона забезпечує виробництво електроенергії з найнижчою собівартістю серед традиційних і альтернативних технологій, виконує роль природного акумулятора у вигляді запасу води в водосховищах чи верхньому басейні гідроакумулюючих станцій, а також виступає оптимальним інструментом для регулювання добових і сезонних навантажень на енергетичну систему. Її раціональне використання відкриває можливості для здешевлення виробництва будь-яких продуктів і досягнення балансу енергосистеми. Аналізуючи сучасні дослідження та публікації, було вивчено дані з щорічних звітів провідних міжнародних організацій, таких як Міжнародна гідроенергетична асоціація (ІНА), Міжнародна агенція з відновлюваної енергії (IRENA), Мережа з відновлюваних джерел енергії REN21, а також Британська нафтова компанія BP.

Звіт ІНА [1] охоплює глобальну ситуацію у сфері гідроенергетики, акцентуючи увагу на 20 країнах-лідерах, які сукупно зосереджують близько 80% світових потужностей (1 015 ГВт із загальних 1 267 ГВт). Документ також містить деталізовану інформацію про окремі регіони: Північна і Центральна Америка [1, с. 49–56], Південна Америка [1, с. 57–64], Африка [1, с. 65–72], Європа [1, с. 73–80], Південна та Центральна Азія [1, с. 81–88], а також Східна Азія з басейном Тихого океану [1, с. 89–97]. Крім того, наведено статистичні дані щодо встановлених потужностей, гідроакумулюючих станцій і обсягів виробленої електроенергії.

Звіт IRENA [2] надає статистику щодо потужностей і обсягів виробництва електроенергії [2, с. 22–27], сегментуючи її на малу [2, с. 28–31], середню [2, с. 32–37] та велику [2, с. 38–43] гідроенергетику. Інший звіт цієї організації фокусується виключно на даних про встановлену потужність на кінець звітного року [3, с. 15–24]. Документ REN21 аналізує введення нових потужностей, роль провідних країн серед світових лідерів, а також обсяги загальних встановлених потужностей [4, с. 57–60]. Зі свого боку Британська нафтова компанія у своєму щорічному звіті подає інформацію про спожиту

гідроелектроенергію, розподіляючи її за регіонами та країнами [5]. Проте жоден із цих оглядів не розглядає питання ефективності експлуатації гідроенергетичних об'єктів.

Мета і завдання дослідження. В Україні з 2002 року функціонує Всеукраїнська громадська організація «Асоціація «Укргідроенерго». На своєму офіційному сайті [7] асоціація публікує інформацію про стан гідроенергетики в Україні, але статистичних даних і аналітичних звітів вона не надає. Стаття спрямована на проведення порівняльного аналізу ефективності функціонування гідроенергетики у провідних країнах світу.

Основними завданнями є:

- визначення ключових факторів, що впливають на ефективність гідроенергетики.
- аналіз досвіду країн-лідерів;
- розгляд можливості використання цього досвіду для розвитку гідроенергетичного сектора в Україні.

Методика проведення досліджень. Дослідження базується на методі порівняльного аналізу, оцінюючи ефективність роботи через відношення обсягів виробленої електроенергії до встановленої потужності. Методологічна база включає аналіз природного потенціалу територій (який враховує рельєф і річкову мережу), статистичні дослідження, методи логічного узагальнення та порівняльний аналіз.

Результати досліджень та їх обговорення. Загалом, найбільшу частку у понад 80 % у первинному споживанні енергії складають викопні джерела енергії: нафта, вугілля та газ, споживання яких кардинально не змінюється протягом більш 10 років (табл. 1). Серед усіх джерел первинної енергії найбільше зросло споживання гідроенергії та відновлювальної енергії, зокрема споживання відновлювальної енергії за аналізований період зросло більш ніж у 20 разів з 2,88 ЕДж у 2000 році до 45,18 ЕДж у 2022 році.

Таблиця 1 – Світове споживання первинної енергії за джерелами у 2015-2022 рр (ЕДж)

Джерела енергії	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
нафта	183,47	187,17	190,32	192,26	192,65	174,99	184,86	190,69
вугілля	157,21	153,77	155,27	157,66	156,72	152,04	160,43	161,47
природний газ	125,24	128,13	131,48	138,08	140,61	138,97	146,41	141,89
ядерна енергія	23,96	24,17	24,24	24,68	25,46	24,40	25,33	24,13
гідроенергія	37,61	38,69	39,00	39,91	40,27	41,21	40,40	40,68
відновлювальна енергія	19,91	22,04	25,29	28,46	31,68	34,87	39,97	45,18
Світ	547,39	553,98	565,60	581,05	587,39	566,49	597,41	604,04

Джерело: побудовано автором на основі [11]

Зростання попиту на первинну енергію сповільнилося порівняно з 2021 роком, збільшившись на 1,1% (6,6 ЕДж) у 2022 році проти 5,5% (30,9 ЕДж) у 2021 році (табл. 2.1.). Первинна енергія у 2022 році була на 16,6 ЕДж вищою за рівень 2019 року до COVID-19 із зростанням споживання в усіх регіонах, крім Європи (-3,8%) і СНД (-5,8%) [11]. Збільшення постачання первинної енергії з 2019 по 2022 рр відбулося в основному за рахунок відновлюваних (за винятком гідро) джерел енергії (13,5 ЕДж) і вугілля (10,6 ЕДж), з підвищеним споживання газу (2,7 ЕДж).

З таблиці 1 можна зробити висновок, що у 2022 році 12% світової енергії було згенеровано за допомогою відновлювальної енергетики, тоді як в 2021 році зелена енергетика забезпечила 10% глобального обсягу.

З позитивного боку, виробництво електроенергії з відновлювальних джерел енергії в 2022 році збільшився більш ніж на понад 500 ТВт год порівняно з 2021 роком (рис. 1), що означає, що вони знаходяться на шляху до задоволення всіх додаткових підвищень глобального попиту на електроенергію протягом наступних двох років.

Як видно з рисунку 1, у світовій структурі виробництва електроенергії все ще домінує викопне паливо, яке забезпечило більш ніж 60% виробництва електроенергії у 2022 році. На вугілля припадало 36% (10317,2 ТВт-год), викопний газ – 22% (6331,4 ТВт-год). Залежність світу від викопної енергії лише незначно знизилася за останні два десяти-

ліття, з 64% у 2000 році до 61% у 2022 році. З 2000 року виробництво вугілля зросло в абсолютному вираженні з 5 719 ТВт-год у 2000 році до 10317 ТВт-год у 2022 році, хоча його частка у виробництві впала з 38% у 2000 році до 36% у 2022 році [12].

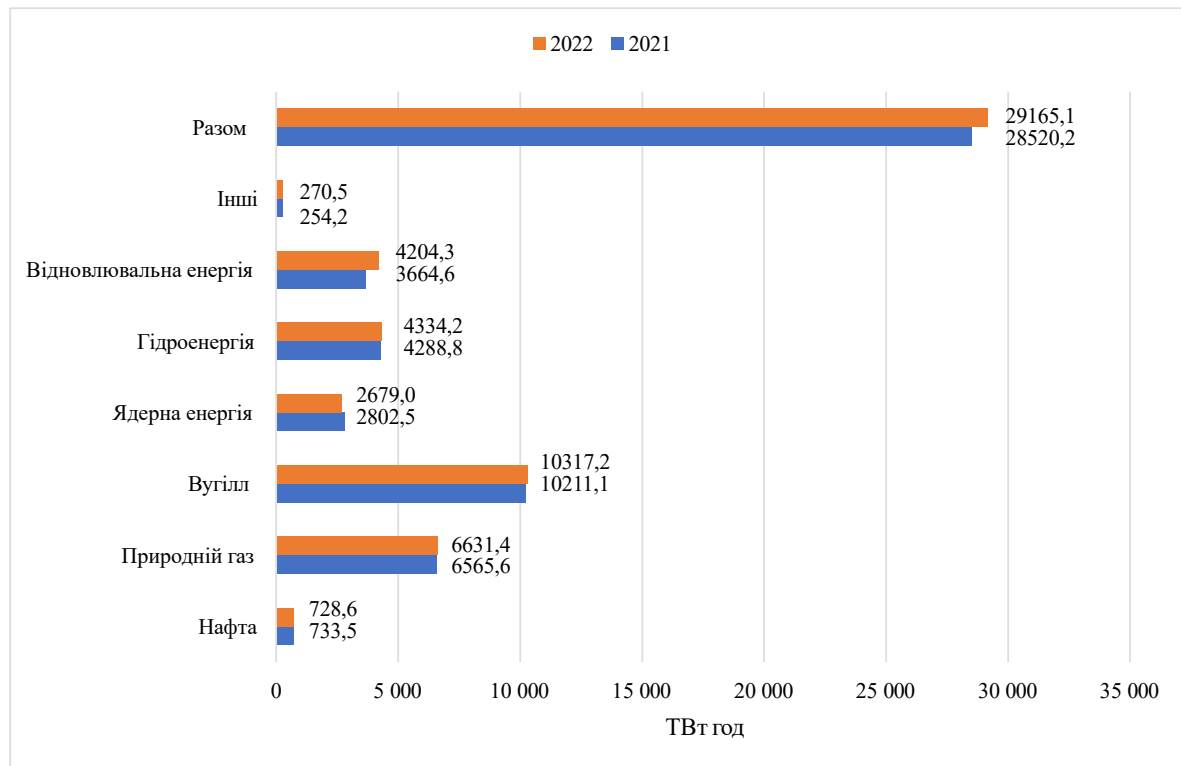


Рисунок 1 – Виробництво електроенергії за видами палива у 2021-2022 рр, ТВт-год

Джерело: побудовано автором на основі [12]

Гідроенергетика залишалася найбільшим джерелом екологічно чистої електроенергії з 15% (4334,2 ТВт-год), а атомна електростанція – другим за величиною джерелом із трохи більше 9% (2679 ТВт-год). Відновлювальна енергетика (вітрова, сонячна енергія, біоенергетика) досягли майже 15% світової електроенергії (4204,2 ТВт-год).

У 2022 році світовий попит на електроенергію досяг нового рекордного максимуму в 28843 ТВт-год. Великі економіки відповідальні за основну частину цього попиту: Китай – 8539 ТВт-год (31%), США – 4128 ТВт-год (15%), Індія 1836 ТВт-год (6%), росії – 1025 ТВт-год (4%) і Японії на 939 ТВт-год (3%). У середньому в усьому світі попит на душу населення становив 3,6 МВт-год у 2022 році, причому деякі великі країни перевищували світовий середній показник на душу населення (США 12 МВт-год, Південна Корея 11 МВт-год, Китай 6 МВт-год) (табл. 2).

Гідроенергетика зберігає найбільшу частку у виробництві відновлюваної електроенергії – 16,6%. Однак її темпи розвитку поступаються таким секторам, як вітрова та сонячна енергетика. У період між 2005 і 2015 роками середньорічний приріст виробництва електроенергії у гідроенергетиці склав 2,9%, а в 2016 році – 2,8%. Натомість вітрова енергетика демонструвала ріст на рівні 23% (2005–2015) і 15,6% у 2016 році, а сонячна – 50,7% і 29,6% відповідно [6].

Попри відносно низькі темпи розвитку, гідроенергетика залишається стабільним і витривалим сектором енергетики. Регіональний аналіз показує, що найвищі темпи зростання гідроенергетичного сектора спостерігалися в Азії. У цій частині світу середньорічний приріст за період 2005–2015 років становив 8%, а в 2016 році – 3,5%. Китай (10,9% і 4% відповідно), В'єтнам (13,2% і 5,7%) та Малайзія (9,9% і 19,5%) лідирували за темпами розвитку. Інші регіони суттєво поступаються: у Північній Америці приріст склав лише 0,05% (2005–2015) і 3,5% (2016), у Європі – 0,7% і 3,4%, а в Африці – 2,9% із негативним трендом (-4,3%) у 2016 році.

Таблиця 2 – Країни-лідери у виробництві та споживанні електроенергії у 2022 році

	Країни	Генерація, ТВт·год	Споживання, ТВт·год	Споживання на душу населення, кВт год
1.	Китай	8881,870	8539,690	6 049,0
2.	США	4291,954	4128,177	12377,2
3.	Індія	1760,279	1462,874	1 039,3
4.	Японія	991,367	939,314	7504,3
5.	Бразилія	674,271	583,184	2871,9
6.	Канада	637,996	553,261	14 208,4
7.	Південна Корея	606,760	586,766	11341,6
8.	Німеччина	560,759	507,248	6 013,0
9.	Франція	446,291	425,994	6 248,7
10.	Саудівська Аравія	431,919	393,213	12 221,1
11.	Іран	360,689	315,843	3722,8
12.	Індонезія	337,160	312,423	1136,7
13.	Мексика	333,140	296,969	2343,8
14.	Велика Британія	318,595	287,128	4280,3
....	Україна	112,244	99,690	2431,6

Джерело: сформовано автором на основі [13]

Основною причиною таких відмінностей стали інтенсивні темпи економічного зростання азійських країн у ХХІ столітті та підвищена потреба в енергії. Водночас у розвинених країнах, як-от західноєвропейські держави та США, відзначається вичерпання можливостей для подальшого розвитку гідроенергетики.

Гідроенергетика є одним із найдешевших джерел виробництва електроенергії в порівнянні з іншими технологіями, що робить використання існуючих гідроенергетичних об'єктів вкрай важливим. Для оцінки ефективності гідроенергетики в різних країнах світу було виконано аналіз статистичних даних із звітів Міжнародної асоціації гідроенергетики (ІНА) та ВР. Цей аналіз передбачає співставлення обсягів виробленої електроенергії зі встановленою потужністю гідрооб'єктів.

Ефективність гідроенергетики характеризується відношенням обсягу виробленої електроенергії (у кВт·год/рік) до встановленої потужності (у кВт). Теоретичний максимум значення цього показника становить 8 760 кВт·год/кВт, що відповідає цілодобовій роботі протягом року. Однак фактичні результати є помітно нижчими через вплив різних факторів, зокрема сезонності та технічних обмежень. Серед 20 провідних країн, які сукупно охоплюють близько 80 % світової встановленої потужності гідроенергетики, найвищі показники у 2017 році демонстрували такі держави: Канада (4 980,6 кВт·год/кВт, що відповідає рівню використання потужності 56,9 %), Колумбія (4 683,6 кВт·год/кВт, 53,5 %), Венесуела (4 683,3 кВт·год/кВт, 53,5 %) та Норвегія (4 491,6 кВт·год/кВт, 51,3 %). Дані цих країн наведені у таблиці 3, яка дозволяє провести детальний аналіз ефективності експлуатації гідроенергетичних ресурсів провідних держав світу та України.

У більшості з цих країн гідроенергетика виступає ключовим джерелом енергії, забезпечуючи понад 50% загального виробництва електроенергії. Наприклад, у Норвегії вона становить 95,9%, у Канаді – 61,3%, у Колумбії – 59,9%, а у Венесуелі – 52,9%. Серед європейських країн слід виділити Австрію та Швейцарію. У цих державах гідроенергетика також забезпечує більше половини загального виробництва електроенергії: в Австрії – 58,7%, а у Швейцарії – 51,9%. Водночас рівень використання встановленої потужності тут нижчий за показники вищезазначеної групи країн: в Австрії це 2 712,0 кВт/кВт (31,0%), у Швейцарії – 2 167,0 кВт/кВт (24,7%). Це пояснюється переважно гірським рельєфом цих країн, значною кількістю опадів і наявністю гідро-

лектростанцій середньої та малої потужностей. Останнім часом в обох країнах активно впроваджують заходи з модернізації енергетичної інфраструктури та підвищення її ефективності завдяки використанню новітнього обладнання.

Таблиця 3 – Ефективність роботи гідроенергетики провідних країн світу та України

Країна	Виробництво електроенергії у 2017 р., млрд кВт·год	Загальна встановлена потужність на кінець 2017 р., МВт	Частка гідроенергетики у загальному виробництві електроенергії, %	Ефективність використання, кВт·год/кВт	Частка використання встановленої потужності, %
Китай	1 194,50	341 190	18,9	3 501,0	40,0
США	322,39	102 867	6,0	3 134,0	35,8
Бразилія	401,06	100 273	66,1	3 999,7	45,7
Канада	403,35	80 985	61,3	4 980,6	56,9
Японія	92,55	49 905	8,0	1 854,5	21,2
Індія	135,54	49 382	9,2	2 744,7	31,3
Норвегія	143,00	31 837	95,9	4 491,6	51,3
Туреччина	59,19	27 273	24,6	2 170,3	24,8
Франція	53,24	25 517	10,8	2 086,5	23,8
Італія	37,53	21 884	14,3	1 715,0	19,6
Іспанія	20,57	20 343	13,0	1 011,2	11,5
Швейцарія	36,67	16 922	51,9	2 167,0	24,7
В'єтнам	59,90	16 679	34,4	3 591,3	41,0
Швеція	63,86	16 466	40,3	3 878,3	44,3
Венесуела	72,09	15 393	52,9	4 683,3	53,5
Австрія	38,05	14 030	58,7	2 712,0	31,0
Мексика	29,83	12 125	9,5	2 460,2	28,1
Іран	16,44	11 811	4,5	1 391,9	15,9
Колумбія	54,92	11 726	59,9	4 683,6	53,5
Україна	12,01	6 785	4,4	1 770,1	20,2

Джерело: розрахунки виконано автором на основі [1, 5]

До окремої групи належать країни, де гідроенергетика виконує балансувальну функцію енергетичної системи: вона допомагає подолати пікові добові й сезонні навантаження. До цієї категорії входять європейські країни, зокрема Франція (2 086,5 кВт/кВт – 23,8%), Італія (1 715,0 кВт/кВт – 19,6%), Іспанія (1 011,2 кВт/кВт – 11,5%), а також Японія (1 854,5 кВт/кВт – 21,2%). Україна також належить до цієї групи як за функцією гідроенергетики (балансування енергосистеми), так і за рівнем ефективності (1 770,1 кВт/кВт – 20,2%).

У країнах із великою територією (росія, Китай, США, Бразилія, Індія) частка гідроенергетики у загальному виробництві електроенергії значно варіюється: від 6% у США до 66,1% у Бразилії. Проте навіть у межах окремих регіонів відмінності можуть бути значними через рельєф місцевості, наявність річок і доступність гідроенергетичних ресурсів. Наприклад, місто Сієтл у США виробляє від гідроенергетики 89% своєї електроенергії – це майже в'ятнадцятеро більше за середній показник по країні.

Ефективність використання гідроенергетики та частка використання встановленої потужності коливаються: в Індії ці показники найнижчі (2 744,7 кВт/кВт – 31,3%), а в Бразилії – найвищі (3 999,7 кВт/кВт – 45,7%). До двадцятки лідерів світової гідро-

енергетики входять ще три країни Азії (В'єтнам, Туреччина, Іран) та Швеція. У Швеції частка електроенергії з гідроенергетики дорівнює 40,3%, а у В'єтнамі – 34,4%.

Країни з вищою ефективністю використання гідроенергетики та коефіцієнтом використання встановленої потужності демонструють помітні переваги. Наприклад, у Швеції ці показники становлять 3 878,3 кВт·год/кВт та 44,3 %, тоді як у В'єтнамі вони досягають 3 591,3 кВт·год/кВт та 41,0 %. У Туреччині гідроенергетика забезпечує майже чверть (24,6 %) виробництва електроенергії. Водночас країна має середні показники ефективності роботи цієї галузі: 2 170,3 кВтмгод/кВт і 24,8 %.

Економіка Ірану значною мірою базується на видобутку нафти та природного газу, тому гідроенергетика відіграє лише допоміжну роль, забезпечуючи лише 4,5 % від загального виробництва електроенергії. Показники ефективності для Ірану становлять 1 391,9 кВт·год/кВт і 15,9 %, випереджаючи лише Іспанію.

Важливою складовою ефективної роботи гідроенергетики в енергосистемах є наявність гідроакumuлюючих потужностей. В Європі вагома частка таких потужностей відзначається в Австрії (37,1 %), Італії (34,5 %), Франції (24,7 %), Швейцарії (18,1 %) та Іспанії (16,4 %). У США цей показник сягає 22,2 %, а в Японії – аж 55,4 %.

Таблиця 4 містить дані про встановлені потужності гідроенергетики та гідроакumuлюючі потужності провідних країн світу і України, що дозволяє оцінити можливості розвитку галузі в майбутньому.

Таблиця 4 – Встановлена потужність гідроенергетики та гідроакumuлююча потужність провідних країн світу та України [16]

Країна	Частка гідроакumuлюючої потужності у загальній встановленій потужності гідроенергетики, %	Гідроакumuлююча потужність на кінець 2017 р., МВт	Загальна встановлена потужність на кінець 2017 р., МВт
Китай	8,4	28 490	341 190
США	22,2	22 809	102 867
Бразилія	0,03	30	100 273
Канада	0,2	177	80 985
Японія	55,4	27 637	49 905
Індія	9,7	4 786	49 382
Норвегія	4,4	1 392	31 837
Туреччина	0	0	27 273
Франція	27,4	6 985	25 517
Італія	34,5	7 555	21 884
Іспанія	16,4	3 329	20 343
Швейцарія	18,1	3 057	16 922
В'єтнам	0	0	16 679
Швеція	0,6	99	16 466
Венесуела	0	0	15 393
Австрія	37,1	5 212	14 030
Мексика	0	0	12 125
Іран	8,8	1 040	11 811
Колумбія	0	0	11 726
Україна	19,4	1 315	6 785

Джерело: розрахунки виконано автором на основі [1].

На противагу цьому, країни, що розвиваються, або ті, де гідроенергетика є базовою джерелом енергії, мають набагато меншу частку гідроакumuлюючих потужностей. Для

прикладу: у Бразилії це становить лише 0,03 %, у Канаді – 0,2 %, а в таких державах як Туреччина, В'єтнам, Венесуела, Мексика та Колумбія вони взагалі відсутні. В Україні частка гідроакумуючих потужностей складає 19,4 % від усієї потужності гідроенергетики. У перспективі вона суттєво зросте після завершення будівництва Дністровської ГАЕС.

Порівнюючи показники України з великими країнами Західної Європи, можна зазначити невелике відставання від Франції та перевагу над Іспанією.

Подальше підвищення ефективності роботи української гідроенергетики слід здійснювати через розвиток малої гідроенергетики із застосуванням сучасного технологічного обладнання та нарощування гідроакумуючих потужностей. Головним завданням залишається поступове вдосконалення цієї галузі для забезпечення сталого енергетичного розвитку країни.

Збільшення встановлених потужностей та обсягів виробництва електроенергії у сфері гідроенергетики України є важливим кроком для забезпечення енергетичної незалежності. Для розвитку гідроакумуючих потужностей доцільно максимально ефективно використовувати існуючі водосховища в басейні річки Дніпро, а також завершити будівництво Дністровської ГАЕС.

Висновки цього дослідження свідчать про результати порівняльного аналізу ефективності роботи гідроенергетики в провідних країнах світу. Найвищу продуктивність демонструють держави, де гідроенергетика виконує роль базової потужності. Серед них лідерами є Канада (ефективність використання встановленої потужності становить 4 980,6 кВт·год/кВт при частці використання 56,9 %), Колумбія (4 683,6 кВт·год/кВт, 53,5 %), Венесуела (4 683,3 кВт·год/кВт, 53,5 %) і Норвегія (4 491,6 кВт·год/кВт, 51,3 %).

Україна знаходиться серед країн, що застосовують гідроенергетику переважно для балансування енергетичної системи. Її показники ефективності (1 770,1 кВт·год/кВт, 20,2 %) зіставні з кількома європейськими країнами: Францією (2 086,5 кВт·год/кВт, 23,8 %), Італією (1 715,0 кВт·год/кВт, 19,6 %) та Іспанією (1 011,2 кВт·год/кВт, 11,5 %).

Крім того, важливим чинником ефективності для країн зі значною регулюючою роллю гідроенергетики є частка гідроакумуючих потужностей. У цьому аспекті Україна (19,4 %) займає проміжне положення між Францією (24,7 %) та Іспанією (16,4 %).

Перспективи розвитку гідроенергетики України рекомендується спрямувати на впровадження малої гідроенергетики та збільшення обсягів встановлених гідроакумуючих потужностей.

Подальші наукові дослідження варто розподілити за окремими напрямками: розвиток великої та малої гідроенергетики, а також посилення гідроакумуючих потужностей. Вивчення досвіду Австрії та Швейцарії може стати корисним у галузі малої гідроенергетики, оскільки ці країни досягли високого рівня у цьому напрямі.

Водночас Японія є прикладом для нарощування потенціалу гідроакумуючих станцій, адже частка ГАЕС у її системі перевищує половину загальних потужностей гідроенергетики.

Бібліографічний перелік

1. Hydropower Status Report 2018. International Hydropower Association (IHA). – London. IHA Central Office, 2018. 104 p.
2. Renewable energy statistics 2017. IRENA Secretariat. International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi. IRENA Secretariat, 2017. 348 p.
3. Renewable capacity statistics 2017. IRENA Secretariat. International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi. IRENA Secretariat, 2017. 60 p.
4. Renewable 2017. Global Status Report. REN 21. Paris. REN 21. Secretariat, 2017. 302 p.
5. BP Statistical Review of World Energy 2017 [Electronic resource] : Website BP. URL: <http://www.bp.com/content/dam/bp/excel/Energy-Economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-workbook.xlsx>.
6. Нараєвський С.В. Ефективність роботи гідроенергетики провідних країн світу. [Електронний ресурс]: Сайт електронного журналу «Економіка і суспільство». Випуск 18, 2018, С. 66-72. URL: <https://economyandsociety.in.ua/>

7. Всеукраїнська громадська організація «Асоціація «Укргідроенерго». Новини [Електронний ресурс]: Сайт Всеукраїнської громадської організації «Асоціація «Укргідроенерго». URL: <http://www.ukrhydroenergo.org/>.
8. Електроенергетика України: стан і перспективи. Блог YC. Market (youcontrol.market). URL: <https://blog.youcontrol.market/ieliektroienierghietika-ukrayini-stan-i-pierspiektiv/> (дата звернення: 2 лютого 2024 р).
9. Огляд енергетичного сектору України. URL: <https://www.oecd.org/eurasia/competitiveness-programme/eastern-partners/Monitoring-the-energy-strategy-Ukraine-2035-UKR.pdf> (дата звернення: 15 березня 2024 р).
10. Primary Energy. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Primary_energy (дата звернення: 22 лютого 2024 р).
11. Statistical Review of World Energy. Energy Institute. 72nd edition. 2023. 64 p. URL: https://www.energyinst.org/data/assets/pdf_file/0004/1055542/EI_Stat_Review_P_DF_single_3.pdf (дата звернення: 2 квітня 2024 р).
12. Global Electricity Review. URL: <https://ember-climate.org/app/uploads/2023/04/Global-Electricity-Review-2023.pdf> (дата звернення: 27 квітня 2024 р).
13. Electricity consumption. URL: <https://countryeconomy.com/energy-and-environment/electricity-consumption> (дата звернення: 27 квітня 2024 р).
14. Reforming Ukraine's electricity market. URL: <https://www.lowcarbonukraine.com/wp-content/uploads/Reforming-Ukraines-electricity-market.pdf> (дата звернення: 2 квітня 2024 р).
15. Electricity Market Report 2023. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/255e9c8a-da84-4681-8c1f-458ca1a3d9ca/ElectricityMarketReport2023.pdf> (дата звернення: 20 квітня 2024 р).
16. Виробництво електроенергії в Україні. URL: <https://www.epravda.com.ua/news/2022/01/11/681292/> (дата звернення: 20 квітня 2024 р).
17. Виробництво е/е в Україні. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/vyrobnystvo-ee-v-ukraini-u-sichni-kvitni-2023-roku-zmenshylosia-na-194> (дата звернення: 25 квітня 2024 р).
18. Ukrainian energy sector evaluation and damage assessment – VIII (as of March 24, 2023). URL: https://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/2023_03_28_UA_sectoral_evaluation_and_damage_assessment_Version_VIII.pdf (дата звернення: 1 травня 2024 р).
19. Developing Renewable Energy in Ukraine. URL: <https://www.csis.org/analysis/developing-renewable-energy-ukraine> (дата звернення: 5 травня 2024 р).
20. Ministry of economy. URL: <https://www.me.gov.ua/News/Detail?lang=en-GB&id=479ea0f7-64b7-4f15-be37-> (дата звернення: 28 квітня 2024 р).
21. Розвиток ВДЕ України. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2023/02/21/697267/> (дата звернення: 10 травня 2024 р).
22. USAID Energy Security Project. URL: <https://energysecurityua.org/news/the-usaid-energy-security-project-presented-a-project-of-a-comprehensive-training-program-on-the-use-of-biomethane/> (дата звернення: 10 травня 2024 р).

References

1. Hydropower Status Report 2018. International Hydropower Association (IHA). – London. IHA Central Office, 2018. 104 p.
2. Renewable energy statistics 2017. IRENA Secretariat. International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi. IRENA Secretariat, 2017. 348 p.
3. Renewable capacity statistics 2017. IRENA Secretariat. International Renewable Energy Agency (IRENA). Abu Dhabi. IRENA Secretariat, 2017. 60 p.
4. Renewables 2017. Global Status Report. REN 21. Paris. REN 21. Secretariat, 2017. 302 p.
5. BP Statistical Review of World Energy 2017 [Electronic resource] : Website BP. URL: <http://www.bp.com/content/dam/bp/excel/EnergyEconomics/statisticalreview2017/bpstatisticalreviewofworldenergy2017-workbook.xlsx>.
6. Narayevsky S.V. Efficiency of hydropower in leading countries of the world. [Electronic resource]: Website of the electronic journal "Economy and Society". Issue 18, 2018, pp. 66-72. URL: <https://economyandsociety.in.ua/>
7. All-Ukrainian public organization "Association "Ukrhydroenergo". News [Electronic resource]: Website of the All-Ukrainian public organization "Association "Ukrhydroenergo". URL: <http://www.ukrhydroenergo.org/>.
8. Electric power industry of Ukraine: state and prospects. Blog YC. Market (youcontrol.market). URL: <https://blog.youcontrol.market/ieliektroienierghietika-ukrayini-stan-i-pierspiektiv/> (accessed February 2, 2024)

9. Ukraine Energy Sector Review. URL: <https://www.oecd.org/eurasia/competitiveness-programme/eastern-partners/Monitoring-the-energy-strategy-Ukraine-2035-UKR.pdf> (accessed March 15, 2024)
10. Primary Energy. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Primary_energy (accessed February 22, 2024)
11. Statistical Review of World Energy. Energy Institute. 72nd edition. 2023. 64 p. URL: https://www.energyinst.org/data/assets/pdf_file/0004/1055542/EI_Stat_Review_PDF_single_3.pdf (accessed April 2, 2024)
12. Global Electricity Review. URL: <https://ember-climate.org/app/uploads/2023/04/Global-Electricity-Review-2023.pdf> (accessed April 27, 2024)
13. Electricity consumption. URL: <https://countryeconomy.com/energy-and-environment/electricity-consumption> (accessed April 27, 2024)
14. Reforming Ukraine's electricity market. URL: <https://www.lowcarbonukraine.com/wp-content/uploads/Reforming-Ukraines-electricity-market.pdf> (accessed April 2, 2024)
15. Electricity Market Report 2023. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/255e9cbada84-4681-8c1f-458ca1a3d9ca/ElectricityMarketReport2023.pdf> (accessed April 20, 2024)
16. Electricity Production in Ukraine. URL: <https://www.epravda.com.ua/news/2022/01/11/681292/> (accessed April 20, 2024)
17. Electricity Production in Ukraine. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/vyrobnytstvo-ee-v-ukraini-u-sichni-kvitni-2023-roku-zmenshylosia-na-194> (accessed on April 25, 2024)
18. Ukrainian energy sector evaluation and damage assessment – VIII (as of March 24, 2023) URL: https://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/2023_03_28-UA_sectoral_evaluation_and_damage_assessment_Version_VIII.pdf (accessed on May 1, 2024)
19. Developing Renewable Energy in Ukraine. URL: <https://www.csis.org/analysis/developing-renewable-energy-ukraine> (accessed on May 5, 2024)
20. Ministry of Economy. URL: <https://www.me.gov.ua/News/Detail?lang=en-GB&id=479ea0f7-64b7-4f15-be37-> (accessed: April 28, 2024)
21. Development of Renewable Energy in Ukraine. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2023/02/21/697267/> (accessed: May 10, 2024)
22. USAID Energy Security Project. URL: <https://energysecurityua.org/news/the-usaid-energy-security-project-presented-a-project-of-a-comprehensive-training-program-on-the-use-of-biomethane/> (accessed: May 10, 2024)

Bashliy Serhiy, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0001-9377-4037;

Kovalenko Viktor, professor, doctor of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0001-5950-4412;

Radchenko Vitaliy, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0000-0001-6473-2524;

Veryovkin Olexsandr, head of the electrical repair service of metalworking production PJSC "Dnirovazhmash", Dnipro, Ukraine, ORCID: 0009-0004-4253-9802;

Chabanyuk Mykhailo, second (master's) level higher education student, Zaporizhzhia National University, ORCID: 0009-0008-7447-9364.

ENGINEERING IN PROVIDING TERRITORIES OF THE WORLD EFFECTIVENESS OF THE FUNCTIONING OF HYDROPOWER

A comparative analysis of the efficiency of hydropower operation in leading countries around the world has been conducted. The best results are demonstrated by countries where hydropower serves as a primary source of energy supply. An important factor in improving efficiency is the presence of pumped storage capacities. Ukraine belongs to the group of countries that use hydropower to maintain the energy system balance.

In today's conditions, the development of renewable energy, including hydropower, largely focuses on aggregate indicators of installed capacity, the volume of newly commissioned capacity per year, and, occasionally, the amount of electricity generated. However, the issue of hydropower efficiency often remains overlooked.

Since 2002, the All-Ukrainian Public Organization "Association Ukrhydroenergo" has been active in Ukraine. The article aims to conduct a comparative analysis of the efficiency of hydropower performance in leading countries. The main objectives are to identify key factors influencing hydropower efficiency, analyze the experience of leading countries, and explore the possibility of applying this experience to the development of Ukraine's hydropower sector.

The research is based on a comparative analysis method, evaluating operational efficiency by the ratio of electricity generated to installed capacity. The methodological foundation includes the analysis of the natural potential of territories (considering relief and river networks), statistical research, methods of logical generalization, and comparative analysis.

It has been established that the efficiency indicators of Ukrainian hydropower are comparable to those of major European countries.

Keywords: hydropower, high-pressure power, efficiency of hydropower, hydroaccumulative power, low hydropower.

Капустян Олексій Євгенович, кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», ORCID: 0000-0002-8979-8076

Погрелюк Ірина Миколаївна, доктор технічних наук, професор, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, ORCID: 0000-0002-3009-2829

Лаврись Сергій Мирославович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України ORCID: 0000-0003-2616-8699

Канашевич Георгій Вікторович, доктор технічних наук, професор, Черкаський державний технологічний університет, ORCID: 0000-0002-6708-040X

Білоник Ігор Методійович, кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», ORCID: 0000-0002-3873-5307

Осіпов Михайло Юрійович, кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка», ORCID: 0000-0002-7903-9463

Завгородній Олександр Васильович, аспірант, Національний університет «Запорізька політехніка», ORCID: 0009-0005-7967-4757

Білоник Дмитро Ігорович, аспірант, Національний університет «Запорізька політехніка», ORCID: 0009-0000-6182-7042

ОТРИМАННЯ ТИТАН-МОЛІБДЕНОВИХ СФЕРИЧНИХ ПОРОШКІВ МЕТОДОМ PREP З ВИКОРИСТАННЯМ КАТОДІВ, ВИГОТОВЛЕНИХ БЕЗКАМЕРНОЮ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОЮ ВИПЛАВКОЮ

Стрімкий розвиток технологій 3D-друку обґрунтовує актуальність виготовлення порошків методом PREP. Підтвердження тому, це активна участь в наукових дослідженнях інноваційних матеріалів, розробці технологій, обладнання фахових установ України, Європи, Китаю, Америки.

Порошки титану та титанових сплавів знаходять широкий попит як жаростійкі, жароміцні та корозійнотривкі матеріали. Відомо, що легування титану молібденом від 3 % до 10 % підвищує його корозійну тривалість в розчинах неорганічних кислот від 20 до 300 разів, що робить цей двокомпонентний сплав перспективним матеріалом для отримання високорозійнотривких порошків. В роботі наведені свідчення о високій біосумісності двокомпонентних титан-молібденових сплавів. Для виготовлення широкого спектру деталей медичного призначення найбільш доцільно використовувати пошаровий синтез двокомпонентним порошком. Титан-молібденові катоди виготовляли зі зливків діаметром 55 мм, які отримали за технологією безкамерної електрошлакової виплавки. Витратні електроди були виготовлені з титанових та молібденових стрічок, які з'єднані в пакет методом TiG. Титан-молібденовий зливочок мав гладку поверхню, щільну бездефектну макроструктуру, включень часток нерозплавленого молібдену не виявлено. Встановлено, твердість відливки та вміст молібдену та титану по перерізу майже не змінювалась. Центр – 33,0...33,2 HRC, Ti – 91,15 %, Mo – 8,83 %; половина радіуса – 33,0...33,5 HRC, Ti – 91,60 %, Mo – 8,84 %; край – 33,5...34,0 HRC, Ti – 91,10 %, Mo – 8,90 %. Розпилений порошок мав наступний хімічний: Ti – основа, 8,700 % Mo; 0,180 % Fe; 0,050 % C; 0,030 % Si; 0,035 % N; 0,150 % O; 0,009 % H, форма часток – сферична, насипна маса 1,9...2,2 г/см³ та фракційний склад: 40...50 мкм – 7 %; 50-60 мкм – 15 %; 60...70 мкм – 23 %; 70...80 мкм – 28 %; 80...90 мкм – 17 %; 90...100 мкм – 7 %. В цілому, порошок відповідає критеріям якості порошків адитивного призначення.

Ключові слова: PREP, порошки з титанових сплавів, електрошлакове виплавляння, витратний електрод, хімічний склад.

Вступ. Інтенсивний розвиток адитивних технологій гостро ставить питання про виробництво витратних матеріалів, взагалі порошків жароміцних, високоміцних та корозійнотривких титанових сплавів.

На сьогоднішній день, титанові порошки для адитивних технологій випускають такі відомі фірми як: Concept Laser (Німеччина), Carpenter Technology Corporation (США), Arcam (Швеція) та інші.

Дослідження по вдосконаленню технологій та обладнання для отримання титанових порошків, покращенню їх властивостей, розширенню марочного складу, активно проводяться в провідних українських науково-дослідних інститутах та університетах (Науково-технічний комплекс «Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона НАН України, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Науково-виробниче підприємство "ВМСК", Акціонерне товариство «Інститут титану», Науково-виробниче підприємство "Дельфін").

Одним з найбільш поширених методів отримання титанових порошків, призначених для використання в адитивних технологіях є метод PREP. Сутність методу достатньо повно розкрита в роботах [1, 2].

Для виготовлення порошків методом PREP застосовують широкий спектр сучасних матеріалів таких як титанові, цирконієві та алюмінієві сплави, жароміцні нікелеві та кобальтові сплави, нержавіючу, інструментальну та мартенсито-старіючу сталі та інші [3, 4].

Перспективним матеріалом для отримання висококорозійнотривких порошків є двокомпонентні сплави α -титану з молибденом. Наприклад, в роботі [5] встановлено, що вироби зі сплаву $Ti + 3\% Mo$, які працюють в середовищі 5 % розчину сірчаної кислоти при температурі 100 °C мають корозійну тривкість в 23,5 разів вищу у порівнянні з титаном VT1-0, при 5 % молибдену, корозійна стійкість підвищується в 117,0 разів.

Спільними дослідженнями Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України і Національного університету «Запорізька політехніка» встановлено, що легування α -титану 10 % молибденом при безкамерному електрошлаковому виплавленні ще більш підвищує корозійну тривкість цього сплаву у розчинах неорганічних кислот. Так в водних розчинах 20 % HCl та 40 % H₂SO₄ при кімнатній температурі швидкість корозії сплаву Ti10Mo відбувається значно повільніше у порівнянні з технічно чистим титаном відповідно у 117 та 315 разів [6].

В хімічних технологіях таких, як гідроліз цукру у вторинній кислоті, виробництві кристалічної глюкози, мінеральних добрив, барвників титан-молибденові сплави, як висококорозійностійкі матеріали є пріоритетними [6].

Останнім часом до двокомпонентних титан-молибденових сплавів виникла підвищена увага як до біосумісного матеріалу [7, 8]. Розробкою цього наукового напрямку займаються такі фахові установи як University of Medicine and Pharmacy Iași, Gheorghe Asachi Technical University of Iasi Romania; Harbin Institute of Technology, Harbin; Central University of Technology, Bloemfontein. Виготовлення деталей медичного призначення, різноманітні хірургічні вироби, імпланти, протези та інші потребують титан-молибденові сплави у вигляді відливок, прокату та найбільш всього, як порошок для 3D-друку [9, 10].

Для цього, перш за все, потрібно отримати титан-молибденовий зливочок, який би мав високу фізико-хімічну однорідність, що забезпечить необхідну якість порошків.

На сьогодні основний метод отримання двокомпонентних титан-молибденових сплавів – є вакуумно-дуговий переплав витратного електрода.

Досліджено декілька способів виготовлення витратних електродів. Так, змішування титанової губки ТГ-110 зі штабіками спеченого молибдену, або лігатурою Ti70Mo не дали очікуваних результатів у зв'язку з утворенням в зливку включень нерозчиненого молибдену. Це пояснюється суттєвою різницею у фізичних властивостях вихідних матеріалів. Температура плавлення α -титану 1660 °C, а молибдену – 2660 °C, щільність титану 4500 кг/м³, а молибдену – 10500 кг/м³. Застосування молибденового порошку при пресуванні титанової губки у витратний електрод призводило до великих витрат та також не забезпечило потрібної якості зливка. В роботі [11] досліджено особливості

плавлення витратного електроду, який складався з прутків технічно чистого титану BT1-0 та молібденових штабків. Доведено, що складові такого електроду розплавляються поодиноці і кожна із складових є відокремленим джерелом утворення крапель. В такому випадку отримати достатньо високу фізико-хімічну однорідність зливка не вдається. Тому, вирішення цієї проблеми відбувається шляхом багатократного переплаву титан молібденового зливка, як витратного електроду [12]. Наприклад, сплав 4201 (Mo 28...32%) виплавляють трьох кратним вакуумно-дуговим переплавом.

З результатів роботи автори роблять висновок – для забезпечення високої фізико-хімічної однорідності титан-молібденових зливок потрібно, щоб на торці, який плавиться, утворювалась монолітна ділянка хімічний склад якої був би близьким до розрахункового. Але в умовах вакуумно-дугової плавки це не можливо.

Значно ширші можливості в плані конструкції та виготовлення витратних електродів належать електрошлаковій технології. Комбіновані, біметалеві, поліметалеві, щільної смуги, та смуг з різних матеріалів дозволяють вирішувати широкий спектр технологічних питань. Суттєва розбіжність в температурі плавлення (майже в тисячу градусів) на наш погляд може бути використана в організації принципово нового механізму плавлення витратного електроду – контактного плавлення. Таке плавлення може відбуватися на занурений в шлак частині торця між щільно з'єднаними смугами титану та молібдену. При цьому, в зливку не повинно залишитися часток нерозчиненого молібдену. Але, ці припущення потрібно підтвердити експериментально.

Мета роботи. Визначити можливість отримання титан-молібденових сферичних порошків методом PREP з використанням катодів, що виготовлені безкамерною електрошлаковою виплавою.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Виготовити декілька витратних електродів з урахуванням забезпечення виникнення на торці електроду який занурено в шлакову ванну ефекту контактного плавлення між складовими титан – молібден.
2. Отримати методом безкамерної електрошлакової виплавки титан-молібденовий зливко складу Ti10Mo, дослідити макро- та мікроструктуру, визначити розподіл молібдену та твердості по перерізу зливка.
3. Виготовити катоди складу Ti10Mo та провести їх розпилення методом PREP.
4. Дослідити якісні характеристики порошку: хімічний склад, морфологію часток, гранулометричний склад, насипну вагу.

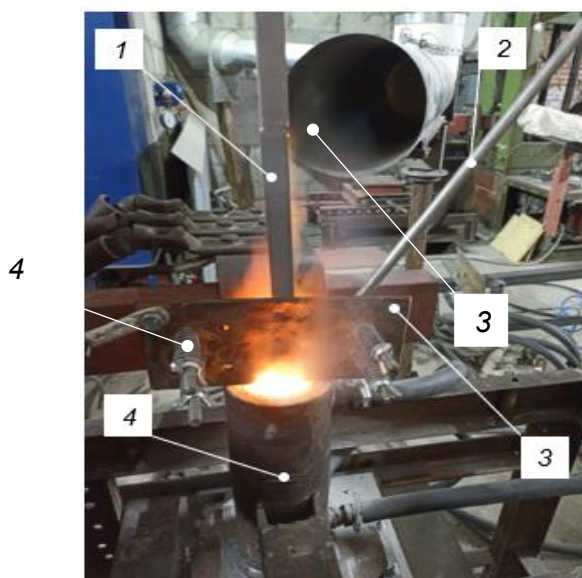
Матеріал, обладнання, методики досліджень. Титан-молібденові зливки діаметром 55 мм для виготовлення катодів отримали безкамерною електрошлаковою виплавою. Витратні електроди складали з трьох титанових стрічок марки BT1-0 (Ti основа; Fe = 0,150 %; C = 0,060 %; Si = 0,020 %; N = 0,025%; O = 0,080 %; H = 0,009 %) перерізом 25 мм × 5 мм та двох молібденових стрічок марки МЧ (Mo – 99,970 %; Fe – 0,015 %; Si – 0,008 %; Ni – 0,038) перерізом 20 мм × 0,5 мм виробництва ТОВ Коростенський металургійний завод. Співвідношення титанових та молібденових стрічок складала 9 до 1. Поверхню стрічок обробляли піскоструминною очисткою та травили в розчині 550 см³ H₂O, 350 см³ HCl та 50 г вторинного натрію[13]. Потім стрічки поєднували між собою у витратний електрод методом TiG. Поверхня стрічок була гладкою, характерною для листів холодної прокатки. При зварюванні це дозволило їх щільно притиснути між собою, що є однією з важливих вимог виникнення ефекту контактного плавлення торця титан-молібденового електроду.

Зливки отримували на електрошлаковій установці А-550, яку додатково обладнали ковзним струмовідводу та пристроєм для захисту аргоном поверхні шлакової ванни і розігрітої частини витратного електроду (рис. 1). Струм плавки 1800...1900 А, напруга – 21 В, флюс – 100 % CaF₂, кристалізатор діаметром 55 мм.

Якість зливка дослідили по наступним показникам: стан поверхні, макро- та мікроструктура, вміст молібдену та твердість в центрі, половині радіусу та краю зливка. Застосували стандартні методики та обладнання.

Враховуючи, що висота кристалізатора складала 250 мм, то зливки виготовили біметалевими (нижня частина α-титан, верхня – α-титан легований 10 % молібдену). Такий варіант виготовлення зливка дозволив з'єднати нижню титанову частину зливка

з хвостовиком із титанового прокату ВТ1-0 для забезпечення необхідної довжини катода (600 мм). Після з'єднання дослідний катод проточили на діаметр 50 мм.



1 – витратний біметалевий електрод; 2 – аргонна система;
3 – ковзний струмопідвід; 4 – кристалізатор

Рисунок 1 – Робочий момент безкамерного електрошлакового виплавлення зливка Ti10Mo

Роботи по розпиленню титан-молібденових катодів виконували на ТОВ «Мультифлекс». Установка для розпилення методом PREP (рис. 2) має наступні характеристики: встановлена потужність – 130 кВт; продуктивність плавлення – 20...150 кг/год; герметична ємність для готового порошку до 250 кг; діаметр заготовки, що переплавляється – 50 мм або 80 мм; частота обертання заготовки – 15000...30000 хв⁻¹; газове середовище суміш газів Ar + He; тиск газу в плавильній камері – від 0,015 мПа до 0,02 мПа; потужність плазмотрону не більше 80 кВт.



Рисунок 2 – Установка для розпилення методом PREP

Розпилення виконали на слідуючій режимі: струм – 950...1000 А, напруга дуги – 45 В, витрата плазмоутворюючого газу – 65...75 л/хв, швидкість обертання витратного електроду – $(17...22) \times 10^3$ хв⁻¹, швидкість подачі витратного електроду – 0,05 м/хв,

зазор між катодом та анодом – 3 мм, відстань між анодом та витратним електродом 30...50 мм, глибина занурення катода – 10 мм.

Порошок досліджено на хімічний склад, морфологію, розподіл по фракціях, насипну вагу.

Хімічний склад визначали спектральним методом з використанням приладу «SPECTROMAX» фірми «SPECTRO». Вміст домішок (азоту, кисню) у частинках порошку визначали за допомогою газоаналізатора моделі ON900 фірми «ELTRA», з консолідованих заготовок виготовлені спеціальні циліндричні зразки діаметром 5 мм довжиною 3,5 мм. Фракційний склад гранул із досліджених сплавів визначений методом розсіву на ситах з розміром комірок (40, 100, 125, 160, 200 та 250) мкм (сухий ситовий аналіз) [14]. Насипна вага визначалася за ISO 3923-1:2008 із застосуванням лійки.

Результати досліджень та їх обговорення. Зовнішній вигляд зливка, його макроструктура, схема вимірювання вмісту молібдену, твердості та мікроструктура наведені на рисунку 3.

Притаманні характеристики якості відливки: гладка поверхня, щільна та бездефектна макроструктура, включення часток нерозплавленого молібдену не виявлено.

Встановлено, що твердість відливки та вміст молібдену по перерізу, майже не змінюється. Перша зона (центр) 33,0...33,2 HRC, Ti – 91,15 %, Mo – 8,83 %; друга зона (половина радіуса) 33,0...33,5 HRC, Ti – 91,60 %, Mo – 8,84 %; третя зона (край) 33,5...34,0 HRC, Ti – 91,10 %, Mo – 8,90%.

Доведено наступне, що застосування біметалевого комбінованого витратного електрода складу титан 90 %, молібден 10 % забезпечило легування зливка вторинного α -титану молібденом в межах поставленої в роботі цілі. Рівномірний розподіл молібдену в зливку пояснюється особливим характером плавлення біметалевого титан-молібденового торця витратного електрода. При зануренні в шлак температура торця складає близько 1400...1500 °C, починає відбуватися процес контактного плавлення між титановими та молібденовими стрічками. Цьому сприяють: висока температура, щільний контакт між стрічками, які виготовлені з чистих матеріалів (BT1-0 та МЧ) «сигароподібний» вигляд діаграми титан-молібден, висока хімічна активність титану [15]. В результаті занурення в шлак торець витратного електрода, який складався із п'яти стрічок, контактним плавленням перетворюється на моноліт орієнтовного хімічного складу 91 % титану та 9 % молібдену. Згідно з діаграмою стану титан-молібден температура плавлення такого сплаву 1700...1750 °C. Далі такий монолітний торець плавиться як звичайний цільний електрод.

Рівномірний розподіл молібдену по перерізу зливка, висока швидкість кристалізації у водоохолоджуваному мідному кристалізаторі є запорукою утворення однорідної та дисперсної двофазної ($\alpha + \beta$)-мікроструктури (рис. 3, г). Мікроструктуру виявили після гартування та травлення шліфа у реактиві Кролла. Встановлено, що мікроструктура має, так звану, «кошикову» будову, β -фаза дисперсна та рівномірно розподілена (рис. 3, г).

Розпилений титан-молібденовий порошок, форма часток, розподіл по фракціям наведено на рис. 4.

Хімічний склад порошку наступний, %: Ti основа; Mo = 8,700; Fe = 0,180; C = 0,050; Si = 0,030; N = 0,035; O = 0,150; H = 0,009. Насипна вага складала 1,9...2,2 г/см³.

Порошок відповідав критеріям якості порошків адитивного призначення: хімічний склад знаходився в межах норм для сплаву Ti10Mo; частинки порошку мали сферичну форму без «сателітів», діаметр частинок порошку відповідав заданому рівню дисперсності, необхідному для 3D-друку.

Подальші дослідження будуть спрямовані на отримання методом 3D-друку зразків деталей та визначення їх властивостей.

Висновки.

1. Встановлена принципова можливість застосування технології безкамерного електрошлакового виплавлення зливок Ti10Mo, призначених для виготовлення катодів установок PREP.

2. Доведено, що висока фізико-хімічна однорідність зливка Ti10Mo забезпечується протіканням процесу «контактного плавлення» торця витратного електрода. При цьому розбіжність по вмісту молібдену в зливку складає не більш 1 %.

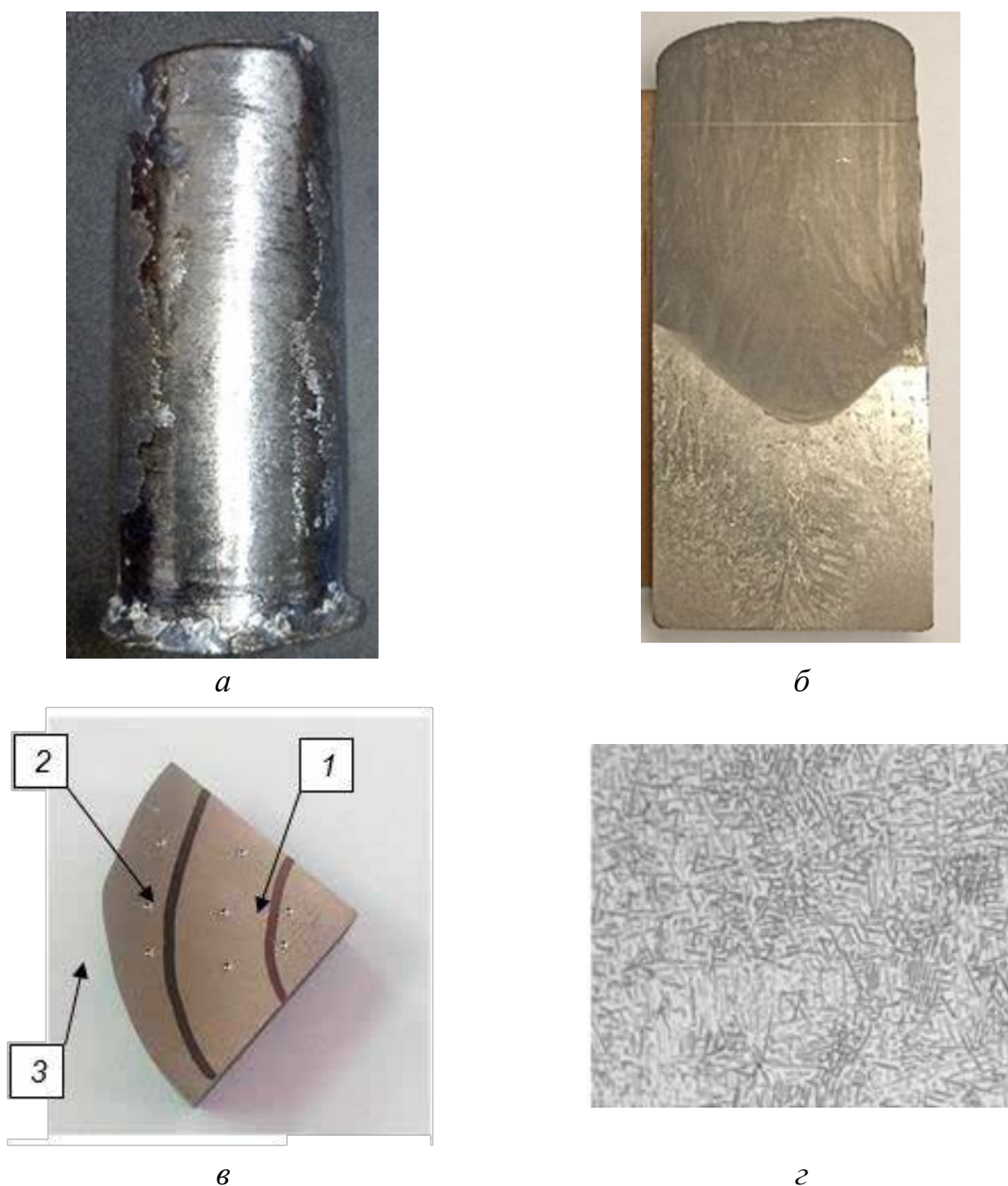


Рисунок 3 – Зовнішній вигляд зливка (а), макроструктура (б), схема вимірювання вмісту молибдену та твердості (в), мікроструктура (г)

3. Досліджено, що процес розпилення катодів зі сплаву Ti10Mo протікав стабільно, без порушення параметрів режиму, що пояснюється температурою плавлення сплаву Ti10Mo 1750 °C та незначним підвищенням питомої ваги.

4. Визначено, що порошок розпилений з катодів сплаву Ti10Mo має сферичну форму, розподіл часток за основними фракціями: 40...50 мкм – 7 %, 50...60 мкм – 15 %, 60...70 мкм – 23 %, 70...80 мкм – 28 %, 80...90 мкм – 17 %, 90...100 мкм – 7 %, насипна вага 1,9...2,2 г/см³.

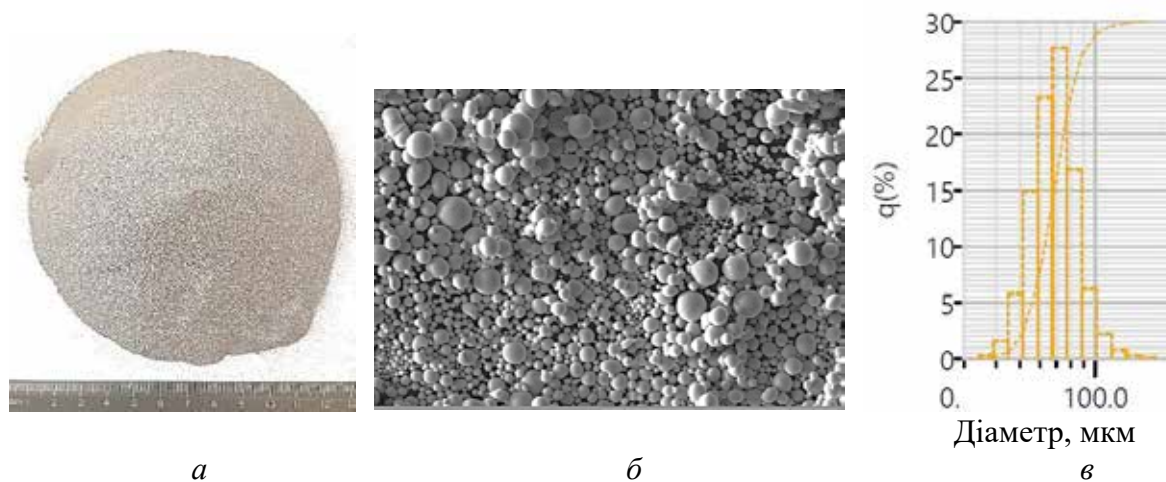


Рисунок 4 – Отриманий титан-молібденовий порошок (а), форма часток (б), розподіл по фракціям (в)

Бібліографічний перелік

1. Chen G., et al. Shape memory TiNi powders produced by plasma rotating electrode process for additive manufacturing // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2017. Vol. 27(12). P. 2647–2655.
2. Isonishi K., Kobayashi M., Tokizane M. Production of Ti-6Al-4V alloy powders by plasma rotating electrode process // Tetsu-to-Hagan. 1989. Vol. 75(10). P. 1913–1920.
3. Офіційний сайт ТОВ «МУЛЬТІФЛЕКС». URL: <https://surl.lu/bjophw>. (дата звернення: 30.06.2025).
4. Laboratory of powder and special metallurgy. URL: <https://ussi.zp.ua/poroshkovoy-metal/>. (дата звернення: 30.06.2025).
5. Коррозія. Методи захисту від корозії [електронний ресурс] // – ООО «Спецтехніка-Україна. – Режим доступу: www.spt-ukr.com/library/5/page36 -].
6. Погрелюк І.М., Білоник Д.І., Лаврись С.М., Білоник І.М., Проскурняк Р.В., Капустян О.Є. Підвищення корозійної тривкості титану вторинного виготовлення легуванням молібденом // Фізико-хімічна механіка матеріалів. 2025. Т. 61, № 1. С. 103–108. URL: <http://jnas.nbuu.gov.ua/article/UJRN-0001556647>.
7. Xian W.H., Li D.G., Chen D.R. Investigation on ultrasonic cavitation erosion of TiMo and TiNb alloys in sulfuric acid solution // Ultrasonics Sonochemistry. 2020. Vol. 62. P. 104877. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.104877.
8. Forna N., Cimpoeșu N., Agop M., Iordache C., Forna D., Mocanu C. Thermal properties of two titanium alloy dental implants – linear behaviour and calorimetric analysis // 2011 E-Health and Bioengineering Conference (EHB). Iasi, Romania, 2011. P. 1–4.
9. Chen Y.Y., Xu L.J., Liu Z.G., Kong F.T., Chen Z.Y. Microstructures and properties of titanium alloys Ti-Mo for dental use // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2006. Vol. 16. P. s824–s828. DOI: 10.1016/S1003-6326(06)60308-7.
10. Dzogbewu T.C., de Beer D.J., du Preez W.B. Laser powder bed fusion of Ti15Mo fused tracks and layers // JOM. 2023. Vol. 75. P. 3183–3196. DOI: 10.1007/s11837-023-05842-2.
11. Dzogbewu T.C., du Preez W.B. In situ alloying of Ti10Mo fused tracks and layers via laser powder bed fusion // Manufacturing Review. 2022. Vol. 9. DOI: 10.1051/mfreview/2022022.
12. Добаткин В. И., Аношкин Н. Ф., Андреев А. Л. Слитки титановых сплавов. Металлургия, 1966. 286 с.
13. Применение титана в народном хозяйстве / под ред. А. И. Туманова. Киев: Техника, 1975. 200 с.
14. Гуревич С.М. Справочник по сварке цветных металлов. Киев: Наукова думка, 1990. 512 с.
15. ДСТУ 2640-94. Порошки металеві. Визначення розміру частинок сухим просіюванням (ISO 4497:1983, ГОСТ 18318-94, NEQ; IDT). [На заміну ГОСТ 18318-73; чинний від 1996-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 1994.
16. Хайрулаев М.Р., Дадаев Д.Х. Контактное плавление в простых системах: монография. Махачкала: Махачкала, 2013. 196 с.

References

1. Chen G., et al. Shape memory TiNi powders produced by plasma rotating electrode process for additive manufacturing // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2017. Vol. 27(12). P. 2647–2655.
2. Isonishi K., Kobayashi M., Tokizane M. Production of Ti-6Al-4V alloy powders by plasma rotating electrode process // Tetsu-to-Hagan. 1989. Vol. 75(10). P. 1913–1920.
3. Official website of LLC MULTIFLEX. URL: <https://surl.lu/bjophw>. (date of access: 30.06.2025).
4. Laboratory of powder and special metallurgy. URL: <https://ussi.zp.ua/poroshkovoy-metal/>. (date of access: 30.06.2025).
5. Corrosion. Methods of Protection Against Corrosion [electronic resource] // – LLC "Spetstekhnika-Ukraine". – Access mode www.spt-ukr.com/library/5/page36 -].
6. Pogrelyuk I.M., Bilonyk D.I., Lavrys S.M., Bilonyk I.M., Proskurnyak R.V., Kapustyan O.E. Increasing the corrosion resistance of secondary titanium by doping with molybdenum // Physico-chemical mechanics of materials. 2025. T. 61, № 1. C. 103–108. URL: <http://jnas.nbuv.gov.ua/article/UJRN-0001556647>.
7. Xian W.H., Li D.G., Chen D.R. Investigation on ultrasonic cavitation erosion of TiMo and TiNb alloys in sulfuric acid solution // Ultrasonics Sonochemistry. 2020. Vol. 62. P. 104877. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.104877.
8. Forna N., Cimpoeșu N., Agop M., Iordache C., Forna D., Mocanu C. Thermal properties of two titanium alloy dental implants – linear behaviour and calorimetric analysis // 2011 E-Health and Bioengineering Conference (EHB). Iasi, Romania, 2011. P. 1–4.
9. Chen Y.Y., Xu L.J., Liu Z.G., Kong F.T., Chen Z.Y. Microstructures and properties of titanium alloys Ti-Mo for dental use // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2006. Vol. 16. P. s824–s828. DOI: 10.1016/S1003-6326(06)60308-7.
10. Dzogbewu T.C., de Beer D.J., du Preez W.B. Laser powder bed fusion of Ti15Mo fused tracks and layers // JOM. 2023. Vol. 75. P. 3183–3196. DOI: 10.1007/s11837-023-05842-2.
11. Dzogbewu T.C., du Preez W.B. In situ alloying of Ti10Mo fused tracks and layers via laser powder bed fusion // Manufacturing Review. 2022. Vol. 9. DOI: 10.1051/mfreview/2022022.
12. Dobatkin V. I., Anoshkin N. F., Andreev A. L. Titanium alloy ingots. Metallurgy, 1966. 286 p.
13. Application of titanium in the national economy / edited by A. I. Tumanov. Kyiv: Tekhnika, 1975. 200 p.
14. Gurevich S. M. Handbook of welding of non-ferrous metals. Kyiv: Naukova dumka, 1990. 512 p.
15. DSTU 2640-94. Metal powders. Determination of particle size by dry sieving (ISO 4497:1983, GOST 18318-94, NEQ; IDT). [To replace GOST 18318-73; valid from 1996-01-01]. View. officer Kyiv: SE "UkrNDNC", 1994.
16. Khairulaev M.R., Dadaev D.Kh. Contact melting in simple systems: monograph. Makhachkala: Makhachkala, 2013. 196 p.

Kapustian Oleksii, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", ORCID: 0000-0002-8979-8076

Pogrelyuk Irina, Doctor of Technical Sciences, Professor, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, ORCID: 0000-0002-3009-2829

Lavris Sergey, Candidate of Technical Sciences, Senior Scientific Researcher, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, ORCID: 0000-0003-2616-8699

Kanashevich Georgiy, Doctor of Technical Sciences, Professor, Cherkasy State Technological University, ORCID: 0000-0002-6708-040X

Bilonyk Ihor, candidate of technical sciences, Associate Professor, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", ORCID: 0000-0002-3873-5307

Osipov Mikhailo, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", ORCID: 0000-0002-7903-9463

Zavgorodniy Oleksandr, PhD student, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", ORCID: 0009-0005-7967-4757

Bilonyk Dmytro, PhD student, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", ORCID: 0009-0000-6182-7042

**OBTAINING TITANIUM-MOLYBDENUM SPHERICAL POWDER
BY THE PREP METHOD USING CATHODES MANUFACTURED
BY CHAMBER-LESS ELECTROSLAG SMELTING**

The rapid development of 3D-printing technologies justifies the relevance of the production of powders by the PREP method. Confirmation of this is active participation in scientific research of innovative materials, development of technologies, equipment of professional institutions of Ukraine, Europe, China and America. Titanium and titanium alloy powders are in wide demand as heat-resistant, heat-resistant and corrosion-resistant materials. It is known that doping titanium with molybdenum from 3 % to 10 % increases its corrosion duration in solutions of inorganic acids from 20 to 300 times, which makes this two-component alloy a promising material for obtaining highly corrosion-resistant powders. The work provides evidence of the high biocompatibility of two-component titanium-molybdenum alloys. For the production of a wide range of medical parts, it is most advisable to use layer-by-layer synthesis with two-component powder. Titanium-molybdenum cathodes were made from ingots with a diameter of 55 mm, which were obtained using the technology of chamberless electroslag smelting. The consumable electrodes were made of titanium and molybdenum strips, which were connected into a package using the TiG method. The titanium-molybdenum ingot had a smooth surface, a dense defect-free macrostructure; no inclusions of unmelted molybdenum particles were detected. It was established that the hardness of the casting and the content of molybdenum and titanium in the cross section almost did not change. Center – 33.0...33.2 HRC, Ti – 91.15 %, Mo – 8.83 %; half of the radius – 33.0...33.5 HRC, Ti – 91.6 %, Mo – 8.84 %; edge – 33.5...34.0 HRC, Ti – 91.10 %, Mo – 8.90%. The sprayed powder had the following chemical composition: Ti – base, 8.700% Mo; 0.180% Fe; 0.050% C; 0.030% Si; 0.035% N; 0.150% O; 0.009% H, particle shape – spherical, bulk density 1.9...2.2 g/cm³ and fractional composition: 40...50 μm – 7%; 50...60 μm – 15%; 60...70 μm – 23%; 70...80 μm – 28%; 80...90 μm – 17%; 90...100 μm – 7%. In general, the powder meets the quality criteria of additive powders.

Keywords: PREP, titanium alloy powders, electroslag smelting, consumable electrode, chemical composition.

Ахінько Олена Вікторівна, аспірант, Запорізький національний університет

ГІДРИД ТИТАНУ, ЯК ОДИН З ОСНОВНИХ ПРОДУКТІВ ОТРИМАННЯ ТИТАНОВИХ ПОРОШКІВ

Титан та титанові порошки привабливі для широкого спектру структурних та функціональних застосувань завдяки чудовій питомій міцності, в'язкості та жорсткості, а також корозійній стійкості. При дії водню утворюються гідриди у формі TiH_x , що призводить до появи тріщин та механічного руйнування через деформацію решітки та накопичення напруги. Кінетика процесу гідрування залежить від кількох факторів, включаючи критичний поріг насичення водню всередині Ti , специфіку взаємодії водню із захисним поверхневим оксидом, швидкість масопереносу, кінетику зародження та фазових перетворень.

Висока вартість виробництва, за існуючих технологій виготовлення, не дозволяє широко використовувати його в цивільних галузях промисловості, таких як автомобілебудування, виробництво споживчих товарів та інших. Особливо, у зв'язку з активним розвитком адитивного виробництва, невідкладним завданням є розробка методів отримання вихідних металевих порошків, які мали б низьку собівартість, але відповідали високим вимогам споживача. Альтернативою зниження виробничих витрат для отримання металевого титану є методи які притаманні порошковій металургії. За рахунок технологічних властивостей порошків титану до формування та спікання методами порошкової металургії обумовлено його використання в різних галузях промисловості, зокрема таких як станкобудування, будівництво, авіаційне двигунобудування, точне приладобудування та ін.

Іонна імплантація часто використовується для зміни хімічних, механічних або електричних властивостей матеріалів. Цей метод використовувався для імплантації іонів H у матрицю Ti для вивчення поведінки гідриду.

Основною проблемою іонної імплантації є пошкодження опроміненням, яке передається матриці через необхідність прискорення імплантованих іонів для проникнення. Під час цього процесу прискорені іони передають свою кінетичну енергію та імпульс електронам і ядрам атомів-мішеней, що генерують значну частку дефектів, таких як атомні вакансії або іонні міжвузля. При іонній імплантації основні дефекти розташовуються поблизу поверхні матеріалу й утримуються у цих дефектах.

Ключові слова: титан, титанові порошки, гідрид титану, електрохімічна зарядка, гідрування-дегідрування, іонна імплантація.

Вступ. Титан має широке використання в різних галузях промисловості завдяки своїм унікальним властивостям, серед яких висока питома міцність по відношенню до ваги, в'язкість та жорсткість, корозійна стійкість та біосумісність. В аерокосмічній промисловості – деталі з титанового порошку використовуються в літаках та космічних кораблях через їхню здатність витримувати екстремальні умови. У медицині – біосумісність титану робить його ідеальним для імплантів та протезів. В автомобільній промисловості використовується у високопродуктивних транспортних засобах для деталей, що потребують міцності та зниження ваги [1].

Висока вартість виробництва, за існуючих технологій виготовлення, не дозволяє широко використовувати його в цивільних галузях промисловості, таких як автомобілебудування, виробництво споживчих товарів та інших. Особливо, у зв'язку з активним розвитком адитивного виробництва, невідкладним завданням є розробка методів отримання вихідних металевих порошків, які мали б низьку собівартість, але відповідали

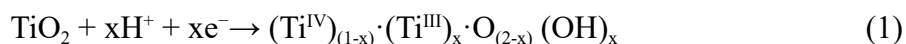
високим вимогам споживача. Альтернативою зниження виробничих витрат для отримання металевого титану є методи які притаманні порошковій металургії. За рахунок технологічних властивостей порошків титану до формування та спікання методами порошкової металургії обумовлено його використання в різних галузях промисловості, зокрема таких як станкобудування, будівництво, авіаційне двигунобудування, точне приладобудування та ін.

Порошки титану можуть бути отримані шляхом гідрування титану губчастого або відходів з утворенням гідриду титану. Завдяки високій крихкості гідрид титану здрибують для отримання тонкодисперсних порошків, які потім дегідруються в печі для отримання чистого титанового порошку. Ці порошки мають неправильну та осколкову морфологію, а вміст домішок у них може бути досить низьким за умови, що вміст домішок у вихідній сировині мінімальний. Головною перевагою цього методу отримання порошків титану є його відносно низька вартість [2, 3].

Порошок титану високої чистоти з гідриду титану отримують наступними методами:

- електрохімічним;
- газовим (гідрування-дегідрування);
- опроміненням іонами водню.

Одержання електрохімічним методом. При електрохімічній реакції в металах титан може утворюватися споуки типу TiH_x , які виникають в наслідок корозії у кислотних або деаерованих водних середовищах. При цих процесах адсорбція водню легко доступна в результаті катодного розряду H^+ – тобто катодної гальваностатичної або потенціостатичної поляризації або шляхом з'єднання Ti з більш гальванічним металом [4, 5]. Подальше проникнення через зовнішню оксидну плівку в матрицю включає процеси, пов'язані з додатковою абсорбцією водню і окислювально-відновною реакцією, які можна представити у вигляді рівняння (1):



Експериментальні дослідження показують, що поглинання H через неушкоджені плівки TiO_2 титаном стає ефективним в діапазоні катодних потенціалів від $-0,6$ до -1 VSCE [5]. Отриманий склад TiH_x варіюється в залежності від значень щільності зарядного катодного струму або зарядного потенціалу [4]. Вочевидь, що дефекти можуть полегшувати проникнення водню через оксидну плівку, наприклад, через структурні дефекти, включаючи кисневі вакансії, межі зерен та тернарні споуки в полікристалічних оксидах, та області низької щільності, що пов'язані з аморфними оксидами або пористістю; у таких випадках необхідний катодний потенціал для проникнення може бути менш негативним, наприклад $\sim -0,35$ VSCE [5]. Зовнішні напруги також призводять до появи дефектів в оксидній плівці і матриці, що в кінцевому підсумку призводить до менш негативних катодних потенціалів для заряду H . Завдяки цьому гідриди Ti , що утворюються на поверхні металевого титану, будуть нерівномірно розподілені і розташовані переважно на межах інтерметалідів та зерен [6].

Одержання газоподібним методом. Газоподібне гідрування-дегідрування (НОН) зазвичай проводиться при підвищених температурах в діапазоні від 480 до 650 °C та газовому середовищі, що складається з чистого H_2 або H_2 змішаного з інертними газами, наприклад, N_2 або Ar , при тиску 1 атм. [7]. Для швидкої зарядки іноді використовуються набагато вищий тиск (наприклад, від декількох атм. до 100 атм.), але таке підвищення тиску може призвести до поверхневого і підповерхневого розтріскування. Процес зарядки включає дисоціацію молекул газу H_2 , адсорбцію H на поверхні та подальше включення в матрицю металу. Як і у випадку електрохімічної зарядки, для включення потрібно, щоб адсорбовані атоми H спочатку проникли в оксидну поверхневу плівку. Типові концентрації водню зазвичай становлять від кількох сотень частин на мільйон за вагою (w_{ppm}) до кількох тисяч w_{ppm} для повного гідрування, перш ніж станеться руйнування зразків на частини. Кількість зарядженого газоподібного водню, яке може бути включене, не обмежується граничною розчинністю водню у твердому тілі в матриці металу. Гранична розчинність водню є важливим параметром гідрування металу і збільшується зі зростанням температури. Перевищення цієї розчинності може зробити метал та сплави сприйнятливими до розтріскування, викликаного гідридами.

Іншою проблемою є зміна мікроструктури під час заряджання газоподібним воднем при підвищеній температурі, що є одночасним процесом, пов'язаним з гідруванням [6].

Іонна імплантація. Іонна імплантація часто використовується для зміни хімічних, механічних або електричних властивостей матеріалів. Цей метод використовувався для імплантації іонів H у матрицю Ti для вивчення поведінки гідриду [8]. Середня глибина проникнення іонів зазвичай знаходиться в діапазоні від нанометрів до кількох мікрометрів. Тому іонна «імплантація» особливо ефективна для вивчення поведінки гідриду в приповерхневій ділянці. Однак основною проблемою іонної імплантації є пошкодження опроміненням, яке передається матриці через необхідність прискорення імпантованих іонів для проникнення. Під час цього процесу прискорені іони передають свою кінетичну енергію та імпульс електронам і ядрам атомів-мішеней, що генерують значну частку дефектів, таких як атомні вакансії або іонні міжвузля. При іонній імплантації основні дефекти розташовуються поблизу поверхні матеріалу й утримуються у цих дефектах [6].

З цих методів газоподібний HOH виділяється як економічний та простий спосіб одержання титанового порошку. Металевий титан має велику спорідненість із воднем, метод HOH використовує оборотні властивості титану та водню. Він включає поглинання водню титаном з утворенням гідриду титану, таких як TiH_2 , $TiH_{1,5}$, $TiH_{0,71}$ та інших, матеріал стає надзвичайно крихкий і легко ламається, що призводить до різного механізму стадій ущільнення та спікання. Після цього титан отриманий методом гідрогенізації механічно подрібнюють з отриманням тонкодисперсного порошку титану. Хімічний склад порошку гідриду титану TiH_2 наведено в таблиці 1, для розміру частинок: менше 280 мкм (при вмісті фракцій +025 ... +028 до 3%).

Таблиця 1 – Хімічний склад порошку гідриду титану TiH_2 , %

Ti	H	Fe	Ni	Mg	Ca	C	N	Cl _{заг.}	Cl _{біл.}
		не більше							
основа	не менше 3,5	0,3	0,08	0,08	0,05	0,07	0,08	0,05	0,005

Після гідратації порошок гідриду титану TiH_2 дегідрується при високих температурах у вакуумі, у результаті виходить титановий порошок високої чистоти.

Хоча мікроструктура титану в основному складається з двох простих фаз, існує безліч різних шляхів фазових перетворень з β на α , що надає широкі можливості для інжинірингу та оптимізації мікроструктури для конкретних застосувань. Утворення гідридів та їх склад залежить від мікроструктурних особливостей.

Існує три типи гідридів Ti з різними складами та кристалічними структурами:

- гранецентрований тетрагональний (ГЦТ) ϵ -гідрид (TiH_2 , $c/a < 1$);
- стабільний гранецентрований кубічний (ГЦК) δ -гідрид (TiH_x , $1,5 < x < 1,99$);
- тета-стабільний ГЦТ γ -гідрид (TiH , $c/a > 1$).

Гідрид із найнижчою стехіометрією – $TiH_{(0,17-0,2)}$ з параметром решітки a 4,40 Å – утворюється в α -Ti, з δ -фази найбільш часто утворюється гідриди Ti [2]. Зародження гідридів у матриці Ti зазвичай відбувається в чотирьох різних орієнтаціях (таблиця 2). Серед них дві орієнтації, що найбільш часто зустрічаються (OP) – OR1 і OR2 для α -Ti/ δ -гідридного переходу [9].

Таблиця 2 – Орієнтаційні співвідношення переходу α -Ti / δ -гідрид

Орієнтаційний зв'язок		Площина інтерфейсу
OR1	$\{0001\}_\alpha // \{1\bar{1}1\}_\delta, <\bar{1}210>_\alpha // \langle 110 \rangle_\delta$	$\{10\bar{1}3\}_\alpha // \{1\bar{1}0\}_\delta$
OR2	$\{0001\}_\alpha // \{001\}_\delta, <\bar{1}210>_\alpha // \langle 110 \rangle_\delta$	$\{10\bar{1}0\}_\alpha // \{1\bar{1}0\}_\delta$
OR3	$\{10.11\}_\alpha // \{1\bar{1}1\}_\delta, <\bar{1}210>_\alpha // \langle 110 \rangle_\delta$	$\{0001\}_\alpha // \{1\bar{1}2\}_\delta$
OR4	$\{\bar{1}011\}_\alpha // \{001\}_\delta, <\bar{1}210>_\alpha // \langle 110 \rangle_\delta$	$\{10\bar{1}1\}_\alpha // \{1\bar{1}1\}_\delta$

Впровадження водню в матрицю Ti викликає деформацію ґрат, а подальше утворення гідридів Ti локально руйнує вихідну решітку матриці. Ці структурні зміни, ймовірно, сприяють накопиченню об'ємних та міжфазних напруг, що в кінцевому підсумку може призвести до водневої крихкості та розтріскування під впливом гідридів.

За останні кілька десятиліть було проведено дослідження для кращого розуміння фізико-хімічних явищ, що лежать в основі гідрування Ti, включаючи адсорбцію, перенесення та утворення гідридної фази H, а також їх вплив на механічні, мікроструктурні та корозійні властивості базових матеріалів. У широкому значенні ці дослідження поділяються на п'ять основних категорій в залежності від явища, що цікавить:

- вплив поверхневого оксиду на адсорбцію та перенесення H;
- вплив цілісності матриці Ti (види крихкості, шорсткість, обробка поверхні, залишкова напруга та мікроструктура) на перенесення та гідрування H;
- вплив утворення гідридів на крихкість та локальну корозійну стійкість;
- розробка відповідних методів, заснованих на використанні зондів високої роздільної здатності, а також кріометоди для локального структурного, хімічного та електрохімічного аналізу;
- багатомасштабне моделювання від атомного до континуального масштабу.

Висновок.

Титанові порошки можуть бути отримані шляхом гідрування титану губчастого або відходів з утворенням гідриду титану, який володіє властивою йому крихкістю. Цей гідрид титану може бути легко механічно подрібнений і просіяний для отримання тонкодисперсних порошоків, які потім дегідруються для отримання чистого титанового порошку. Ці порошки мають нерегулярну та фрагментовану морфологію, а вміст домішок у них може бути досить низьким за умови.

References

1. Pascu, C.I.; Nicolicescu, C.; Cioateră, N.; Gheorghe, Ș.; Geonea, I.; Didu, A. Characterization of Titanium Alloy Obtained by Powder Metallurgy *Materials*, 2022. № 15(6). 15 p. <https://doi.org/10.3390/ma15062057>
2. Yanko T., Brener V., Ovchinnikov O. Production of spherical titanium alloy powders used in additive manufacturing from titanium scrap. In: MATEC Web of Conferences (The 14th World Conference on Titanium (Ti 2019), Nantes, France, 10-14 June 2019). 2020;321(07008). <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032107008>
3. Fang Z.Z., Paramore J.D., Sun, P., Ravi Chandran K.S., Zhang Y., Xia Y., Cao F., Koopman M., Free M. Powder metallurgy of titanium – past, present, and future. *International Materials Reviews*, 2017. Vol. 63(7). P. 1-53/
4. Y. Liu, Z. Ren, J. Liu, R. Schaller, E. Asselin, Electrochemical Investigation and Identification of Titanium Hydrides Formed in Mixed Chloride Sulfuric Acid Solution, *J. Electrochem. Soc.* 166 (11) (2019) C3096.
5. M. Vezvaie, J. Noël, Z. Tun, D. Shoesmith, Hydrogen absorption into titanium under cathodic polarization: an in-situ neutron reflectometry and EIS study, *J. Electrochem. Soc.* 160 (9) (2013) C414.
6. Zhu, Y.; Heo, T.W.; Rodriguez, J.N.; Weber, P.K.; Shi, R.; Baer, B.J. et al – Hydriding of titanium: Recent trends and perspectives in advanced characterization and multiscale modeling – Article in Current Opinion in Solid State and Materials Science July 2022 DOI: 10.1016/j.cossms.2022.101020; <https://www.researchgate.net/publication/362966545>
7. N. Pushilina, M. Syrtanov, E. Kashkarov, T. Murashkina, V. Kudiiarov, R. Laptev, A. Lider, A. Koptug, Influence of manufacturing parameters on microstructure and hydrogen sorption behavior of electron beam melted titanium Ti-6Al-4V alloy, *Materials* 11 (5) (2018) 763. [61] N. Pushilina, A. Panin, M. Syrtanov, E. Kashkarov, V. Kudiiarov, O. Perevalova, R. Laptev, A. Lider, A. Koptug, Hydrogen-induced phase transformation and microstructure evolution for Ti-6Al-4V parts produced by electron beam melting, *Metals* 8 (5) (2018) 301.
8. T. Suda, M. Ohkawa, S. Sawada, S. Watanabe, S. Ohnuki, S. Nagata, Effect of surface modification by ion implantation on hydrogenation property of TiFe alloy, *Mater. Trans.* 43 (11) (2002) 2703–2705.
9. Q. Wang, S. Xu, J.-S. Lecomte, C. Schuman, L. Peltier, X. Shen, W. Song, Crystallographic orientation dependence of hydride precipitation in commercial pure titanium, *Acta Mater.* 183 (2020) 329–339.

Akhinko Olena, postgraduate student, Zaporizhzhia National University

TITANIUM HYDRIDE AS ONE OF THE MAIN PRODUCTS IN THE PRODUCTION OF TITANIUM POWDERS

Titanium and titanium powders are attractive for a wide range of structural and functional applications due to their excellent specific strength, toughness, stiffness, and corrosion resistance. When exposed to hydrogen, titanium forms hydrides in the form of TiH_x , leading to cracking and mechanical failure as a result of lattice distortion and stress accumulation. The kinetics of the hydriding process depends on several factors, including the critical threshold of hydrogen saturation within Ti, the nature of hydrogen's interaction with the protective surface oxide, mass transfer rate, and the kinetics of nucleation and phase transformations.

The high production cost associated with existing manufacturing technologies prevents widespread use of titanium in civilian industries such as automotive manufacturing, consumer goods production, and others. Particularly with the active development of additive manufacturing, an urgent task is to develop methods for obtaining metal powders with low production costs that still meet high consumer requirements.

An alternative to reducing production costs for obtaining metallic titanium lies in the methods inherent to powder metallurgy. The technological properties of titanium powders—such as their suitability for shaping and sintering by powder metallurgy methods—enable their use across various industries, including machine tool building, construction, aerospace engine manufacturing, and precision instrumentation.

Ion implantation is often used to modify the chemical, mechanical, or electrical properties of materials. This method was applied for implanting H ions into a Ti matrix to study hydride behavior.

The main problem of ion implantation is radiation damage transferred to the matrix due to the need to accelerate the implanted ions for penetration. During this process, accelerated ions transfer their kinetic energy and momentum to the electrons and nuclei of the target atoms, generating a significant number of defects, such as atomic vacancies or interstitial ions. In ion implantation, the primary defects are located near the material's surface and are retained in these defect sites.

Keywords: titanium, titanium powders, titanium hydride, electrochemical charging, hydriding-dehydriding, ion implantation

Наукове видання

МЕТАЛУРГІЯ

2025
Випуск 1

Технічне редагування
Комп'ютерна верстка та макетування

Ю. Назарова
Н. Кузнєцова



Г Е Л Ь В Е Т И К А
В И Д А В Н И Ч И Й Д І М

WWW.HELVETICA.UA

Підписано до друку 28.05.2025. Формат 60x84/8.
Папір офсетний. Гарнітура Times. Цифровий друк.
Ум. друк. арк. 21,86. Наклад 300. Замовлення № 0725/613.
Віддруковано з готового оригінал-макета.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефони: (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.