

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЇ ІМ. АКАДЕМІКА М. І. ГАСИКА
ПРИДНІПРОВСЬКИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР НАН УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКА АСОЦІАЦІЯ ВИРОБНИКІВ ФЕРОСПЛАВІВ ТА ІНШОЇ
ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЙНОЇ ПРОДУКЦІЇ
АКАДЕМІЯ НАУК ВИЩОЇ ШКОЛИ УКРАЇНИ



Матеріали

Міжнародної науково-практичної конференції
“Інновації в металургії і суміжних стратегічних галузях для енергоефективності
і сталого розвитку”

The Proceedings
of the International scientific and practical conference
“Innovation in Metallurgy and Strategical adjacent industries for energy efficient
and sustainable development”

присвячена
100-річчю кафедри електрометалургії ім. академіка М. І. Гасика

22-23 квітня, 2025

ДНІПРО

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЇ ІМ. АКАДЕМІКА М. І. ГАСИКА
ПРИДНІПРОВСЬКИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР НАН УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКА АСОЦІАЦІЯ ВИРОБНИКІВ ФЕРОСПЛАВІВ ТА ІНШОЇ
ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЙНОЇ ПРОДУКЦІЇ
АКАДЕМІЯ НАУК ВИЩОЇ ШКОЛИ УКРАЇНИ



Матеріали

Міжнародної науково-практичної конференції
“Інновації в металургії і суміжних стратегічних галузях для енергоефективності
і сталого розвитку”

присвячена
100-річчю кафедри електрометалургії ім. академіка М. І. Гасика

22-23 квітня, 2025

ДНПРО

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES
DEPARTMENT OF ELECTROMETALLURGY NAMED AFTER
ACADEMICIAN MYKHAILO GASIK
PRYDNIPROVSKYI SCIENTIFIC CENTER OF THE NAS OF UKRAINE
UKRAINIAN ASSOCIATION OF MANUFACTURERS OF FERROALLOYS AND
OTHER ELECTROMETALURGICAL PRODUCTS
ACADEMY OF SCIENCES OF HIGHER EDUCATION OF UKRAINE



The Proceedings
of the International scientific and practical conference
“Innovation in Metallurgy and Strategic adjacent industries for energy efficient
and sustainable development”

dedicated to the
100th anniversary of the Department of Electrometallurgy named after Academician
Mykhailo Gasik

22-23 April 2025

DNIPRO

УДК 669:[005.591.6:620.92](082)

I 66

Рекомендовано до друку вченою радою Українського державного університету науки і технологій

(Протокол № 12 від 28.05.2025)

Рецензенти:

Грищенко С. Г. – голова ради директорів об'єднання “Укркольормет”, проф., д.т.н.

Камкіна Л. В. – декан факультету металургійних процесів та хімічних технологій Українського державного університету науки і технологій, проф., д.т.н.

I 66 Інновації в металургії і суміжних стратегічних галузях для енергоефективності і сталого розвитку : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 22–23 квітня 2025 р. / за заг. ред. Ю. С. Пройдака, О. В. Жаданоса. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2025. – 198 с.

У збірнику подано матеріали, що висвітлюють актуальні проблеми розвитку сучасних технологій в металургійному виробництві, на залізничному транспорті, хімічних виробництвах. Значна увага приділена питанням цифрової трансформації, математичному моделюванню, мультидисциплінарним дослідженням.

ISBN 978-617-8314-05-7(PDF)

Recommended for publication by the Academic Council of the Ukrainian State University of Science and Technologies

(Minutes No. 12 dated May 28, 2025)

Reviewers:

Hryshchenko S. G. – Chairman of the Board of Directors of the Association "Ukrkolormet", Professor, Doctor of Technical Sciences

Kamkina L. V. – Dean of the Faculty of Metallurgical Processes and Chemical Technologies, Ukrainian State University of Science and Technology, Professor, Doctor of Technical Sciences

Innovations in Metallurgy and Related Strategic Industries for Energy Efficiency and Sustainable Development : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, April 22–23, 2025 / edited by Yu. S. Proidak, O. V. Zhadanos. – Electronic edition. – Dnipro : USUST, 2025. – 198 p.

The collection presents materials highlighting current issues in the development of modern technologies in metallurgical production, railway transport, and chemical industries. Significant attention is paid to digital transformation, mathematical modeling, and multidisciplinary research.



Цей твір ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons

[«Attribution-NonCommercial-ShareAlike» 4.0 International \(CC BY-NC-SA 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

[\(«Із зазначенням авторства – Некомерційна – Поширення на тих самих умовах» 4.0 Міжнародна\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

ISBN 978-617-8314-05-7(PDF)
DOI 10.15802/978-617-8314-05-7

© Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2025

ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ КОМІТЕТ КОНФЕРЕНЦІЇ

1. **Сухий К.М.** – ректор університету, член-кор. НАН України, проф., д.т.н. (голова)
2. **Пройдак Ю.С.** – проректор з наукової роботи, проф., д.т.н. (заступник голови)
3. **Жаданос О.В.** – доцент кафедри електрометалургії ім. акад. М.І. Гасика, доц., к.т.н. (вчений секретар)
4. **Величко О.Г.** – директор навчально-наукового інституту (ННІ) “Дніпровський металургійний інститут”, член-кор. НАН України, проф. д.т.н.
5. **Гладких В.А.** - професор кафедри електрометалургії ім. акад. М.І. Гасика, проф., д.т.н.
6. **Горобець А.П.** - професор кафедри електрометалургії ім. акад. М.І. Гасика, доц., к.т.н.
7. **Грищенко С.Г.** – голова ради директорів об’єднання “Укркольормет”, проф., д.т.н.
8. **Данішевський В.В.** - директор ННІ “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури”, проф., д.т.н.
9. **Капіца М.І.** – директор ННІ “Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту”, проф., д.т.н.
10. **Колеснікова Т.О.** – директор наукової бібліотеки УДУНТ, с.н.с., канд. наук із соціальних комунікацій.
11. **Кудрявцев С.Л.** – виконуючий директор Української асоціації виробників феросплавів та іншої електрометалургійної продукції, к.т.н.
12. **Маркуль Р.В.** – начальник НДЧ УДУНТ, доц., к.т.н.
13. **Свердліковська О.С.** - в.о. директора ННІ “Український державний хіміко-технологічний університет”, проф., д.т.н.
14. **Таранець І.В.** – директор центру web-менеджменту
15. **Хомутовська А.В.** – зав. відділом рекламно-виставкової та інформаційної діяльності.

ПОЧЕСНІ ГОСТІ КОНФЕРЕНЦІЇ

1. **Булат А.Ф.** – Голова Придніпровського наукового центру, академік НАН України;
2. **Коротков А.М.** – Генеральний директор компанії «Інтерпайп»;
3. **Куцін В.С.** – Генеральний директор АТ «Нікопольський завод феросплавів» (1999-2021 р.);
4. **Наконечний О.Г.** – Президент Академії наук вищої школи України;
5. **Тараненко С.Д.** – Генеральний директор АТ «Дніпровський стрілочний завод», голова Наглядової Ради Українського державного університету науки і технологій;
6. **Тігіно С.Л.** – Власник групи «ТАС»;
7. **Тупиця О.Л.** – Голова координаційної ради з питань вищої освіти при Дніпровському міському голові;
8. **Gasik Michael** – Professor of the Department of Chemical and Metallurgical Engineering, Materials Processing and Powder Metallurgy of the Aalto University, Prof., Dr.Sc. (Aalto, Finland)
9. **Karbowniczek Mirosław** - Professor of the AGH university of Krakow, prof. dr hab. inż. (Krakow, Poland)
10. **Zhouhua Jiang** – Head of the Department of Metallurgy of the Northeastern university, prof. (Shenyang, P.R. China).

CONFERENCE ORGANIZING COMMITTEE

1. **Sukhyi K.M.** - Rector of Ukrainian State University of Science and Technologies, Prof., Dr.Sc., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine (Chair of the Committee)
2. **Proidak Y.S.** - Vice-Rector for Research of Ukrainian State University of Science and Technologies, Prof., Dr.Sc. (Co-Chair of the Committee)
3. **Zhadanos O.V.** - Associate professor of the department of electrometallurgy, Assoc. Prof., PhD (scientific secretary)
4. **Velychko O.G.** - Director of the Scientific and Educational institute "Dnipro Metallurgical Institute", Prof., Dr.Sc., Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine
5. **Hladkykh V.A.** - Professor of the department of electrometallurgy, Prof., Dr.Sc.
6. **Horobets A.P.** - Professor of the department of electrometallurgy, Assoc. Prof., PhD.
7. **Hryshchenko S.G.** - Chairman of the Board of Directors of the Association "Ukrcolormet", Prof., Dr.Sc.
8. **Danishevskyy V.V.** - Director of the Scientific and Educational institute "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", Prof., Dr.Sc.
9. **Kapytsa M.I.** - Director of the Scientific and Educational institute "Dnipro Institute of Infrastructure and Transport", Prof., Dr.Sc.
10. **Kolesnikova T.O.** - Director of the Scientific Library of USUST, Senior Researcher, Ph.D in Social Communications.
11. **Kudriavtsev S.L.** - Executive director of the Ukrainian association of manufacturers of ferroalloys and other electrometallurgical products, Ph.D
12. **Markul R.V.** - Head of the Research Department of USUST, Assoc. Prof., Ph.D.
13. **Sverdlikovska O.S.** – Acting director of Scientific and Educational institute "Ukrainian State University of Chemical Technology", Prof., Dr.Sc.
14. **Taranets I.V.** - director of the web management center
15. **Khomutovska A.V.** - Head of the Department of Advertising, Exhibition and Information Activities

HONORARY GUESTS OF THE CONFERENCE

1. **Bulat A.F.** – Head of the Prydniprovskiy Scientific Center, Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine
2. **Korotkov A.M.** – General Director of Interpipe Company
3. **Kutsin V.S.** – General Director of Nikopol Ferroalloy Plant JSC (1999–2021)
4. **Nakonechnyi O.H.** – President of the Academy of Sciences of Higher Education of Ukraine
5. **Taranenko S.D.** – General Director of Dnipro Switch Plant JSC, Chairman of the Supervisory Board of the Ukrainian State University of Science and Technology
6. **Tihipko S.L.** – Owner of the TAS Group
7. **Tupytsia O.L.** – Chairman of the Coordinating Council on Higher Education under the Mayor of Dnipro
8. **Gasik Michael** – Professor of the Department of Chemical and Metallurgical Engineering, Materials Processing and Powder Metallurgy of the Aalto University, Prof., Dr.Sc. (Aalto, Finland)
9. **Karbowiczek Mirosław** - Professor of the AGH university of Krakow, prof. dr hab. inż. (Krakow, Poland)
10. **Zhouhua Jiang** – Head of the Department of Metallurgy of the Northeastern university, prof. (Shenyang, P.R. China).

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	14
СЕКЦІЯ 1. СУЧАСНА ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ: ПРОБЛЕМИ ТА РІШЕННЯ	15
ПРОДУВАННЯ ВАННИ КОНВЕРТЕРА ПРИ РАФІНУВАННІ ФЕРОНІКЕЛЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ОДНОСОПЛОВИХ ТА ТРИСОПЛОВИХ ФУРМ Акрєєв В.В., Приходько С.В., Мельник С.О., Овчарук А.М.	15
ОГЛЯД ДОСТУПНИХ ДЖЕРЕЛ МАРГАНЦЕВОЇ СИРОВИНИ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИРОБНИЦТВА МАРГАНЦЕВИХ СПЛАВІВ ПІДПРИЄМСТВАМИ УКРАЇНИ Аносов О.В., Гладких В.А., Рубан А.В., Рябцев О.О.	21
ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ ПІД ЧАС ВИПЛАВКИ МАРГАНЦЕВИХ ФЕРОСПЛАВІВ В УМОВАХ АТ НІКОПОЛЬСЬКИЙ ЗАВОДУ ФЕРОСПЛАВІВ Бабуцький В.І., Зінченко О.М.	25
РОЗРОБКА ЕФЕКТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПЛАВКИ СПЛАВІВ МАРГАНЦІУ Величко К.О.	30
ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕФЕКТИВНОГО НАГРІВУ ЗАЛІЗО-РУДО-ВУГІЛЬНОГО БРИКЕТУ В ІНДУКЦІЙНОМУ ПОЛІ Грек О.С.	35
ІНТЕНСИФІКУЮЧИЙ ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЮ НА ПРОЦЕС ВІДНОВЛЕННЯ ОКСИДІВ Гришин О.М., Надточій А.А., Губа Р.М., Хромовський С.А.	40
ВПРОВАДЖЕННЯ НОВИХ ЕКОЛОГІЧНИХ В'ЯЖУЧИХ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВУГЛЕГРАФІТОВИХ ВИРОБІВ Дерев'янка І.В., Жаданос О.В., Агєєв О.Г.	46
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАВЛЕННЯ ВУГЛЕЦЬКАРБІДОКРЕМНІСВИХ БРИКЕТІВ В СТАЛЬ-КОВІШІ ПРИ ПОЗАПІЧНІЙ ОБРОБЦІ СТАЛІ Жаданос О.В., Дерев'янка І.В., Шепетяк Є.О., Мацишин В.Г., Петренко М.С.	49
АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ІНТЕГРАЦІЇ ПРОЦЕСІВ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ТА ПРОКАТКИ У МОДУЛЬНИХ МЕТАЛУРГІЙНИХ СИСТЕМАХ Ціколія А.З., Кононов Д.О.	54
ХАРАКТЕРИСТИКА ВУГЛЕЦЕВИХ ВІДНОВНИКІВ ДЛЯ ВИПЛАВКИ ФЕРОСИЛІЦІУ З ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ КРЕМНІЮ Кравченко В.П., Гладких В.А., Рубан А.В., Малий Є.Д.	59

ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗА З ОКСИДІВ НІКЕЛЕВОЇ РУДИ В ТРУБЧАСТІЙ ОБЕРТОВІЙ ПЕЧІ З ВИКОРИСТАННЯМ В ЯКОСТІ ВІДНОВНИКІВ ВУГІЛЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ГРУП	
Мельник С.О., Акреєв В.В. Приходько С.В. Овчарук А.М.	64
ВЗАЄМОВІДНОСИНИ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ НА ШЛЯХУ ЕВОЛЮЦІЙНОГО РОЗВИТКУ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПРОЦЕСІВ	
Мішалкін А.П., Петренко В.О., Селегей А. М., Фонарьова Т.А., Крекотень М.А.	70
ПРОБЛЕМАТИКА ПЛАВКИ НІКЕЛЕВИХ РУД І ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ	
Приходько С.В., Акреєв В.В., Мельник С.О., Овчарук А.М.	77
ДОСЛІДЖЕННЯ ЛИВАРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БРОНЗИ СИСТЕМИ Cu-Al-Sn-Mn	
Білий А.П., Реп'ях С.І., Шемет В.Ю., Баркар Р.Р.	83
ПРОБЛЕМА УТВОРЕННЯ НАСТИЛУ НА ПОДИНІ РУДОВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ПЕЧІ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ФЕРОСИЛІКО-МАРГАНЦЮ	
Рубан А.В., Надточій А.А., Овчарук А.М., Зінченко О.М.	86
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ АГЛОМЕРАЦІЇ МАРГАНЦЕВОЇ ОКИСНОЇ ЗБАГАЧЕНОЇ РУДИ МЕТОДОМ ДОДАВАННЯ СПОЛУЧНОГО	
Пройдак Ю.С., Гогенко О.О., Сидорський О.В., Гогенко О.О., Толстун О.І.	91
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕС ТВЕРДОФАЗНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ОКСИДІВ ЗАЛІЗА ГАЗАМИ	
Скрипченко Р.Д.	94
ВПЛИВ НА ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ ВУГІЛЛЯ ШЛЯХОМ ГЛИБОКОГО ЗБАГАЧЕННЯ	
Коренєв О.В., Сорокін Є.Л.	99
МЕТОД ОБҐРУНТОВАНОГО КОРИГУВАННЯ РЕЖИМУ ЗАВАНТАЖЕННЯ ШИХТИ, З УРАХУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ ПЛАСТИЧНОЇ ЗОНИ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ	
Щербачов В.Р., Білошапка О.О.	104
ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРУВАННЯ ПЛАКОВАНОГО ПІСКУ В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ВИПРОМІНЮВАННІ ПІД ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ ЛИВАРНИХ ФОРМ ЗА ЗАМОРОЖЕНИМИ МОДЕЛЯМИ	
Якименко Д.Ю., Білий О.П., Осипенко І.О., Таранов А.А.	106

СЕКЦІЯ 2. ТРАНСПОРТНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ 110

СТРАТЕГІЧНІ ПРІОРИТЕТИ ТА ІННОВАЦІЙНІ ПЕРСПЕКТИВИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ МЕТАЛУРГІЙНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ РЕГІОНІВ У ФАКТАХ
Кудря Я.В. 110

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ РЕМОНТУ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ НА ЗАВОДАХ ПАТ УКРЗАЛІЗНИЦЯ
Бобирь Д.В., Сердюк В.Н. 116

ІНТЕГРАЦІЯ СТАНДАРТУ ІЕС/ISO 31010:2009 У СИСТЕМУ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ ЛОКОМОТИВНОГО ГОСПОДАРСТВА
Очкасов О.Б., Десяк А.Є., Жовніренко О. 122

МЕТОДИ АНАЛІЗУ ІНДИКАТОРНИХ ДІАГРАМ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ: ОГЛЯД І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ
Очкасов О.Б., Студенко О.І. 129

РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ КЕРУВАННЯ РУХОМИМ СКЛАДОМ ПРИ ВИМУШЕНОМУ ЗНИЖЕННІ ШВИДКОСТІ
Капіца М.І., Бобирь Д.В., Кислий Д.М., Самілик Д.О. 134

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ КОМУТАЦІЙНОГО БЛОКУ З КОРИГУВАЛЬНИМИ ЛАНКАМИ В ТИРИСТОРНИХ DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ
Бобирь Д.В., Колодій Д.О. 140

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВІДВЕДЕННЯ В РАДІАТОРАХ З РІЗНИМИ ПРОФІЛЯМИ ТРУБОК
Капіца М.І., Десяк А.Є. 147

ЗАСТОСУВАННЯ ПІДХОДІВ RISK-BASED MAINTENANCE ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ УТРИМАННЯ ЛОКОМОТИВНОГО ПАРКУ
Боднар Б.Є., Очкасов О.Б. 152

СЕКЦІЯ 3. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ХІМІЇ ТА ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ 158

ЗАСТОСУВАННЯ ДИМЕРНИХ ІОННИХ РІДИН ІОНЕНОВОГО ТИПУ ЯК КОМПОНЕНТ СОНЯЧНИХ КОМПІРОК
Свердліковська О., Вовчук Б. 158

ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИМ ОСАДОМ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ НИЗЬКОЇ ІНДУКЦІЇ к.х.н., доц. С.В. Ковальов, зав. лаб. В.І. Міщенко	163
ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН ТОНКИХ ПЛІВОК НАНЕСЕНИХ НА МЕТАЛ ОСНОВИ Ковальов С.В., Козлов Я.М.	168
КОНТРОЛЬ РОЗЧИНОСТІ IN VITRO БІОАКТИВНОГО СКЛА ГРАВІМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ Македонська-Білих О.М., Хоменко О. С.	173
ІННОВАЦІЙНІ ПОЛІМЕРНІ ІОННІ РІДИНИ ТА ІОННІ РІДИНИ ІОНЕНОВОГО ТИПУ Свердліковська О.С., Потапчук М.О.	178
КОРДІЄРИТОВА РАДІОПРОЗОРА КЕРАМІКА, МОДИФІКОВАНА СКЛОМ В СИСТЕМІ $MgO - Al_2O_3 - B_2O_3 - SiO_2$: СИНТЕЗ ТА ВЛАСТИВОСТІ Зайчук О.В., Калішенко Ю.Р., Амеліна О.А., Гордєєв Ю.С.	183
СЕКЦІЯ 4. ІТ-ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ У ВИРОБНИЦТВІ	188
ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ТА INDUSTRIAL AI В УКРАЇНІ: МОЖЛИВОСТІ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОГО РОЗВИТКУ Очкасов О.Б.	188
РОЛЬ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА РОЗРОБКА НОВИХ МЕТОДІВ ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНОГО СКЛАДУ МЕТАЛУРГІЙНИХ ІШЛАКІВ Степаненко Д.О., Тогобицька Д.М., Стовпченко Г.П., Лісова Л.О.	193

CONTENT

INTRODUCTION	14
SECTION 1. MODERN ELECTROMETALLURGY: ISSUES AND SOLUTIONS	15
PURGING OF THE CONVERTER BATH IN THE REFINING OF FERRONICKEL USING SINGLE-NOZZLE AND THREE-NOZZLE LANCES Akreiev V.V., Prykhodko S.V., Melnyk S.O., Ovcharuk A.M.	15
REVIEW OF AVAILABLE MANGANESE RAW MATERIAL SOURCES AND FEATURES OF MANGANESE ALLOYS PRODUCTION BY UKRAINIAN ENTERPRISES Anosov O.V., Gladkikh V.A., Ruban A.V., Riabtsev O.O.	21
WAYS TO REDUCE ENERGY CONSUMPTION IN SMELTING OF MANGANESE FERROALLOYS IN THE CONDITIONS OF AT NIKOPOL FERROALLOY PLANT Babutskyi V.I., Zinchenko O.M.	25
DEVELOPMENT OF EFFECTIVE TECHNOLOGY OF SMELTING MANGANESE ALLOYS Velychko K.O.	30
INVESTIGATION OF PARAMETERS OF EFFECTIVE HEATING OF IRON-ORE-COAL BRIQUETTE IN AN INDUCTION FIELD Grek O.S.	35
INTENSIFYING INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC FIELD ON THE OXIDE REDUCTION PROCESS Grishin O.M., Nadtochiy A.A., Guba R.M., Hromovskiy S.A.	40
INTRODUCTION OF NEW ECOLOGICAL BINDERS FOR THE PRODUCTION OF CARBON GRAPHITE PRODUCTS Ihor Derevyanko, Oleksandr Zhadanos, Ageev Oleksandr	46
RESEARCH ON THE MELTING PROCESS OF CARBON-SILICON CARBIDE BRIQUETTES IN THE LADLE DURING SECONDARY STEELMAKING Oleksandr Zhadanos, Ihor Derevyanko, Egor Shepetyak, Vasil Matsyshyn, Maksym Petrenko	49
ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL INTEGRATION OF CONTINUOUS CASTING AND ROLLING PROCESSES IN MODULAR METALLURGICAL SYSTEMS Tsikolia A.Z., Kononov D.O.	54
CHARACTERISTICS OF CARBON REDUCING AGENTS FOR SMELTING FERROSILICON WITH HIGH SILICON CONTENT Kravchenko V.P., Gladkikh V.A., Ruban A.V., Maly E.D.	59

RECOVERY OF IRON FROM NICKEL ORE OXIDES IN A TUBULAR ROTARY KILN USING ENERGY GROUP COALS AS REDUCING AGENTS Melnyk S.O., Akreiev V.V., Prykhodko S.V., Ovcharuk A.M.	64
RELATIONSHIP BETWEEN THEORY AND PRACTICE ON THE WAY OF EVOLUTIONARY DEVELOPMENT OF METALLURGICAL PROCESSES Anatolii Mishalkin, Vitalii Petrenko, Andrii Selegei, Tetiana Fonarova, Andrii Selegei	70
PROBLEMS OF NICKEL ORE SMELTING AND SELECTION OF THE OPTIMAL PROCESS Prykhodko S.V., Akreiev V.V., Melnyk S.O., Ovcharuk A.M.	77
Cu-Al-Sn-Mn RESEARCH ON THE CASTING PROPERTIES OF BRONZE OF THE Cu- Al-Sn-Mn SYSTEM Andrii Bilyi, Serhii Repiakh, Vladyslav Shemet, Rostyslav Barkar	83
THE PROBLEM OF CONSTITUTION OF FLOORING AT THE BOTTOM OF THE ORE FURNACE DURING FEROSILICOMANGANESE VIBRATION Ruban A.V., Nadtochiy A.A., Ovcharuk A.M., Zinchenko O.M.	86
STUDY OF THE PROCESS OF AGGLOMERATION OF ENRICHED MANGANESE OXIDE ORE BY ADDING A BINDER Projdak Y.S., Gogenko O.O., Sydorskyi O.V., Gogenko O.O., Tolstun O.I.	91
EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF AN ELECTROMAGNETIC FIELD ON THE PROCESS OF SOLID-PHASE REDUCTION OF IRON OXIDES BY GASES Skrypchenko R.D.	93
IMPACT ON COAL QUALITY PARAMETERS BY DEEP ENRICHMENT Koreniev Oleksii, Sorokin Yevhenii	99
METHOD OF REASONED ADJUSTMENT OF THE BATCH LOADING MODE, TAKING INTO ACCOUNT THE PARAMETERS OF THE PLASTIC ZONE IN A BLAST FURNACE Shcherbachhev V.R., Biloshapka O.O.	104
RESEARCH ON STRUCTURING OF CLAD SAND IN MICROWAVE RADIATION DURING THE MANUFACTURE OF CASTING MOLDS BASED ON FROZEN MODELS Dmyrto Yakimenko, Oleksandr Bilyi, Iryna Osypenko, Artem Taranov	106

SECTION 2. TRANSPORT AND INDUSTRIAL ENGINEERING	110
STRATEGIC PRIORITIES AND INNOVATIVE PROSPECTS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF REGIONS METALLURGICAL MACHINE INDUSTRY IN THE FACTS Kudria Yaroslav	110
ANALYSIS OF THE TECHNOLOGY OF REPAIRING TRACTION ELECTRIC MOTORS AT THE PLANTS OF THE PRIVATE JOINT-STOCK COMPANY UKRZALIZNYTSIA Boby D. V., Serdiuk V. N.	116
INTEGRATION OF IEC/ISO 31010:2009 STANDARD INTO THE RISK MANAGEMENT SYSTEM OF LOCOMOTIVE OPERATIONS Oleksandr Ochkasov, Andriy Desyak, Zhovnirenko Oleksandr	122
METHODS OF INDICATOR DIAGRAM ANALYSIS FOR DIAGNOSING THE TECHNICAL CONDITION OF DIESEL ENGINES: REVIEW AND APPLICATION PROSPECTS Ochkasov O.B., Studenko O.I.	129
DEVELOPMENT OF ENERGY-EFFICIENT DRIVING MODES FOR ROLLING STOCK DURING FORCED SPEED REDUCTION Kapica M.I., Bobyr D.V., Kyslyi D.M., Samilyk D.O.	134
CALCULATION OF PARAMETERS OF SWITCHING UNIT WITH CORRECTIVE LINKS IN THRUSTER DC-DC CONVERTERS Boby D.V., Kolodii D.O.	140
EVALUATION OF COOLING PERFORMANCE IN RADIATORS WITH DIFFERENT TUBE PROFILES Mykhailo Kapitsa, Andriy Desyak	147
APPLICATION OF RISK-BASED MAINTENANCE APPROACHES TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF LOCOMOTIVE FLEET MAINTENANCE SYSTEM Bodnar B.Ye., Ochkasov O.B.	152
SECTION 3. PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF CHEMISTRY AND CHEMICAL TECHNOLOGY	158
APPLICATION OF DIMERIC IONIC LIQUIDS OF IONENE TYPE AS A COMPONENT OF SOLAR CELLS Sverdlikovska O., Vovchuk B.	158

STRENGTHENING OF DETAILS OF HEAT EXCHANGERS IN FOOD PRODUCTION BY ELECTROCHEMICAL DEPOSIT IN A LOW INDUCTION MAGNETIC FIELD Kovalyov S.V., Mishchenko V.I.	163
IMPROVING THE METHODOLOGY FOR DETERMINING THERMOPHYSICAL QUANTITIES OF THIN FILMS DEPOSITED ON A BASE METAL Kovalyov Stanislav, Kozlov Yaroslav	168
CONTROL OF IN VITRO SOLUBILITY OF BIOACTIVE GLASS BY GRAVIMETRIC METHOD Makedonska-Bilykh O.M., Khomenko O.S.	173
INNOVATIVE POLYMER IONIC LIQUIDS AND IONENE-TYPE IONIC LIQUIDS Sverdlikovska O.S., Potapchuk M.O.	178
SYNTHESIS AND PROPERTIES OF RADIOTRANSSPARENT CORDIERITE CERAMICS MODIFIED WITH MgO – Al ₂ O ₃ – B ₂ O ₃ – SiO ₂ GLASS Zaichuk O.V., Kalishenko Yu.R., Amelina O.A., Hordieiev Yu.S.	183
SECTION 4. IT-DIGITAL TRANSFORMATION IN PRODUCTION	188
INDUSTRIAL AI AND DIGITAL TRANSFORMATION OF UKRAINIAN INDUSTRY: STATUS, CHALLENGES AND PRACTICAL CASES Ochkasov O.B.	188
THE ROLE OF INFORMATION TECHNOLOGY AND THE DEVELOPMENT OF NEW METHODS FOR SELECTING THE RATIONAL COMPOSITION OF METALLURGICAL SLAGS Dmytro Stepanenko, Daria Togobitska, Ganna Stovpchenko, Liudmyla Lisova	193

ПЕРЕДМОВА INTRODUCTION

Міжнародна науково-практична конференція “Інновації в металургії і суміжних стратегічних галузях для енергоефективності і сталого розвитку” присвячена 100-річчю кафедри електрометалургії ім. академіка М.І. Гасика – унікального науково-освітнього осередку, який впродовж століття визначав розвиток електрометалургії в Україні та далеко за її межами. Університет і кафедра, що стали місцем формування численних поколінь інженерів, науковців та лідерів промисловості, сьогодні продовжують зміцнювати свій авторитет завдяки потужному науковому потенціалу та активній участі у вирішенні сучасних технологічних викликів.

Тематика конференції охоплює стратегічно важливі напрями розвитку промисловості, серед яких електрометалургія, машинобудування, хімічна технологія та цифрова трансформація. Програма конференції розкриває широкий спектр проблем, пов'язаних із підвищенням енергоефективності, екологічною безпекою та інтеграцією інноваційних рішень у виробничі процеси. У центрі обговорень – інженерні та науково-технічні рішення, які сприятимуть переходу промисловості на принципи сталого розвитку.

У роботі конференції взяли участь провідні науковці, представники промислових підприємств, молоді дослідники з України, а також закордонні колеги. Це свідчить про високий рівень міжнародної співпраці та зацікавленість у вирішенні спільних галузевих завдань.

Змістовна частина конференції структурована за чотирма основними секціями:

- Секція 1 присвячена сучасним проблемам і перспективам електрометалургії. Учасники розглядають інноваційні технології виплавки металів, використання альтернативних джерел енергії, модернізацію доменних і феросплавних процесів, термодинамічні та фізико-хімічні аспекти виробництва новітніх сплавів.
- Секція 2 охоплює питання транспортної інженерії та машинобудування, зокрема розвиток спеціалізованих технічних засобів і механізмів для потреб металургійної промисловості.
- Секція 3 об'єднує дослідження у галузі хімії та хімічної технології, що мають прикладне значення для металургії, екології, енергозбереження.
- Секція 4 акцентує увагу на цифровій трансформації, яка сьогодні є ключовим фактором у підвищенні конкурентоспроможності виробництва.

У збірнику представлено тези доповідей, які демонструють багатогранність досліджень, високу наукову новизну і практичну значущість. Автори звертаються до фундаментальних проблем та пропонують прикладні рішення, здатні вплинути на розвиток галузі в умовах нових технологічних викликів.

Організаційний комітет висловлює щиру подяку всім учасникам конференції, авторам доповідей, а також партнерам і гостям, які долучилися до святкування славетного ювілею кафедри. Спільними зусиллями ми формуємо майбутнє української науки та промисловості, закладаючи основи для ефективного, безпечного і сталого розвитку.

З повагою,

Юрій ПРОЙДАК, завідувач кафедри Електрометалургії ім. академіка М.І. Гасика

22 квітня 2025 року, м. Дніпро

СЕКЦІЯ 1. СУЧАСНА ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ: ПРОБЛЕМИ ТА РІШЕННЯ

SECTION 1. MODERN ELECTROMETALLURGY: ISSUES AND SOLUTIONS

ПРОДУВАННЯ ВАННИ КОНВЕРТЕРА ПРИ РАФІНУВАННІ ФЕРОНІКЕЛЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ОДНОСОПЛОВИХ ТА ТРИСОПЛОВИХ ФУРМ

Акреєв В. В. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0009-3705-4129>, akreev@gmail.com

Приходько С. В. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0005-0013-2198>, svprima@gmail.com

Мельник С. О. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0009-3964-312X>, samelnik2016@gmail.com

Овчарук А. М. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0007-0218-2513>, tehnosplavy.dnepr@gmail.com

Анотація. Процес продування киснем у вертикальних конвертерах необхідний для зниження вмісту сірки, фосфору, вуглецю та заліза в металі FeNi до заданого рівня. Окислення домішок відбувається здебільшого у зоні циркуляції, де метал стикається з футеровкою, шлаком і присадками плавки. Візуальне спостереження, дослідження газового струменя, процесу циркуляції рідкого металу і шлаку всередині конвертера неможливе, тому що середовище непрозоре, а конвертер має металевий корпус і вогнетривке футерування. У цій доповіді буде проведено комп'ютерне моделювання гідродинамічного процесу продування конвертерної ванни із застосуванням односоплових та трисоплових фурм. Розглянуто способи збільшення ефективності та стабільності продування на прикладах моделювання об'ємної концентрації рідини, масової концентрації рідини та траєкторії руху газу в розплаві.

Ключові слова: рафінування феронікелю, конвертер, киснева фурма, моделювання процесу продування.

PURGING OF THE CONVERTER BATH IN THE REFINING OF FERRONICKEL USING SINGLE-NOZZLE AND THREE-NOZZLE LANCES

Akreiev V. V. Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0009-3705-4129>, akreev@gmail.com

Prykhodko S. V. Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0005-0013-2198>, svprima@gmail.com

Melnyk S. O. Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0009-3964-312X>, samelnik2016@gmail.com

Ovcharuk A. M. Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0007-0218-2513>, tehnosplavy.dnepr@gmail.com

Abstract. The purging process in vertical converters with oxygen is required in order to reduce the content of sulfur, phosphorus, carbon and iron in FeNi metal to a given level. Oxidation of impurities occurs mainly in the circulation zone, where the metal collides with the lining, slag and melt additives. Visual inspection, study of the gas jet, the process of circulation of liquid metal and slag inside the converter is impossible, because the environment is opaque, converter has a

metal body and a refractory lining. In this report, computer simulation of the hydrodynamic process of purging a converter bath using single-nozzle and three-nozzle lances will be investigated. On the base of examples of modeling the volumetric concentration of liquid, the mass concentration of liquid and the trajectory of gas movement in the melt, methods for increasing of the efficiency and stability of purging are considered.

Key words: ferronickel refining, converter, oxygen lance, modeling of the purging process.

Режим дуття суттєво впливає на продуктивність конвертерів, хід шлакоутворення, стійкість футерування, кількість викидів, вихід рідкої сталі та стійкість сопла фурми. Характер взаємодії кисневого струменя з конвертерною ванною може змінюватись в залежності від конструкції сопла, тиску кисню, положення сопла над рівнем ванни та інших факторів [1,2].

У конвертері є циркуляція рідини – загальна та у кожного сопла (або фурми). При близькому розташуванні сопел у днищі відбувається наближення струменів під впливом циркуляції та злиття їх із утворенням суцільних каналів, т. е. утворюються розриви рідини. Рідина обертається і горизонтальній площині, відбуваються коливання рідини, при резонансі - сплески хвиль. При підвищенні в'язкості рідини картина розподілу газу (повітря) та рідини змінюється: порушується або зникає правильна циркуляція рідини, бульбашки великі, рідина дробиться на великі краплі; відбуваються викиди рідини (металу, шлаку); контакт газу та рідини погіршується [3].

При продуванні зверху характер взаємодії газового струменя з рідиною залежить від динамічного натиску (швидкості) струменя на межі газ-ванна. При малих значеннях динамічного напору (швидкості) струмінь утворює лунку рідини, відбивається і розтікається поверхнею ванни; при великих значеннях динамічного натиску відбувається розбризкування рідини, але основна частина струменя проникає в рідину, підсмоктує (відриває) рідину і дробить її на дрібні краплі. Спостерігається також циркуляція та утворення бульбашок газу. Таким чином, при достатньому тиску газу і невеликій висоті фурми газовий струмінь входить в рідину спочатку теж суцільним струменем-факелом. У реальних умовах струмінь нерідко занурений у шлакометалеву піну [3].

В основному конвертері на Побузькому феронікелевому комбінаті проводиться остаточне рафінування напівпродукту з метою одержання товарного феронікелю. При вмісті кремнію в чорновому феронікелі менш, ніж 1,5% рафінування дозволяється проводити в одну стадію в основному конвертері. Після заливки напівпродукту конвертер встановлюється у вертикальне положення, опускається фурма і починається продування.

Для рафінування феронікелю застосовується односоплова фурма з мідним наконечником, з критичним перерізом сопла – 32,5 мм; перетином на виході – 44,0 мм; висотою сопла – 81 мм (рис. 1). Залежно від хімічного складу чорнового феронікелю, а також кількості перероблюваного холодного металу, що містить нікель, для продування може бути використана фурма з трисопловим наконечником [4].

Продування проводиться при тиску кисню не нижче 10 ат ($10,1 \times 10^6$ Па) по манометру на цеховому колекторі, витрата кисню – 100-170 м³/хв, чистота кисню не менш,

ніж 99,5%. Положення фурми змінюється над рівнем дзеркала ванни в залежності від складу, температури чорнового феронікелю та заданого режиму.

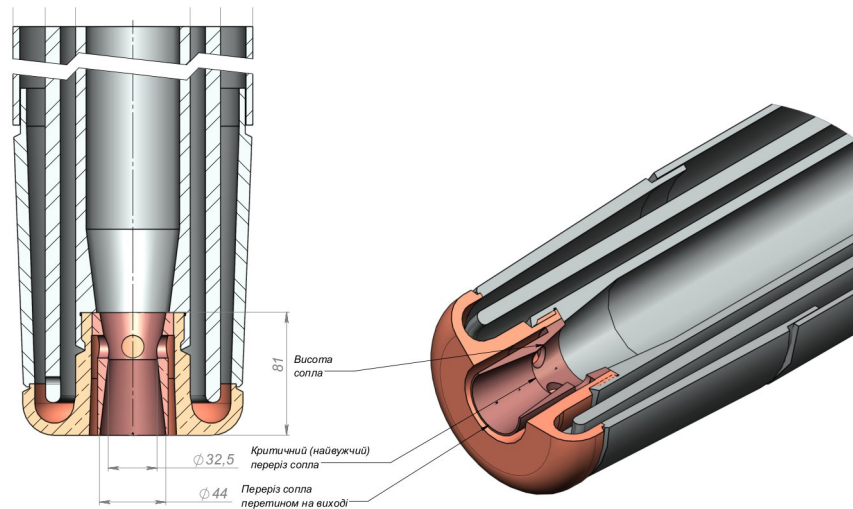


Рис. 1. Односоплова фурма з мідним наконечником

Для шлакоутворення по ходу продування додається вапняк або вапно з розрахунку отримання основності шлаку (співвідношення CaO/SiO_2) в межах 2-3. Витрата вапняку визначається машиністом дистриб'ютора залежно від вмісту кремнію, сірки, фосфору в напівпродукті. Тривалість першого продування визначається машиністом дистриб'ютора візуально по факелу до повного окислення вуглецю. Після закінчення першого продування на розсуд бригадира відбирається проба металу для визначення вмісту вуглецю, кремнію, сірки, фосфору, хрому, нікелю, міді, кобальту. З метою коригування хімічного складу та температури феронікелю можливі наступні продування [4].

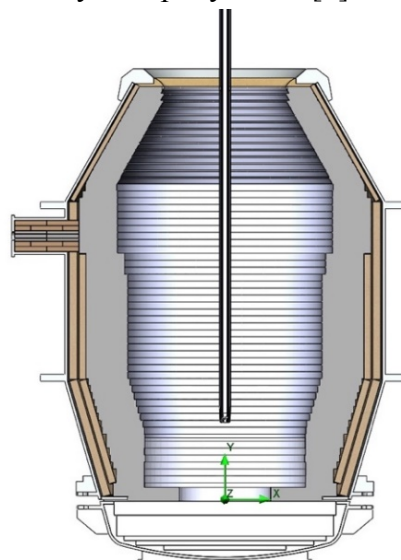


Рис. 2. Тривимірна модель основного конвертера рафінування феронікелю

Для побудови геометрії моделі феронікелевого конвертера використовувався програмний комплекс системи автоматичного проектування SolidWorks. Ґрунтуючись на проектних кресленнях, підготували тривимірну модель металевого корпусу конвертера, в

неї встановили арматурне і робоче футерування відповідно до реального робочого проекту, встановили кисневу фурму зі змінним наконечником (рис 2).

Додатковий модуль Flow Simulation дозволяє моделювати потоки рідини та газу для обчислення різних характеристик, таких як температура, швидкість потоку, об'ємна та масова концентрація рідини, тощо. Модуль розв'язує рівняння Нав'є-Стокса, які є формулюваннями законів збереження маси, імпульсу та енергії для потоків рідини. Рівняння доповнюються рівняннями стану рідини, що визначають природу рідини, і емпіричними залежностями густини рідини, в'язкості і теплопровідності рідини від температури. Непружні неньютонівські рідини розглядаються шляхом введення залежності їх динамічної в'язкості від швидкості зсуву потоку і температури, а стисливі рідини – шляхом введення залежності їх густини від тиску. Задача конкретизується визначенням її геометрії, граничних і початкових умов [5].

В нашому випадку завдання зведено до того, що обчислювальна область визначена як внутрішня порожнина конвертера, обумовлена його робочим футеруванням, рідина – це розплав, газ подається через фурму із заданими умовами, параметри моделювання ідеальні (конвертер та фурма розташовані строго вертикально).

На рис. 3, а та 3, б відображена об'ємна концентрація розплаву в конвертері при моделюванні роботи односоплової та трисоплової фурми в часі, яка є мірою об'єму розчиненої рідини у заданому об'ємі робочої порожнини конвертера. Для проведення аналізу та зіставлення результатів між двома фурмами, обрані наступні часові позначки – 0,1 с; 0,3 с; 0,6 с; 1 с; 1,7 с; 2 с; 2,8 с; 3,8 с; 4,3 с. При впливі струменя газу на ванну конвертера на рис. 3 спостерігається «пульсаційний» характер западини, що повторюється з часом (1,7 с; 3,8 с), розплав періодично «пробивається» струменем газу практично до дна конвертера, що безумовно може вплинути негативно на футеруванні агрегату, зменшуючи його термін служби.

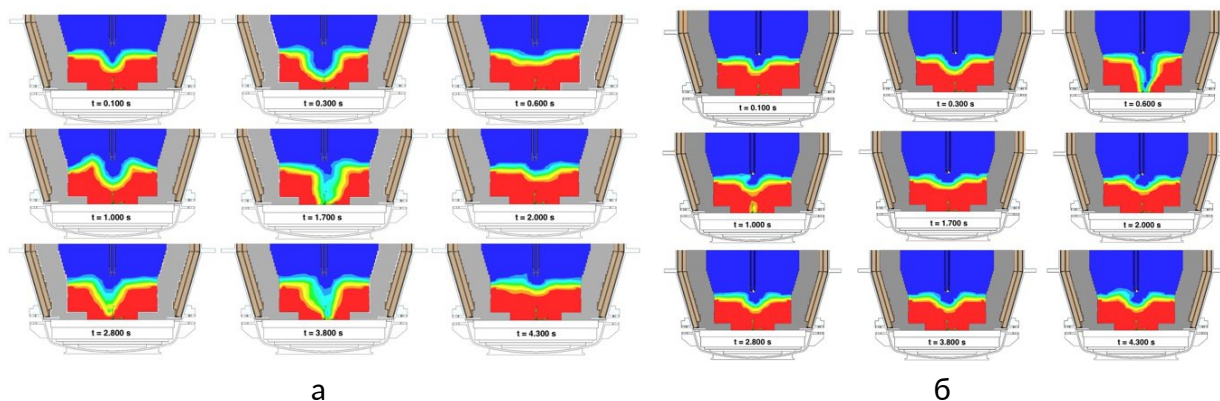


Рис. 3. Односоплова (а) та трисоплова (б) фурма. Об'ємна концентрація рідини

При роботі фурми з одним соплом, ширина западини в рідині залишається майже постійною під впливом газу, змінюється лише глибина западини, спостерігається утворення хвиль, гребінців по краях западини, характер та форма яких змінюються в часі. Особливо варто звернути увагу на периферію металеві ванни конвертера, на яких об'ємна концентрація рідини практично не змінюється, що може опосередковано свідчити як про

недостатнє перемішування розплаву в цій області, так и про меншу дію розплаву на робоче футерування стін конвертера.

Картина з використанням трисоплової фурми та розподіл об'ємної концентрації рідини, як показано на рис. 3, б, має дещо інший характер. По-перше відсутня пульсація западини, що формується потоком газу з фурми, а «простріл» до дна конвертера спостерігається тільки на одній часовій ділянці – біля 0,6 секунди. Враховуючи, що перехід від одного режиму до іншого (початок продування) відбувається стрибкоподібно, оскільки фурма багатосоплова, а струмені газу турбулентні, можемо припустити, що такий ефект пов'язаний з початком роботи фурми при моделюванні процесу. В такому випадку, вплив продування на термін служби футерування дна конвертера буде меншим, ніж у попередньому варіанті.

Додатково фіксується більш стабільна поведінка западини, вона не така глибока як на рис. 3, а, але візуально здається ширше.

Хвилі та гребні по краях западини менші, характер і форма стабільніші за попередню, об'ємна концентрація рідини біля стін практично не змінюється. При візуальному порівнянні відзначається більш стабільна западина під час роботи трисоплової фурми, тоді як фурма з одним соплом постійно змінює ширину та глибину западини в часі, надаючи їй непередбачувану форму. Можна припустити, що багатосоплова фурма дозволяє проводити продування розплаву при збереженні більш спокійнішого (з меншою турбулентністю) характеру перемішування, з меншим впливом на цілісність робочого футерування дна конвертера.

Для того, щоб побачити процес руху частинок газу в розплаві, їх кількість на напрям, проаналізувати хід перемішування, проводилося комп'ютерне моделювання траєкторії пруху газу в рідині. Порівняльні зображення для односоплової та трисоплової фурми зображені на рис. 4.

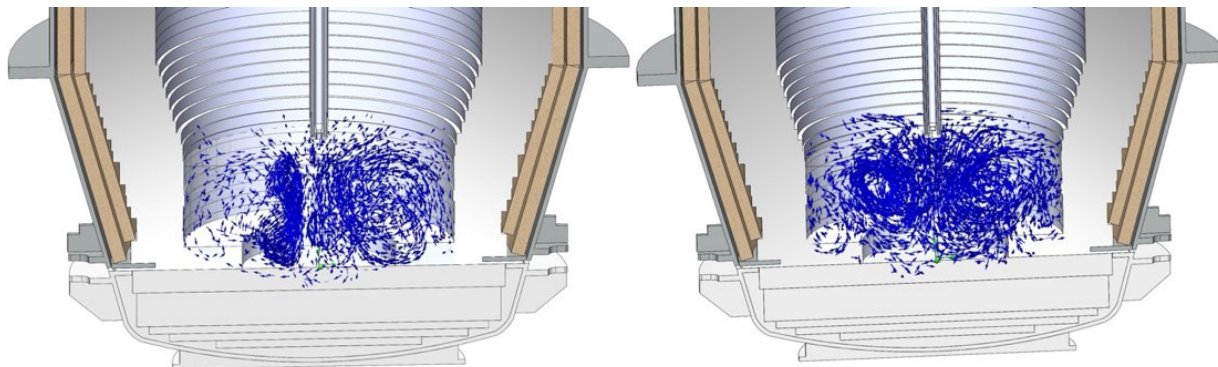


Рис. 4. Траєкторія потоку газу в рідині (односоплова фурма - зліва, трисоплова - справа)

Грунтуючись на моделюванні, можемо сказати, що трисоплова фурма краще перемішує ванну з рідиною, при однакових параметрах тиску і витрати газу, кількість векторів траєкторії потоку газу набагато більше, ніж у односопловій. При такій траєкторії руху, коли рідина циркулює, відбиваючись від дна і стінок металеві ванни конвертера, перемішування не має такого «загасання» в напрямку від вертикальної осі фурми до стінки. Можна припустити, що застосування трисоплової фурми, збільшивши інтенсивність

перемішування, дозволить досягти повного окислення вуглецю при рафінуванні феронікелю в більш короткий термін, що дозволить швидше відібрати пробу металу для визначення вмісту необхідних хімічних елементів, скорочуючи тривалість плавки. Трисоплова фурма, виходячи з рис. 4, в рівній мірі впливає на робоче футерування дна і стін металеві ванни конвертера.

Висновки

1. Характер взаємодії газового струменя з рідиною, форма та розміри западини більш стабільні при застосуванні трисоплової фури.
2. Інтенсивність перемішування ванни металу при використанні трисоплової фури вище та рівномірніше за об'ємом розплаву, ніж при використанні фури з одним соплом.
3. Ефект збільшення кількості сопл фури може призвести до скорочення тривалості плавки, зменшення часу прибуття металу в конвертері, підвищення продуктивності і стійкості футерування агрегату, зниженню питомих витрат.
4. Односоплова фурма більшою мірою впливає на футерування дна конвертера, що може призвести до випереджального зносу та утворення лунки.
5. Фурма з трьома соплами впливає як на робоче футерування стін, так і на футерування дна конвертера.

Бібліографічний список

1. Zdeněk A. Technology of production of steel in converters. Ostrava, 2014. 618 s. Режим доступу: [1](#)
2. Баптизманский В.И. Конвертерные процессы производства стали. Київ-Донецьк: Вища школа, 1984. 343 с.
3. Бойченко Б.М., Охотський В.Б., Харлашин П.С. Конвертерне виробництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія: Підручник. Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2004. 454 с.
4. Рибак В. В. Технологічна інструкція рафінування чорного феронікелю; № 001; 2022 р.
5. Solidworks Flow Simulation. 2022 p. [SOLIDWORKS 3d Fluid Simulation & Flow Modeling Software](#)

ОГЛЯД ДОСТУПНИХ ДЖЕРЕЛ МАРГАНЦЕВОЇ СИРОВИНИ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИРОБНИЦТВА МАРГАНЦЕВИХ СПЛАВІВ ПІДПРИЄМСТВАМИ УКРАЇНИ

О.В. Аносов¹, В.А. Гладких¹, А.В. Рубан¹, О.О. Рябцев¹

1. Український державний університет науки і технологій, Україна, м. Дніпро, просп. Науки, 4, 49600

Анотація. Розглянуто актуальну ситуація та перспективи забезпечення марганцевою сировиною світових виробників. Особливу увагу приділено: проблемі вмісту фосфору у вітчизняних рудах; методам отримання феросилікомарганцю з низьким вмістом фосфору. Порівняльна оцінка використання імпортованих руд замість традиційної технології електрометалургійної дефосфорації марганцевої сировини – виплавки малофосфористого шлаку свідчить про перспективність даного підходу.

Ключові слова: ФЕРОСИЛІКОМАРГАНЕЦЬ, МАРГАНЦЕВА СИРОВИНА, ФОСФОР, МАЛОФОСФОРИСТИЙ ШЛАК.

REVIEW OF AVAILABLE MANGANESE RAW MATERIAL SOURCES AND FEATURES OF MANGANESE ALLOYS PRODUCTION BY UKRAINIAN ENTERPRISES

O.V. Anosov¹, V.A. Gladkikh¹, A.V. Ruban¹, O.O. Riabtsev¹

1. Ukrainian State University of Science and Technology, ave. Nauky, 4, Dnipro, Ukraine, 49600

Abstract. This report examines the current situation and prospects for manganese raw material supply for global producers. Special attention is given to the issue of phosphorus content in local ores and methods for obtaining low-phosphorus ferrosilicomanganese. A comparative assessment of the use of imported ores instead of the traditional electrometallurgical dephosphorization of manganese raw materials – slag smelting with low phosphorus content – indicates the promise of this approach.

Keywords: FERROSILICOMANGANESE, MANGANESE RAW MATERIAL, PHOSPHORUS, LOW-PHOSPHORUS SLAG.

У 2023 році у світі було вироблено та використано майже 23 млн. т. різних марганцевих сплавів, з яких 17,5 млн. т. феросилікомарганцю, що вимагало відповідного збільшення видобутку марганцевої руди. У 2023 році було вироблено понад 60 млн. т. марганцевих руд та концентратів різної якості. Світові запаси марганцевих руд оцінюються приблизно 4,8 млрд. т., з яких лише 11% це є бідні руди, основні запаси яких (близько 80 %) перебувають у Україні [1].

Найбільші з наземних покладів марганцевої руди знаходяться в Південній Африканській Республіці (ПАР), Гані, Австралії, Габоні, Бразилії, Китаї, Індії, Мексиці, Україні та Казахстані. У Грузії розташоване перше у світі родовище, що промислово

розробляється [2]. Кожна з наведених вище країн має свої родовища марганцевої сировини, які сконцентровані на певних ділянках та у конкретних містах.

ПАР. Родовище Калахарі містить 78% світових наземних запасів марганцевої руди. Основні поклади розташовані в районах Постмасбург і Куруман-Калахар, за тисячу кілометрів від найближчих портів. У численних шахтах, таких як Маматван і Весселз, видобуваються різні види металургійних або залізистих руд [3].

Австралія. Грут Айлендське родовище розташоване на острові в затоці Карпентарія на півночі Австралії. Значна кількість руди проходить збагачення.

Габон. Родовище Моанда розташоване в районі Франсвіль. Це дуже значне родовище високоякісної руди.

Бразилія. У Бразилії кілька марганцевих родовищ, але основне виробництво було розпочато у 2001 році на шахтах Ігарап Азул та Урукум. Ігарап Азул розташована в тропічному лісі, за 25 км від Карахаса, штат Пара на північному сході Бразилії. Інша шахта, Урукум, розташована поблизу Болівійського кордону. Ще одну відому шахту – Амапа – було закрито наприкінці 1997 року внаслідок повного вироблення руди.

Мексика. родовище Моланго є прикладом великого карбонатного депозиту. Особливістю є виробництво з руди так званих нодулів [3].

Гана. велике родовище карбонатної руди Нсута, що розробляється.

Китай. Володіє найбільшою здобиччою марганцевої руди у світі Розвідані запаси становлять 13% загальносвітових. За останні 30 років відбулося значне збільшення видобутку марганцевої руди. Рудні депозити переважно розміщуються у трьох провінціях: Гуанкжі, Хунан, Гуїжу. З усіх родовищ, тільки одне (Guangxi Xialei) має запаси більше 100 млн. т., ще на шести родовищах запаси руди перевищують 20 млн.т. Близько 60 китайських родовищ відносно невеликі та мають запаси у кількості близько 2 млн.т. кожне. На додаток до цього, є кілька родовищ меншого розміру. Середній вміст марганцю в китайських родовищах 22%, високим також є вміст фосфору та заліза.

Індія. В індійських штатах Орісса, Карнатака, Мадхья Прадеж, Махараштра та інших є численні невеликі родовища марганцю. У 2000 року експлуатувалося 135 марганцевих шахт та кар'єрів. Більшість руди, що видобувається, є низько- і середньосортною з невисоким вмістом марганцю. Колись Індія була одним із головних експортерів марганцевої руди. У зв'язку з виробленням родовищ, нині від 80 до 90% металургійних руд використовують на внутрішньому ринку виробництва феросплавів [4].

Україна. Нікопольське родовище є одним з найбільших у світі. В 2003 році на території цього родовища працювало 11 шахт та кар'єрів [5].

Казахстан. Має у своєму розпорядженні кілька родовищ. Хоча в рудах низький вміст марганцю, вони містять низький вміст шкідливих домішок. Більшість руд, що добуваються, використовується для внутрішнього виробництва феросилікомарганцю.

Грузія. Чіатурське родовище на цей час є малорентабельним через виснаження. Вміст марганцю низький і становить 17-25%. Руди з високим вмістом марганцю майже повністю вироблені. На зараз руда видобувається, переважно, для внутрішнього виробництва феросплавів.

Насправді майже всі металургійні руди піддаються збагаченню. Руди дробляться, просіюються і промиваються (у разі потреби). Часом використовується збагачення у важкому середовищі для руд з високим вмістом кремнію та алюмінію. Середня кількість марганцю, що вдається зберегти в результаті цієї операції, знаходиться в межах 60% - 75% [3].

Відомі світові виробники використовують високоякісні руди, що забезпечує отримання низькофосфористих марганцевих феросплавів з відносно низькою витратою електроенергії, незначними втратами марганцю з відвальним шлаком. Крім того, високоякісні руди ПАР, Бразилії, Габона, Австралії поставляються, найчастіше, у вигляді необхідної фракції і використовуються в металургійному виробництві без дороговартісної попередньої підготовки [4].

Марганцеві руди Нікопольського басейну - це руди осадового походження. Вони характеризуються відносно низьким вмістом марганцю (21-32%), високою концентрацією фосфору (0,13-0,25%), значними домішками кремнезему (38-40%) та порожньої породи. Робота з рудами українського родовища потребує використання складних схем збагачення та агломерації отриманих концентратів для використання у потужних закритих та герметичних рудовідновлювальних печах. При існуючих методах збагачення марганцевих руд ступінь дефосфорації сягає не більше 35%. Це викликано через неможливість повного поділу мінеральних складових марганцю і фосфору.

Основною перевагою виробництва феросилікомарганцю перед виплавою феромарганцю є значно вище вилучення марганцю та можливість використовувати в процесі низькоякісні марганцеві руди. Тому, з огляду на особливості хімічного складу місцевих руд, виробництво високомарганцевого та високофосфористого феросилікомарганцю отримало в Україні пріоритет. Присутність на світовому ринку марганцевих сплавів та реалізація всієї продукції українських підприємств в умовах жорсткої конкуренції неможлива без підвищення якості феросилікомарганцю.

Найбільш проблематичною характеристикою феросилікомарганцю, що виробляється українськими підприємствами, є вміст у них фосфору. Ця проблема зумовлена природно високим вмістом фосфору в місцевих рудах, яка є найбільш доступною і відносно дешевою марганцевою сировиною для АТ НЗФ і АТ ЗФЗ. Особливістю процесу виплавки феросилікомарганцю є практично повний перехід фосфору з шихти у сплав [5]. Розроблений та реалізований в умовах АТ НЗФ та АТ ЗФЗ спосіб дефосфорації марганцевої сировини шляхом електрометалургійного виробництва малофосфористого шлаку частково вирішує питання зниження фосфору в кінцевому сплаві, але він є високовитратним. Технологія супроводжується додатковими втратами марганцю та високими витратами електроенергії та коксу.

Альтернативою дефосфорації через виплавку МФШ для АТ НЗФ стало придбання та використання у складі шихти низькофосфористих імпорتنих руд. На цей час, у зв'язку зі значним зростанням ціни на електроенергію, виплавка та подальше використання МФШ економічно не є ефективним. Залучення імпорتنих низькофосфористих руд для процесу виплавки феросилікомарганцю зі зниженим вмістом фосфору дозволило значно покращити основні показники виробництва феросплавів в умовах АТ НЗФ та АТ ЗФЗ. Доцільність

придбання та використання імпортованих руд для українських підприємств багато в чому визначається їх доступністю та вартістю.

У процесі освоєння виплавки феросилікомарганцю з використанням імпортованих руд також було зазначено, що наявні в літературі залежності показників від вмісту марганцю для печей АТ НЗФ мають відносно вузький діапазон 38-41% і коректні тільки для агломератів з місцевих концентратів [2]. Процеси сумісного використання в якості компоненти шихти агломератів, вітчизняних концентратів, МФШ та різних імпортованих руд потребують більш глибокого вивчення та оцінки.

Бібліографічний список

1. Нікопольські феросплави. М.І. Гасик, В.С. Куцін, Є.В. Лапін та ін. Дніпропетровськ: «Системні технології», 2004, 204 с.
2. О.В. Аносов, В.А. Гладких, А.В. Рубан та ін. Порівняльна оцінка якості сировини для виплавки сплавів марганцевих. Дніпро. - Теорія і практика металургії. - №3, 2023.
3. Рудовідроджувальні електропечі та технології виробництва марганцевих феросплавів. Куцін В.С., Величко Б.Ф., Гасик М.І. та ін. Дніпропетровськ, НМетАУ, 2011
4. Феросплави України-2000. М. І. Гасик, О.Г. Ганцеровський, А.М. Овчарук, І.П. Рогачов. - Дніпропетровськ: Системні технології, 2001, 87 с.
5. Production of Manganese Ferroalloys. S.E. Olsen, M. Tangstad, T. Linstad // SINTEF and Tapir Academic Press, Trondheim, 2017.
6. Zhou Jian. Review and Prospect of Global Manganese Ore Market // International Forum on Manganese Electrolytic Products Market Summit, March 1st, 2024.

ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ ПІД ЧАС ВИПЛАВКИ МАРГАНЦЕВИХ ФЕРОСПЛАВІВ В УМОВАХ АТ НІКОПОЛЬСЬКИЙ ЗАВОДУ ФЕРОСПЛАВІВ

1. Бабуцький Вадим Іванович. АТ Нікопольський завод феросплавів. Електрометалургів вул. 310, Нікополь, Україна, 53200 vadimbabuckiy@gmail.com - відповідальний автор, <https://orcid.org/0009-0006-6728-3342>

2. Зінченко Олександр Миколайович. АТ Нікопольський завод феросплавів. Електрометалургів вул. 310, Нікополь, Україна, 53200 ozincenko88@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-7454-0264>

Анотація: Ефективність виробничої діяльності в умовах зростання вартості ресурсів вимагає нетрадиційних рішень. Дослідним шляхом, використовуючи відомі теоретичні дані, впроваджено технологічні прийоми використання дрібних руд у закритих і герметичних печах, а також роботу печей із плановими гарячими простоями. Отримано реальне зниження витрат як натуральному, так і вартісному вираженні.

Ключові слова: Ефективність виробництва, властивості марганцевих руд, управління потужністю печей

WAYS TO REDUCE ENERGY CONSUMPTION IN SMELTING OF MANGANESE FERROALLOYS IN THE CONDITIONS OF AT NIKOPOL FERROALLOY PLANT

1. Babutskyi Vadym Ivanovych. JSC Nikopol Ferroalloy Plant. Electrometallurgov str. 310, Nikopol, Ukraine, 53200 vadimbabuckiy@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-6728-3342>

2. Zinchenko Oleksandr Mykolaiovych. JSC Nikopol Ferroalloy Plant. Electrometallurgov str. 310, Nikopol, Ukraine, 53200 ozincenko88@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-7454-0264>

Abstract: The efficiency of production activity in the conditions of increasing cost of resources requires unconventional solutions. Experimentally, using known theoretical data, technological methods of using fine ores in closed and sealed furnaces, as well as the operation of furnaces with planned hot downtime are introduced. The real reduction of expenses both in natural and cost terms is received.

Keywords: Production efficiency, properties of manganese ores, furnace capacity control

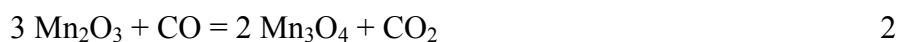
В умовах постійного зростання вартості енергоносіїв неминує знижується ефективність виробничої діяльності промислових підприємств. Особливо це стосується енергоємних галузей промисловості, одна з яких - виплавка феросплавів в електричних рудовідновних печах великої потужності. Стосовно АТ «Нікопольський завод феросплавів» частка електроенергії в собівартості товарної продукції впродовж останніх 15 років безперервно збільшувалася - як за рахунок зростання вартості самої електроенергії, так і доступних до переробки марганцевих руд і концентратів. У даній статті представлено досвід роботи АТ Нікопольський завод феросплавів (АТ НЗФ) в умовах внутрішнього ціноутворення на енергоносії та попиту на марганцеві сплави на внутрішньому і світовому

ринках, що склалися на поточний момент. В історії АТ НЗФ були періоди роботи з різними за своїми якісними характеристиками та фізико-хімічними властивостями марганцевими рудами і концентратами. У тривалому періоді, починаючи з моменту пуску заводу, єдиними постачальниками марганцевої сировини були гірничозбагачувальні комбінати, що працювали на Нікопольському родовищі марганцевих руд, які розташовані в безпосередній близькості від заводу [1]. У наступні періоди у заводу з'явилася можливість, а іноді й необхідність працювати з використанням імпорتنих марганцевих руд як окисних (Австралія, Габон, Бразилія), так і карбонатних (Гана, ПАР). У таблиці 1 наведено середнє співвідношення видів марганцевої сировини та її вплив на питому витрату під час виплавки феросилікомарганцю.

Таблиця 1. Марганцева сировина, яку використовували на АТ НЗФ у різні періоди, і її питома витрата під час виплавки феросилікомарганцю

Найменування	Питома витрата, б.кг/б.т.		±, %
	1	2	
Агломерат В2 (українські руди)	675	743	
Агломерат В2П (імпорتنі руди)	578	655	
РАЗОМ агломерат	1253	1398	11,6
Руди кускові, импорт, РАЗОМ	200	30	-85
в.т.ч.			
Австралія, Габон	36		
ПАР	137		
Гана КК	27	30	
ШМФ. ШМП	153	248	62,1
УСЬОГО сплав	1606	1676	4,4

Як впливає з даних, наведених у таблиці 1, використання для виплавки імпорتنих марганцевих руд - агломератів АМНВ-2П Гана, ПАР, які мають високу природну основність, а Гана також високий вміст оксиду магнію, та кускових руд Австралії, Габону, в яких марганець на 68-73% представлений вищим оксидом MnO_2 , давало змогу мати нижчий питома витрата марганцевої сировини порівняно з роботою на агломератах та передільному шлаку [2]. Як відомо, вищі оксиди марганцю в умовах відновлювальної плавки, особливо в закритих печах, відновлюються оксидом вуглецю:



Усі перераховані вище реакції протікають із виділенням тепла і дають змогу зменшити витрату електроенергії під час плавки. Відновлення оксиду марганцю відбувається твердим вуглецем



Під час виплавки феросилікомарганцю в закритих і герметичних печах до шихтових матеріалів висуваються жорсткі вимоги щодо вмісту фракцій менше 5 мм. Частка такої фракції в шихті не повинна перевищувати 10%. Наразі заводу доступні до переробки тільки концентрати з руд Нікопольського басейну, які через методи збагачення початкових руд, хоча і мають фракційний склад 0-10 мм, але частка фракції менш як 5 мм складає більше 80%, що вимагає їх окускування перед подачею в піч. Окускування здійснюють спіканням концентратів в агломерат на агломераційних машинах. Агломерація сприяє економії електроенергії у випадку з карбонатними рудами, коли витрати тепла на розкладання манганокальциту, родохрозиту відбуваються за рахунок тепла горіння аглопалива, а не у ванні печі. Якщо ж агломеруються оксидні руди, більша частина корисного тепла, що виділяється внаслідок екзотермічного попереднього відновлення, втрачається в процесі випалу на агломераційній стрічці, і споживання енергії в процесі плавки в печі зростає. З метою зниження витрат електроенергії заводом було розроблено низку заходів щодо можливості подачі сирого концентрату 1с у піч, минаючи агломерацію. Під час освоєння цього процесу було встановлено оптимальну частку сирого концентрату безпосередньо у складі марганцевої сировини на плавку, що дає змогу поліпшити електричний режим роботи печі (вища температура плавлення, ніж в агломерату, і електроопір у верхніх горизонтах печі). Збільшення частки понад оптимальні значення призводить до різкого погіршення газового режиму роботи печі (зниження газопроникності та спікання колошника) і погіршення як ходу печі, так і ТЕП (рис.1).

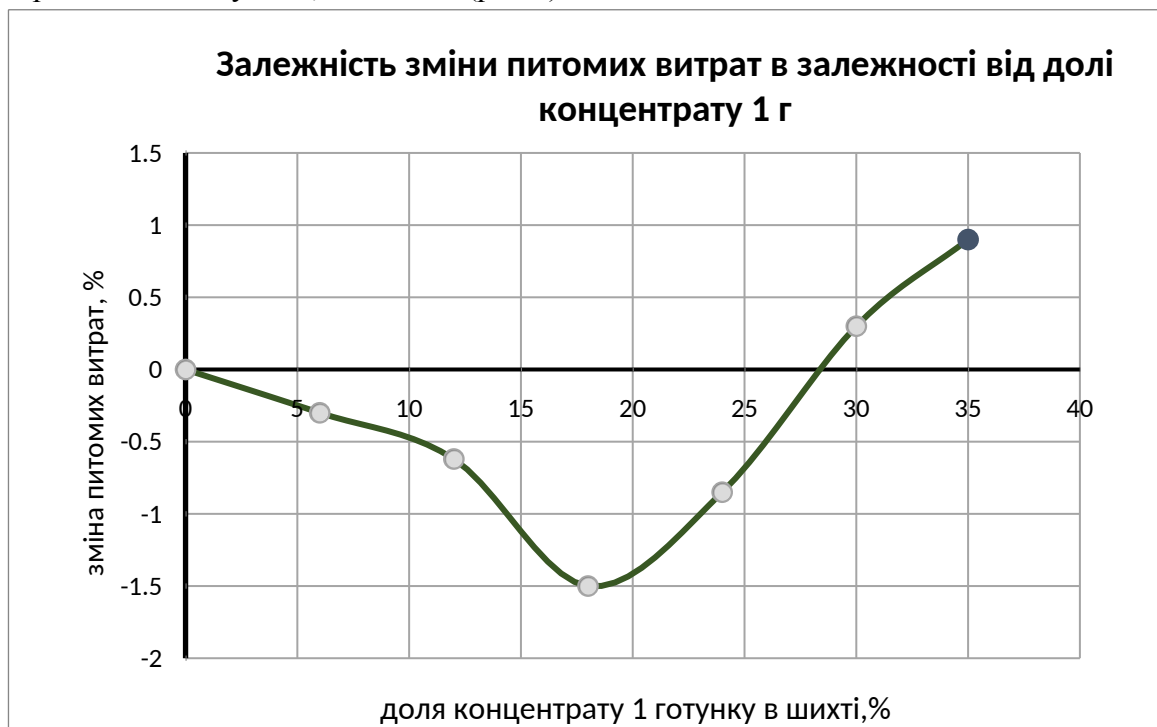


Рис.1 - Вплив частки концентрату 1с у шихті на зміну питомих витрат

Таким чином, введення до шихти на виплавку феросилікомарганцю концентратів 1с, минаючи стадію агломерації, дає змогу знизити як витрати безпосередньо на отримання агломерату, так і поліпшити ТЕП виплавки. Аналогічна ситуація спостерігається так само

при виплавці високовуглецевого феромарганцю. Зміна вартості 1 кВт*год електроенергії протягом доби відрізнятиметься в 4-6 разів. Відповідно для підприємств, що мають безперервний цикл виробництва, робота в години найвищої вартості електроенергії призводить до нерентабельності готової продукції. Водночас процес виробництва феросплавів у рудовідновлювальних печах з безперервною подачею шихти і періодичним випуском розплаву вимагає саме постійної роботи (споживання електроенергії) щогодини. Гарячі простой призводять до втрат тепла через футерування ванни печі та водоохолоджувальні елементи, що призводить до збільшення питомої витрати основних ресурсів - електроенергії (компенсація втрат тепла), марганцевої сировини (зниження температур у зоні відновлення, і відповідно вилучення марганцю і кремнію), коксу внаслідок зниження виходу металу. Крім того, основним вузьким місцем є робота самозапикаючихся електродів, термічна напруга в яких під час гарячих простоїв печей вкрай негативно впливають на процес формування тіла електрода та їхню стійкість у ванні печі. АТ НЗФ постійно змінював режими роботи пічних агрегатів залежно від зміни рівня цін на електроенергію в години доби: від зниження потужності до технологічно мінімальної, а останніми роками до повного простою печей протягом 4-5 годин за вартості 1 МВт*год понад 7000 грн. Примірні графіки роботи печей наведено на рис.2.

время	0:00-1:00	1:00-2:00	2:00-3:00	3:00-4:00	4:00-5:00	5:00-6:00	6:00-7:00	7:00-8:00	8:00-9:00	9:00-10:00	10:00-11:00	11:00-12:00	12:00-13:00	13:00-14:00	14:00-15:00	15:00-16:00	16:00-17:00	17:00-18:00	18:00-19:00	19:00-20:00	20:00-21:00	21:00-22:00	22:00-23:00	23:00-24:00	средняя мощность	съем за сутки
Н печи	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	тыс.кВт*ч
1	34	34	34	34	34	34	34	26	26	34	34	34	34	34	34	34	34	18	20	20	20	20	18	28	29,4	706
6	40	48	48	48	48	48	40	34	34	50	50	50	50	50	50	50	40	18	20	20	20	20	18	28	38,4	922
ЦФ	74	82	82	82	82	82	74	60	60	84	84	84	84	84	84	84	74	36	40	40	40	40	36	56	67,8	1628
СН	10	10	10	10	10	10	10	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	8	8	8	8	10	10	9,2	221	
Агло. Маш.									6	10	10	10	10	10	10	10	5								3,4	81
ИТОГО	84	92	92	92	92	92	84	69	75	103	103	103	103	103	103	103	88	45	48	48	48	48	46	66	80,4	1930
время	0:00-1:00	1:00-2:00	2:00-3:00	3:00-4:00	4:00-5:00	5:00-6:00	6:00-7:00	7:00-8:00	8:00-9:00	9:00-10:00	10:00-11:00	11:00-12:00	12:00-13:00	13:00-14:00	14:00-15:00	15:00-16:00	16:00-17:00	17:00-18:00	18:00-19:00	19:00-20:00	20:00-21:00	21:00-22:00	22:00-23:00	23:00-24:00	средняя мощность	съем за сутки
Н печи	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	МВт	тыс.кВт*ч
1	44	48	48	48	48	48	34	26	26	34	48	48	48	48	48	48	30	18					18	28	32,8	786
6	40	50	50	50	50	50	40	34	34	50	50	50	50	50	50	50	30	18					18	28	35,1	842
ЦФ	84	98	98	98	98	98	74	60	60	84	98	98	98	98	98	98	60	36	0	0	0	0	36	56	67,8	1628
СН	10	10	10	10	10	10	10	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	8	8	8	8	10	10	9,2	221	
Агло. Маш.									6	10	10	10	10	10	10	10	5								3,4	81
ИТОГО	94	108	108	108	108	108	84	69	75	103	117	117	117	117	117	117	74	45	8	8	8	8	46	66	80,4	1930

Рис.2. Графік знімання електроенергії АТ НЗФ протягом доби

Робота пічних агрегатів з простоями в години пік вимагала розробки порядку зниження і набору потужності, графіка випуску розплаву, перепуску електродів для мінімізації їхніх відколів у процесі роботи. Однак повністю уникнути вкорочення електродів під час роботи печей з простоями поки що не вдалося. Однак гнучка зміна потужності, споживаної заводом у години високої та «низької» вартості електроенергії, дала змогу довести зниження добової ціни за 1 МВт*год на 12-18% від середньої ціни енергоринку залежно від співвідношення годинних цін і часу простою печей протягом доби.

Висновки

1. Освоєно технологію використання сирих руд українських ГЗК безпосередньо в закриті й герметичні рудовідновні печі потужністю 63МВ*А. Встановлено оптимальне співвідношення сирих руд і агломерату в складі марганцевої сировини на плавку. Економія витрат основних ресурсів на 1 т сплаву може досягати до 1,5-2%.

2. Розроблено режим роботи пічних агрегатів з використання активної потужності залежно від годинної вартості електроенергії протягом доби. Впроваджені заходи дали змогу організувати безаварійну роботу печей із плановими гарячими простоями до п'яти годин протягом доби. Економія від середньодобової ціни енергоринку становить від 12 до 18%.

Бібліографічний опис

1. Гасик М.І. Марганець. М.: Металургія, 1992
2. Рінгдален Е., Танштад М. ІНФАКОН XIII, Казахстан, 2013.

РОЗРОБКА ЕФЕКТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПЛАВКИ СПЛАВІВ МАРГАНЦЮ

Величко К.О. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0009-3705-4129>, akreev@gmail.com

Анотація. Запропоновано вести виплавку сплавів марганцю в індукційній печі з використанням як відновник вугілля та силікомарганцю. Спосіб дозволяє зменшити безповоротні втрати марганцю та забезпечує зниження енергетичних витрат.

Ключові слова: марганець, силікомарганець, феромарганець, брикети, що містять марганець, вугілля, індукційна піч.

DEVELOPMENT OF EFFECTIVE TECHNOLOGY OF SMELTING MANGANESE ALLOYS

Velychko K.O. Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine

Abstract. It is proposed to smelt manganese alloys in an induction furnace using coal and silico-manganese as a reducing agent. The method allows to reduce irreversible losses of manganese and provides a reduction in energy costs.

Key words: manganese, silicomanganese, ferromanganese, briquettes containing manganese, coal, induction furnace.

Широко застосовувані способи виплавки сплавів марганцю реалізують у відновлювальних печах [1-3].

Розділяють безфлюсовий та флюсовий способи плавки. У першому випадку одержуваний при цьому високомарганцевий шлак (38%Mn) використовують як вихідний компонент шихти для виплавки силікомарганця з зниженим вмістом фосфору, що підвищує вилучення марганцю і знижує витрату шихтових матеріалів. При флюсовому способі високовуглецевий феромарганець виплавляють з використанням вихідних концентратів, коксикі та вапняку.

Процес виплавки ведуть у два етапи. На першому етапі відновлюють фосфор із переведенням його в попутний метал. Для цього концентрат Mn-руди дефосфорують, відновником в якому є твердий вуглець. Отриманий шлак є вихідним продуктом для виплавки середньо- та низьковуглецевого феромарганцю. На другому етапі в дуговій електропечі ведуть процес відновлення марганцю із ШМП кремнієм передельного феросилікомарганцю, який може бути представлений реакцією:



Недоліками описаного способу виплавки низьковуглецевого феромарганцю є втрати марганцю з попутним металом, що виходить на першій стадії, і підвищена сумарна витрата електроенергії на виплавку сплавів за цією технологією.

Свого часу академік М.І.Гасік, співробітники кафедри електromеталургії стали та феросплавів Дніпропетровського металургійного інституту та фахівці Нікопольського Заводу Феросплавів розробили спеціальну технологію виплавки марганцевих сплавів на основі марганцевмісної шихти з відносно високим вмістом фосфору.

В цілому, процеси характеризуються високою продуктивністю та технологічністю та вирішують завдання отримання сплавів марганцю.

Разом з тим, при електродуговому нагріванні шихти і проведенні вуглецевотермічного відновлення температури процесу в районі дуг невиправдано високі, що призводить до підвищених втрат марганцю з випаровуванням, а власне вуглецевотермічне відновлення супроводжується виділенням великої кількості монооксиду вуглецю на кожен тону по М стехіометрії 276 кг вуглецю та процес відновлення супроводжується виділенням майже 642 кг монооксиду вуглецю і після допалювання останнього до CO_2 утворюється приблизно 1000 кг вуглекислого газу $\{\text{CO}_2\}$.

При сьгоднішніх екологічних вимогах до викидів CO_2 в атмосферу і тим більше у майбутньому, такі класичні технології виплавки марганцевих сплавів не можна вважати екологічно прийнятними, як з точки зору теплових навантажень та випаровування металів, так і насамперед у зв'язку з викидами $\{\text{CO}_2\}$ в атмосферу.

Як альтернативні рішення автором запропоновано:

- вести процес в індукційній печі;
- використовувати як відновник газоподібний водень;
- Завершальну стадію виплавки марганцевих сплавів ($\text{MnO} \rightarrow \text{Mn}$) проводити використовуючи силікомарганець (SiMn) або феросиліцій (FeSi).

На вибір індукційної печі в якості металургійного агрегату для нагріву, проведення твердофазного відновлення і розплавлення шихти вплинули переваги останньої при реалізації виплавки сплавів марганцю. По-друге, втрати в індукційній печі значно менше, ніж в електродуговій печі.

Саме ці переваги пропонується використовувати для виплавки сплавів марганцю.

Індукційну піч можна розглядати як унікальний металургійний агрегат, можливості якого не реалізовані повною мірою, у тому числі для марганцевих сплавів [4].

Шихтові матеріали:

1. марганцевий концентрат;
2. вугілля;
3. силікомарганець;
4. DRI;
5. вапно.

З марганцевого концентрату та вугілля готують марганецьрудовугільні брикети.

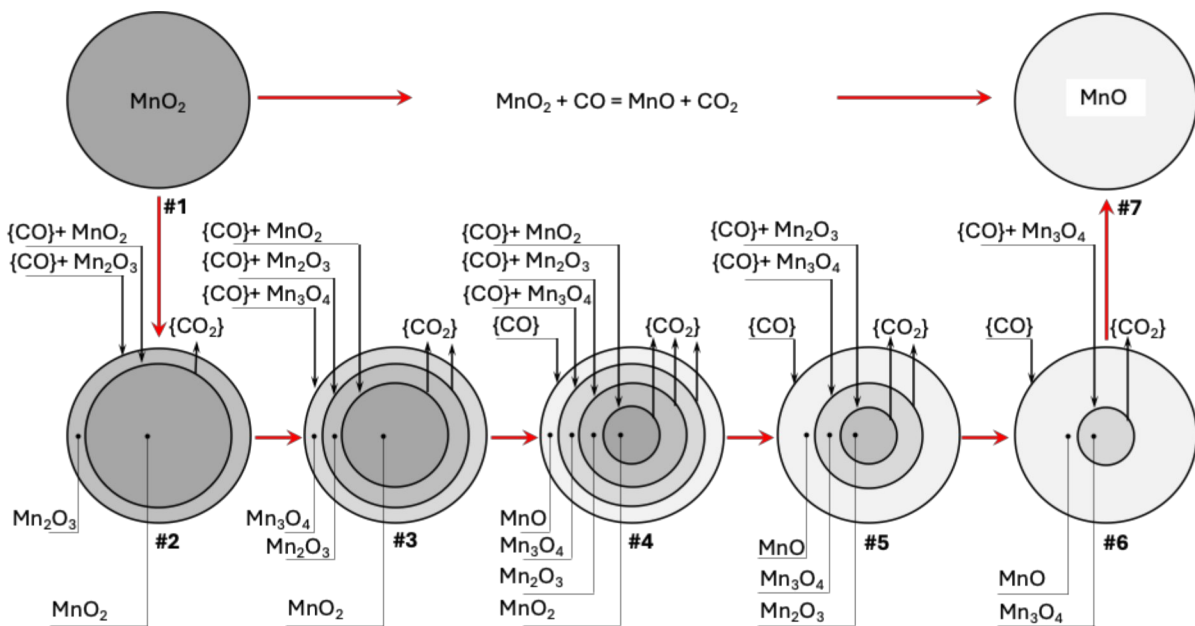
Зважаючи на відсутність металевої складової в марганецьрудовугільних брикетах, їх нагрівання не можливе в магнітному полі індукційної печі.

Разом з тим, введення металевої частини (частинок DRI) змінює уявлення про теплові можливості процесів нагрівання та розплавлення марганецьрудовугільних брикетів в індукційній печі робить такий нагрівання та розплавлення реалізованим.

Марганецьрудовугільні брикети змішують з подрібненим DRI до рівномірного розподілу частинок DRI серед марганецьрудовугільних брикетів.

Для швидкого нагріву марганецьрудовугільних брикетів розміри останніх обмежують діаметром 10-25 мм.

У марганецьрудовугільному брикеті кількість вугілля на процес має забезпечувати вуглецевотермічне твердофазне відновлення оксидів заліза до заліза та відновлення MnO_2 до MnO . Схема послідовного ступінчастого відновлення оксидів марганцю представлена малюнку 1.



Мал. 1. Схема послідовного ТФВ елементі марганецьрудовугільному брикету.

Відновником є монооксид вуглецю як продукт газифікації вуглецю вугілля. В елементі брикету, як і у всьому брикеті, частинки концентрату марганцевої руди та вугілля нагріваються шматочком DRI. Нагрів марганецьрудовугільної шихти йде від поверхні металевої частинки вглиб. Розмір частинки концентрату марганцевої руди в брикеті - до 1-2 мм, Позиція 1 на рис.1 представляє інкубаційний період, коли в системі насамперед за рахунок нагріву формуються умови для протікання реакцій ТФВ. Після досягнення температури газифікації вугілля та початку процесу твердофазного

відновлення на поверхні частинки концентрату марганцевої руди протікає реакція відновлення монооксидом вуглецю MnO_2 до Mn_2O_3 з утворенням скоринки відновленого оксиду Mn_2O_3 на поверхні (позиція 2 на рис.1). Подальше просування нагріву та монооксиду вуглецю вглиб створює умови протікання там також відновної реакції $\text{MnO}_2 - \text{Mn}_2\text{O}_3$. У той же час в області близької поверхні йде відновлення сесквіоксиду марганцю до подвійного оксиду марганцю (позиція 3 на рис.1). Серцевина частинки складається з діоксиду марганцю MnO_2 . У позиції 3 показані просування фронту підведення відновника та в протилежному напрямку відведення газоподібного продукту відновлення CO_2 .

Позиція 4 на рис.1 показує, як реакції ТФВ набувають подальшого розвитку. Нагрів та підведення монооксиду вуглецю від периферії до центру дозволяє умовно виділити чотири області. В області близької поверхні процеси відновлення оксидів марганцю концентрату марганцевої руди вуглецем завершуються утворенням області монооксиду марганцю. Наступна вглиб область представлена подвійним оксидом марганцю (Mn_3O_4). У ній завершено реакцію відновлення Mn_2O_3 до подвійного оксиду. Далі проходить область, де завершуються перетворення MnO_2 на Mn_2O_3 . У центральній області, куди не доставлено відновлювач, ще зберігається діоксид марганцю MnO_2 .

Позицію 5 характеризує відсутність у частинці марганцевого концентрату вищого оксиду MnO_2 . Центр представлений тепер оксидом Mn_2O_3 , області подвійного оксиду марганцю та монооксиду марганцю збільшуються. Процеси ТФВ уповільнюються та йдуть до свого завершення. У позиції 6 представлені лише дві відносно великі області: у центрі невідновлений подвійний оксид марганцю Mn_3O_4 і далі монооксид MnO . При подальшій доставці монооксиду вуглецю до центру та перебігу відновлення Mn_3O_4 процес ТФВ завершується і частинка концентрату марганцевої руди брикету (як і у всьому брикеті) тепер представлена монооксидом марганцю (позиція 7 на рис. 1).

Подальший нагрівання DRI та марганецьрудовугільного брикету призводить до їх розплавлення. Отриманий марганцевистий шлак спочатку скачують, а відновлення MnO ведуть SiMn кремнієм.

Сумарна витрата матеріалів для проведення процесу в індукційній печі склала:

- марганцева руда - 1.000 кг;
- вугілля – 140 кг;
- силікомарганець (28% Si) – 410 кг;
- вапно – 300 кг.

Спосіб експериментально перевірено в умовах роботи 50 кг індукційної печі.

Висновки. Показано важливу можливість ефективної виплавки сплавів марганцю в індукційній печі.

Бібліографічний список

1. Величко А.Г., Ду Юньшень, Гасік М.А. Теоретичні основи процесів та технологій середньовуглецевого феромарганцю. - Дніпропетровськ, НМетАУ, 2016 р. 259 стор.
2. Гасік М.А., Кравченко П.А., Сазоненко О.М. Удосконалення технологічних процесів тристадійного виробництва металевого марганцю силікотермічним способом. Металургійна та гірничорудна промисловість, 2008.02, с. 21-26
3. Величко А.Г., Ду Юньшень, Гасік М.А. Дослідження термодинаміки відновлення закису марганцю силікомарганцем при отриманні середньовуглецевого феромарганцю. Металургійна та гірничорудна промисловість, 2015.04, с. 34-37
4. Грек О.С., Величко К.А. Індукційна піч – універсальний металургійний агрегат для твердофазного відновлення та плавлення сталі та високовуглецевого феромарганцю. Теорія та практика металургії. 2023. Вип. 4 (141). С. 13–21.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕФЕКТИВНОГО НАГРІВУ ЗАЛІЗО-РУДО-ВУГІЛЬНОГО БРИКЕТУ В ІНДУКЦІЙНОМУ ПОЛІ

Грек О.С. Дніпровський металургійний інститут Українського університету науки та технологій, м. Дніпро, Україна, alex.grek.ks@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-0153-5416>

Анотація. Збільшення екологічного навантаження металургійної галузі спонукає до пошуку нових технологій металургійного виробництва та скорочення викидів парникових газів у існуючих технологічних ланцюгах. Перспективою для «зеленої» металургії є технології прямого твердофазного відновлення заліза з першоджерельних залізородних матеріалів. Запропоновано принципово новий технологічний ланцюг для отримання високоякісної сталі шляхом твердофазного відновлення залізної руди з використанням індукційної печі. Проведено експериментальні дослідження твердофазного відновлення залізо-рудо-вугільного брикету в лабораторних умовах. Наведено результати розрахунку геометричних параметрів металеві складові залізо-рудо-вугільного брикету для умов ефективного процесу нагріву брикетів в умовах індукційного нагріву.

INVESTIGATION OF PARAMETERS OF EFFECTIVE HEATING OF IRON-ORE-COAL BRIQUETTE IN AN INDUCTION FIELD

Grek O.S. Dnipro Metallurgical Institute of the Ukrainian University of Science and Technology Dnipro, Ukraine, alex.grek.ks@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-0153-5416>

Abstract. The growing environmental burden of the steel industry is prompting the search for new steelmaking technologies and a reduction in greenhouse gas emissions in existing production chains. The technologies of direct solid-phase iron reduction from primary iron ore materials are promising for green metallurgy. A fundamentally new technological chain to produce high-quality steel through the solid-phase reduction of iron ore using an induction furnace is proposed. Experimental studies of the solid-phase reduction of iron-ore-coal briquettes in the laboratory were carried out. The results of calculation of the geometrical parameters of the metal component of the iron-ore-coal briquette for the conditions of an effective process of heating briquettes under induction heating are presented.

Вступ. Світове виробництво сталі останні 25 років безперервно зростало та у 2025 році становило близько 1,9 млрд. тон [1]. Разом із тим на металургію припадає 20% глобального споживання викопного вугілля та як галузь, металургія відповідальна за 9% глобальної емісії парникових газів [2].

Близько 72% світового виробництва сталі припадає на технологічний маршрут виплавки сталі Доменна Піч - Кисневий Конвертер, 20% сталі виплавляють із металевих брухту в дугових електросталеплавильних (ДЕСП) печах, а 8% сталі виробляють із прямо відновленого заліза (DRI - Directly Reduced Iron) з використанням ДЕСП [3]. Енергетична інтенсивність та викиди вуглецевого газу для різних технологічних шляхів отримання сталі наведено у 2023 році наведені у Таблиці 1.

Таблиця 1.

Емісія CO₂ та енергетичне споживання на виробництво сталі у 2023 році.

	Інтенсивність викидів CO ₂ , т/т сталі	Енерговитрати, ГДж/т сталі
ДП - КК	2,32	24,20
Лом - ДЕСП	0,70	10,24
DRI - ДЕСП	1,43	23,19

Порівняно з технологічною послідовністю «Доменна Піч - Кисневий конвертер» виплавка сталі в ДЕСП з металевого брухту дає в 3 рази менше викидів парникових газів і набуває широкого поширення у світі як варіант «зеленої» металургії [3, 4]. Також, через те що у світі зростає потреба у транс регіональному транспортуванні залізної руди, що у 2023 році склало 62,7%, та через обмежений доступ до коксівного вугілля, отримують розвиток технології прямого твердофазного відновлення заліза з першоджерельних матеріалів (Рис. 1).

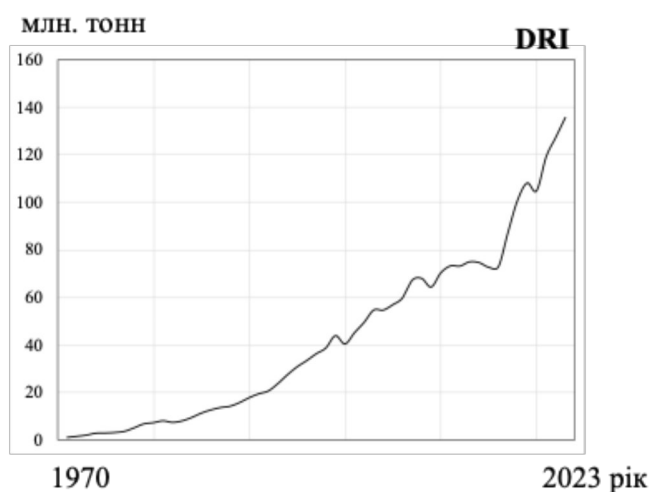


Рис. 1. Світова динаміка виробництва заліза прямого відновлення (DRI) [1].

У 2023 році 99,9% виробництва заліза прямого відновлення реалізовували за чотирма технологіями твердофазного відновлення (Таблиця 2).

Таблиця 2.

Розподіл світового виробництва заліза прямого відновлення за технологіями у 2023 році.

MIDREX	55,8%
HYL/Energiron	12,2%
PERED	2,30%
Вращающаяся рудовосстановительная печь	29,6%
Другие	0,10%

Технології прямого отримання відносно низької питомої продуктивності, порівняно з доменно-конвертерним циклом, мають низку істотних переваг:

- значно нижчі капітальні витрати;
- менші енерговитрати на тону розлитої сталі;
- можливість отримання пористого матеріалу для порошкової металургії;
- використання тільки електроенергії;

- не використання коксу;
- зниження викидів парникових газів.

Запропоновано інший технологічний ланцюжок виплавки сталі, що передбачає використання індукційної печі. Відповідно до нього, під час виплавки сталі не застосовують доменну піч, виключають кокс і коксохімічне виробництво, не використовують киснево-конвертерний агрегат або дугову електросталеплавильну піч (Рис. 2. Схема отримання якісної сталі з використанням у технологічному ланцюжку індукційної печі. Рис. 2).

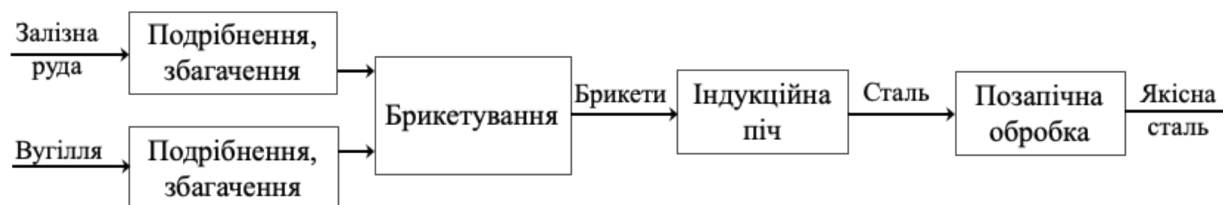


Рис. 2. Схема отримання якісної сталі з використанням у технологічному ланцюжку індукційної печі.

Принциповим у пропонованій технологічній схемі є використання індукційної печі суміщеного металургійного агрегату - печі для твердофазного відновлення і розплавлення продуктів твердофазного відновлення з подальшим рафінуванням.

Матеріали, що не мають електропровідних і магнітних властивостей, зокрема оксиди заліза та інші оксиди, не нагріваються в магнітному полі індукційної печі. У зв'язку з цим, для нагріву діелектричної немагнітної шихти (у нашому випадку шихти для твердофазного відновлення) запропоновано проводити опосередкований нагрів, коли металева складова, яка вводиться, нагрівається в магнітному полі індуктора і, своєю чергою, нагріває прилеглі до неї матеріали шихти. Такою металевою складовою, що гріє, може слугувати металізована губка (Sponge) або подрібнений металізований окатиш (DRI), металева стружка.

Твердофазне відновлення може проводитися вуглецем, частково вуглецем і воднем або тільки воднем. В останньому випадку, що дуже важливо, реалізується концепція «зеленої» металургії. Так індукційна піч може претендувати на універсальний металургійний агрегат для виплавки сталі.

Методика дослідження. Проведені експериментальні дослідження на лабораторній індукційній печі потужністю 5 кВт довели принципову можливість нагріву та відновлення залізо-рудо-вугільних брикетів із вмістом металевої складової у вигляді порошку металізованого заліза (Fe 98%) від 30 до 50%. Результати експериментів та математичного моделювання процесу опубліковано в роботі [5]. Варто зауважити що вміст металевої складової нижче 30% не призводив до бажаних результатів нагріву рудо-вугільної шихти брикету, натомість математичне моделювання демонструвало теоретичну можливість нагріву та відновлення навіть при вмісті металевої складової на рівні 10%.

Було проведено додаткову серію експериментів з використанням металевої складової у формі окатишів діаметром 7-10 мм із вмістом 5-10% від маси залізорудної складової брикету. Така зміна умов експерименту привела до дуже швидкого розігріву та відновлення рудо-вугільної складової. Час нагріву та відновлення брикету скоротився майже в 1,5 рази порівняно з часом відновлення для брикетів із вмістом металевої складової у вигляді порошку на рівні 40-50%.

Проведено математичне моделювання механізмів та умов що впливають на ефективність взаємодії змінного електромагнітного поля індукційної печі та металізованої складової з метою отримання параметрів що дозволять зменшувати вміст металевої складової в залізо-рудно-вугільному брикеті, збільшувати швидкість нагріву та регулювати умови проведенні відновлення рудної складової брикету.

Результати та їх обговорення. Матеріал DRI має відносно високий електричний опір у діапазоні від 10^{-5} до 10^{-6} Ом×м, що є вищим за чисте залізо (приблизно $9,98 \times 10^{-8}$ Ом×м) або вуглецеву сталь $1,71 \times 10^{-7}$ Ом×м. Це пов'язано з пористістю та неметалевими включеннями в структурі DRI. Відносна магнітна проникність DRI становить 100-500 і з тих самих причин, що й опір, є нижчою, ніж у щільного заліза (96% Fe і 4% Si $\mu_r = 500-7000$). Температуру точки Кюрі для DRI приймають 1008 К, що дещо нижче, ніж у чистого заліза 1043 К [6].

Глибина проникнення змінного магнітного поля вглиб матеріалу, що нагрівається, обернено пропорційна кореню від частоти змінного струму в обмотках індуктора. В Таблиця 3 наведено розрахункові значення товщини скін-шару для матеріалу DRI зі збільшенням частоти змінного струму.

Таблиця 3.

Значення товщини скін-шару (δ) за різної температури і частоти (f) змінного струму в обмотках індуктора для матеріалу металевих частинок - DRI.

f , Гц	50	500	5 000	50 000
δ (при $T = 300$ К), мм	7,12	2,25	0,71	0,23
δ (при $T = 1008$ К), мм	123,34	39,00	12,33	3,90

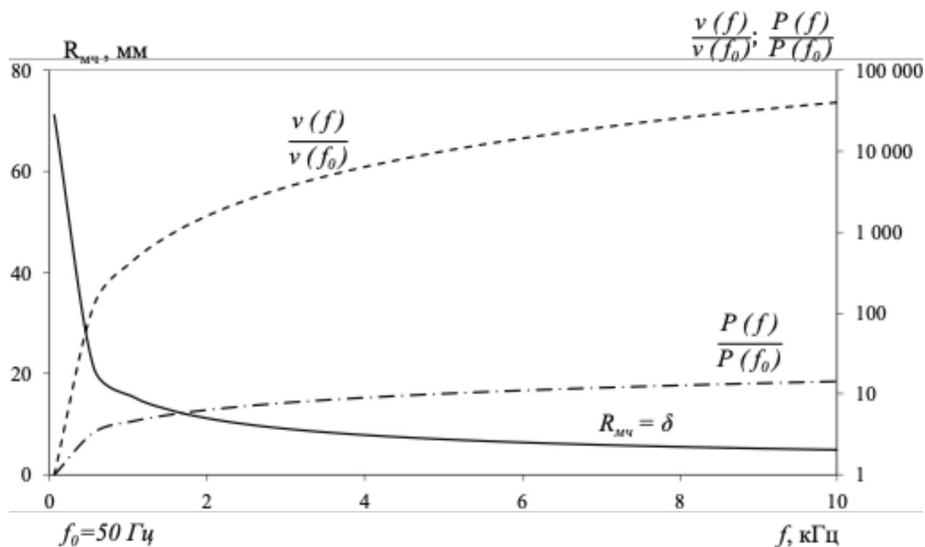


Рис. 3. Залежність радіуса металевої частинки $R_{мч}$, відносної зміни швидкості нагріву частинки $v(f)/v(f_0)$ і теплової потужності частинки $P(f)/P(f_0)$ від частоти змінного струму індуктора за умови $R_{мч} = \delta$ для матеріалу частинки - DRI.

Приймаючи $R_{мч} = \delta$ як оптимальні умови для нагріву металевої сфери, проведено розрахунки радіусу металевої частинки, що дадуть змогу проводити ефективний індукційний нагрів у діапазоні робочих частот від 50 Гц до 10 кГц, а також зміни швидкості

та одиничної потужності металеві частинки під впливом змінного магнітного поля за $R_{\text{мч}} = \delta$ та $\mu_r = 1$ залежно від частоти змінного струму в індукторі печі. Результати розрахунку представлені на Рис. 3.

Висновки:

1. Проведено експериментальне дослідження нагріву та відновлення залізо-рудовугільних брикетів із вмістом металеві складові менше 10% від маси рудо-вугільної частини брикету та встановлено збільшення швидкості нагріву при збільшенні геометричного розміру частинок металеві складові брикету.
2. Встановлено взаємний вплив параметрів матеріалу що нагрівається (розмір, форма та електромагнітні властивості) та частоти електромагнітного поля індукційної печі.
3. Проведено розрахунок діаметрів сферичних металізованих частинок у відповідності до частоти змінного струму в індукторі печі а також зміну теплової потужності та швидкості нагріву металеві складові залізо-рудовугільного брикету.

Бібліографічний список

1. World Steel in Figures 2024. Brussels, Belgium: World Steel Association, 2024.
2. Iron and steel technology roadmap. Paris, France: IEA, 2020.
3. Sustainability performance of the steel industry 2003-2023. Brussels, Belgium: World Steel Association, 2024.
4. Madias J. Electric Arc Furnace. *Ironmaking and Steelmaking Processes*. Springer, 2016. С. 267–281.
5. Velychko O., Grek O., Grishin O., Velychko K. PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF SOLID-PHASE REDUCTION OF PELLETS (BRIQUETTES) UNDER INDUCTION HEATING. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2024. № 3. С. 37–45.
6. Lide D. R., Baysinger G., Chemistry S., Berger L. I., Goldberg R. N., Kehiaian H. V., Kuchitsu K., Rosenblatt G., Avenue M., Roth D. L., Library M., Zwillinger D. CRC Handbook of Chemistry and Physics.

ІНТЕНСИФІКУЮЧИЙ ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЮ НА ПРОЦЕС ВІДНОВЛЕННЯ ОКСИДІВ

Гришин О.М. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0000-0665-1179>, hryshyn@i.ua

Надточій А.А. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0000-0001-5077-0562>, Nadtochiy08@ukr.net

Губа Р.М. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0003-2173-517X>, roman.guba@sets.space

Хромовський С.А. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, romul.kira@gmail.com

Анотація. Метою роботи є розробка механізму інтенсифікуючого впливу електромагнітного поля на процес твердофазного відновлення оксидів газами. Експерименти проводили у змінному магнітному полі з частотою змінного току в індукторі від 50 Гц до 40 кГц. Процес газового відновлення досліджували із визначенням ступеню відновлення оксиду у діапазоні температур 973-1373 К з використанням різних залізорудних матеріалів. Результати лабораторних експериментів свідчать про вплив високочастотного електромагнітного поля, що інтенсифікує, на процес твердофазного відновлення залізорудних матеріалів. Представлено фізико-хімічну модель механізму інтенсифікуючого впливу ЕМП на процес відновлення. Високочастотне поле суттєво прискорює процеси дифузії, а також підвищує електронну та структурну дефектність кристалічних решіток, що позитивно впливало на розвиток адсорбційно-хімічної ланки.

Ключові слова: твердофазне відновлення, інтенсифікація, оксиди заліза, змінне електромагнітне поле, механізм впливу ЕМП

INTENSIFYING INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC FIELD ON THE OXIDE REDUCTION PROCESS

Grishin O.M., Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0000-0665-1179>, hryshyn@i.ua

Nadtochiy A.A., Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-5077-0562>, Nadtochiy08@ukr.net

Guba R.M. Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0003-2173-517X>, roman.guba@sets.space

Hromovskiy S.A. Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, romul.kira@gmail.com

Abstract. The aim of the work is to develop a mechanism for the intensifying effect of an electromagnetic field on the process of solid-phase reduction of oxides by gases. The experiments were carried out in an alternating magnetic field with an alternating current frequency in the inductor from 50 Hz to 40 kHz. The process of gas reduction was studied with the determination of the degree of oxide reduction in the temperature range of 973-1373 K using various iron ore materials. The results of laboratory experiments indicate the influence of a high-frequency intensifying electromagnetic field on the process of solid-phase reduction of iron ore materials. A physicochemical model of the mechanism of the intensifying effect of EMF on the reduction process is presented. The high-frequency field significantly accelerates diffusion processes, and

also increases the electronic and structural defects of crystal lattices, which positively affected the development of the adsorption-chemical link.

Keywords: solid-phase reduction, intensification, iron oxides, alternating electromagnetic field, mechanism of EMF influence

Матеріали наукових публікацій та результати наших досліджень свідчать про значний вплив електромагнітного поля (ЕМП), що інтенсифікує, на кінетику процесів твердофазного відновлення оксидів. ЕМП з різною інтенсивністю впливає на ланку газового відновлення та ланку газифікації вуглецю. Оптимізація параметрів електромагнітного поля пов'язана з уявленнями про механізм впливу, що інтенсифікує. Водночас літературні джерела містять дуже обмежений матеріал про механізм електромагнітного впливу на процес відновлення.

Різні зовнішні енергетичні (фізичні) впливи, як можливі регулятори перебігу фізико-хімічних процесів, давно привертають увагу дослідників [1,2]. Встановлено сильний вплив електромагнітних і корпускулярних випромінювань на процеси, що протікають у газовій та рідкій фазах. Так, під впливом α -частинок має місце прискорення реакцій розпаду монооксиду вуглецю, його окиснення та багатьох інших [3]. Ефекти, що спостерігалися, обумовлені збудженням газових молекул, їх іонізацією, утворенням атомів і радикалів. Подібні зміни відбуваються і в рідинах, де вони носять, однак, яскраво виражений локальний характер.

Випромінювання не тільки впливають на хід реагування газів між собою на поверхні твердих тіл (гетерогенний каталіз), але також змінюють швидкість взаємодії останніх з газами. Встановлено, що під опроміненням може прискорюватися окиснення металів та відновлення їх із оксидів. У ряді досліджень (напр. [4,5]) відзначалася значна інтенсифікація відновлення оксидів заліза H_2 та CO під впливом іонізуючого та гамма-опромінення (в ході реагування або попередньо); одночасно знижувалася температура початку перебігу процесу із помітною швидкістю. Слід зауважити, що позитивна дія γ -променів мала місце і у разі використання їх одночасно з каталізаторами [5]. Кінетичні зрушення, що спостерігалися, пов'язують зі сприятливими змінами умов хемосорбції газів, ослабленням зв'язків метал-кисень, з прискоренням дифузії іонів крізь кристалічні решітки і полегшенням зародження нових фаз.

Нами вивчені кінетичні закономірності та механізм відновлення оксидів заліза газами в умовах накладення на систему електромагнітних полів різної частоти, що реагує (до $5 \cdot 10^4$ Гц). В дослідженнях використані різноманітні залізорудні матеріали. Крім хімічно чистих оксидів заліза та промислових концентратів, відновленню піддавалися: Fe_2O_3 кваліфікації ЧДА, кристалічний (розмір частинок 0,5-2 мм); залізні руди в шматках і зернах різної крупності – лисаківська ($Fe_{зар} = 41,6-43,7 \%$), криворізький гематит ($Fe_{зар} = 54,7 \%$), магнетит ($Fe_{зар} = 56,7 \%$), багата мартитова руда (менше 1 % пустої породи); неофлюсовані та офлюсовані окатиші з рядового магнетитового концентрату, сирі та піддані окислювальному випалу при 1523 К; офлюсований агломерат основністю 1,1 та 1,33 з вмістом кисню 22,5 та 22,2 % відповідно.

Контрольні експерименти показали відсутність скільки-небудь помітного розігріву

зразків у змінному магнітному полі невеликих частот ($f \leq 50$ Гц). Це має бути пов'язано з низькими значеннями f і H , при яких індуковані вихрові струми та струми, зумовлені феромагнітними властивостями кристалічних фаз, вкрай малі. Отже, прискорення відновлення, що спостерігалось, не можна пояснити термічним ефектом.

Варіації температури в інтервалі 773-1073 К показали, що накладення магнітного поля найбільше прискорює процес при 873-973 К. До 973 К відновлення розвивалося східчасто; перевищення зазначеної температури призводило до зональної течії процесу. Подібні закономірності мали місце у дослідях із порошковими матеріалами – хімічно чистими Fe_2O_3 та Fe_3O_4 . Магнітне поле промислової частоти помітно форсувало видалення кисню практично протягом усього процесу.

Подальші дослідження були спрямовані на вивчення кінетики процесу за участю залізорудних матеріалів промислового типу. Відновлення магнетитового концентрату воднем і монооксидом вуглецю показало, що закономірності впливу магнітного поля, встановлені в дослідях із хімічно чистими препаратами, в основному зберігаються. Подібна картина мала місце й у потоці відновника різного складу – типу продуктів парової конверсії газу. Навіть в умовах досить інтенсивного розпаду СО видалення кисню шихти при накладенні магнітного поля помітно прискорювалося.

Високочастотне електромагнітне поле ($f \geq 2$ кГц) викликало суттєвий розігрів залізорудної шихти у процесі її відновлення. Термічний ефект зменшувався із зростанням температури; при 1073 К і вище він був практично відсутній. Розігрів шихти, що спостерігався, може бути переважно пов'язаний з вихровими струмами, обумовленими зміщенням кордонів доменів. Висока частота цих процесів, незважаючи на низьку напруженість поля, давала значний термічний ефект. Зниження f зменшувало фіксований розігрів зразка. У цьому напрямі діяв підйом температури, послаблюючи прояви феромагнетизму кристалічних фаз. Внесок звичайних індукованих струмів у ефект розігріву був порівняно невеликим.

Слід зазначити факт розігріву зразка був майже протягом всього процесу відновлення. Це пояснюється практично безперервною наявністю у шихті Fe_3O_4 або металевого заліза – перевірка показала, що обидві зазначені фази однаково успішно нагріваються у високочастотному полі. Оскільки магнітні силові лінії замикаються не через зовнішню поверхню зразка, а пронизують його, підйом температури мав місце по всьому об'єму шихти. Таким чином є принципова можливість нагрівання електромагнітним шляхом залізорудних матеріалів при їх металізації:

- відновлення при 673 К у звичайних умовах;
- відновлення у змінному полі ($f = 25$ кГц; $W = 30$) без стабілізації температури;
- відновлення у відсутності поля, але з відтворенням температурного режиму, ним обумовленого.

Дослідження дозволяють зробити висновок, що прискорення процесу за рахунок підйому температури становить в середньому $\sim 1/3$ загального ефекту інтенсифікації.

Такого висновку дозволяють дійти і результати другої серії експериментів, що відрізняються від попередньої стабілізацією температури у разі електромагнітних впливів:

- відновлення при 673 К у звичайних умовах;

– відновлення в змінному полі ($f = 42$ кГц; $W = 30$) зі стабілізацією температури по зовнішній термопарі на рівні 673 К;

– відновлення в звичайних умовах при 693 К, що практично відповідає максимальному розігріву зразка, що викликається змінним полем.

Зіставлення кінетичних даних свідчить про наявність електромагнітного ефекту, що майже втричі перевершує термічний. Подібна картина мала місце у процесі відновлення лисаківської руди при 773 К та в умовах більш високої напруженості поля $W = 50$.

Результати наших досліджень у сукупності з літературними даними дозволяють вважати, що одним із можливих механізмів впливу випробуваних впливів на процес відновлення є магнітострикційні коливання, що виникають у решітках кристалічних фаз. На користь такого висновку свідчать немонотонна зміна λ зі збільшенням H і зміна знаку магнітострикції заліза, які можуть стати причиною екстремальної залежності швидкості відновлення від величини напруженості поля. Криві лінійної магнітострикції полікристалів заліза за даними різних авторів не збігаються: в одних джерелах відзначається наявність яскраво вираженого максимуму поблизу $H = 24$ кА/м зі зміною знаку λ при $H = 40$ кА/м [6,7]; інші джерела вказують наявність екстремуму на кривій $\lambda = f(H)$. Проте всі характерні значення H досить близькі до оптимуму напруженості поля, при якому газове відновлення залізородних матеріалів за нашими дослідженнями протікало найбільш інтенсивне. Слід зазначити також, що максимальне прискорення процесу зовнішніми енергетичними впливами досягалося в умовах невисоких температур, коли феромагнітні властивості кристалічних фаз і магнітострикційні ефекти знаходилися на високому рівні [7].

Прямим підтвердженням реалізації та суттєвої ролі зазначених ефектів можуть бути результати досліджень газового відновлення лисаківської руди в умовах магнітних впливів низької частоти. Накладення змінного поля викликало диспергування залізородної шихти, особливо сильне в температурному інтервалі 773-833 К. Це пов'язане з магнітострикційними деформаціями, які створювали механічні напруження в рудних зернах і призводили до їх руйнування. Магнітострикційні коливання як фактор інтенсифікації відновлення можуть діяти за декількома напрямками, впливати на різні ланки процесу.

Результати досліджень показали, що прискорюючий ефект низькочастотних полів стає значним лише за підвищених витрат газу і збільшується зі зростанням W . Отже, зовнішній масоперенос не схильний до суттєвого впливу таких факторів. Високочастотні електромагнітні поля, навпаки, в умовах порівняно малих W форсували видалення кисню не менше ніж при підвищених витратах газу. Це свідчить про прискорення зовнішнього газообміну ними і може бути пояснено наступним. Кристалічні фази, що мають феромагнітні властивості, в умовах змінних електромагнітних впливів відіграють роль мініатюрних магнітострикційних вібраторів (малої потужності). Акустичні коливання ультразвукових частот, що генеруються ними, викликають «обурення» газової фази. Це сприяє газообміну між потоком відновника та поверхнею зразка; полегшує газообмін в об'єму шихти, в її міжзеренному просторі. Активація газових молекул ультразвуковими коливаннями в порах рудних частинок, мабуть, може сприяти внутрішньодифузійного транспорту газів.

Розглянуті вище ефекти посилюватимуться зі зростанням потужності електромагнітних впливів. Це, ймовірно, і стало однією з причин залежності швидкості відновлення, що спостерігалася, від величини $\mathcal{H}$. Подібний вплив може мати також зростання частоти ЕМП. Прояв феромагнетизму вище температури початку окиснення при накладенні зовнішнього поля обумовлює можливість впливу на газообмінні процеси у досить широкому діапазоні температур.

Значного впливу магнітострикційних коливань різних частот слід очікувати на розвиток кристалохімічних перетворень. Безперервна зміна в змінному полі умов рівноваги між вузлами кристалічних решіток має «розхитувати» їх, збільшувати рухливість іонів у твердих фазах. В результаті полегшуватимуться фазові перетворення при відновленні оксидів заліза. Дійсно, цим можна пояснити скорочення тривалості інкубаційного періоду і згладжування перегинів на кінетичних кривих, що спостерігалось в дослідах з накладенням поля.

Крім того, підвищена рухливість іонів повинна створювати сприятливі умови для перебігу реакційної дифузії, яка відіграє важливу роль у ході відновлення залізородних матеріалів. Позитивна дія змінних полів у цьому напрямі підтверджена результатами досліджень кінетики твердофазної взаємодії заліза з Fe_2O_3 та Fe_3O_4 .

Висновки

На базі аналізу кінетичних даних та результатів спеціальних досліджень – електрофізичних, структурно-мікроскопічних, закономірностей дифузійного газообміну, спираючись на положення фізики твердого тіла та теорії магнетизму, висунуто уявлення про механізм впливу змінних електромагнітних полів на швидкість відновлення оксидів заліза газами.

1. Вплив електромагнітного поля переважно обумовлений феромагнітними властивостями кристалічних фаз, які визначають зміну вільної енергії, магнітострикційні коливання решіток, розподіл та рух частинок під зовнішнім впливом; з вибіркоким поглинанням енергії електромагнітних хвиль частиною іонів кристала (що знаходяться в приповерхневому шарі, в оточенні структурних дефектів) та молекулами адсорбату; про виникнення контактної різниці потенціалів між оксидами заліза, що зумовлює їх односторонню провідність, та ін. В результаті цього форсується зовнішньо- та внутрішньодифузійний газообмін у ході відновлення.

2. «Розхитуються» кристалічні решітки твердих реагентів, утворюються додаткові структурні дефекти, що у свою чергу послаблює зв'язок Fe-O, полегшує зародження нових фаз та розвитку реакційної дифузії. Одночасно змінюється концентрація електронних дефектів та залежні від неї умови хемосорбції; відбувається активація молекул адсорбату, яка сприяє взаємодії H_2 , CO з киснем оксидів і десорбції продуктів – H_2O , CO_2 .

3. Сукупність зазначених ефектів призводить до диспергування твердих продуктів відновлення, утворення розвиненої мережі транспортних каналів і збільшення поверхні, доступної газам.

Бібліографічний список

1. Ertl G., Knözinger H., Weitkamp J. Handbook of Heterogeneous Catalysis. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1997. 2497 s. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527619474>
2. Pizzini S. Physical Chemistry of Semiconductor Materials and Processes. John Wiley & Sons, Ltd, 2015. 403 s. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118514610>
3. Singh A., Kremers W. Radiolytic dechlorination of polychlorinated biphenyls using alkaline 2-propanol solutions. *Radiation Physics and Chemistry*. 2002. Vol. 65. Is. 4-5. P. 467-472. [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(02\)00360-2](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(02)00360-2)
4. Pospíšil M., Topinka J. Effect of the ionizing radiation on the kinetics of the reduction by hydrogen of NiO-Fe₂O₃ mixed oxides of various genesis. *Collect. Czech. Chem. Commun.* 1986. Vol. 51, P. 1561-1570. DOI: <https://doi.org/10.1135/cccc19861561>
5. Holmboe M. Effect of gamma irradiation on the redox states of the structural iron in bentonite clay. 2023:14. ISSN: 2000-0456. Режим доступа: [202314-effect-of-gamma-irradiation-on-the-redox-states-of-the-structural-iron-in-bentonite-clay.pdf](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(02)00360-2)
6. Leszek B. Magalas, Golovin S. A., Darinskiy B. M. Mechanical Spectroscopy, Internal Friction and Relaxation Phenomena in Solids – Suggested Reading. *Solid State Phenomena*. 2006. Vol. 115. P. 15-24. DOI: [10.4028/www.scientific.net/SSP.115.15](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.115.15)
7. Симонов В.К., Руденко Л.Н., Ростовцев С.Т. Методика определения основных характеристик диффузионного массопереноса в условиях обтекания исследуемого образца газами. *Новые методы исследования процессов восстановления черных металлов*: сб.науч.тр. М.: Наука, 1974. С. 86-89.

ВПРОВАДЖЕННЯ НОВИХ ЕКОЛОГІЧНИХ В'ЯЖУЧИХ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВУГЛЕГРАФІТОВИХ ВИРОБІВ

Дерев'янка І.В., к.т.н., доцент кафедри електрометалургії, Український державний університет науки і технологій, просп. Науки 4, Дніпро, 49600, Україна (E-mail: Ihorsic@meta.ua, <https://orcid.org/0009-0000-9287-9558>),

Жаданос О.В., к.т.н., доцент кафедри електрометалургії, Український державний університет науки і технологій, просп. Науки 4, Дніпро, 49600, Україна (E-mail: Alexzhad1980@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9533-9933>),

Агеєв О.Г. аспірант кафедри електрометалургії, Український державний університет науки і технологій, просп. Науки 4, Дніпро, 49600, Україна (E-mail: Ageev_a_g@ukr.net.),

Реферат. Розвиток електротермічного виробництва, зокрема виробництва вуглеграфітової продукції, полягає в зниженні екологічного навантаження на виробництво. Одним із напрямків інноваційного розвитку технологій виробництва вуглеграфітових виробів є залучення альтернативних наповнювачів, зокрема в'язучих з низьким вмістом канцерогенних речовин.

Ключові слова: вуглеграфітові матеріали, холодно набивні маси, зв'язуючі, екологія, гуміти, гуміноіва кислота.

INTRODUCTION OF NEW ECOLOGICAL BINDERS FOR THE PRODUCTION OF CARBON GRAPHITE PRODUCTS

Ihor Derevyanko, Ph.D, Ass. Prof. Department of electrometallurgy, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky avenue, 4, Dnipro, 49600, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0000-9287-9558>, e-mail: Ihorsic@meta.ua,

Oleksandr Zhadanos, Ph.D, Ass. Prof., Department of electrometallurgy, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky avenue, 4, Dnipro, 49600, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-9533-9933>, e-mail: Alexzhad1980@gmail.com,

Ageev Oleksandr, Ph.D student, Department of electrometallurgy, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky avenue, 4, Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: Ageev_a_g@ukr.net

Abstract. The development of electrothermal production, in particular the production of carbon graphite products, consists in reducing the environmental burden on production. One of the areas of innovative development of technologies for the production of carbon graphite products is the involvement of alternative filler materials, in particular binders with a low content of carcinogenic substances.

Keywords: carbon-graphite materials, cold-pressed masses, binders, ecology, humites, humic acid.

Маса вуглецева холоднонабивна призначена для набивання міжблочних швів і заповнення компенсаційних зазорів у футеровці вуглеграфітових блоків доменних та феросплавних печей, алюмінієвих електролізерів та інших типів печей де використовується вугільні блоки [1].

Основним виробником вуглергафітової продукції в Україні є ПрАТ «Укрграфіт». На сьогоднішній день виробляються холоднонабивні маси марок МХТД та МХД середні значення технічних показників якості продукції наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Середні значення технічних показників якості холоднонабивних мас [2].

Технічні характеристики	Одиниця виміру	Типові значення	
Марка		МХТД	МХД
Щільність об'ємна (невипалена маса)	кг/м ³	1670	1600
Межа міцності на стиск (випалена маса)	МПа	24	25
Коефіцієнт теплопровідності при 10°C (невипалена маса)	Вт/м•К	12	8

Найважливішими властивостями подової маси, що впливають на термін служби футеровки, є час ущільнюваності в процесі набивання, ступінь усадки або розширення після випалу, якість наповнювача та сполучного. Прийнятий час ущільнюваності маси не має перевищувати 10 сек, і при випаленні вона повинна розширяться.

Основні експлуатаційні властивості холоднонабивна подова маса набуває у процесі ущільнення (набійки у швах) та подальшого випалу, тому для неї важливою характеристикою є гранулометричний склад наповнювача, максимальний розмір зерна, кількість сполучного. Набійні властивості маси залежать від пластичності маси, оптимальне значення якої досягається при температурах від 25 до 35°C [3].

При виробництві холоднонабивної маси в сполучну речовину ,кам'яновугільний пек, додають легко леткі модифікатори, наприклад, поглинальну олію (продукт сублімації кам'яного вугілля) та інші пластифікатори [4].

З метою зниження канцерогенності мас та екологічного навантаження все частіше використовують альтернативні пластифікатори отримані з одного або кількох органічних сполук таких як меласа, водний розчин глюкози [5].

Кафедрою електрометалургії УДУНТ проведено пошуки альтернативних сполучних та пластифікуючих речовин. Одним з напрямків дослідження є перспектива використання гумінів, гумітів та гумінових кислот. У таблиці 2 наведено оцінку середнього елементного складу низки гумітів.

Таблиця 2. Елементний склад гумітів (мас. %) [6].

Елемент	Деревина	Торф	Буре вугілля	Кам'яне вугілля	Антрацит
С	50	55	70	85	96

H	6	6	5	6	2
O+S+N	44	39	25	9	2

Гумінові кислоти є високо реакційно-здатними і активними іонообмінними речовинами, які утворюють міцні зв'язки з багатьма іонами і молекулами речовин, елементами, що знаходяться в розчині, а також включених в кристалічну структуру мінералів. Ці речовини вступають в реакцію взаємодії з катіонами металів з утворенням різного роду з'єднань. Питома поверхня їх становить приблизно 900 м² /г, що порівняно з питоною поверхнею, наприклад, активованого вугілля. Ці властивості посилюються наявністю в їх молекулах функціональних груп, характерних для ефективних комплексоутворювачів (наприклад, -COOH, -OH та ін.) [6].

Проведений аналіз фізико-хімічних властивостей гумітів та їх похідних, зокрема гумінової кислоти, показав що одним із напрямів вирішення питань зниження екологічного навантаження на виробництво вуглеграфітової продукції є залучення до технології високомолекулярних природних органічних сполук.

Бібліографічний список

1. Ферросплавні електропечі: [Підручник] / В.А. Гладких, М.І. Гасик, А.М. Овчарук, Ю.С. Пройдак. - Дніпро: Системні технології, 2007. - 259 с.
2. <https://ukrgrafit.com.ua/>
3. Пітюлін І.Н. Науково-технологічні основи створення кам'яно-вугільних вуглецевих матеріалів для великогабаритних електродів – Харків, - 2004 – 480 с
4. Бабенко, Е.М. Нові види сполучних матеріалів та технологія їх застосування у електродному виробництві. Дис... д-ра техн. наук. - Харків: УХІН, 1988.
5. Патент Франції №243839, кл. С 04 В 35/52, В 22 D 3/02, опубл., 1980 р.
6. Горова А.І., Орлов Д.С., Щербенко О.В. Гумінові речовини. Будова, функції, механізм впливу, протекторні властивості, екологічна роль. -К: Наук. думка, 1995. - 260 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАВЛЕННЯ ВУГЛЕЦЬКАРБІДОКРЕМНІЄВИХ БРИКЕТІВ В СТАЛЬ-КОВШІ ПРИ ПОЗАПІЧНІЙ ОБРОБЦІ СТАЛІ

Жаданос О.В., к.т.н., доцент кафедри електromеталургії, Український державний університет науки і технологій, просп. Науки 4, Дніпро, 49600, Україна (E-mail: Alexzhad1980@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9533-9933>),

Дерев'янка І.В., к.т.н., доцент кафедри електromеталургії, Український державний університет науки і технологій, просп. Науки 4, Дніпро, 49600, Україна (E-mail: Ihorsic@meta.ua, <https://orcid.org/0009-0000-9287-9558>)

Шепетяк Є.О. аспірант кафедри електromеталургії, Український державний університет науки і технологій, просп. Науки 4, Дніпро, 49600, Україна (E-mail: Egor4446@i.ua)

Мацишин В.Г. аспірант кафедри електromеталургії, Український державний університет науки і технологій, просп. Науки 4, Дніпро, 49600, Україна (E-mail: Vasiliy.dnepr@gmail.com)

Анотація. Досліджено процес взаємодії вуглецькарбідкремнієвих брикетів з залізовуглецевим розплавом під час позапечної обробки. Виконано розрахунок процесу плавлення цементної зв'язки CSIC-брикетів з використанням чисельних методів. За результатами виконаних досліджень отримана аналітична залежність часу розпаду брикету в залізовуглецевому розплаві від його розмірів, що дозволяє визначати його раціональний розмір при використанні в ковшовій металургії.

RESEARCH ON THE MELTING PROCESS OF CARBON-SILICON CARBIDE BRIQUETTES IN THE LADLE DURING SECONDARY STEELMAKING

Oleksandr Zhadanos, Ph.D, Ass. Prof., Department of electrometallurgy, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky avenue, 4, Dnipro, 49600, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-9533-9933>, e-mail: Alexzhad1980@gmail.com

Ihor Derevyanko, Ph.D, Ass. Prof. Department of electrometallurgy, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky avenue, 4, Dnipro, 49600, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0000-9287-9558>, e-mail: Ihorsic@meta.ua

Egor Shepetyak, Ph.D student, Department of electrometallurgy, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky avenue, 4, Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: Egor4446@i.ua

Vasil Matsyshyn, Ph.D student, Department of electrometallurgy, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky avenue, 4, Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: Vasiliy.dnepr@gmail.com

Abstract. The interaction process between CSIC-briquettes and iron-carbon melt during secondary steelmaking has been studied. The melting process of CSIC-briquettes' cement binder has been calculated using numerical methods. According to the results of the performed research, the analytical dependence between briquettes' breakdown time in iron-carbon melt and their size

has been obtained. This result allows us to determine the optimal size of briquettes for their use in secondary steelmaking.

Вступ

Під час виплавки сталі в сучасних електрометалургійних комплексах і киснево-конвертерних цехах науглецювання металу до заданого вмісту вуглецю здійснюють у ковші під час випуску розплаву з пічного агрегату або під час обробки на установці «електропіч-ківш». З досвіду вітчизняної та світової сталеплавильної промисловості відомо, що в якості матеріалів для науглецювання використовують антрацити, металургійний коксик, пековий кокс і нафтовий кокс або їхні суміші, вторинні вуглецеві матеріали (бій графітованих електродів, вуглецеві катодні футерування електролізерів тощо). Для науглецювання також використовують вторинні вуглець-карбідокремнієві матеріали у вигляді брикетів на цементній зв'язці [1, 2]. Висока механічна міцність CSiC-брикетів досягається завдяки гідратному твердінню цементу, який за хімічним складом можна віднести до концентраційної області системи $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$, що характеризується відносно високою (1550°C) температурою плавлення. Цемент, обволікаючи частинки вуглецю та SiC, запобігає їхньому окисленню на початковому етапі взаємодії з металом, який нерозкислений.

Постановка завдання дослідження

Поряд з вибором вихідного компонентного та гранулометричного складу для отримання брикетів, які застосовуються для науглецювання розплаву в ковші, важливим також є визначення раціональних розмірів брикетів. До розміру брикетів, що використовуються в ковшовій металургії, пред'являються такі вимоги: з одного боку, брикет повинен повністю взаємодіяти з залізовуглецевим розплавом за час випуску металу зі сталеплавильного агрегату, а, з іншого боку, розміри його повинні забезпечити мінімальні втрати за рахунок винесення матеріалу з ковша за рахунок конвективних потоків. Для оптимізації розмірів брикетів у цій роботі проведено теплофізичний аналіз процесів, які відбуваються при взаємодії CSiC-брикетів з металом.

Аналіз процесу плавлення CSiC-брикетів в сталевому розплаві

Процес взаємодії CSiC-брикетів із залізовуглецевим розплавом можна розділити на кілька стадій: заморожування кірочки розплаву на поверхні брикету; плавлення замороженого шару; нагрівання брикету до температури плавлення цементу та інтенсивне стаціонарне плавлення цементної зв'язки, взаємодія вуглецю та SiC з металом [3]. При математичному моделюванні приймаємо припущення, що брикет має форму кулі.

У перший момент початку взаємодії розплаву з брикетом швидкість відведення теплоти від поверхні всередину тіла перевищує швидкість підведення теплоти з розплаву до його поверхні, внаслідок чого метал намерзає на брикеті. Цей процес завершується за рівності зовнішнього $q_{\text{зовн}}$ і внутрішнього $q_{\text{внут}}$ теплових потоків. Надалі зовнішній тепловий потік перевершує внутрішній, і намерзла кірочка плавиться. Математичний опис цих процесів ґрунтується на диференціальному рівнянні теплопровідності:

$$\left. \frac{\partial t}{\partial \tau} = a_{\bar{\sigma}p} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right) \right\}; \quad (1)$$

$$(0 < r < r_{noch}; \tau > 0)$$

де $a_{\bar{\sigma}p}$ – ефективний коефіцієнт теплопровідності брикету; r_{noch} – початковий радіус кулі.

Граничні умови матимуть вигляд:

а) на етапах наморозжування та подальшого плавлення сталеві кінорчки

$$\alpha \cdot (t_{розп} - t_{нов}) \pm q_{скр.кп} \cdot \rho_{кп} \frac{dx}{d\tau} = -\lambda_{\bar{\sigma}p-кп} \cdot \frac{\partial t}{\partial x}, \quad (2)$$

де $\lambda_{\bar{\sigma}p-кп}$ – коефіцієнт теплопровідності системи брикет-кінорчка; $\rho_{кп}$ – густина кінорчки; $q_{скр.кп}$ – приховане тепло, що виділяється при наморозжуванні або поглинається при плавленні кінорчки; α – коефіцієнт тепловіддачі від розплаву до поверхні системи брикет-кінорчка; $t_{розп}$ – температура розплаву; $t_{нов}$ – температура поверхні системи брикет-кінорчка.

б) на етапі безпосереднього плавлення брикету

$$\alpha \cdot (t_{розп} - t_{нов}) \pm q_{скр.бр} \cdot \rho_{бр} \frac{dx}{d\tau} = -\lambda_{\bar{\sigma}p} \cdot \frac{\partial t}{\partial x}, \quad (3)$$

де $\lambda_{\bar{\sigma}p}$ – коефіцієнт теплопровідності брикету; $\rho_{бр}$ – густина кінорчки; $q_{скр.бр}$ – приховане тепло, що поглинається при плавленні брикету.

Одночасно з процесом наморозжування та плавлення кінорчки відбувається нагрівання брикету до температури плавлення цементної зв'язки. Зв'язка брикету, прогрітого до температури плавлення цементу, починає плавитися з постійною швидкістю, оскільки різниця температур $t_{розп} - t_{нов}$ і тепловий потік з об'єму розплаву до поверхні брикету не змінюються. На основі прийнятих припущень, визначимо час повного розплавлення цементної зв'язки брикету в залізобетонному розпаві залежно від їх геометричних розмірів. Приймаємо, що температура розплаву в період плавлення зв'язуючого брикету є постійною і дорівнює 1600°C.

Розрахунок стадій наморозжування сталеві кінорчки та її розчинення, а також прогрівання брикету є завданням нестационарної теплопровідності з граничними умовами третього роду [4]. При розрахунках приймали, що час циклу обчислень Δt становив 1 с, протягом якого розміри брикетів залишаються постійними.

Аналіз результатів.

Реалізацію представленої математичної моделі проводили на ПЕОМ. Проведені розрахунки показали, що процес плавлення цементної зв'язки та, отже, розпаду брикету залежно від його радіусу становить від 3 до 17 хв (рис. 1).

За результатами виконаних за допомогою розробленої математичної моделі досліджень отримано залежність часу розпаду брикету у сталевій ванні від його розмірів:

$$\tau = 6,61 \cdot r_{\bar{\sigma}p} - 7,33. \quad (4)$$

Радіус брикету в залежності від ємності ковша вибирається в кожному конкретному випадку з отриманої залежності [5].

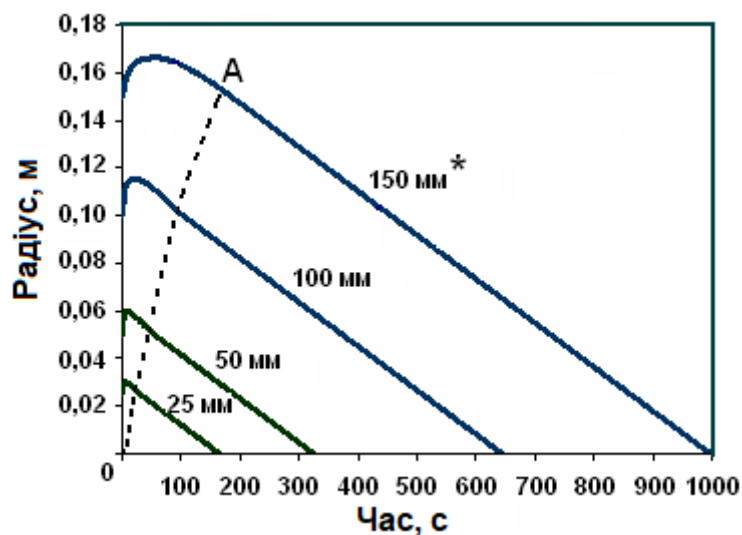


Рис. 1 - Зміна радіусу системи брикет - кірочка в залежності від розмірів брикету та часу перебування брикету в розплаві температурою 1600°C*

Висновки

1. Розроблено теплофізичну модель взаємодії вуглець-карбідокремнієвих брикетів із залізовуглецевим розплавом при ковшевій обробці (легуванні).
2. Розраховано процес плавлення цементної зв'язки CSiC-брикетів з використанням ПЕОМ.
3. Проведені розрахунки показали, що процес плавлення цементної зв'язки та, отже, розпаду брикету залежно від його радіусу (25-150 мм) становить від 3 до 17 хв.
4. Отримано аналітичну залежність часу розпаду брикету в залізовуглецевому розплаві від його розмірів, що дозволяє визначати його раціональний розмір при використанні в ковшовій металургії.

Бібліографічний список

1. Дерев'янко І.В.. Технологія отримання вуглець-карбідокремнієвих брикетів і застосування їх для науглецювання сталевій ванни. Дис. канд. техн. наук. - Дніпропетровськ: НМетАУ, 2007.
2. Advanced technologies for smelting the steel in EAF using the CSiC briquettes / Gasik, M.I.; Ovcharuk, A.N.; Semenov, I.A.; Derevyanko, I.V. // Stal' - 2004. - Issue 4, 2004, Pages 31-36.
3. Меджибозький М.Я. Основи термодинаміки та кінетики сталеплавильних процесів: навч. посібник для вузів/М.Я. Меджибозький – Київ-Донецьк: Вища шк. Головне вид-во, 1979. - 280 с.

*Числа у кривих – вихідний радіус CSiC-брикетів; А – лінія, що розмежовує область наморозування – плавлення металеві кірочки та область плавлення цементної зв'язки

4. Рум'янцев В.Д., Ольшанський В.М. Теплотехніка: Навчальний посібник / Під ред. В.І. Губінського. – Дніпропетровськ: Пороги, 2002. – 325 с.
5. Жаданос А.В. Теплофізична модель взаємодії вуглецевих карбідокремнієвих брикетів з металом-напівпродуктом при позапічній обробці сталі / О.В. Жаданос, І.В. Дерев'янка // Металургійна теплотехніка: сб. наук. праць Національної металургійної академії України, 2013 – вип. 4 (19) – Дніпропетровськ: Нова ідеологія – С. 78-81.

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ІНТЕГРАЦІЇ ПРОЦЕСІВ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ТА ПРОКАТКИ У МОДУЛЬНИХ МЕТАЛУРГІЙНИХ СИСТЕМАХ

А.З. Ціколія, аспірант, Кафедра галузевого машинобудування, Інститут промислових і бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна, E-mail: Anzor0409@gmail.com

Д.О. Кононов, к.т.н., доц., Кафедра галузевого машинобудування, Інститут промислових і бізнес технологій, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49010, Україна, ORCID 0000-0001-9505-5298, E-mail: d.o.kononov@ust.edu.ua.

Анотація. Аналіз розвитку безперервного лиття сталі як ключового етапу сучасного металургійного виробництва, з акцентом на інтегровані ливарно-прокатні модулі. Визначено технологічні переваги об'єднання процесів розливу та гарячої прокатки, їхній вплив на продуктивність, енергоефективність і якість продукції. Окреслено перспективи подальшої модернізації ливарно-прокатних комплексів з урахуванням сучасних викликів галузі.

Ключові слова: безперервне лиття сталі, МБЛЗ, ливарно-прокатний модуль, гаряча прокатка, інтегроване виробництво, металургійне устаткування

ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL INTEGRATION OF CONTINUOUS CASTING AND ROLLING PROCESSES IN MODULAR METALLURGICAL SYSTEMS

A.Z. Tsikolia, PhD Student, Department of Industrial Engineering, Institute of Industrial and Business Technologies, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2 Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, E-mail: Anzor0409@gmail.com

D.O. Kononov, Ph.D. (Tech.), Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Institute of Industrial and Business Technologies, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2 Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, ORCID 0000-0001-9505-5298, E-mail: d.o.kononov@ust.edu.ua.

Abstract. This study analyzes the development of continuous steel casting as a key stage in modern metallurgical production, with a focus on integrated casting-rolling modules. The technological advantages of combining casting and hot rolling processes are identified, emphasizing their impact on productivity, energy efficiency, and product quality. The prospects for further modernization of casting-rolling complexes are outlined, considering the current challenges in the industry.

Keywords: continuous steel casting, CCM, casting-rolling module, hot rolling, integrated production, metallurgical equipment.

Вступ

Сучасне металургійне виробництво активно розвивається у напрямку підвищення ефективності, якості продукції та зменшення витрат. Однією з ключових інновацій, що значно вплинула на ці аспекти, є впровадження безперервного лиття сталі. Цей процес, який замінив традиційне розливання у виливниці, дозволив здійснювати кристалізацію рідкої сталі у напівфабрикати — сляби, блюми — без зупинки технологічного потоку.

Безперервне лиття не тільки скорочує виробничий цикл, а й забезпечує стабільну якість та високий вихід придатної продукції. На його основі створено новітні інтегровані виробничі комплекси, такі як ливарно-прокатні модулі (ЛПМ), які поєднують процеси розливу та гарячої прокатки, що ще більше підвищує ефективність виробництва сталі.

Мета дослідження полягає в аналізі технологічної інтеграції процесів безперервного лиття та прокатки в модульних металургійних системах з метою підвищення ефективності виробництва, зниження енергетичних та матеріальних витрат, а також поліпшення якості кінцевої продукції. Дослідження спрямоване на виявлення технологічних переваг інтеграції цих процесів, а також на розробку рекомендацій для подальшої модернізації ливарно-прокатних комплексів у відповідь на сучасні виклики галузі.

Процес безперервного лиття сталі

Безперервне лиття сталі — це сучасний процес, у якому рідка сталь безупинно кристалізується у заготовку певного поперечного перерізу: сляби, блюми. Цей метод був розроблений у 1950-х роках для підвищення продуктивності порівняно з традиційним литтям у виливниці, яке хоча й зберігає певні переваги, вже не відповідає сучасним вимогам щодо ефективності виробництва. Процес починається з подачі сталі з установки вторинної металургії до машини безперервного лиття.

Рідка сталь надходить з ковша через тундиш до мідного кристалізатора, де починається затвердіння. Заготовка формується та проходить охолодження в системі вторинного зрошення, після чого розрізається та направляється на подальшу переробку або зберігання. Цей процес забезпечує високу якість продукції та безперервність технологічного циклу.

Ливарно-прокатний комплекс з МБЛЗ

Ливарно-прокатні комплекси з МБЛЗ (машинами безперервного лиття заготовок) являють собою високоефективні інтегровані системи, що поєднують процес безперервного лиття сталі та її наступну гарячу прокатку. На відміну від класичних МБЛЗ, де напівфабрикати (сляби, блюми або заготовки) після лиття охолоджуються, зберігаються, а потім знову нагріваються для прокатки, у ливарно-прокатних модулях ці етапи об'єднані в єдиний безперервний процес. Це дозволяє скоротити втрати тепла, зменшити споживання енергії та підвищити продуктивність.

Структура ЛПМ (на прикладі виробництва гарячекатаного рулонного прокату):

- **Сталеплавильна ділянка** — включає киснево-конвертерні або електросталеплавильні агрегати, а також установку доведення сталі (наприклад, «ковш-піч», вакууматор).
- **Тонкослябова машина безперервного лиття заготовок (МБЛЗ)** — використовується одна або кілька установок, оснащених електромагнітними перемішувачами, м'яким обтисканням та іншими системами поліпшення якості.
- **Проміжне нагрівання** — іноді між МБЛЗ і прокатним станом встановлюються індукційні або роликові печі, якщо затримка між литтям і прокаткою є значною, але часто процес відбувається без додаткового підігріву.

- **Стан гарячої прокатки** — використовується безперервний стан або стан типу Стеккеля. Особливість — можливість прокатки тонкослябових заготовок без попереднього охолодження.
- **Моталка та система транспортування рулонів** — забезпечує змотування прокатоного металу у рулони. Встановлюються летючі ножиці для розкрою та розділення стрічки.

Основні відмінності від класичної МБЛЗ-схеми:

- У класичній схемі сталь після лиття охолоджується, транспортується і окремо прокатується — часто на іншому обладнанні і з перервами між операціями.
- ЛПМ дозволяє уникнути повторного нагріву, що знижує витрати енергії на 30–50% і скорочує технологічний цикл на декілька годин.
- Завдяки безперервному процесу досягається вища рівномірність структури металу та менше включень.
- ЛПМ займає менше простору порівняно з класичними схемами.

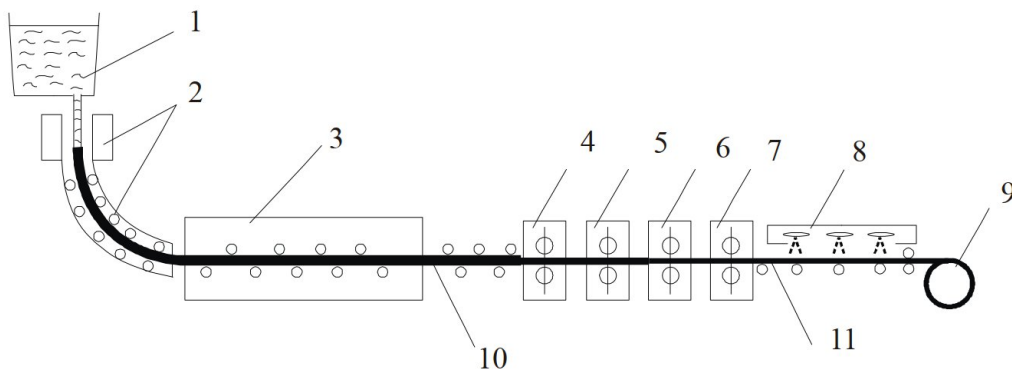


Рис.1. Ливарно-прокатний комплекс з МБЛЗ

1 - ковш з рідкою сталлю, 2 – машини безперервної розливки сталі, 3 – піч відпалу, 4..7 – прокатні кліті, 8 – відводючий рольганг з душуючим пристроєм, 9 – моталка штаби в рулон, 10 – швидкість заготовки - 0,23 м/с, товщина – 50мм, 11 – швидкість штаби – 4,6м/с, товщина – 2,5мм.

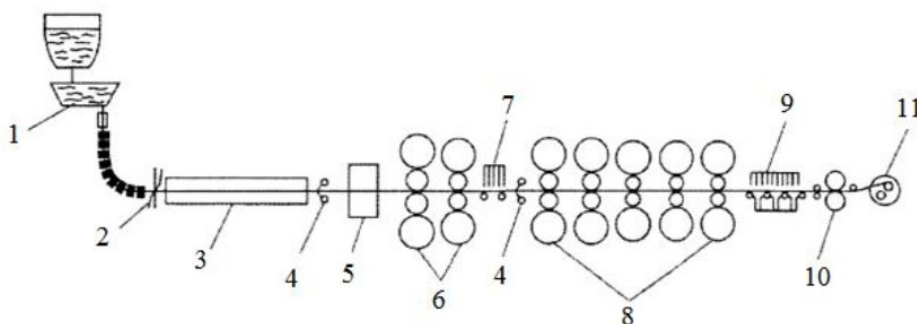


Рис.2. Схема агрегата DSP

1 – машина для лиття тонких слябів; 2 – маятникові ножиці; 3 – нагрівальна туннельна піч; 4 – устаткування для явидалення окалини; 5 – кліть з вертикальними валками; 6 – чорнові кліті; 7 – устаткування для переміжного охолодження; 8 – безперервна чистова група клітей; 9 – холодильник; 10 – летучі ножиці; 11 – моталка

Конструкція ливарно-прокатних модулів дозволяє виготовляти продукцію широкого марочного та розмірного асортименту. Зокрема, вони вже дозволяють отримувати прокат завтовшки від 0,6 мм, який є недоступним при використанні традиційних схем гарячого прокатування. Крім того, існує можливість модифікації ЛПМ залежно від виробничих потреб, у тому числі прибудови до них обладнання для отримання продукції глибших переділів (наприклад, ліній травлення, прокатних станів та агрегатів безперервного відпалу, що дозволяють випускати холоднокатану рулонну продукцію в єдиному з ЛПМ виробничому потоці).

Існують кілька модифікацій ливарно-прокатних технологій, серед яких найбільш відомими є:

- CSP (Compact Strip Production) — розробка компанії SMS Group, яка базується на литті тонкої слябової заготовки з її подальшим прокатуванням на тонколистовий прокат. Відзначається компактністю обладнання та високою енергоефективністю.
- ISP (In-line Strip Production) — характеризується прямим поєднанням МБЛЗ із прокатною кліткою без потреби у проміжному охолодженні чи накопиченні заготовок. Дозволяє досягати високої продуктивності та стабільної якості стрічки.
- ESP (Endless Strip Production) — технологія від Primetals Technologies, що дозволяє безперервне лиття і прокатку без зупинок, завдяки чому значно знижуються витрати на енергію та покращується якість продукції за рахунок рівномірності процесу.
- TSP (Tippins-Samsung Process) — менш поширена, але ефективна система, яка включає інтегроване рішення для виготовлення гарячекатаного прокату шляхом мінімізації часу між литтям і прокаткою.

Ці технології активно впроваджуються на сучасних металургійних комбінатах і є ключовими у створенні високоефективних, компактних та економічно вигідних виробничих ліній. Їх вибір залежить від типу продукції, яку необхідно отримати, вимог до якості та доступних інвестицій у технічне обладнання.

Висновки

Аналіз технологічної інтеграції процесів безперервного лиття та прокатки в рамках модульних металургійних систем показує значний потенціал для підвищення ефективності та зниження витрат у виробництві сталі.

Об'єднання процесів розливу та гарячої прокатки в ливарно-прокатних модулях дозволяє скоротити енергетичні витрати, знизити технологічний цикл та підвищити якість продукції.

Впровадження таких технологій, створює можливості для досягнення високої продуктивності та стабільної якості, що важливо для сучасних металургійних комбінатів. Подальші інновації в галузі та оптимізація інтеграції процесів безперервного лиття та прокатки можуть стати важливим кроком для збільшення глобальної конкурентоспроможності металургійних підприємств.

Бібліографічний список

1. Серода, Б.П. Металознавство та термічна обробка чорних та кольорових металів / Б.П. Серода. – Запоріжжя: ЗДІА, 2008. – 302 с.
2. Калан, А.С. Стандартизация качественной стали / А.С. Калан. – М.: Металлургия, 1972. – 391 с.
3. Пикеринг, Ф.Б. Физическое металловедение и разработка сталей / Ф.Б. Пикеринг. – М.: Металлургия, 1982. – 184 с.
4. Грудев, А.П. Технология прокатного производства / А.П. Груднев, Л.Ф. Машкин, М.И. Ханин. – М.; Металлургия, 1994. – 656 с.
5. Коновалов, Ю.В. Справочник прокатника. Кн. А. Производство горячекатаных листов и полос / Ю.В. Коновалов. – М.; Теплотехник, 2008. – 640 с.
6. Минаев, А.А. Совмещенные металлургические процессы / А.А. Минаев. – Донецк: Технопарк, 2008. – 552 с.
7. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Освоєння виробництва прокату товщиною 1,2 мм на стані 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛПЧА»”, Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, №5 (265), сс. 171-175.

ХАРАКТЕРИСТИКА ВУГЛЕЦЕВИХ ВІДНОВНИКІВ ДЛЯ ВИПЛАВКИ ФЕРОСИЛІЦІЮ З ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ КРЕМНІЮ

В.П. Кравченко¹, В.А. Гладких¹, А.В. Рубан¹, Є.Д. Малий¹

1. Український державний університет науки і технологій, Україна, м. Дніпро, просп. Науки, 4, 49600

Анотація. Наведено огляд актуальної ситуація та розглянуто перспективи забезпечення виробників високовідсоткового феросиліцію відновниками. Наведено інформацію про природу та характеристики найбільш поширених і доступних вуглецевмісних матеріалів, що використовуються для виробництва феросплавів. Обрано шляхи подальшої роботи з підбору найбільш раціонального відновника для його використання під час виплавки феросиліцію в умовах феросплавних заводів України.

Ключові слова: феросиліцій, вуглець, відновник, вугілля, кокс

CHARACTERISTICS OF CARBON REDUCING AGENTS FOR SMELTING FERROSILICON WITH HIGH SILICON CONTENT

V.P. Kravchenko¹, V.A. Gladkikh¹, A.V. Ruban¹, E.D. Maly¹

1. Ukrainian State University of Science and Technology, ave. Nauky, 4, Dnipro, Ukraine, 49600

Abstract. The current situation is reviewed and the prospects for providing high-percentage ferrosilicon producers with reducing agents are considered. Information is provided on the nature and characteristics of the most common and available carbon-containing materials used for the production of ferroalloys. Ways for further work on selecting the most rational reducing agent for its use during ferrosilicon smelting in the conditions of ferroalloy plants in Ukraine are selected.

Keywords: ferrosilicon, carbon, reductor, coal, charcoal, coke

Феросиліцій — сплав кремнію із залізом, який широко використовується в металургії для розкислення та легування під час виробництва майже всіх марок сталі. Феросиліцій виробляють шляхом відновлення кремнію з кварциту вуглецевими відновниками у присутності заліза (вуглецевотермічний спосіб). Головними компонентами шихти для виробництва феросиліцію є: кварцит, вуглецевий відновник та сталева стружка або інший залізовмісний матеріал з мінімальним вмістом вносимої порожньої породи.

Вуглецевий відновник є другим після кварциту найважливішим компонентом шихти. Хоча в цьому процесі можуть бути використані різні вуглецеві відновлювальні матеріали, запаси їх обмежені. Основним відновником є кокс, проте використовуються також нафтовий кокс та вугілля. Основним джерелом вуглецю є вугілля. Вугілля може бути використане лише частково безпосередньо як відновник у печах закритого типу із зануреною дугою. Обмеження викликані частково міркуваннями безпеки виробництва та частково у зв'язку з виникаючими природоохоронними проблемами та безпекою працівників на виробництві. Залежно від технологічного процесу вимоги до відновника дуже різні. Вибір найбільш відповідного залежить від різних факторів: вимоги до кінцевого продукту та технології виробництва; собівартості; доступності; впливу на довкілля (наприклад викид шкідливих газів). Матеріали, що виробляються з біомаси, такі як деревне

вугілля, можуть певною мірою замінити викопний вуглець. Вуглецеві матеріали є складними системами з широким діапазоном фізичних та хімічних властивостей. Хімічний склад впливає на реакційну здатність відновника, якість продукту, питоме споживання електроенергії та кількість витраченого відновника. Фізичні властивості впливають на ефективність та продуктивність відновлювального процесу та процесу плавки.

Для вуглецевого відновника важливо:

1. Оптимальне співвідношення реакційної здібності вуглецю та фізичних властивостей для використання у феросплавних печах (фракція, міцність, вміст летких речовин тощо).
2. Прийнятна (відносно невисока) електропровідність.
3. Фракційний склад.
4. Мінімальний вміст шкідливих домішок.
5. Вартість.

Вугілля є надзвичайно складним гетерогенним матеріалом, для якого дуже важко скласти конкретні специфікації. Це порода осадового типу, що утворилася у результаті геологічних процесів. Вона складається з певного типу органічних речовин, які називаються «мацералами». У меншій кількості в цій породі присутні неорганічні речовини – мінерали. Вугілля формується з органічних покладів, більшість яких сформувалося з болотного торфу. Вугілля утворилося шляхом вуглефікації торф'яних відкладень. Процес вуглефікації залежить від температури породи, тиску та часу. Вуглефікація проходить через наступні стадії: лігніти, суб-бітумне вугілля, бітумне вугілля, антрацити. Тобто від низькосортних до високосортних сортів вугілля. Кількість летких матеріалів, кисню та водню зменшується у міру підвищення сорту вугілля, а кількість вуглецю збільшується. Високосортні типи вугілля багаті вуглецем і мають високу енергоємність. Фіксований вуглець (С-нелетучий) є твердим, відмінним від попелу осадом, що залишається після виділення летких речовин у результаті піролітичного розкладання. Кількість летких речовин зменшується з 75% для деревини, до менш ніж 3% для антрациту. У той же час, кількість кисню зменшується з 40% до 2%. Різниця між загальною кількістю вуглецю та «фіксованим» вуглецем дає кількість летких речовин.

Коксування – це процес нагрівання вугілля без повітря для виведення летких речовин. Розрізняються низькотемпературне та високотемпературне коксування. Низькотемпературне проходить при температурі близько 500°C. Таке коксування ще називається напівкоксування. Напівкокс все ще містить значну кількість водню. Вихідний газ містить велику кількість гідрокарбонатів та смол, а також невелика кількість вільного водню. Низькотемпературний кокс представляє обмежений інтерес для металургії. Він використовується для виробництва кремнію та феросиліцію. Високотемпературне коксування проводиться за температури вище 1000°C. Для коксування вугілля піддають дробленню, щоб 80-90% складало фракцію 3-мм та менше. Також змішуються кілька типів вугілля, щоб мати можливість контролювати процес його розширення в печі для отримання необхідної якості. Основу складають бітумне вугілля. Майже весь кокс виробляється в коксових батареях, що складаються з великою кількістю печей. Вугільна шихтова суміш нагрівається теплом від стін камери протягом 14-20 годин. Спочатку біля стін камери

утворюється пластична зона, а потім вона поширюється на середину. При нагріванні до 350 °C - 500 °C вугілля спочатку проходить стадію часткової плинності. При подальшому нагріванні кашоподібна суміш твердне в кокс. Максимальна температура в центральній частині сягає 1100°C. При цьому майже всі леткі речовини виводяться. У коксі в кінці процесу їх кількість складає 1-2%. Газ насичується воднем та метаном, тоді як вищі вуглеводни та смоли розкладаються під дією високих температур. Також газ містить CO, CO₂, H₂O, C₂H₆, H₂S, і NH₃ в незначній кількостях. Після закінчення процесу, кокс виводиться з печі і охолоджується або сухим способом або шляхом «мокрого гасіння». Механічна міцність коксу може змінюватись. Вона залежить від суміші використовуваного вугілля. Шляхом змішування різних видів вугілля досягаються специфічні властивості коксу. Доменне вугілля має бути механічно міцним, а також залишатися міцним після реакції в шахті доменної печі, тобто мати високий показник міцності після реакції (CSR). Для електричних печей із зануреною дугою можна використовувати менш міцний кокс. Більше 90% всього виробленого металургійного коксу використовують у доменних печах для виробництва чавуну і лише певна частка – для феросплавів.

Кокс демонструє широкий діапазон хімічних та фізичних властивостей. Хімічні властивості в основному впливають на реактивність відновника та на його витрату. Ті ж властивості впливають на якість продукту та енергоспоживання під час плавки. Фізичні властивості певною мірою впливають на ефективність та продуктивність роботи печі. Для того, щоб зрозуміти процеси, що проходять при використанні коксу в печі, необхідно розпочати зі складу та петрології вихідного вугілля. Так саме як відбивну здатність вітринітів і склад мацералів можна співвідносити з фізичними та хімічними властивостями вугілля, стабільність та реактивність коксу можна визначити з вивчення вихідного вугілля на мікроскопічному рівні та за технологічними складовими виробництва коксу.

Деревне вугілля має високий електроопір, низьку об'ємну масу і високу CO₂-реактивність у порівнянні з коксом. Деревне вугілля використовувалося як відновник у дугових печах протягом багатьох років. Особливо це стосується Бразилії. Між коксом та деревним вугіллем є суттєві відмінності. Зазвичай деревне вугілля містить менше фіксованого вуглецю і більш високий вміст летких речовин, а вміст золи відносно невеликий (у порівнянні з коксом). Високий опір деревного вугілля дозволяє печі функціонувати з більшою ефективністю щодо споживання електроенергії. Основним недоліком його є низька механічна міцність та висока вартість. У зв'язку з високими природоохоронними витратами (податки та вартість квот на емісію CO₂).

Найбільш дешевим, доступним і поширеним відновником для феросплавного виробництва довгий час був коксовий горішок. Коксовий горішок (10-25 мм) - одна з фракцій, що утворюються при подрібненні та розсіві «кокового пирога» під час виробництва металургійного коксу. Він застосовується у всіх процесах, де допускається використання відновника із відносно високою зольністю (10-15% A^C). Галузеві стандарти на коксовий горішок регламентують лише показники зольності та вміст дрібняка <10 мм. За вмістом сірки, фосфору та виходу летких речовин (V^T) коксовий горішок повинен відповідати вимогам, передбаченим для цих показників стандартами на доменний кокс. При цьому не враховуються хімічна активність та питомий електроопір, а також низька

інших властивостей. Якість коксового горішка, його електроопір, пористість, хімічна активність можуть сильно коливатися в залежності від застосованого кам'яного вугілля і режиму коксування. Досвід АТ «Запорізький феросплавний завод» (АТ ЗФЗ) свідчить, що результати застосування у технології виплавки феросиліцію коксового горішка різних виробників можуть значно відрізнятися, при цьому стандартні показники якості можуть бути близькими або навіть однаковими. Таким чином, існуючі стандарти, що регламентують якість коксу і вугілля не повною мірою характеризують їх властивості як відновників для виробництва феросплавів.

Значна частина закордонних виробників вирішували питання оптимізації відновника шляхом переходу на використання вугілля певних родовищ або у складі сумішей, або навіть до 100% використання. Досить часто використання вугілля обмежене екологічними вимогами чи технологічними особливостями, що мають місце на тому чи іншому підприємстві. Наприклад, закриті печі, високопотужні печі, конструкції газоочищення, особливості систем подачі сировини та ін.

Для «компенсації» недоліків, властивих традиційному коксовому горіху, як відновнику при виробництві феросплавів, українські підприємства також прагнуть застосувати різні вуглецевмісні матеріали. Опрацьовується і можливість додавання у шихту до відновної частини вугілля саме довгопламенної та газової групи місцевих родовищ. Також розглядаються можливості виробництва коксу зі специфічними властивостями, що більш задовольняють вимогам феросплавного виробництва.

Отримання вуглецевих відновників, що відповідають вимогам електротермічних виробництв, є актуальним питанням і досить складною проблемою, для вирішення якої необхідно:

- ~ формування об'єктивних параметрів якісної відновлювальної суміші;
- ~ поглиблений аналіз доступних вуглецевих відновників;
- ~ розробка рекомендацій щодо зміни структури забезпечення вуглецевими матеріалами;
- ~ оцінка ефективності запропонованих заходів.

З урахуванням об'єктивної зміни характеристик коксу, що виробляється, та в умовах постійного зростання ціни електроенергії питання підбору оптимального відновника для виплавки феросиліцію набуває особливої актуальності та вимагає глибшого аналізу.

Бібліографічний список

1. Кравченко В.П., Гладких В.А., Аносов О.В. та ін. Аналіз якості шихтових матеріалів при виробництві висококремністого феросиліцію // Теорія і практика металургії №3, 2023, С10-14.
2. В.Л. Зубов, М.І. Гасик. Електрометалургія феросиліцію. Дніпропетровськ: Системні технології, 2002. – 704 с.
3. В.Л. Зубов, М.І. Гасик, А.М. Овчарук. Структурні параметри, вуглехімічні та металургійні властивості вуглецевих відновників для виробництва феросплавів. Дніпропетровськ: Національна металургійна академія України, 2011. – 158 с.

4. М.І.Гасик, М.П. Лякішев. Фізикохімія і технологія електроферосплавів. Підручник для ВНЗ. Дніпропетровськ: ДНВП Системні технології, 2005. – 448 с.
5. Production of Manganese Ferroalloys/ S.E. Olsen, M. Tangstad, T. Linstad// © SINTEF and Tapir Academic Press, Trondheim 2007.

ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗА З ОКСИДІВ НІКЕЛЕВОЇ РУДИ В ТРУБЧАСТІЙ ОБЕРТОВІЙ ПЕЧІ З ВИКОРИСТАННЯМ В ЯКОСТІ ВІДНОВНИКІВ ВУГІЛЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ГРУП

Мельник С. О. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0009-3964-312X>, samelnik2016@gmail.com

Акреєв В. В. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0009-3705-4129>, akreev@gmail.com

Приходько С. В. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0005-0013-2198>, svprima@gmail.com

Овчарук А. М. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0007-0218-2513>, tehnosplavy.dnepr@gmail.com

Анотація. Вивчення процесів твердофазного відновлення заліза з оксидів з використанням в якості відновника вугілля антрацитових та енергетичних груп. Визначення залежності співвідношення відновників, що використовуються для відновлення металів у руднотермічній печі. В результаті виділення летких компонентів у процесі нагрівання вугілля двох марок за температур 300-1050 °С, визначені оптимальні співвідношення вугілля, що забезпечують попереднє відновлення заліза з нікелевмісної сировини. Оптимальні співвідношення вугілля марок ДГ і АС (75%/25%) при температурі 850-950 °С, що призводить до зниження витрати енергоресурсів за рахунок горіння летких з вугілля, а також зниження витрати електроенергії під час плавлення огарку в руднотермічній печі.

Ключові слова: нікелева руда, огарок, ступінь металізації, газове вугілля, трубчаста обертальна піч.

RECOVERY OF IRON FROM NICKEL ORE OXIDES IN A TUBULAR ROTARY KILN USING ENERGY GROUP COALS AS REDUCING AGENTS

Melnyk S. O. Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0009-3964-312X>, samelnik2016@gmail.com

Akreiev V. V. Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0009-3705-4129>, akreev@gmail.com

Prykhodko S. V. Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0005-0013-2198>, svprima@gmail.com

Ovcharuk A. M. Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0007-0218-2513>, tehnosplavy.dnepr@gmail.com

Abstract. The study of the processes of solid-phase reduction of iron from oxides using anthracite and energy groups of coal as a reducing agent. Determination of the dependence of the ratio of reducing agents used for the reduction of metals in an ore-thermal furnace. As a result of the release of volatile components during the heating of two coal grades at temperatures of 300-1050 °C, the optimal coal ratios were determined to ensure the preliminary reduction of iron from nickel-containing raw materials. Additionally, as a result of studying of the process of iron recovery from nickel ore, the optimal ratios of energy coal and anthracite coal grades (75%/25%) at a temperature of 850-950 °C were determined, which leads to reduce consumption of energy

consumption to the combustion of volatiles from coal, as well as reducing energy consumption of calcine melting process in an ore-smelting furnace.

Key words: nickel ore, calcine, level of metallization, gas coal, rotary tubular kiln.

Метою дослідження є визначення ступеня твердофазного відновлення заліза з оксидів нікелевої руди в трубчастій обертовій печі з використанням вугілля енергетичних груп в якості відновника.

В якості відновника при отриманні металу із оксидів нікелевої руди використовують вугілля антрацитових та енергетичних груп. З метою вивчення ступеню твердофазного відновлення заліза в трубчастій обертовій печі, використовували вугілля ДГ та АС. Вугілля ДГ має високий вміст вуглецю (до 60 %), що дозволяє йому виступати в якості відновника, забезпечуючи процес твердофазного відновлення заліза з оксидів нікелевої руди [1].

Дослідження проводилися на ТОП-1 в умовах діючого виробництва ТОВ "Побужський феронікелевий комбінат". Основні характеристики ТОП-1: довжина 70 м, радіус 4,5 м, кут нахилу 3° [2].

Дослідження з визначення оптимального співвідношення вугілля марки ДГ та АС у складі відновників проведено за такими етапами (табл. 1):

Таблиця 1. Етапи проведення експерименту

№ етапу	Співвідношення вугілля ДГ:АС у шихті, %	Вміст відновника в шихті, %
1	0:100	4
2	25:75	4
3	50:50	5
4	75:25	5
5	100:0	5

У період проведення досліджень на кожному етапі відібрано проби руди та огарку для виконання хімічного аналізу з визначенням Fe_2O_3 , FeO , $\text{Fe}_{\text{заг}}$, $\text{Fe}_{\text{мет}}$ та вологи. Хімічний склад вугілля (табл.2) виконаний перед початком проведення досліджень і залишався постійним протягом усього періоду випробувань [3].

Таблиця 2. Хімічний склад вугілля, мас. %

Марка	C	Летючі	Зола	S	Зола, %				
					CaO	$\text{Fe}_{\text{заг}}$	SiO_2	MgO	P
АС	86,3	5,3	7,4	0,85	2	9,5	51	1,8	0,031
ДГ	66,2	25,0	12,1	0,65	7,2	9	47	2,2	0,033

Для вугілля марки ДГ характерний підвищений вміст летких 25 мас. %. Горіння летких речовин забезпечує необхідні умови для твердофазного відновлення в процесі обпалу. За цих умов основна частина тривалентного оксиду заліза відновлюється до двовалентного. Спостерігається також деяке відновлення оксиду заліза до металу [4].

В табл. 3 представлено середній хімічний склад огарку, отриманого в період проведення досліджень.

Таблиця 3. Середній хімічний склад огарку, мас. %

№ етапи	Співвідношення вугілля ДГ до АС	Fe _{заг}	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃
1	0	12,14	0,18	6,78	9,24
2	25	12,63	0,24	8,75	7,98
3	50	13,36	0,32	10,74	6,69
4	75	13,73	0,35	11,23	6,55
5	100	13,6	0,45	11,48	5,98

Як впливає з таблиці 3, відсотковий вміст FeO в огарку з використанням вугілля марки ДГ порівняно із завантаженням без добавки вугілля марки ДГ до складу відновників (етап 1) збільшився в:

- Етап 2 вміст ДГ - 25 % у складі відновника в 1,29 разів;
- Етап 3 вміст ДГ - 50 % у складі відновника в 1,58 разів;
- Етап 4 вміст ДГ - 75 % у складі відновника в 1,66 разів;
- Етап 5 вміст ДГ - 100 % у складі відновника в 1,70 разів.

Як показано на рис. 1, зі збільшенням відсоткового вмісту вугілля марки ДГ у відновнику відношення $Fe^{(+2)}/Fe_{(заг)}$ підвищується і відповідно відношення $Fe^{(+3)}/Fe_{(заг)}$ знижується, що характерно для протікання процесів твердофазного відновлення [3].

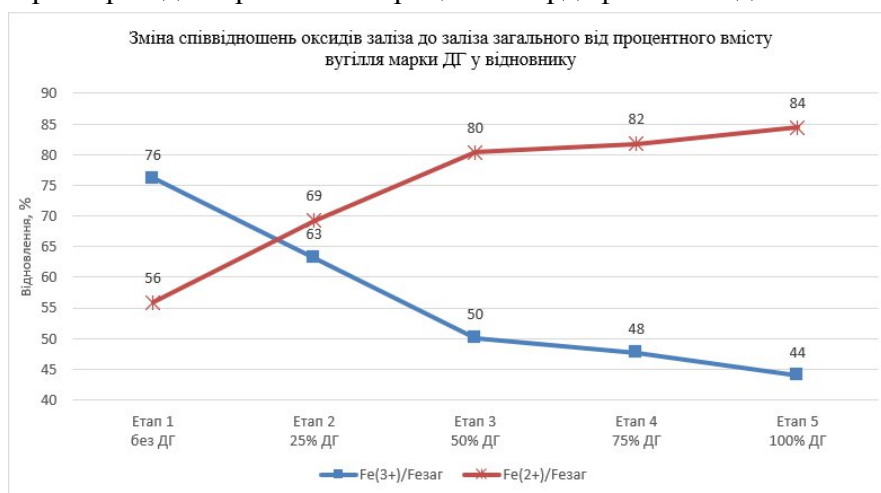


Рис. 1. Зміна співвідношень оксидів заліза до заліза загального від відсоткового вмісту вугілля марки ДГ у відновнику

Основними характеристиками процесу твердофазного відновлення оксидів заліза є ступінь відновлення і ступінь металізації. Для визначення цих характеристик було виконано розрахунок матеріальних балансів за вмістом заліза [5].

Ступінь відновлення і ступінь металізації отриманого огарку за етапами представлені в таблиці 4.

Ступінь відновлення огарку при завантаженні вугілля марки ДГ 100% зросла в 1,65 разів, ступінь металізації відповідно в 2,22 рази порівняно із завантаженням без добавки вугілля марки ДГ до складу відновника [3].

На процеси твердофазного відновлення крім хімічного складу вихідної сировини

великий вплив чинить гранулометричний склад і температурний режим процесу. Активніше процес твердофазного відновлення протікає в дрібній фракції руди [3].

Таблиця 4. Ступінь відновлення і ступінь металізації отриманого огарку, мас. %

№ етапу	Ступінь відновлення	Ступінь металізації
1	16,47	1,50
2	19,27	1,86
3	21,08	2,37
4	23,19	2,57
5	27,17	3,33

За результатами опрацювання даних роботи ТОП-1 виконано розрахунок питомих норм витрат матеріалів, що завантажуються, одержуваного огарку, природного газу. Питомі норми витрат за етапами представлені в таблиці 5.

Таблиця 5. Питомі норми витрат, т/т сухої руди

Шихтові матеріали	етап 1 (ДГ - 0 %)	етап 2 (ДГ 25 %)	етап 3 (ДГ - 50 %)	етап 4 (ДГ - 75 %)	етап 5 (ДГ - 100 %)
Огарок	0,902	0,825	0,889	0,927	0,935
Вапняк	0,057	0,007	0,048	0,053	0,052
Відновник у т.ч.:	0,052	0,057	0,063	0,063	0,064
АШ	0,041	0,034	0,014	0,016	
АС	0,010	0,009	0,017		
ДГ		0,014	0,031	0,047	0,064
Витрата природного газу, м ³	86,500	84,314	83,092	82,150	81,208
Витрата природного газу середня за період досліджень, м ³ /т сухої руди		83,090			

Зменшення питомої витрати природного газу відбувається за рахунок збільшення частки вугілля марки ДГ у складі відновника. Питома витрата природного газу без використання вугілля марки ДГ за даними комбінату становить 86,5 м³/т сухої руди. Середня питома витрата природного газу за період досліджень з використанням вугілля марки ДГ склала 83,090 м³/т сухої руди. Економія природного газу за рахунок використання вугілля марки ДГ у складі відновника становить 3,41 м³/т сухої руди [3].

Отриманий у ТОП-1 огарок прямував для подальшого перероблення в РТП-1. Завантаження огарку в РТП-1 здійснювалося як з ТОП-1, так і з ТОП-2 у співвідношенні 1:1.

Для перевірки окиснюваності заліза в огарку, що надходив з ТОП-1 на переробку в РТП-1 відібрано 2 паралельні проби під час вивантаження огарку з ТОП-1 і з кубеля подачі огарку в РТП. Результати аналізу представлені в таблиці 6.

З таблиці 6 можна побачити, що окислення заліза металевого та оксидів заліза було незначним. У процесі роботи РТП-1 здійснювався контроль за такими технологічними показниками: питома витрата електроенергії; хімічний склад металу.

Таблиця 6. Хімічний склад огарку, мас. %

Місце відбору проби	Fe _{заг}	Fe _{мет}	FeO	Fe ₂ O ₃
Огарок при вивантаженні з ТОП-1	15,00	0,37	14,20	5,10
Огарок із кубеля	15,00	0,24	13,80	6,10

Аналіз хімічного складу чорного нікелю показав, що при переробці огарку з використанням в якості відновника при завантаженні в шихту 100 % вугілля марки ДГ, зменшився вміст Si з 5 % до 2,8 %, що призвело до зростання температури металу вище норми, тому найдоцільнішою є переробка огарку з вмістом у складі відновника 75 % вугілля марки ДГ (етап 4).

Економія питомої витрати електроенергії на 1 т огарку за рахунок попереднього твердофазного відновлення становить 5 кВт/т огарку [3].

Висновки

1. Використання вугілля марки ДГ у складі відновника при обпалюванні нікелевої руди з отриманням огарку позитивно впливає на процес твердофазного відновлення. Найефективнішим для подальшого плавлення огарку в РТП є завантаження шихтових матеріалів з відновником, що містить 75 % вугілля марки ДГ і 25 % вугілля марки антрацитових груп (АС).

2. Економія природного газу за рахунок використання вугілля марки ДГ у складі відновника становить 3,41 м³/т сухої руди або ~4%.

3. Економія питомої витрати електроенергії на 1 т огарку за рахунок попереднього твердофазного відновлення становить 5 кВт/т огарку або ~1%.

4. Для уточнення отриманих даних щодо економії питомої витрати природного газу на ТОП-1 і питомої витрати електроенергії на РТП-1 необхідний більш тривалий період досліджень. Економія питомої витрати електроенергії на РТП-1 може бути визначена за 100 % завантаження попередньо відновленого огарку. Для забезпечення цих умов необхідна одночасна робота ТОП-1 і ТОП-2 з отриманням попередньо відновленого огарку.

Бібліографічний список

1. 76 Best Books on Metallurgy. Режим доступу: [76 Best Books on Metallurgy - Sanfoundry](#)
2. Ганусовський Д. Технологічна інструкція підготовка шихтових матеріалів та обпалення шихти в обпалювальному цеху ТОВ «ПФК» Код: ПФК-СВ-ТІ-13-0001.
3. Хазнаферов М.В., Сушинський А.Д., Поплавський Ю.В., Рябчикова Н.Ф. Звіт ДП "Державний науково-дослідний та проектний інститут титану". ІТ-13-1/1. 2013 р.

4. Овчарук А.М. та ін. Звіт з науково-дослідної роботи «Складання енергетичного балансу рудотермічних печей РТП-1 та РТП-2 при виробництві феронікелю в умовах ТОВ «ПФК». Дніпро, 2018.
5. Щитов А.Є., Галімов М.Д., Окунєв О.І. Твердофазне відновлення висококремнистої руди з виділенням металізованого продукту. Дифузія, сорбція і фазові перетворення в процесах відновлення металів: зб. наук. пр. М.: Наука, 1981.

ВЗАЄМОВІДНОСИНИ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ НА ШЛЯХУ ЕВОЛЮЦІЙНОГО РОЗВИТКУ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

Мішалкін А.П., к.т.н., доцент, стейкхолдер освітньої програми «Комплаєнс металургійного виробництва, кафедра інтелектуальної власності та управління проектами ННІ «Дніпровський металургійний інститут» УДУНТ, e-mail: meshalkin@ukr.net

Петренко В.О., д.т.н., професор, Заслужений діяч науки і техніки України, Академік академії вищої школи України, завідувач кафедри інтелектуальної власності та управління проектами ННІ «Дніпровський металургійний інститут» УДУНТ, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5017-1674>; e-mail: petrenko_v@email.ua

Селегей А. М., к.т.н., доцент, доцент кафедри інтелектуальної власності та управління проектами ННІ «Дніпровський металургійний інститут» УДУНТ, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3161-5270>, e-mail: selegey@ua.fm

Фонарьова Т.А., к.е.н., доцент, доцент кафедри інтелектуальної власності та управління проектами ННІ «Дніпровський металургійний інститут» УДУНТ, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7726-6999>, e-mail: fonarovat@ukr.net

Крекотень М. А., ас., кафедри інтелектуальної власності та управління проектами ННІ «Дніпровський металургійний інститут» УДУНТ, ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-3952-5270>, e-mail: Max002323@gmail.com

Анотація. Організація окремих етапів сучасних наскрізних технологічних схем виробництва металів і сплавів, як закінчених процесів трансформування фізико-хімічного потенціалу з досягненням проміжних цілей, базується на обґрунтуванні умов раціонального за питомими витратами використання складових вихідного потенціалу ресурсів. Теоретико - практичне визначення дієвих факторів зовнішнього впливу є важливою умовою отримання металопродукції шляхом реалізації відповідного процесу при раціональній витраті мінеральної сировини та ефективному використанню енергоресурсів. Своєчасне, випереджене за часом, прогнозування часу і місця і джерел виникнення загрозливих ситуацій, наступне обґрунтування та застосування комплаєнс – заходів забезпечать умови, сприятливі для розробки і промислового застосування інноваційних технологій і матеріалів.

Ключові слова: фізико-хімічний потенціал, чорні метали, феросплави, ефективність, раціональність

RELATIONSHIP BETWEEN THEORY AND PRACTICE ON THE WAY OF EVOLUTIONARY DEVELOPMENT OF METALLURGICAL PROCESSES

Anatolii Mishalkin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Stakeholder of the educational program "Compliance in Metallurgical Production", Department of Intellectual Property and Project Management Ukrainian state university of science and technologies, Dnipro, e-mail: meshalkin@ukr.net

Vitalii Petrenko, Doctor of Technical Sciences, professor, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, Academician of the Academy of Sciences of the Higher School of Ukraine, Head of the Department of Intellectual Property and Project Management Ukrainian state university of science and technologies, Dnipro. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5017-1674>; e-mail: petrenko_v@email.ua

Andrii Selegei, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Intellectual Property and Project Management, guarantor of the "Compliance of Metallurgical Production" educational program, Ukrainian State University of Science and Technology. Ukrainian state university of science and technologies, Dnipro. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3161-5270>, e-mail: selegey@ua.fm

Tetiana Fonarova, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Intellectual Property and Project Management, Ukrainian state university of science and technologies, Dnipro, ORCID ID: <https://orcid.org/https://orcid.org/0000-0001-7726-6999>, e-mail: fonarovat@ukr.net

Andrii Selegei, As. of the Department of Intellectual Property and Project Management, guarantor of the "Compliance of Metallurgical Production" educational program, Ukrainian State University of Science and Technology. Ukrainian state university of science and technologies, Dnipro. ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0005-3952-5270>, e-mail: Max002323@gmail.com

Abstract. The organization of individual stages of modern end-to-end technological schemes for the production of metals and alloys, as complete processes of transformation of the physical and chemical potential with the achievement of intermediate goals, is based on the substantiation of the conditions for the rational use of the components of the initial potential of resources in terms of specific costs. The theoretical and practical determination of effective factors of external influence is an important condition for obtaining metal products through the implementation of the relevant process with rational consumption of mineral raw materials and efficient use of energy resources. Timely, advanced forecasting of the time and place and sources of threatening situations, subsequent justification and application of compliance measures will provide conditions favorable for the development and industrial application of innovative technologies and materials.

Keywords: physical and chemical potential, ferrous metals, ferroalloys, efficiency, rationality

Вступ. При визначенні напрямків розвитку, найбільш раціональних за використанням ресурсів, задіяних в реалізації процесів виробництва чорних металів та сплавів, ефективних за отриманими кінцевими результатами, корисно розглянути шлях їх еволюції в історичному плані, з аналізом джерел формування та визначенням рівнів використання потенціалів їх рушійних сил.

Цей шлях, якщо джерелом і часом виникнення сучасного сталеплавильного процесу рахувати бесемерівський процес, який має історію понад 170 років. Практично, одночасно з його виникненням, який в своєму еволюційному розвитку перетворився в сучасний киснево – конвертерний процес, з'явилися і перші процеси одержання металів за рахунок використання електричної енергії, трансформованою в теплову. Поштовхом для подальшого вдосконалення бесемерівського способу виробництва сталі з метою зростання продуктивності процесу та підвищенню якості металопродукції було створення промислового процесу виробництва кисню. Його використання сприяло інтенсивному розвитку процесу з розробкою цілого ряду сучасних способів (технологій та обладнання) виробництва сталі. Безперечні переваги і є основними причинами його поширення – біля 2/3 сталі у світі виплавляється з використанням киснево-конвертерних способів. До основних переваг доцільно віднести автогенність процесу, можливість переробки техногенних відходів власного та інших виробництв, технологічна гнучкість процесу, його значна продуктивність та можливість отримання якісної сталі широкого спектру властивостей і призначення.

Стосовно виробництва сталі та феросплавів в агрегатах, в яких в якості джерела теплової енергії використали електричну дугу. Аналіз його сучасного стану і завдань, визначених як основні напрямки розвитку виробництва електросталі, дозволяє визначити ряд невирішених, або тих, що потребують уточнення, проблем щодо визначення шляхів їх реалізації, особливо за умов руху вітчизняної металургії в напрямку її «озеленення»:

- встановлення раціональних співвідношень компонентів металошихти, сталевий брукхт / рідкий переробний чавун з обґрунтуванням вірогідності виключення з неї чавуну, шляхом залучення залезу прямого відновлення (DRI / HBI).

- уточнення раціонального співвідношення D_v/H_v , яке забезпечує підвищення продуктивності теплових агрегатів та рівню витрат електроенергії на основних етапах наскрізної технології, на яких здійснюється трансформація вихідних властивостей рідкого металевих напівпродукта;

- розширення спектру функціонального призначення рідкого переробного чавуну, з використанням корисних властивостей його трансформованого під час позапічної обробки вихідного сировинного та енергетичного потенціалів;

- розширення спектру призначення корисних властивостей шлакової фази за рахунок розробки та впровадження, раціональних за витратами ресурсів і ефективних за дією шлакоутворюючих матеріалів;

- створення та застосування ефективних за результатами технологічних рішень щодо мінімізації інтервалу коливань втрат заліза за час окислювального періоду та легуючих елементів при проведенні позапічної обробки сталевих напівпродукту та ін.

Таким чином, основою для подальшого розвитку сучасних виробництв металів та сплавів в агрегатах з використанням в якості джерела теплоти, необхідної для проведення відповідних технологічних операцій, електричної дуги, є створення раціональних за витратами ресурсів мінеральної сировини та енергозатрат, ефективних за кінцевими результатними та екологічно чистих технологічних рішень. А основним функціональним призначенням факторів зовнішнього впливу на процес як об'єкт дослідження, має бути мінімізація питомих витрат сировини, енергії, часу на виробництво якісного металу за рахунок підвищення рівню та якості використання потенціалу особистості, колективу у взаємодії з метою подальшого розвитку науково - технічної бази металургійних процесів.

Мета. Обґрунтування умов, за якими взаємодія фізико-хімічних властивостей складових вихідного внутрішнього потенціалу системи зі складовими потенціалу зовнішнього впливу, які виконують роль регулятора напрямку процесу трансформації властивостей та стану складових внутрішнього вихідного ресурсного потенціалу, може бути реалізована енергоефективна, ресурсозберігаюча і доволі чиста в екологічному плані поетапна наскрізна технологія виробництва сталі в ДСП

Аналіз взаємовідносин наукових положень та практичних рішень на шляху еволюційного розвитку виробництва металів та феросплавів. Аналогом, за фізико-хімічною сутністю процесів, які відбуваються за рахунок реалізації ефектів синергії, джерелом яких є взаємодія теплової енергії з іншими факторами зовнішнього впливу, способів виробництва сталі, феросплавів, підготовки вуглецевих матеріалів шляхом їх термічної обробки в високотемпературних електрокальцинаторах та ін., доцільно визначити електропечі Пісона (1853 г.) та Сименса (1881 г.), які також близькі за принципом дії, основою конструкційного виконання та призначенням [1].

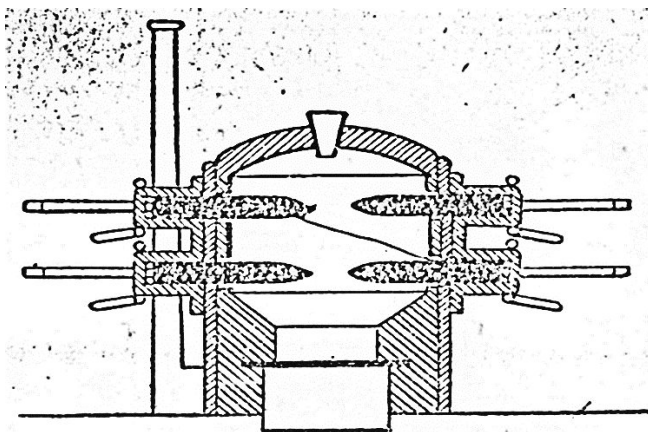


Рис. 1 - Перша електропеч Пісона з вугільними електродами (1853 г.)

В піч Пісона руда до тиглю засипалась зверху, нагрівалась та плавилася при контактуванні з високотемпературною зоною розповсюдження електричної дуги з вугільними електродами. Після стікання рідкого розплаву в нижню частину печі провадились операції по його рафінуванню. Це стало можливим після відкриття електричної дуги, властивості якої описано в (1802 р), використання току від динамо машини та відкриття Фарадеєм електростатичної індукції. Використання відповідних ефектів електричного току застосовано також в печах супротиву, індукційних, електрокальцинаторів та ін.

Засновником основних теоретичних положень фізичної хімії, які дозволили визначити раціональні способи використання вихідного потенціалу металургійних систем, відомий українсько-російсько - радянський вчений Бекетов М.М. [2]. Як хімік-металург, він заклав основи алюмо - та магнієтермії, створивши процес отримання сплавів, реалізація якого не потребує використання енергії зовнішніх джерел, склав ряд витіснення металів, який став прототипом сучасного електрохімічного ряду напруги, вперше сформулював закон хімічної дії (1865 р.), розробив способи одержання металічних рубідію та цезію, промислового виробництва алюмінію.

Їх основою було теоретичне обґрунтування умов і визначення впливу зовнішніх факторів, які сприяють досягненню максимально раціональних рівнів використання корисних властивостей вихідних потенціалів систем, що ним досліджувались.

В подальшому теоретичні дослідження з розробкою фізико-хімічних основ металургійних процесів продовжили вітчизняні вчені -металурги С.Т. Ростовцев [3], Є. О. Казачков [4]. Подовживши теоретичні дослідження з практичною та послідовною реалізацією їх результатів, вагомий вклад в розвиток процесів виробництва феросплавів зробив академік, зав кафедри Електрометалургії М.І. Гасик.

Особливе місце в електрометалургії займають способи виробництва феросплавів. Основними напрямками досліджень наукової школи, заснованою в 1925 році С. І. Тельним, лідером на науковим керівником якої з 1973 р. був М.І. Гасик, стали теоретичні і експериментальні дослідження процесів електрометалургійного виробництва спеціальних сталей, феросплавів, кольорових металів та електротермії вуглецево-графітової продукції, абразивних матеріалів широкого функціонального призначення. Її вклад в формування науково-технічної бази чорної металургії, яка є важливою складовою економічної безпеки та суверенітету держави важко переоцінити.

Методика дослідження - системний аналіз, який характеризується комплексним підходом при обґрунтуванні компонентного складу вихідних шихт, які в умовах відповідного процесу реалізують свій скритий потенціал корисних властивостей при взаємодії з вихідним потенціалом властивостей об'єкту дослідження – конкретного металургійного процесу або його етапу. Спектр функціонального призначення прогнозується на етапі обґрунтування компонентного складу вихідної шихти з урахуванням відповідних властивостей і функціональних можливостей індивідуальних компонентів та їх суміші. Позитивні ефекти як результат їх взаємодії можуть бути посилені за рахунок застосування інших способів зовнішнього впливу, результат якого визначається перетвореннями, які мають фізико-хімічне походження.

Прогнозування на основі результатів термодинамічних розрахунків та експериментального визначення показників реальної кінетики трансформації властивостей вихідного потенціалу металургійної системи, що є об'єктом дослідження, дозволяє визначити способи зовнішньої дії, що забезпечать умови для виникнення або унеможливлення, прискорення або зміни напрямку розвитку відповідних реакцій. Не зупиняючись на значних досягненнях сучасної науки про електрометалургію, розглянемо результати вирішення, визначених вище проблем, шляхом проведення фізико-хімічних досліджень а аналізу їх результатів.

Обговорення результатів дослідження. Результати математичного моделювання особливостей виплавки сталі в ДСП при зміні відношення діаметра і глибини ванни (H_B/D_B),

проведеного авторами дослідження [5] до отримання показника H_v/D_v в межах $2,5 \div 1,8$ дозволяє збільшити швидкість: нагріву ванни і плавлення скрапу на $12 \div 25$ %, зневуглецевлення на $5 \div 18$ %, дефосфорації на $3 \div 25$ %. Визначившись за доцільне використання в шихті $30 \div 50\%$ рідкого чавуну, автори, вірогідно, не проаналізували результати, які отримано на багато раніше при моделюванні киснево-конвертерного процесу. Не провели багатофакторного аналізу впливу показника на зміну фізичних процесів у ванні ДСП. Нами визначено критичне значення D_v/H_v , при якому збільшення інтенсивності продування ванни конвертера не приводить до зміни гідродинамічного стану, який визначає інтенсивність переносу теплоти і маси. Не визнано за фактор впливу, очевидно, і вплив на процеси переносу теплоти і маси (трафік компонентів до зони їх реагування і видалення продуктів їх реагування) зміни лімітуючих ланок при досягненні критичних концентрацій в металі вуглецю. А основною рушійною силою в умовах ванни, що продувається газом, або ні, є спливання бульбашок CO , що є продуктом реакції окислювання вуглецю.

Достовірність висновку авторів про те, що при перемішуванні розплаву електровихревіми течіями вплив глибини ванни на процеси тепло- і масообміну перевищує вплив продування ванни газом не викликають сумніву, але ігнорувати фактами, отриманими шляхом теоретичних досліджень та підтверджених експериментально, не звертати на них уваги, дослідник не повинен.

Результати дослідження авторів [6] щодо використання «проблемних» шихт при одержанні корозійностійкої сталі, визначили економічну доцільність та технологічну можливість удосконалення технології виплавки дуплекс-процесом, шляхом видалення фосфору на першому етапі, а на другому - рафінування та легування розплаву. Результати наших досліджень, метою яких було фізико-хімічне обґрунтування раціональних параметрів високотемпературного нагріву дисперсних відходів електromеталургійного цеху (БМЗ), які збирались промисловим пиломососом, з проведенням поточного аналізу кінетичних особливостей процесу, зміни стану та поведінки шихти в умовах печі супротиву, дозволили зробити наступні висновки. Нагрів до $1750^\circ C$ з витримкою при неї $15 \div 17$ хв. дозволив високі ступені відновлення (до 90%) Ni , Si , Mn , Cr понад 96% Fe . Найбільш раціональним за витратами відновника, мінімізацією втрат дисперсного матеріалу та досягнення стабільного ходу, за результатами експериментального дослідження визначено наступні умови проведення процесу: попередня теплова обробка суміші біомаси (целюлігнін) з пилом електromеталургійного цеху при температурі $650^\circ C$; нагрів до $1750^\circ C$ зі швидкістю $12 \div 15^\circ C/хв$. Наступна умова стосувалася зміни конструктивних параметрів тигля – по аналогії з умовами нагріву шихти в доменній печі було зроблено розширення нижньої частини графітового тигля. Ступінь закріплення на поверхні частинок піролізного вуглецю перевищила аналогічний показник при механічному перемішування компонентів приблизно в 20 разів. Покриття та укрупнення розміру частинок пилу під час попереднього нагріву піровуглецем, дозволило збільшити кут природного укусу. Ці умови, штучно створені в процесі дослідження дозволили вдосконалити параметри високотемпературного нагріву з реалізацією відновлення та переходу елементів в металевий розплав.

Щодо потенціалу корисних, ще не використаних в металургії, властивостей рідкого переробного чавуну. Результати досліджень, на етапах яких обґрунтовувались раціональні напрямки використання їх фізико-хімічного потенціалу, перевірялись шляхом фізичного моделювання на високотемпературних моделях з наступним аналізом отриманих результатів дали визначити наступне. Використання фізичної теплоти рідкого чавуну дозволяє штучно підвищити теплопродуктивність реакцій, якої недостатньо для проведення реакцій, призначенням яких є отримання чавунів з властивостями, розкислювача, легуючого, модифікатора, матеріалу для навуглецювання розплавів та іншими корисними властивостями, які формують оновлений потенціал чавуну з розширеним спектром функціонального призначення.

На рис. 2 приведено визначену в дослідження схему складових потенціалу особистості та їх взаємовідносини науковими дослідженнями та навколишнім середовищем.

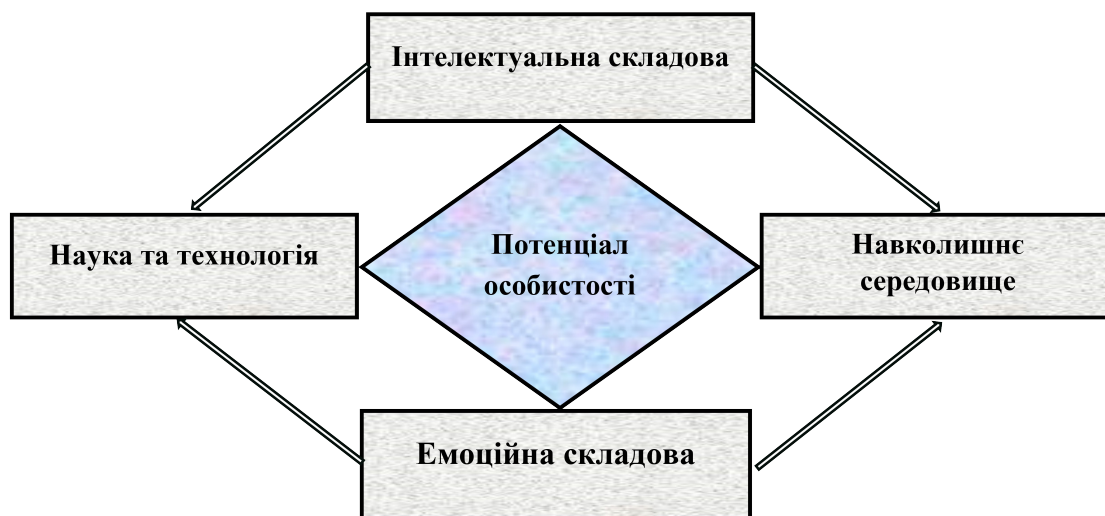


Рис. 2 - Взаємовідносини складових потенціалу особистості з навколишнім середовищем

Таким чином, потенціал особистості, важливими складовими якого ми вважаємо інтелект та емоції, формує колективний потенціал творчого колективу науковців, об'єднаних вирішенням конкретних завдань, властивості якого, в свою чергу, повинні бути раціонально використано для отримання очікуваних результатів.

Використання сучасного експериментального та програмного забезпечення дозволяє підвищити рівень достовірності та якість результатів досліджень, що має важливе значення для розробки раціональних за витратами ресурсів, ефективних та екологічно чистих за результатами реалізації, інноваційних процесів, рішень та матеріалів.

Висновки. Створенню інноваційних технологій і матеріалів сприяє плідна взаємодія науки, як «компасу», технології як «штурвалу» та «комплаєнсу» як комплексу заходів з прогнозування та протидії небезпечним ситуаціям на шляху до «успіху».

Деяку стурбованість викликає суттєве порушення балансу між дослідженнями, які спрямовані на вдосконалення виробництва електросталі та феросплавів. Складається думка, що чинники інтелектуального наукового потенціалу використовуються, основному, для вирішення задач щодо виробництва феросплавів, а електрометалургія сталі є практично завершеним за вихідними можливостями процесом. Сподіємося, що це помилкова думка, а її потенціал не використано.

Розвиток та вдосконалення технологій і конструкції електричних печей розширило спектр сталей, що виплавляються способом електродугової плавки, від вуглецевих та низьколегованих до спеціальних високолегованих сталей кольорових сплавів та лігатур.

Бібліографічний список

1. Покровський Ю.М. Нариси з історії металургії. Ч. 1. / ОНТИ НКТП. 1936. 195 с.
2. Усенко П. Г. БЕКЕТОВ Микола Миколайович [Архівовано 7 березня 2016 у Wayback Machine.] // Енциклопедія історії України : у 10 т. / редкол.: В. А. Смолій (голова) та ін. ; Інститут історії України НАН України. К. : Наукова думка, 2003. Т. 1 : А — В. — С. 216. ISBN 966-00-0734-5.
3. Ростовцев С.Т. Теорія металургійних процесів. Металургвидав. 1956. 515 с.
4. Казачков Є. А. Розрахунки з теорії металургійних процесів. Металургвидав, 1988. 288 с.

5. Тимошенко С.М. , Стовпченко Г.П., Костецький Ю.В. , Губинський М.В. Шляхи підвищення енергоефективності дугових сталеплавильних печей. *Сучасна електрометалургія*. №1, 2019. С. 46-56.
6. Величко О.Г., Аллакх Сингх, Величко К.О. Технологічні особливості виплавки корозійностійкої сталі на проблемній металошихті. *Теорія і практика металургії*. №3, 2021. – С. 41 – 47.

References

1. Pokrovsky Y.M. Essays on the history of metallurgy. NKTT. 1936. 195 p.
2. Usenko P.G. Beketov M.M. [Archived March 7, 2016, at the Wayback Machine] // Encyclopedia of the History of Ukraine: in 10 volumes / editors: V.A. Smoliy (chairman) and others; Institute of History of Ukraine of the National Academy of Sciences of Ukraine. K. : Naukova Dumka, 2003. - Vol. 1: A - B. - P. 216.
3. Rostovtsev S.T. Theory of metallurgical processes - Metallurgizdat.1956. 515 p.
4. Kazachkov E.A. Calculations on the theory of metallurgical processes. Metallurgizdat, 1988. 288 c.
5. Timoshenko S. N., Stovpchenko A. P., Kostetsky Y. V., Gubinsky M. V.. Ways to improve the energy efficiency of arc steelmaking furnaces. *Modern Electrometallurgy*. №1, 2019. - С. 46-56.
6. Velichko O.G., Allakkh Singh, Velichko K.O. Technological features of smelting corrosion-resistant steel on problematic metal charge. *Theory and practice of metallurgy*. №3, 2021. - С. 41 - 47.

ПРОБЛЕМАТИКА ПЛАВКИ НІКЕЛЕВИХ РУД І ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ

Приходько С. В. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0005-0013-2198>, svprima@gmail.com

Акреєв В. В. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0009-3705-4129>, akreev@gmail.com

Мельник С. О. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0009-3964-312X>, samelnik2016@gmail.com

Овчарук А. М. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0007-0218-2513>, tehnosplavy.dnepr@gmail.com

Анотація. Сприятливі фізико-механічні характеристики нікелю призвели до його широкого застосування в різних продуктах близько двох мільйонів тон на рік. Нікель є найважливішим легуючим елементом в аустенітній нержавіючій сталі та інших спеціальних сплавах. Різке збільшення виробництва таких сплавів протягом останніх десятиліть значно збільшився попит на феронікель.

Щоб задовольнити збільшення промислового попиту, необхідні нові та ефективніші шляхи для вилучення нікелю з бідних і складніших руд за умов виснаження запасів багатих нікелевих руд. У цьому документі узагальнено досвід роботи в галузі освоєння та експлуатації технології електроплавки феронікелю та викладено досягнуті показники рудотермічної печі потужністю 40 MWA та особливості процесу технології низького відновлення заліза та вибір раціонального відновника процесу.

Ключові слова: латерити, плавка феронікелю, рудотермічна піч, проблеми виплавки, технологія низького відновлення заліза, відновник

PROBLEMS OF NICKEL ORE SMELTING AND SELECTION OF THE OPTIMAL PROCESS

Prykhodko S. V. Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0005-0013-2198>, svprima@gmail.com

Akreiev V. V. Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0009-3705-4129>, akreev@gmail.com

Melnyk S. O. Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0009-3964-312X>, samelnik2016@gmail.com

Ovcharuk A. M. Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0007-0218-2513>, tehnosplavy.dnepr@gmail.com

Abstract. The favorable physical and mechanical characteristics of nickel have led to widespread use in various products, about two million tons per year. Nickel is the most important alloying element in austenitic stainless steel and other special alloys. The dramatic increase in the production of these alloys over the past decade has significantly increased the demand of ferronickel. In order to meet increased industrial demand, new and more efficient ways of nickel production from poor and more complex ores are needed in conditions of depletion of reserves of rich nickel ores. This document summarizes the experience in the field of development and operation of ferronickel electric smelting technology, sets out performance of ore-smelting furnace with a capacity of 40 MWA and the features of the process of low iron reduction technology, selection of the optimal process reducing agent.

Key words: laterites, ferronickel smelting, ore-thermal furnace, smelting problems, low iron reduction technology, reducing agent.

Нікеленосні латеритні відкладення утворюються в результаті вивітрювання основних гірських порід, які є складними сумішами феро-магнієвих мінералів, таких як олівін $(\text{Fe,Mg})_2[\text{SiO}_4]$, піроксен $(\text{Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$ та амфібол $(\text{Mg,Fe})_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ [1]. Промисловий інтерес латеритів складають три види мінералів: лимоніт, сапроліт, перехідні мінерали.

Науковий підхід зумовлює доцільним виконати переробку лимонітів вилуговуванням, а сапролітів – пірометалургійними методами [2]. Однак скорочення сапролітових покладів змушує звертатися до переробки лимонітів і перехідних мінералів пірометалургійними методами. Крім того, підвищений попит на нікель призводить до того, що в переробку залучаються руди з небажаними проблематичними у пірометалургійній переробці показниками кислотності (S/M), високим вмістом гетиту, що збільшує співвідношення Fe/Ni. Ці руди створюють практичні проблеми при експлуатації печей, таких, наприклад, як:

- наявність великої кількості вільного кремнезему та гетиту обмежують температуру випалу огарка, для запобігання його спіканню в трубчастій печі, і як наслідок, збільшує питомі витрати електроенергії при плавленні шихти в електропечі;

- збільшення кислотності S/M призводить до наявності проблем, пов'язаних з електричними режимами роботи печей, а також кипіння (спінювання) розплаву шлаку, і як наслідок, призводить до аварійності самоспільних електродів.

Основним обмежуючим фактором є те, що не всі потенційні руди можуть (або повинні) бути переплавлені в довільні сорти феронікелю. При цьому феронікелеві заводи потрапляють у дві групи, що відрізняються ступенем відновлення заліза із руди:

- низьке відновлення, яке відновлює від 15% до 30% заліза з руди;
- високе відновлення, яке відновлює від 45% до 65% заліза з руди. У тому числі виробники нікелевого чавуну. Забезпечують рівень відновлення заліза в діапазоні від 70% до 80%.

Таким чином, кожен процес повинен починатися з визначення його раціонального ступеня відновлення заліза і відповідно сорту феронікелю [3]. Це визначення вимагає наступних кроків.

Визначення раціонального сорту феронікелю. Очевидно те, що виробництво феронікелю з нижчим вмістом нікелю призводить до нижчої втрати нікелю в шлаковій фазі з двох причин: через низький вміст нікелю в шлаку і менших обсягах власне шлаку. При цьому більш високе відновлення вимагає більше відновника і більше витрат енергії на тонну проплавленого недогарка. Відповідно, виробництво феронікелю з нижчим вмістом нікелю, як правило, призводить до зниження обсягів переробки руди, оскільки потужності більшості плавильних печей обмежені.

Таким чином, для будь-якої заданої руди та плавильної печі існує максимальний рівень виробництва нікелю, де зростання ступеня відновлення врівноважується зниженням обсягів проплаву руди.

На рис. 1 наведені ці кореляції в залежності від ступеня відновлення заліза для руди з вмістом 1,6% Ni, 16% Fe, та 2,2 S/M. Різка зміна нахилу кривої маси шлаку на рівні близько 45% відновлення заліза відбувається через окиснення кремнію при виробництві феронікелю.

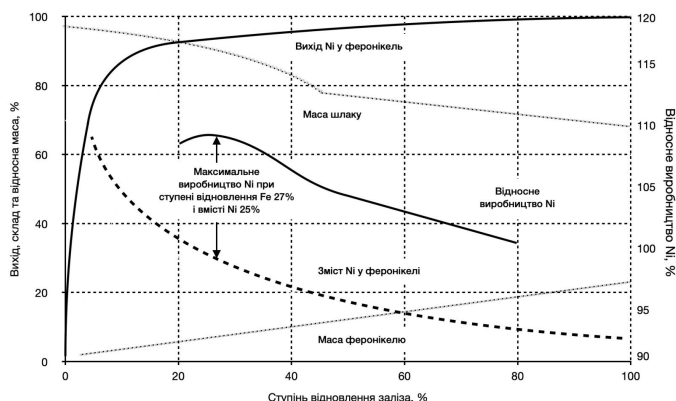


Рис.1. Залежність складу нікелю, виходу, виробництва феронікелю та шлаку від ступеня відновлення Fe [3]

Оцінка металургійної доцільності цього раціонального сорту. Цей крок включає оцінку безлічі робочих параметрів, такі як ліквідус температури металевої і шлакових фаз, необхідний перегрів феронікелю і шлаку, робочі температури, потенційна стабільність роботи, ймовірність окиснення кремнію і вуглецю, кипіння розплаву і таке інше.

Вибір складу феронікелю є компромісом між раціональним для даної руди (плавильної печі) та ймовірною стабільністю та довговічністю роботи за такого ступеня відновлення. Таким чином, цей вибір не може бути довільним на основі ідеї щодо затребуваності певного сорту феронікелю.

Початковий період роботи рудотермічної печі відповідав усталеній технології високого відновлення заліза з додаванням до рудної суміші флюсів у вигляді вапняку та відновника антрацитової групи [4]. Збільшення частини лимонітів в перероблюваних рудах призводило до стабільної зміни сорту феронікелю, зменшуючи частку нікелю в феронікелі і роблячи процес більш економічно недоцільним.

На рис. 2 відображена залежність зміни сорту феронікелю зі зниженням вмісту в ньому нікелю з 20% до 10% при збільшенні переробки лімонітів з більш високим вмістом заліза та нижчим вмістом нікелю.

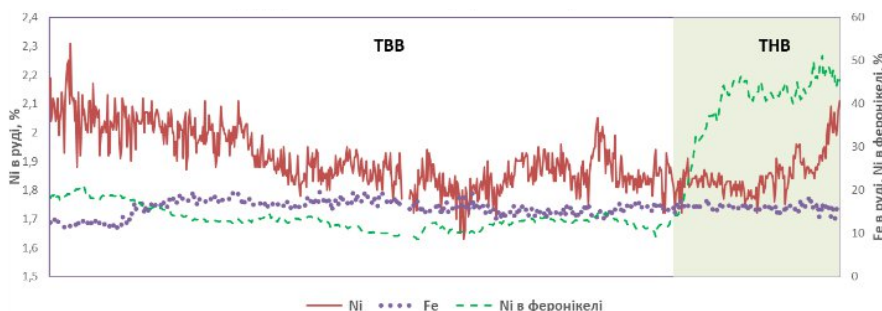


Рис. 2. Зміна сорту феронікелю за зміни ступеня відновлення заліза

Проблематика підтримки стабільності технологічного процесу, погіршення сорту феронікелю та зниження економічної ефективності виробництва зумовили пошук шляхів

переведення печі з технології високого відновлення на технологію низького відновлення заліза.

Неможливість подальшого збільшення потужності рудотермічної печі на величину більше 25 МВт через критичну температуру металу, що могло вкрай негативно позначитися на стабільності конструкцій печі, включаючи вогнетривку футеровку, подальше технологічне управління рудотермічною піччю було можливим за технологією низького відновлення. Для чого виконано зміну типу відновника, що використовується, з антрацитової марки вугілля на енергетичні, приблизного наступного складу: зола – 10,8%; леткі – 34,5%; сірка – 0,5%, та контролем фракційного складу.

Період окиснення вуглецю характеризувався активним спінюванням шлакової ванни і відповідними повними зупинками рудотермічної печі для осадження шлаку, що спінився. Температура металу за період знижено з 1500 °С до 1470 °С (рис. 3).

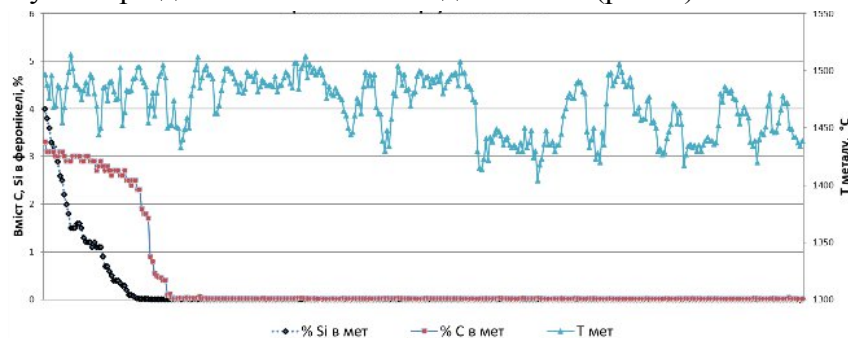


Рис. 3. Зміна сорту феронікелю під час переходу з технології високого відновлення заліза на технологію низького відновлення

Період повного окиснення кремнію та вуглецю з феронікелю обґрунтував твердження про можливе протікання позапічної десульфурзації без наявності кремнію в металі та повного припинення процесу позапічної десульфурзації при зниженні вмісту вуглецю менше 2%. До кінця цього періоду окиснення вуглецю температура чорного феронікелю стабілізована на показнику 1430 °С, шлаку – до 1580 °С.

Наступний період виходу в робочий режим роботи рудотермічної печі був пов'язаний зі стабілізацією шлакового режиму (рис. 4) та вирішенням практичних завдань:

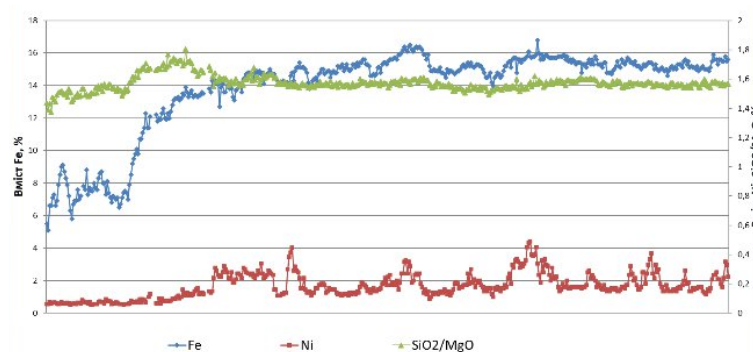


Рис. 4. Зміна складу шлаку зі зниженням ступеня відновлення заліза

1) *визначення раціональної питомої витрати електроенергії.* При цьому спостерігається природна залежність зниження питомої витрати електроенергії зі збільшенням потужності (рис. 5, а), а також стабільна залежність зниження питомої витрати

електроенергії зі збільшенням вмісту заліза (лимонітів) у руді, що переробляється (рис. 5, б). Таким чином, перехід на технологію низького відновлення заліза є не тільки технологічно раціональним, а й економічно доцільним, знижуючи витрати основної економічної складової – електроенергії.

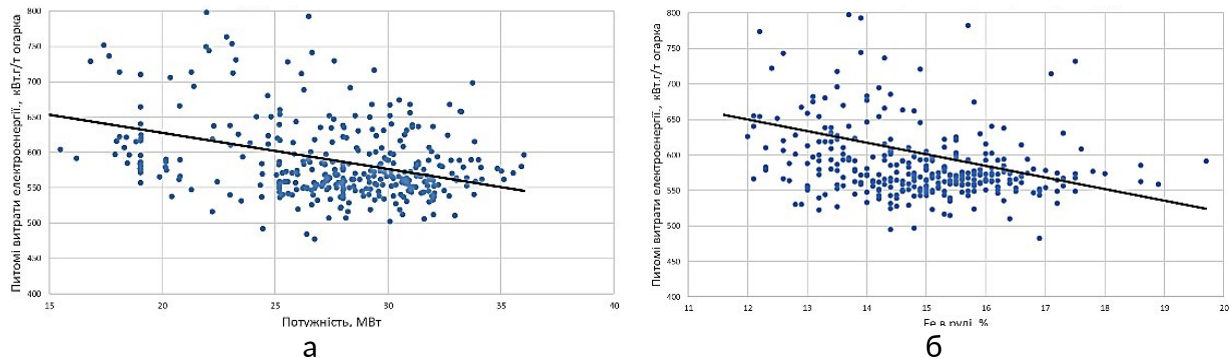


Рис. 5. Залежність питомої витрати електроенергії від: а) потужності рудотермічної печі; б) вмісту заліза у руді

2) *робота на електричних режимах, що забезпечують раціональну температуру чорного феронікелю та електронічного шлаку (рис. 6).*

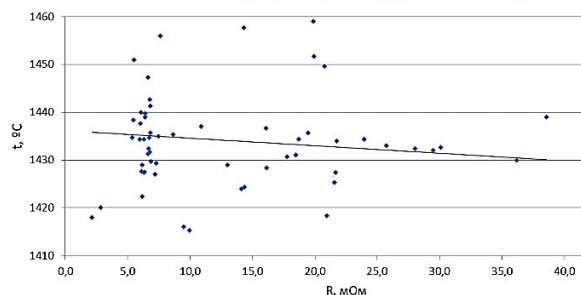


Рис. 6. Залежність температури чорного феронікелю від опору

3) *зниження рівня шлаку, що спінився, в печі, що збільшується при вмісті вуглецю в огарку більше 1% і знижується при падінні вуглецю в недогарку менше 1%.*

Вміст залишкового вуглецю в огарку при постійному дозуванні відновника залежить від активності відновника (рис. 7, а) та його фракційного складу, часу знаходження матеріалу у ТОП та температурного профілю ТОП. Переважно використання «молодого» вугілля з високим вмістом летких та фракційним складом - 6 мм > 95% (рис. 7, б) [5].

Досягнуті показники роботи рудотермічної печі на ТНВ [4]: потужність печі – 37МВт; відновлення заліза – до 15%; питома витрата електроенергії- 583 кВт/т огарка; питома витрата відновника – 36,6 кг/т; вихід огарка з руди – 91,0%, вміст нікелю в чорновому феронікелі – 45%; вміст вуглецю в чорновому феронікелі – до 0,02%; вміст кремнію у чорновому феронікелі – 0,01%.

З урахуванням роботи двох рудотермічних печей, одна з яких працює з високим ступенем відновлення заліза, інша – з низьким ступенем відновлення заліза, досягнуто потенціалу виробництва можливого повного спектру сортів феронікелю з вмістом нікелю в товарному феронікелі від 18 % до 70 %.

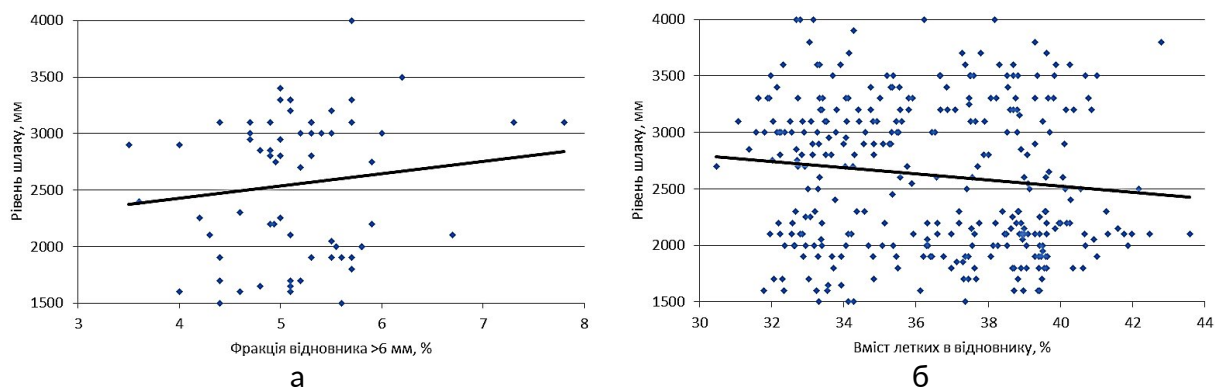


Рис. 7. Залежність спінювання шлакової ванни від: а) фракції відновника; б) вмісту летких відновника

Бібліографічний список

1. Frank K. Crundwell, Michael S. Moats, William G. Davenport. Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum Group Metals. Elsevier Ltd. 610 s. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63541-8>
2. Solar M.Y., Candy Ian, Wasmund B. Selection of optimum ferronickel grade for smelting nickel laterites. *IM Bulletin*. 2008. Vol. 101(1107). P. 1-8. Режим доступу: [\(PDF\) Selection of optimum ferronickel grade for smelting nickel laterites](#)
3. Maurice Y. Solar, Sina Mostaghel. Smelting of difficult laterite ores. *Mineral Processing and Extractive: Metallurgy IMM Transactions. section C*. 2015. Vol. 124(1). P. 35-46. DOI: [10.1179/1743285514Y.0000000075](https://doi.org/10.1179/1743285514Y.0000000075)
4. Технологічна інструкція електроплавка огарка у руднотермічних печах № ПФК-УВ-ТІ-14-0002 від 18.02.2022.
5. Приходько С.В., Солоха В.К. Звіт з переходу на технологію низького відновлення заліза в РТП-1 на Побузькому феронікелевому комбінаті, 2015 р.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛИВАРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БРОНЗИ СИСТЕМИ Cu-Al-Sn-Mn

Білий А.П., аспірант кафедри ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій, просп. Науки 4, Дніпро, 49600, Україна (E-mail: 777bap777@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2391-6575>),

Реп'ях С.І., д.т.н., професор кафедри ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій, просп. Науки 4, Дніпро, 49600, Україна (E-mail: 123rs@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0003-0203-4135>),

Шемет В.Ю., аспірант кафедри ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій, просп. Науки 4, Дніпро, 49600, Україна (E-mail: vladislavshemet705@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-2216-8270>),

Баркар Р.Р., аспірант кафедри ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій, просп. Науки 4, Дніпро, 49600, Україна (E-mail: barkarrostislav@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0003-0680-6101>)

Анотація. У роботі представлено результати дослідження ливарних властивостей бронзи системи Cu-Al-Sn-Mn, розробляємої для експлуатації в умовах дії морської води. За результатами виконаних досліджень встановлено селективний вплив хімічних елементів бронзи на її рідкоплинність та лінійну усадку. Встановлено раціональні межі зміни хімічних елементів бронзи. Одержані результати свідчать про доцільність легування марганцем та оловом задля покращення ливарних характеристик алюмінієвих бронз.

Ключові слова: ливарні властивості, алюмінієва бронза, марганець, олово, рідкоплинність, лінійна усадка

RESEARCH ON THE CASTING PROPERTIES OF BRONZE OF THE Cu-Al-Sn-Mn SYSTEM

Andrii Bilyi, Ph.D student, Department of Foundry Production, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky avenue, 4, Dnipro, 49600, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-2391-6575>, e-mail: 777bap777@gmail.com

Serhii Repiakh, Doctor of sciences, Prof., Department of Foundry Production, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky avenue, 4, Dnipro, 49600, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-0203-4135>, e-mail 123rs@ua.fm

Vladyslav Shemet, Ph.D student, Department of Foundry Production, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky avenue, 4, Dnipro, 49600, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0009-2216-8270>, e-mail vladislavshemet705@gmail.com

Rostyslav Barkar, Ph.D student, Department of Foundry Production, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky avenue, 4, Dnipro, 49600, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0003-0680-6101>, e-mail barkarrostislav@gmail.com

Abstract. The paper presents the results of the study of the casting properties of bronze of the Cu-Al-Sn-Mn system, developed for operation in seawater conditions. According to the results

of the studies, the selective influence of the chemical elements of bronze on its fluidity and linear shrinkage was established. Rational limits for changing the chemical elements of bronze were established. The results obtained indicate the feasibility of alloying with manganese and tin to improve the casting characteristics of aluminum bronzes.

Keywords: casting properties, aluminum bronze, manganese, tin, fluidity, linear shrinkage

Вступ

Сплави на основі міді відомі поєднанням високих механічних характеристик, пластичності, корозійної стійкості, що робить їх незамінними у багатьох галузях машинобудування, суднобудування, нафто- та газовидобувної промисловості. Особливо актуальними є сплави, здатні працювати в агресивному середовищі морської води, де матеріали піддаються одночасному впливу хлоридів, кисню, біологічних агентів і абразивного зносу [1-3].

Вибір системи для досліджень оснований на результаті аналізу селективного впливу відомих хімічних елементів на структуру і властивості бінарних бронз. Зокрема, алюміній до 9,4% за масою в бронзі знаходиться в твердому розчині (в α -фазі) забезпечуючи бронзі вузький температурний інтервал кристалізації, підвищення міцності і лінійної усадки.

Система Cu-Al-Sn-Mn – перспективний напрям розробки нових марок ливарних бронз. Завдяки введенню алюмінію формується комплексна структура з підвищеною міцністю, а присутність олова й марганцю сприяє стабілізації фазових складників та утворенню захисної оксидної плівки на поверхні, що істотно уповільнює корозію. Проте детальні дослідження закономірностей структурування, фазоутворення, механічних, ливарних і експлуатаційних властивостей таких сплавів потребують системного підходу [4, 5].

Мета

Метою дослідження є встановлення ливарних властивостей ливарної бронзи системи Cu-Al-Sn-Mn, визначення впливу легуючих елементів рідкоплинність та лінійну усадку, визначити межі змін хімічного складу сплавів.

Методика

Матеріали: Досліджувалися експериментальні зливки бронзи із вмістом:

- Cu – основа;
- Al – 6–9%;
- Sn – 0,2–1,5%;
- Mn – 4–9%.

Технологія плавки: Плавка проводилася у тигельній електропечі при температурі 1200–1250 °С. Легування здійснювалося в процесі завантаження шихти в тигель. Заливання розплаву проводили з тигля у пісчано-глиняні форми з розмірами зразків $\text{Æ}20 \times 150$ мм та сталевий кокіль з розмірами зразків $20 \times 20 \times 120$ мм.

Методи аналізу:

1. Рідкоплинність сплавів визначали на спиралевидній пробі Керрі.
2. Лінійні розміри зразків вимірювали за допомогою штангенциркуля.

Результати та їх обговорення

Рідкоплинність бронзи досліджуваного складу склала 620...710 мм за пробою Керрі, що є добрим рівнем показника як до ливарних бронз. Лінійна усадка бронз змінюється в межах від 1,8 до 2,3%.

При цьому, в прийнятих межах масових змін алюміній знижує рідкоплинність, але підвищує лінійну усадку.

Присутність олова призводить до утворення інтерметаллідів, підвищенню міцності та твердості бронзи, зниженню рідкоплинності та лінійної усадки.

Марганець сприяє рафінуванню сплаву, підвищенню його міцності, знижує рідкоплинність і підвищує лінійну усадку бронз.

Висновки

5. Сплави системи Cu-Al-Sn-Mn мають високу перспективність для експлуатації в умовах морської води.
6. Рациональний склад бронзи, який забезпечує їй прийнятні ливарні властивості, наступний: Al = 6–9%; Sn = 0,2–1,5%; Mn = 4–9%; Cu – залишок.
7. Введення в бронзу системи Cu-Al певної кількості Mn і Sn дозволяє регулювати її структуру від однофазної до двофазної, що надає перспективу значного покращення не тільки її експлуатаційних, але і механічних властивостей.
8. Перспективними напрямками подальших досліджень є оптимізація хімічного складу бронзи за показниками її механічних властивостей.

Список використаних джерел

1. Дзюбіна А.В., Узлов К.І., Кімстач Т.В. Закономірності структуроутворення ливарних алюмінієвих бронз. *Молоді вчені 2021 – від теорії до практики* : матеріали XII Всеукр. конф. (Дніпро, 25 березня 2021 р.). Дніпро : НМетАУ, 2021. С. 34-38. ISBN 978-617-7891-09-2
2. Кімстач Т. В., Узлов К. І., Реп'ях С. І., Солоненко Л. І. Аналіз нормативних вимог до матеріалу для виготовлення гребних гвинтів. *Металургійна та гірничорудна промисловість*. 2020. № 3. С. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.34185/0543-5749.2020-3-28-38>.
3. Узлов К. І., Реп'ях С. І., Дзюбіна А. В., Кімстач Т. В., Мовчан О. В. Аналіз відповідності нормативних вимог до алюмінієвих бронз закономірностям структуроутворення в системі Cu-Al. *Теорія і практика металургії*. 2019. № 5 (122). С. 55-63. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.5.2019.07>.
4. Кімстач Т. В., Узлов К. І., Реп'ях С. І., Мазорчук В. Ф., Усенко Р. В., Іванова Л. Х. Фізичні та ливарні властивості сплавів системи Cu-SnAl. *Теорія і практика металургії*. 2021. № 6 (131). С. 31–38. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2021.05>.
5. Кімстач Т. В., Узлов К. І., Реп'ях С. І., Солоненко Л. В. Оптимізація вмісту олова та алюмінію в олов'яній бронзі за показниками механічних властивостей. *Металознавство та термічна обробка металів*. 2022. Т. 2. № 2 (97). С. 41–54. DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.050722.41.858.

ПРОБЛЕМА УТВОРЕННЯ НАСТИЛУ НА ПОДИНІ РУДОВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ПЕЧІ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ФЕРОСИЛКОМАРГАНЦЮ

Рубан А.В., ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0000-0001-6553-6568>, artem_ruban@ukr.net

Надточій А.А. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0000-0001-5077-0562>, nadtochiy08@ukr.net

Овчарук А.М. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0007-0218-2513>, tehnosplavy.dnepr@gmail.com

Зінченко О.М. ННІ ДМетІ УДУНТ, Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0009-0006-6728-3342>, ozincenko88@gmail.com

Анотація. Метою цього дослідження є визначення фізико-хімічних і фізико-механічних властивостей зразків настилу з подини рудовідновлювальної печі № 1 на Нікопольському заводі феросплавів, які були відібрані під час її зупинки на капітальний ремонт. Дослідження також спрямоване на встановлення умов і механізму утворення цього настилу, а також розробку рекомендацій, які допоможуть уникнути утворення тугоплавких сполук на подині печі та їх видалення з ванни печі перед її зупинкою на капітальний ремонт. Основною причиною утворення тугоплавкого настилу, що містить карбід кремнію, є нерівномірний режим роботи печі, який виникає через переведення печей на зонний тариф і, ймовірно, скорочення часу роботи печей на виплавці високовуглецевого феромарганцю, що сприяє руйнуванню карбідів і промивці ванни печей.

Ключові слова: рудовідновлювальна піч, феросилікомарганець, настил, карбід кремнію, властивості, хімічна руйнація

THE PROBLEM OF CONSTITUTION OF FLOORING AT THE BOTTOM OF THE ORE FURNACE DURING FEROSILICOMANGANESE VIBRATION

Ruban A.V. Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-6553-6568>, artem_ruban@ukr.net

Nadtochiy A.A. Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0001-5077-0562>, nadtochiy08@ukr.net

Ovcharuk A.M. Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0007-0218-2513> tehnosplavy.dnepr@gmail.com

Zinchenko O.M., Dnipro Metallurgical Institute of USUST, Dnipro, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0006-6728-3342>, ozincenko88@gmail.com

Abstract. The objective of this study is to determine the physicochemical and physicomechanical properties of samples of deposit from the bottom of ore-reducing furnace №1 at the Nikopol Ferroalloy Plant, which were collected during its shutdown for major repairs. The study is also aimed at establishing the conditions and mechanism of formation of this deposit, as well as developing recommendations that will help to avoid the formation of refractory compounds on the furnace bottom and their removal from the furnace bath before its shutdown for major repairs. The main reason for the formation of refractory deposit containing silicon carbide is the uneven operation of the furnace, which occurs due to the transfer of furnaces to a zone tariff and,

probably, a reduction in the operating time of furnaces for smelting high-carbon ferromanganese, which contributes to the destruction of carbides and washing of the furnace bath.

Keywords: reduction furnace, ferrosilicomanganese, deposit, silicon carbide, properties, chemical destruction

Виробництво феросилікомарганцю на Нікопольському заводі феросплавів проводять у закритих та герметичних печах підвищеної потужності типу РПЗ-63 та РКГ-81. Рудовідновлювальну піч типу РПЗ-63 № 1 введено в експлуатацію в квітні 1995 року і, пропрацювавши більш ніж 20 років, була зупинена на капітальний ремонт із повною заміною футерування ванни. При зупинці печі на капітальний ремонт, її охолодженні та видаленні пухкої шихтової суміші з верхніх горизонтів плавильного простору було виявлено настил, що характеризується високою міцністю, щільністю, кристалічною будовою структури, металевим та графітовим блиском. Труднощі, що виникли під час руйнування футеровки та її вилучення з печі під час зупинки на капітальний ремонт, спостерігаються вперше за 50 років виробництва марганцевих феросплавів.

Настил розташовувався по всій площі ванни майже безперервним шаром і мав різну висоту у різних районах печі [1]. З метою визначення складу настилу проводили відбір проб у різних точках ванни печі. Результати хімічного аналізу матеріалу показали, що його склад представлений конгломератом, що складається з металу – переважно феросилікомарганцю, карбиду кремнію, з незначними домішками шлакової фази. Основною причиною заростання поди ванни була експлуатація печі на низькій потужності трансформатора (у тому числі з періодичними відключеннями печі), обумовлена технічним графіком роботи з зонного тарифу використання електроенергії, а також неодноразовими тривалими холодними простоями печі в періоди зниження попиту на марганцеві феросплави на ринку. У ці моменти відбувається карбідоутворення в коксовому шарі при надлишку вуглецю і наявності кремнезему [2].

У роботі виконані порівняльні дослідження щодо визначення дрібності, міцності, питомої роботи руйнування, а також об'ємної, істинної, насипної щільності настилу з печі та деяких руд марганцю. Для порівняння також проведено дослідження пористості цих матеріалів. Об'ємна щільність змінюється від 2455 до 3410 кг/м³, а істинна щільність від 2900 до 3770 кг/м³, і ця відмінність пояснюється відмінністю хімічного складу в пробах. Щодо дрібності та питомій роботі руйнування проби мають великі розбіжності. За міцністю проби мають від 2,8 до 12,3 балів за шкалою проф. М.М. Протодияконова. Якщо врахувати, що руди, що мають міцність від 3 до 10 балів, відносяться до середньої міцності, то в нашому випадку вони міцніші і тому їхнє руйнування необхідно здійснювати вибуховими способами. Досліджуваний матеріал у порівнянні з сіміналами [1], отриманими за технологією кам'яного лиття, які мають фізико-механічні властивості, близькі до ударостійкої кераміки, що використовується для кульозахисних броньових пластин (щільність 2,9 г/см³, межа міцності при стисканні 450 МПа, межа міцності на вигин 50 МПа, мікротвердість 15 МПа, ударна в'язкість 2,5 кДж/м² [3]), характеризується показником ударної в'язкості на порядок вище.

Дослідження зразків проводилися на растровому електронному мікроскопі мікроаналізаторі SUPRA 40WDS («Карл Цейсс», Німеччина) [4] з використанням рентгенівського енергодисперсійного мікроаналізатора INCAx-sigth («Oxford Instruments», Великобританія) з програмним забезпеченням INCA 350. Для виявлення фазового складу досліджуваного матеріалу застосовувався метод картування окремих ділянок поверхні зразка з метою виявлення розподілу окремих хімічних елементів по поверхні вибраної ділянки і визначення, таким чином, ділянок, зайнятих окремими фазами, що дало можливість створити з цих фотографій панораму невеликої ділянки шліфа при збільшенні 192X. На рис. 1 наведено ділянку поверхні шліфа, на якій проводився кількісний рентгенівський мікроаналіз в окремих точках поверхні, які за кольором відповідають різним фазам з різним хімічним і мінералогічним складом (табл.1).

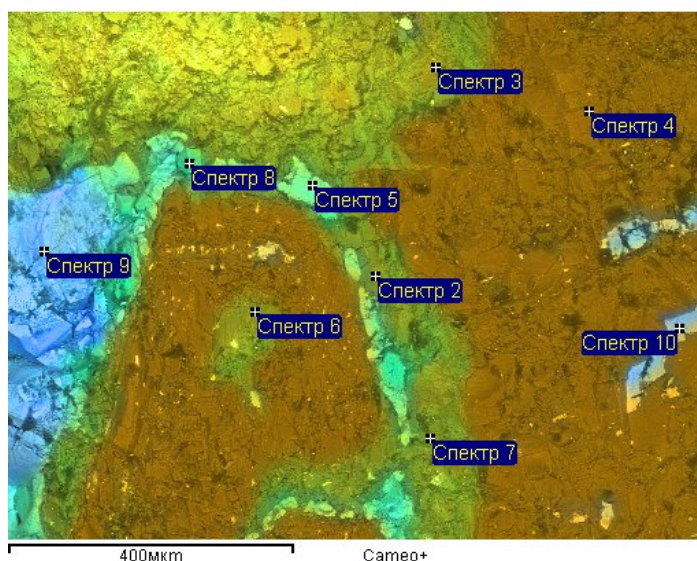


Рис. 1. Поверхня шліфа, на якому проведено кількісний рентгенівський мікроаналіз у окремих точках поверхні

Таблиця 1 - Хімічний і мінералогічний склад матеріал, що досліджувався

Елемент	Сумарний спектр	Номер спектру								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
C	27,18	13,75	17,68	33,6	5,35	28,44	7,08	8,98	5,03	10,62
O	20,23	47,13	49,55	1,49	3,13	42,52	41,97	6,64	6,61	2,59
Na	0,25		1,59			0,63	0,61			0,31
Mg	0,67	8,14	0,19			0,11	6,92			
Al	0,96	0,24	7,21		0,4	3,59	2,12			
Si	35,57	18,86	17,3	63,99	0,79	15,08	23,95	0,55	19,09	23,81
S	1,43		0,22	0,23	32,64	0,31			0,25	
K	0,53		2,99			2,77	0,39			
Ca	2,51	9,99	1,97		0,31	0,8	14,58	0,36	0,42	
Ti	1,44							82,99		

Mn	7,92	1,7	0,51	0,69	55,27	4,12	2,37	0,48	54,52	54,08
Fe	1,31	0,19				0,96			13,77	8,6
Ba			0,81			0,54				
					F=2,11	Cl=0,13			P=0,31	

На основі дослідження РСМА встановлено наявність у пробах фаз силікомарганцю різних складів, карбідів кремнію майже стехіометричного складу, а також сульфідів марганцю, карбідів титану. Макроскопічне вивчення настилу показало, що він складається, в основному, з трьох компонентів: 1 – основна маса світло-сірого кольору з зеленуватим відтінком; 2 – металеві включення (феросилікомарганець) бронзово-жовтого кольору округлої та лінзоподібної форми; 3 – вкраплення індивідів (карборунду) темно-синього, темно-зеленого до чорного кольору, що мають високу твердість. Під час мікроскопічного вивчення додатково було встановлено, що основна маса настилу представлена сплутано-волокнистим агрегатом двох мінералів амфіболу тремоліт-актинолітового ряду та воластоніту. Також були виявлені графіт, піротин і кварц. Мінеральний склад настилу, % об'єм.: карборунд - 26,5; метал (Mn, Si, Fe, P) - 14,3; тремоліт-актиноліт $\text{Ca}_2\text{Mg}_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}][\text{OH}]_2$ - $\text{Ca}_2(\text{MgFe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ - 24,6; воластоніт $\text{Ca}_2[\text{Si}_3\text{O}_9]$ - 32,6; графіт - 1,7; кварц - 0,2; піротин $(\text{Fe}_{1-x}\text{S})$ - 0,1.

Карборунд (карбід кремнію) представлений кількома політипними модифікаціями, які відрізняються за формою (ідіоморфні, гіпідіоморфні, скелетні, дендроїдні, стовпчасті) та за кольором (темно-коричневі до чорного, зелені, сині). Описувані індивіди в полірованих препаратах мають дуже високий рельєф щодо мінералів основної маси настилу. Це проявляється у дуже широких контурах індивідів у відбитому світлі. Подібна характеристика типова для мінералів з дуже високою твердістю, що додатково підтверджує діагностику мінералу. Металеві включення у відбитому світлі мають світло-жовтий колір і найвищу відбивну здатність серед усіх виявлених у матеріалі настилу мінералів. Зворотний бік полірованого препарату додатково був оброблений соляною кислотою з метою спостереження реакції присутніх у настилі мінеральних фаз. У результаті було виявлено, що бурхливу реакцію з кислотою проявляють металеві включення. Виділення CO_2 , у вигляді незначної кількості бульбашок, також проходило на периферії окремих зерен карборунду. Це обумовлено наявністю дрібних включень металу на поверхні індивідів карбиду кремнію, що додатково підтверджено вивченням настилу у відбитому світлі.

Проведені в лабораторних умовах дослідження (табл. 2) щодо визначення температури плавлення зразків уламків показали, що при нагріванні до температури 1500 °C відбувається розшарування розплаву на рідку фазу і плаваючі на поверхні включення карбиду кремнію (проба 1), а додавання стехіометричної кількості оксиду заліза (FeO) і вапняку (CaCO_3) дозволило вже при температурі 1300 °C отримати гетерогенний розплав (проба 2).

Таблиця 2 - Хімічний склад зразків уламків настилу до та після експерименту

№ проби	Хімічний склад, %										
	C	Si	Mn	Fe	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	P	Na ₂ O	K ₂ O
1	7,2	38,0	18,7	2,5	11,2	3,9	5,2	3,6	0,06	-	-
2	18,0	14,8	12,8	16,5	15,2	1,4	2,5	1,4	0,05	0,8	0,1

Таким чином, високі міцнісні властивості уламків настилу печі № 1, що виробляє феросилікомарганець перед її зупинкою на капітальний ремонт, обумовлені сплутано-волокнистим характером будови основної маси настилу, що має складний мінералогічний склад, армованої різно-орієнтованими індивідами карборунду (карбиду кремнію), представленого різними політипними модифікаціями – ідіоморфними, гіпідіоморфними, скелетними, дендріодними, стовпчастими. Досліджені уламки настилу можна розглядати як потенційну комплексну сировину, з якої можливо отримувати абразивний матеріал, вогнетривку сировину та феросилікомарганець.

Висновки

1. Настил, виявлений при зупинці рудовідновлювальної печі типу РПЗ-63 № 1 цеху виробництва феросплавів, займає практично всю площу подини, утворивши «хибну» подіну товщиною 400-1300 мм вище за рівень осі льоток, що викликало великі труднощі при її руйнуванні та вилученні з ванни.
2. Причиною утворення настилу на подині печей є переведення їх на технічний графік роботи за зонним тарифом використання електроенергії, тривалі холодні простої та скорочення об'єму виробництва високовуглецевого феромарганцю, що сприяє розмиванню карбідних утворень.
3. Дослідженнями фізико-механічних властивостей зразків виломок виявлено високі характеристики міцності матеріалу настилу, які обумовлені сплутано-волокнистим характером будови основної маси, а армованість її різноорієнтованими індивідами карбиду кремнію.

Бібліографічний список

1. Рубан А.В., Надточій А.А., Бабуцький В.І., Зінченко О.М., Малий Є.Д., Комар А.С. Проблема утворення настилу на подині рудовідновлювальної печі при виробництві феросилікомарганцю: аналіз фізико-механічних властивостей. *Теорія і практика металургії*. 2024. №4. С. 25-30. Режим доступу: [UDK](#).
2. Гасик М.І., Лякішев М.П. Фізико-хімія і технологія феросплавів: підр. для ВНЗ. 3-є вид. перероб. і доп. Д.: Системні технології, 2009. 457 с. ISBN 966-8421-4571
3. Игнатова А.М., Артемов А.О., Игнатов М.Н. Исследование пулестойкости синтетических минеральных сплавов. *Фундаментальные исследования*. 2013. № 10-2. С. 261-265.
4. Instrument Database: Carl Zeiss AG - SUPRA 40. URL: [SUPRA 40 \(Carl Zeiss AG \) | EVISA's Instruments Database](#) (date of access: 28.03.2025).

УДК 622.785

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ АГЛОМЕРАЦІЇ МАРГАНЦЕВОЇ ОКИСНОЇ ЗБАГАЧЕНОЇ РУДИ МЕТОДОМ ДОДАВАННЯ СПОЛУЧНОГО

Пройдак Ю.С. д.т.н., професор, проректор з наукової роботи ННІ ДМетІ УДУНТ,
Дніпро, Україна, <https://orcid.org/0000-0001-7380-055X>, y.s.projdak@ust.edu.ua

Гогенко О.О. к.т.н., гол. інженер ТОВ “НВП “Техно”, Дніпро, Україна,
office@torfdom.com.ua

Сидорський О.В, головний технолог ТОВ “НВП “Техно, Дніпро, Україна,
office@torfdom.com.ua

Гогенко О.О. заступник директора ТОВ “ТОРФДОМ-МЧ”, Дніпро, Україна,
office@torfdom.com.ua

Толстун О.І. директор ТОВ “НВП “Техно”, ТОВ “ТОРФДОМ-МЧ”, Дніпро, Україна,
office@torfdom.com.ua

Анотація. Метою роботи є визначення принципової можливості одержання окисованого марганцевого агломерату методом введення сполучного. Дослідження проводили з використанням хімічних, фізико-механічних методів аналізу вихідної сировини та кінцевої продукції. Процес сушіння вивчали з використанням аглочаші. Встановлено, що зміцнення при введенні розробленого сполучного в шихту протікає за рахунок здійснення реакцій утворення низькоосновних гідросилікатів кальцію, органо-мінеральних сполук утворення полімерної структури за рахунок води. Використання розробленого сполучного "Екстракт гуматовий торф'яний" ТУ У 08.9-35113654-004:2012 дозволяє отримати кусковий продукт без застосування твердого палива, що відповідає вимогам феросплавного виробництва. Процес не супроводжується забрудненням довкілля.

Ключові слова: марганцева окисна руда, агломерат, тверде паливо, екстракт гуматовий торф'яний, сполучна, зв'язана вода, міцність.

UDQ 622.785

STUDY OF THE PROCESS OF AGGLOMERATION OF ENRICHED MANGANESE OXIDE ORE BY ADDING A BINDER

Projdak Y.S., Gogenko O.O., Sydorskyi O.V., Gogenko O.O., Tolstun O.I.

Abstract. The aim of the work is to determine the fundamental possibility of obtaining agglomerated manganese agglomerate by introducing a binder. The studies were carried out using chemical, physicommechanical methods of analyzing the raw materials and the final product. The drying process was studied using a sinter bowl. It was found that strengthening when introducing the developed binder into the batch occurs due to the reactions of formation of low-base calcium hydrosilicates, organo-mineral compounds of the formation of a polymer structure due to water. The use of the developed binder "Humate peat extract" TU U 08.9-35113654-004:2012 allows you to obtain a lump product without the use of solid fuel, meeting the requirements of ferroalloy production. The process does not cause environmental pollution.

Keywords: manganese oxide ore, agglomerate, solid fuel, humate peat extract, binder, bound water, strength.

Агломерація - процес об'єднання дрібних частинок матеріалу у більші, досягається за рахунок різних методів: стиснення, додавання сполучних речовин та теплової обробки. При виробництві чорних металів та феросплавів основним способом виробництва агломерату є теплова обробка. Джерелом тепла при використанні цього методу є кокс та вугілля, фракції менш як 5 мм. При згорянні аглопалива утворюється розплав, що забезпечує процес спікання частинок руди та концентрату в окусовану сировину.

Поряд з перевагами даний метод має ряд істотних недоліків, одним з яких є виділення при виробництві агломерату значної кількості твердих та газоподібних речовин, що забруднюють атмосферу.

Зараз розвиток металургійного виробництва спрямований на заміну коксу та вугілля процесами безкоксової металургії.

При виробництві окусованої сировини дослідження спрямовані на заміну процесу теплової обробки дрібнодисперсних рудних матеріалів на безобпалові методи окусовання. Одним з таких методів є додавання до рудних матеріалів сполучного.

Групою комерційних та промислових підприємств "ТОРФДОМ" проведено дослідження щодо заміни коксу та вугілля при виробництві окусованої сировини розробленим на власній виробничій базі органо-мінеральним сполучним - екстрактом гуматовим торф'яним ТУ У 08.9-35113654-004:20 витяжку з біомаси водним розчином рідкого скла та насичений вуглеводами.

Дослідження процесу окусування при повній заміні коксу та вугілля ЕГТ проводили в ННІ "Дніпровський металургійний інститут". Як шихтові матеріали використовували збагачену марганцеву окисну руду 1 с. Покровського гірничо-збагачувального комбінату, екстракт гуматовий торф'яний (ЕГТ) виробництва ГКПП "ТОРФДОМ" відсів вапна - 2 мм.

Фізико-хімічні властивості компонентів наведені у таблиці №1.

Таблиця 1

Фізико-хімічні властивості компонентів

Матеріал	Вміст вологи, %		Зміст фракцій менший 5 мм%	Зміст компонентів								
	вільна	пов' язан а		Mn заг.	Mn ₃ O 4	Fe заг.	CaO	Mg O	SiO ₂	Al ₂ O 3	P ₂ O ₅	A
Марганцева руда	5,5	8,0	25,0	43, 0	61,43	1,4	3,5	1,39	13,4	1,42	0,485	—
ЕГТ	10,0	30,0	—	—	—	0,3	0,11	0,10	10,0	0,12	—	25,0
Вапно	—	—	95,0	—	—	0,1	90,0	3,0	3,5	1,0	—	—

Для інтенсифікації процесу зміцнення у складі компонентів аглошихти використовували негашене вапно фракції менш як 2 мм.

У процесі досліджень вихідні шихти зволожували до вмісту вільної води від 10 до 20% у шихті.

Процес приготування шихти проводили шляхом почергового змішування матеріалів у наступному порядку: марганцеву руду змішували з негашеним вапном, а потім отриману суміш вводили концентрований розчин ЕГТ. Змішування проводили за допомогою лопатевого змішувача протягом 5 хв. Після цього отриману суміш завантажували в аглочашу і сушили. Як теплоносії використовували нагріте до 250°C повітря. Час термообробки відповідав середньому часу знаходження аглошихти на агломашині. Отриманий продукт вивантажували з аглочаші та здійснювали обробку окускованого продукту з визначенням механічної міцності.

У процесі досліджень встановлено, що окускування марганцевої руди методом додавання сполучного протікає аналогічно з аглопроцесом при використанні теплоносія твердого вуглецю коксу або вугілля. Однак цей процес протікає без спалювання твердого палива в інтервалі 150÷300°C. Джерелом рідкої фази є сполучна і продукти його взаємодії з аглошихтою. У зазначеному температурному інтервалі проходить процес карамелізації та рідка фаза, що утворюється, забезпечує необхідну міцність кінцевої окускованої сировини при його охолодженні. Крім того, додаткову міцність агломерату надає утворення органо-мінеральних сполук сполучного з вапном.

Особливу роль процесі окускування без використання твердого палива (коксіка, вугілля) грає “пов’язана” і “вільна” волога.

Встановлено [1], що міцність окускованої сировини досягається за рахунок створення у водному середовищі реакційного об’єму, рівномірного розподілу частинок реагентів, утворення водневих зв’язків між поверхнево-активними полярними частинками нанорозмірними та молекул води. При цьому формується просторова полімерна структура, що міцно утримує частинки вихідних речовин у “соті” водневих зв’язків води, забезпечуючи збереження ближнього порядку між частинками, що реагують, і обсягом реагуючої суміші. Визначено, що при вмісті води менш як 15 до обсягу не забезпечує рівномірного розподілу частинок реагентів у полімерній структурі типу замкнутих стільників за рахунок дефіциту водневих зв’язків, що призводить до утворення конгломератів нанорозмірних частинок та нестабільності обсягу реакційної суміші. Використання кількості води більш як 20 до реакційного об’єму призводить до широкої дисперсії нанорозмірних частинок у реакційному об’ємі, в результаті цього знижується швидкість проведення процесів на кожній стадії.

Вплив кількості сполучного на властивості міцності агломерату визначаємо шляхом вимірювання вмісту дрібниці фракції менш як 5 мм при п’ятикратному скиданні окускованої сировини, що пройшов стадію сушіння, з висоти 1 м.

Дослідження показали, що найбільш високою міцністю має окусковану сировину, отриману з суміші, що містить 12% сполучного (ЕГТ). Зміст фракцій менш як 5 мм становить 15%. Це відповідає міцності якісного марганцевого агломерату, одержаного методом термічної обробки.

Таким чином, проведені дослідження показали можливість отримання окускованої сировини з марганцевих руд шляхом додавання сполучного. За рахунок протікання фізико-хімічних процесів відбувається зміцнення аглошихти з одержанням агломерату, що відповідає вимогам феросплавного виробництва.

Бібліографічний список

1. Lukashevich O.D., Lotov V.A., Usova N.T. Production of water-resistant durable silicate materials based on natural and man-made raw materials, Vestnik TGAS №. 12.1968.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕС ТВЕРДОФАЗНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ОКСИДІВ ЗАЛІЗА ГАЗАМИ

Скрипченко Р.Д. Дніпровський металургійний інститут Українського університету науки та технологій, м. Дніпро, Україна, vizvoxer@gmail.com

Анотація. У роботі досліджено вплив зовнішніх електромагнітних полів різної частоти на процеси газового відновлення залізорудних матеріалів. Експериментально встановлено, що як змінні магнітні поля промислової частоти (50 Гц), так і високочастотні електромагнітні поля (25–40 кГц) мають інтенсифікуючий ефект на швидкість відновлення оксидів заліза воднем. Найбільше прискорення процесу спостерігалось при температурах 573–773 К, де швидкість відновлення збільшувалася у 1,5–2 рази. Високочастотне поле не лише змінювало кінетику відновлення, але й викликало додатковий локальний розігрів шихти. Отримані результати свідчать про перспективність застосування електромагнітних впливів для інтенсифікації процесів твердофазного відновлення у металургії.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF AN ELECTROMAGNETIC FIELD ON THE PROCESS OF SOLID-PHASE REDUCTION OF IRON OXIDES BY GASES

Skrypchenko R.D., Dnipro Metallurgical Institute of the Ukrainian University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine, vizvoxer@gmail.com

Abstract. The paper investigates the effect of external electromagnetic fields of different frequencies on the processes of gas reduction of iron ore materials. It has been experimentally established that both alternating magnetic fields of industrial frequency (50 Hz) and high-frequency electromagnetic fields (25-40 kHz) have an intensifying effect on the rate of reduction of iron oxides by hydrogen. The greatest acceleration of the process was observed at temperatures of 573-773 K, where the reduction rate increased by 1.5-2 times. The high-frequency field not only changed the reduction kinetics but also caused additional local heating of the charge. The results obtained indicate the prospects of using electromagnetic effects to intensify the processes of solid-phase reduction in metallurgy.

Вступ. Одним з найважливіших завдань, що стоять перед металургійною галуззю на сучасному етапі, є скорочення мінеральних та енергетичних витрат, а також включення до технологічного процесу різних техногенних матеріалів. Найбільш ефективним способом вирішення цього завдання є подальша розробка фізико-хімічних основ та технологічних аспектів твердофазного відновлення рудних матеріалів. Частка металів, отриманих з даної технології, у світі постійно підвищується [1]. Однак, незважаючи на істотні переваги, технологічні схеми твердофазного відновлення, що існують, мають вагомий недолік - низька продуктивність. В даний час розроблені та успішно застосовуються різні методи інтенсифікації процесів відновлення: фізичний, хіміко-каталітичний та енергетичний вплив на реагуючу систему. Спільним для даних методів інтенсифікації є вплив на дифузійну та кристало-хімічну ланки процесу відновлення. Але залишається недостатньо дослідженим інтенсифікація процесів відновлення оксидів металів за участю різних видів енергетичного впливу.

Різні зовнішні енергетичні (фізичні) впливи, як можливі регулятори перебігу фізико-хімічних процесів, давно привертають увагу дослідників. Завдяки численним роботам найбільш значних успіхів у цій галузі досягнуто шляхом застосування електромагнітних і корпускулярних випромінювань [2–7].

Високочастотні електромагнітні впливи (видиме світло, γ -промені та ін.) викликають появу в кристалах над рівноважних вільних електронів та електронних дірок (можливо через проміжний екситонний стан) [7, 8]. Частина вільних носіїв заряду може локалізуватися на структурних дефектах кристалічних ґрат. Все це призводить до зміни хемосорбційних та каталітичних властивостей поверхні напівпровідників [2, 3, 7, 8].

Є відомості що до впливу на широке коло процесів зовнішніх електричних полів [3, 4, 9]. Накладення їх на напівпровідникові матеріали, змінюючи поверхневу концентрацію вільних зарядів, зумовлює електро-адсорбційний ефект, що дозволяє регулювати донорно-акцепторну хемосорбцію газів. Впливаючи на положення рівня Фермі, зовнішні електричні поля створюють електро-каталітичний ефект, впливають на швидкість хімічних реакцій [3]. У сильних полях напівпровідники збагачуються додатковими носіями заряду (головним чином внаслідок термоелектронної та ударної іонізації), що також відбивається на поверхневих властивостях та реакційної здатності твердого тіла.

Методика. Відновлення залізорудних зразків здійснювалося у потоці газів, на лабораторній установці. Для створення електромагнітних впливів вона була додатково забезпечена водо охолоджуванним індуктором, розташованим коаксіально з реактором і нагрівальним елементом.

У разі генерації низькочастотних магнітних полів індуктор був багатовитковим соленоїдом з мідного дроту. Живлення його здійснювалося від електромережі через автотрансформатор, що дозволяло змінювати напруженість поля H . Для регулювання частоти останнього ($f < 50$ Гц) використовували мультівібратор. В дослідах з постійним магнітним полем соленоїд живили через випрямляч.

Для створення електромагнітних впливів підвищених частот ($f = 50$ кГц) служив індуктор, виконаний з мідної водоохолоджувальної трубки. Живлення його та регулювання параметрів поля здійснювали за допомогою генератора потужності УЗГ 5-1,6 і генератора, що задає ГЗ-33. Потужність, що підводиться до індуктора, встановлювалася і підтримувалася по індикатору з межами шкали від 0 до 100 відносних одиниць (W). Напруга (U) вимірювали ламповим вольтметром.

У дослідженнях були використані різні залізорудні матеріали: хімічно чисті оксиди заліза та промислові концентрати. Відновленню піддавалися: Fe_2O_3 кваліфікації ЧДА, кристалічний (великістю частинок 0,5 – 2 мм); залізні руди в шматочках і зернах різної крупності - лисаковская ($\text{Fe}_{\text{общ}} = 41,6 - 43,7 \%$), криворізький гематит ($\text{Fe}_{\text{общ}} = 54,7 \%$), магнетит ($\text{Fe}_{\text{общ}} = 56,7 \%$), багата мартитова руда; сирі та піддані окислювальному випалу при 1523 К; офлюсований агломерат основністю 1,1 та 1,33 з вмістом кисню 22,5 та 22,2 % відповідно.

Результати та їх обговорення. На першому етапі роботи було вивчено вплив змінних магнітних полів промислової частоти ($f = 50$ Гц) на швидкість відновлення

кристалічного оксиду заліза (III) воднем. Дослідженнями встановлено інтенсифікуючий ефект зовнішніх впливів, що зростає із збільшенням W_{H_2} (Рисунок 1).

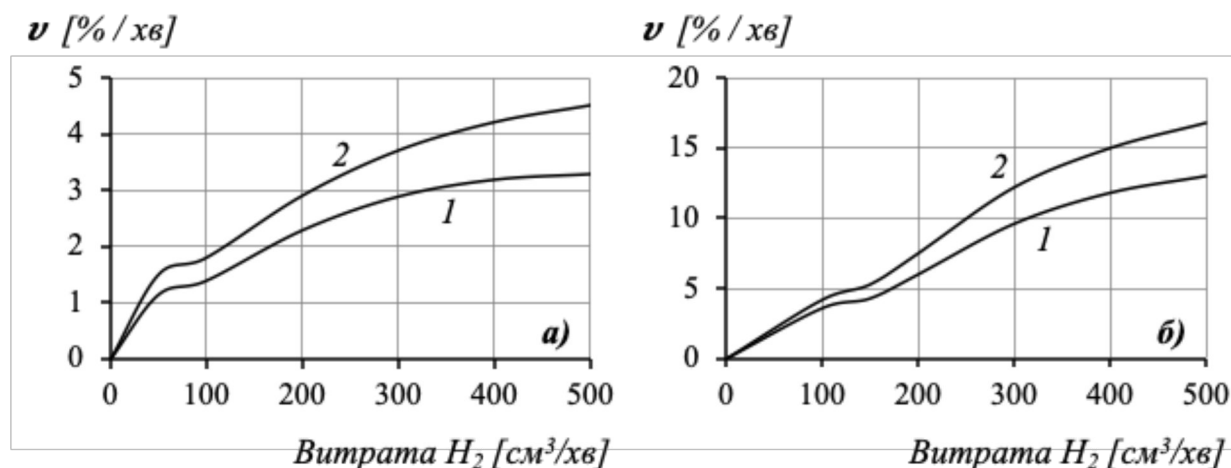


Рисунок 1. Вплив змінного поля на відновлення Fe_2O_3 воднем при температурі 773 К (а) та 973 К (б): 1 – поза полем, 2 – у полі $H=24$ кА/м

Варіації температури в інтервалі 773-1073 К показали, що накладення магнітного поля найбільше прискорює процес при 873-973 К. Характер кінетичних кривих зберігається однотипним (Рисунок 2а). До 973 К відновлення розвивалося східчато; перевищення зазначеної температури призводило до зональної течії процесу. У дослідях при температурі 773 К відзначалася поява метастабільного вюститу. Подібні закономірності мали місце у дослідях із порошковими матеріалами – хімічно чистими Fe_2O_3 та Fe_3O_4 . Магнітне поле промислової частоти помітно форсувало видалення кисню практично протягом усього процесу (Рисунок 2б).

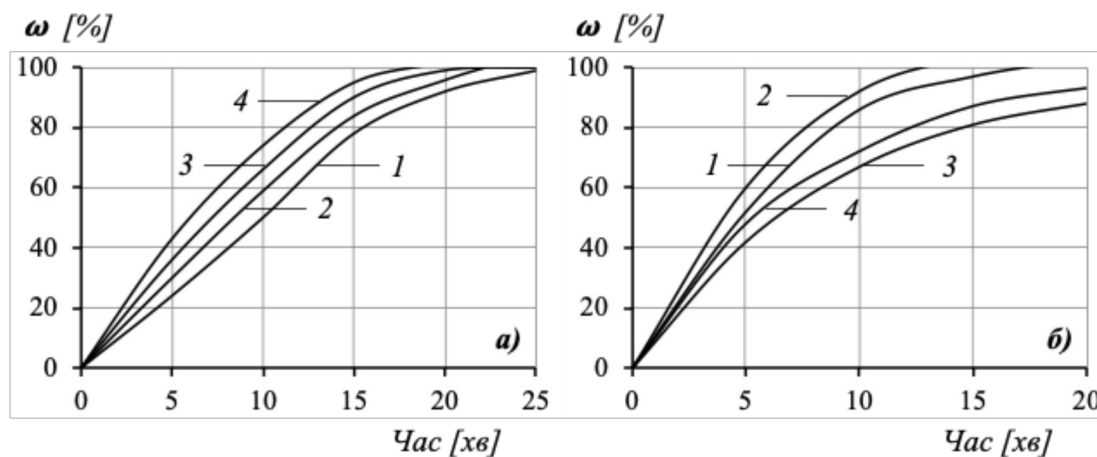


Рисунок 2. Кінетика відновлення оксидів заліза воднем за умов ЕМП промислової частоти: а) – Fe_2O_3 ; 1,2-873 К, 3,4-973 К, 1,3-поза полем, 2,4- у полі; б) – 973 К, порошок; 1,2- Fe_2O_3 , 3,4- Fe_3O_4 ; 1,3- поза полем, 2,4-у полі.

Вплив змінного магнітного поля на тривалість повного відновлення гематиту $\tau_{\omega=100}$ у температурному інтервалі 773-1073 К ілюструється у

Таблиця 4.

Таблиця 4. Час повного відновлення кристалічного Fe_2O_3 воднем у звичайних умовах та при накладенні змінного магнітного поля ($H = 24 \text{ кА/м}$)

T, K		773	873	973	1073
$\tau_{w=00}$	поза полем	34,5	26	21,7	17,2
	у полі	32	22,5	17,7	16

Наступним етапом роботи було вивчення впливу електромагнітного поля підвищених частот на кінетику газового відновлення залізорудних матеріалів. Проведені дослідження виявили значні можливості інтенсифікації процесу цим методом.

Відновлення хімічно чистого Fe_2O_3 воднем (витратою $300 \text{ см}^3/\text{хв}$) показало, що накладання ЕМП ($f = 25 \text{ кГц}$, $U = 80 \text{ В}$, $H \sim 5 \text{ кА/м}$) сильно форсує видалення кисню шихти в області низьких температур: $573\text{-}673 \text{ К}$. Так ω , що досягалася за 20 хв при 673 К , зростала від ~ 40 до 70% , тобто. більше, ніж у $1,7$ рази, а за перші 10 хв експерименту – у $1,6$ рази. Підвищення температури знижувало інтенсифікуючий ефект: при температурі 873 К збільшувалася від 52 до $\sim 65\%$ або в $1,25$ рази (Рисунок 3).

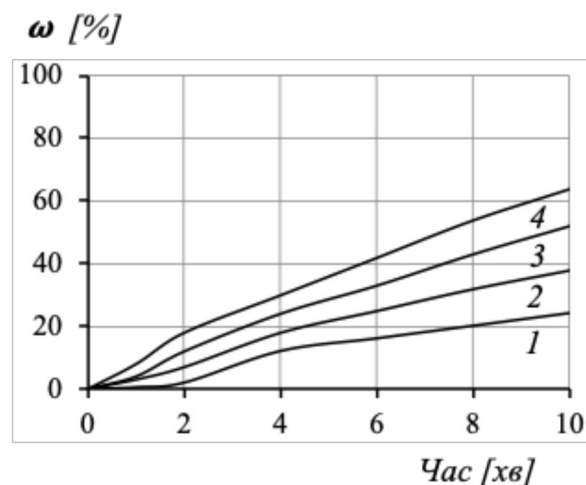


Рисунок 3. Вплив високочастотного електромагнітного поля ($f = 25 \text{ кГц}$, $W = 30$, $H \sim 5 \text{ кА/м}$) на кінетику відновлення Fe_2O_3 воднем ($W_{\text{H}_2} = 300 \text{ см}^3/\text{хв}$): 1,2-673 К; 3,4-873 К; 1,3-поза полем; 2,4 -під впливом поля, режим II.

Накладення низькочастотних магнітних полів ($f \leq 50 \text{ Гц}$) не викликало розігріву шихти. Термопара, що вводилася всередину порошкових навішування Fe_2O_3 , Fe_3O_4 і Fe , не зафіксувала зміни температури. До аналогічних результатів привели виміри в ході відновлення зернистої лисаківської руди H_2 при температурі 873 К .

Інша картина мала місце за умов електромагнітних впливів підвищених частот. Термопара, розташована під зразком, показувала зростання його температури за сталості потужності, що споживається нагрівальним елементом. Цей додатковий розігрів шихти зменшувався із підвищенням температури відновлення. Перевірка показала, однак, що інтенсифікація процесу, що спостерігається, не може бути зведена до одного розігріву (кількісні співвідношення розглядаються далі).

Висновки:

1. Встановлено інтенсифікуючий вплив слабких електромагнітних полів частотою $0,5\text{--}5\cdot 10^4$ Гц при відновленні заліза газами – H_2 , CO та їх сумішами.
2. Високочастотні електромагнітні поля найбільш сильно форсували відновлення заліза в області температур $573\text{--}773$ К. Зі збільшенням частоти (до $35\text{--}40$ кГц) та напруженості ефективність їх накладання зростала.
3. У зазначеній температурній області електромагнітні дії ($f = 25\text{--}40$ кГц; $H = 3,5\text{--}5$ кА/м) збільшували швидкість відновлення хімічно чистих оксидів заліза та лисаківської руди воднем у $1,5\text{--}2$ рази.

Бібліографічний список

1. World Steel in Figures 2024. Brussels, Belgium: World Steel Association, 2024.
2. Thomas J. M., Thomas W. J. Principles and Practice of Heterogeneous Catalysis. Wiley, 2015. 768 с. ISBN 978-3-527-31458-4.
3. Волькштейн Ф.Ф. Физико-химия поверхности полупроводников. М.:Наука, 1973. 399 с.
4. Lannoo M., Bourgoin J. Point Defects in Semiconductors I. Springer Berlin Heidelberg, 1981. 265 с. ISBN 978-3-642-81576-8.
5. Uvic R. Crystallography and Crystal Chemistry. Springer Cham, 2024. 442 с. ISBN 978-3-031-49751-3.
6. Stiegler J.O., Mansur L.K. Radiation Effects in Structural Materials. *Annual Review of Materials Research*. 1979. Вип. 9. С. 405–454.
7. Zhao C., Hirota K., Taguchi M., Takigami M., Kojima T. Radiolytic degradation of octachlorodibenzo-p-dioxin and octachlorodibenzofuran in organic solvents and treatment of dioxin-containing liquid wastes. *Radiation Physics and Chemistry*. 2007. Вип. 76, № 1. С. 37–45.
8. Chen Z., Huang C., Zhou T., Hu J. Strike a balance between adsorption and catalysis capabilities in $\text{Bi}_2\text{Se}_3\text{--xOx}$ composites for high-efficiency antibiotics remediation. *Chemical Engineering Journal*. 2020. Вип. 382, № 122877.
9. Panjak, Chauhan M. Effect of ultrasound on the redox reactions of iron (II) and (III). *Indian Journal of Chemistry Section a*. 2004. Вип. 43. С. 2098–2101.

ВПЛИВ НА ЯКІСНІ ПОКАЗНИКИ ВУГІЛЛЯ ШЛЯХОМ ГЛИБОКОГО ЗБАГАЧЕННЯ

Коренєв О.В., УДУНТ, Дніпро, Україна, labrasa1992@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-7208-8480>

Сорокін Є.Л., УДУНТ, Дніпро, Україна, cokingg0@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-4665-7521>

Анотація. У роботі проведені дослідження, щодо цілеспрямованого впливу на природу спікливого вугілля, а саме за рахунок його глибокого збагачення. Зміни якісних показників спікливого вугілля оцінювали за результатами дослідження показників технічного аналізу та петрографічного. Результати здійснених досліджень доводять, що глибоке збагачення як спосіб зміни властивостей спікливого вугілля є недостатньо ефективним, оскільки лише незначною мірою змінює властивості низькометаморфізованого вугілля. Тому зазначений метод є малоефективним і неприйнятним для регулювання властивостей кам'яного вугілля.

Ключові слова: слабкоспікливе вугілля, низькометаморфізоване вугілля, глибоке збагачення, технічний аналіз, петрографічний аналіз, сума спікливих компонентів.

IMPACT ON COAL QUALITY PARAMETERS BY DEEP ENRICHMENT

Koreniev Oleksii, USUST, Dnipro, Ukraine, labrasa1992@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-7208-8480>

Sorokin Yevhenii, USUST, Dnipro, Ukraine, cokingg0@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-4665-7521>

Abstract. The work conducted research on the targeted impact on the nature of sintering coal, namely through its deep enrichment. Changes in the qualitative indicators of sintering coal were evaluated based on the results of the study of technical analysis and petrographic indicators. The results of the conducted research prove that deep enrichment as a method of changing the properties of sintering coal is not effective enough, since it only slightly changes the properties of low-metamorphosed coal. Therefore, this method is ineffective and unacceptable for regulating the properties of hard coal.

Keywords: low-sintering coal, low-metamorphosed coal, deep enrichment, technical analysis, petrographic analysis, sum of sintering components

Вступ та Мета. Група методів, що ґрунтується на цілеспрямованому впливі на природу вугілля шляхом перерозподілу компонентного складу, тобто на спрямованому регулюванні властивостей, є найбільш перспективною. Ця група характеризується тим, що розширення сировинної бази коксування відбувається через залучення до складу вугільної шихти вугілля, використовуваного в енергетиці. Тут необхідно зазначити, що використання енергетичного вугілля під час виробництва металургійного коксу без зміни його технологічних властивостей призводить до зниження якості отриманого вуглецевого

відновника. Тому для використання зазначеного методу необхідне детальне вивчення можливості зміни властивостей.

Найбільш простим методом, що дозволяє змінювати властивості як спіклого, так і слабкоспіклого вугілля є глибоке збагачення. Тому спочатку в роботі вивчалася можливість зміни властивостей вугілля шляхом глибокого збагачення.

Методика

Вивчалась можливість зміни властивостей спіклого вугілля шляхом глибокого збагачення у важких середовищах з густиною розчину 1,3 г/см³:

- марка ДГ Павлоградської ЦЗФ;
- марка Г Краснолиманської ЦЗФ;
- марка Ж Узловської ЦЗФ;
- марка К Київської ЦЗФ;
- марка ПС Калінінської ЦЗФ.

Результати та їх обговорення

Спочатку зміна властивостей вугілля до і після збагачення визначалася за допомогою показників технічного аналізу. Результати здійсненого дослідження подано в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати технічного аналізу

№ п/п	Марка вугілля	Показники технічного аналізу, %					
		Зольність (A ^d)		Вміст сірки (St ^d)		Вихід летких (V ^{daf})	
		До збагачення	Після збагачення	До збагачення	Після збагачення	До збагачення	Після збагачення
1	ДГ	8,4	4,8	2,78	1,31	43,7	46,1
2	Г	7,7	3,7	2,17	1,2	37,9	40,4
3	Ж	8,2	2,9	1,52	1,19	30,8	31,2
4	К	8,5	4,1	1,78	1,2	23,5	23,7
5	ПС	8,4	4,5	0,67	0,66	17,8	17,1

Результати здійсненого дослідження впливу глибокого збагачення на показники технічного аналізу доводять, що, як і передбачалося, під час збагачення вугілля показник зольності у концентратів істотно відрізняється від початкових. Така зміна пов'язана з тим, що під час глибокого збагачення відбувається додаткове очищення органічної маси вугілля від мінеральних домішок.

Показник вмісту сірки у вугіллі при глибокому збагаченні останнього також знижується, як і передбачалося, оскільки основний вміст сірки знаходиться в мінеральній частині у вигляді піритної сірки. Отже, такі показники, як зольність і вміст сірки у вугіллі, при глибокому збагаченні, є взаємопов'язаними і зниження одного показника (зольності) незмінно призводить до зниження вмісту сірки у вугіллі.

Зміна показника виходу летких речовин з вугілля на суху беззольну масу при глибокому збагаченні неоднакова для вугілля різної стадії метаморфізму. Глибоке збагачення впливає на показник виходу летких речовин лише молодого вугілля. Зміни зазначеного показника у більш зрілого вугілля – в межах похибки. Отримані дані можуть свідчити про те, що молоде вугілля містить у своїй структурі більш широкий спектр

органічних сполук різної густини, а більш зріле – має більш упорядковану й однорідну структуру.

Подальші дослідження з вивчення можливості зміни властивостей спіклого вугілля шляхом глибокого збагачення здійснені за допомогою петрографічних методів дослідження. Під час зазначених досліджень визначався показник відбиття вітриніту (рис. 1), а також мацеральний склад, що подано в таблиці 2.

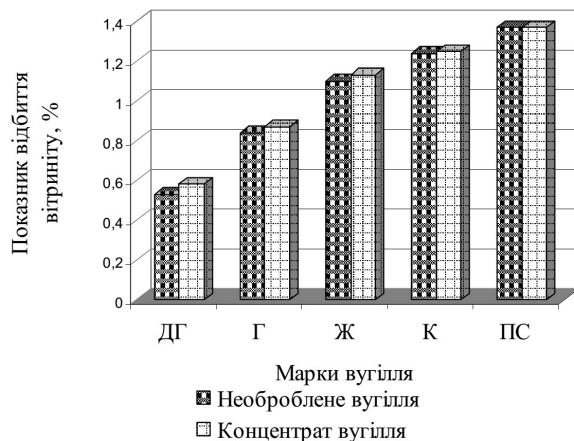


Рисунок 1 Вплив глибокого збагачення на показник відбиття вітриніту

Таблиця 2

Результати петрографічного дослідження

№ п/п	Марка вугілля	Петрографічний склад, %					
		Вітриніт (Vt)		Ліптиніт (L)		Інертиніт (I)	
		До збагачення	Після збагачення	До збагачення	Після збагачення	До збагачення	Після збагачення
1	ДГ	52,6	61,1	16,2	15,6	31,2	23,3
2	Г	78,1	79,9	3,9	5,0	18,0	15,1
3	Ж	87,1	89,3	1,8	2,9	11,1	7,8
4	К	87,4	89,1	0,7	1,8	11,9	9,1
5	ПС	76,7	80,8	0,5	0,8	22,8	18,4

Здійснені дослідження впливу глибокого збагачення на показник відбиття вітриніту показали ідентичний результат з попередніми даними, зокрема зміна показника виходу легких речовин. Отримані дані також свідчать про різноманітну структуру молодого вугілля і більш впорядковану – для більш зрілого.

Зміна петрографічного складу при глибокому збагаченні проб вугілля показує, що вплив зазначеного чинника не однаковий для різних марок вугілля. Глибоке збагачення істотно впливає на вміст вітриніту низькометаморфізованого вугілля (марка ДГ). При зазначеному впливі відбувається значне збільшення зазначеного параметра з 52,6 до 61,1%, що може свідчити про різноманітну структуру молодого вугілля, до складу якого входить досить великий спектр різноманітних поліциклічних і полісполучених органічних сполук.

Вміст ліптиніту у вугіллі зазначених марок після збагачення змінюється однотипно. Глибоке збагачення впливає на більш зріле вугілля і сприяє незначному збільшенню зазначеного параметра. Проте вплив таким способом на низькометаморфізоване вугілля призводить до зниження показника вмісту ліптиніту з 16,2 до 15,6%. Зазначені зміни є несуттєвими – у межах похибки.

Вміст ліптиніту у вугіллі зазначених марок після збагачення змінюється однотипно. Глибоке збагачення впливає на більш зріле вугілля і сприяє незначному збільшенню зазначеного параметра. Проте вплив таким способом на низькометаморфізоване вугілля призводить до зниження показника вмісту ліптиніту з 16,2 до 15,6%. Зазначені зміни є несуттєвими – у межах похибки.

Для детального вивчення даних петрографічного дослідження проб вугілля за отриманими результатами було розраховано показник суми спікливих компонентів (Σ СК), що подано на діаграмі (рисунк 2).

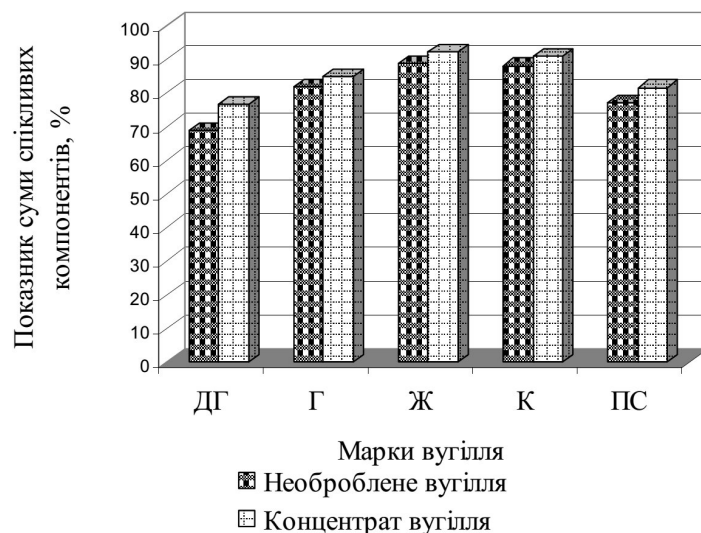


Рисунок 2 Вплив глибокого збагачення на показник суми спікливих компонентів

Результат розрахунку суми спікливих компонентів показує, що цей показник, як і передбачалося, має найбільше значення у вугіллі марки Ж, а найменші результати має низькометаморфізоване вугілля марки ДГ, а також достатньо зріле вугілля марки ПС.

Глибоке збагачення досліджуваних марок вугілля призводить до поліпшення цього показника. Проте отримані зміни мають різну інтенсивність. Так до найбільшої зміни суми спікливих компонентів глибоке збагачення призводить у низькометаморфізованого вугілля. Цей показник змінюється з 68,8 до 76,7%, що становить 7,9%. У решти вугілля зміни спостерігаються в межах 4%, що свідчить про незначний вплив глибокого збагачення на структуру і властивості добреспіклого вугілля. Зміни у низькометаморфізованого вугілля додатково демонструють його нестабільну структуру.

Висновки

1. Такі показники, як зольність і вміст сірки у вугіллі є, при глибокому збагаченні, взаємопов'язаними і зниження одного показника (зольності) незмінно призводить до зниження вмісту сірки у вугіллі, оскільки основний вміст сірки знаходиться в мінеральній частині у вигляді піритної сірки.

2. Вихід летких речовин з вугілля на суху беззольну масу при глибокому збагаченні неоднаковий для вугілля різної стадії метаморфізму. Глибоке збагачення впливає на показник виходу летких речовин лише молодого вугілля. Зміни зазначеного показника у

більш зрілого вугілля – у межах похибки. Отримані дані свідчать про те, що молоде вугілля містить у своїй структурі більш широкий спектр органічних сполук різної густини, а більш зріле має більш упорядковану і однорідну структуру.

3. Глибоке збагачення як спосіб зміни властивостей спіктивного вугілля є недостатньо ефективним, оскільки дозволяє лише незначною мірою змінювати властивості низькометаморфізованого вугілля. Отже, зазначений метод є малоефективним і неприйнятним для регулювання властивостей кам'яного вугілля.

Бібліографічний список

1. Kushnareva T.A. Clinkering Properties of Individual Fractions of Enriched Poorly Clinkering Coal / T.A. Kushnareva, E.L. Sorokin // *Coke and Chemistry*, 2018. – Vol. 61. – № 2. – P. 38-41.
2. Starovoit A.G. Modification of the Clinkering Properties of Coal 1. Profound Enrichment / A.G. Starovoit, E.L. Sorokin, T.A. Kushnareva // *Coke and Chemistry*, 2019. – Vol. 62. – № 5. – P. 174-176.
3. Власов Г.А. Научные основы и технология получения химических продуктов термодеструкции угля : дис. д.т.н. : 05.17.07 / Власов Геннадий Александрович. – Днепропетровск, 2005. – 424 с. Библиогр. : с. 400-424.
4. Barsky V. Composition and structure of coal organic mass. 3. Dynamics of coal chemical structure during metamorphism / V, Barsky, G.Vlasov, A. Rudnitsky // *Chemistry and Chemical Technology*. 2011, vol. 5, no. 3, pp. 285- 290.
5. Vlasov G.A. О кинетике образования парогазовых продуктов при коксовании углей / G.A.Vlasov, Barskyi V.D., Chuishchev V.M. // *Uglekhimicheskii Zhurnal*, 2003, no. 3-4, pp. 55-61.
6. Егоров В.М., Малый Е.И. Каменноугольные фусы как связующее и восстановитель при получении рудно-углеродистых брикетов. // *Углехимический журнал*. - 2003. - № 1-2. - С. 47-48.

МЕТОД ОБҐРУНТОВАНОГО КОРИГУВАННЯ РЕЖИМУ ЗАВАНТАЖЕННЯ ШИХТИ, З УРАХУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ ПЛАСТИЧНОЇ ЗОНИ В ДОМЕННІЙ ПЕЧІ

METHOD OF REASONED ADJUSTMENT OF THE BATCH LOADING MODE, TAKING INTO ACCOUNT THE PARAMETERS OF THE PLASTIC ZONE IN A BLAST FURNACE

Щербачов В.Р. молодший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, аспірант кафедри металургії чавуну і сталі Дніпровського металургійного інституту

Білошапка О.О. молодший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

За результатами визначення форми та положення пластичної зони при роботі доменної печі у різних технологічних умовах встановлено взаємозв'язки параметрів пластичної зони з температурою газу над засипом, рудним навантаженням та розподілом мас окатишів і агломерату вздовж радіусу колошника. Співвідношення кількості окатишів та агломерату у різних зонах доменної печі досить тісно пов'язане з різницею температур плавлення і розм'якшення суміші цих компонентів у розглянутій зоні (коефіцієнт достовірності апроксимації взаємозв'язку становить 0,99), що дозволяє зробити висновок про можливість використання зазначеного відношення, як керуючого параметра при коригуванні товщини пластичної зони.

На основі встановлених зв'язків характеристик розподілу шихти за радіусом колошника (рудних навантажень, вмісту компонентів шихти в різних зонах колошника) з параметрами пластичної зони обґрунтовані та розроблені основні положення корегування параметрів режиму завантаження шихти, що забезпечують покращення параметрів пластичної зони. Основні положення та послідовність вирішення завдань щодо їх реалізації наведені нижче.

1. Визначення характеристик розподілу компонентів шихти в кільцевих зонах по радіусу колошника.

2. Розрахунково - аналітичний прогноз температур розм'якшення та плавлення сумішей залізовмісних компонентів у кільцевих зонах.

3. Розрахунково – аналітичне та графічне моделювання пластичної зони з використанням засобів контролю температури газового потоку та поверхні засипу на основі запропонованого методу.

4. Визначення раціональних значень критерію оцінки форми та положення пластичної зони в доменній печі в поточних технологічних умовах доменної плавки та допустимих діапазонів його зміни. Оцінка рівня раціональності сформованої пластичної

зони та відповідності її поточним параметрам (показникам) процесу плавки за допомогою розробленого критерію.

5. Експертна оцінка необхідних змін форми, розташування та товщини пластичної зони, заснована на результатах розрахунків за допомогою запропонованого методу, та враховує об'єктивні технологічні параметри процесу плавки, а також показання засобів контролю розподілу шихти та газового потоку.

6. Вибір можливого напрямку коригування режиму завантаження в залежності від необхідної зміни параметрів пластичної зони.

Вибір коригуючого впливу здійснюється в залежності від необхідності вирішення конкретного завдання, основні з яких наведені нижче.

6.1. Зміна положення «кореня» та/або вершини пластичної зони в осі печі.

6.1.1. Зміна положення «кореня» та/або вершини пластичної зони в осі печі зі зміною форми пластичної зони.

6.1.2. Зміна положення «кореня» та/або вершини пластичної зони в осі печі без зміни форми пластичної зони.

6.2. Зміна об'ємного розташування пластичної зони.

6.3. Зміна температурного інтервалу (товщини) пластичної зони.

Задачі по п. 6.1 вирішуються шляхом зміни рудних навантажень та/або шляхом зміни розподілу компонентів по радіусу колошника. П. 6.2 реалізується в основному зміною загального рудного навантаження в шихті. Завдання п. 6.3 вирішується виключно шляхом зміни розподілу компонентів.

Корегування розподілу компонентів у сукупності з раціональним розподілом рудних навантажень є одним із суттєвих резервів підвищення економічності плавки. У зв'язку з цим розробка раціонального режиму завантаження доменної печі має здійснюватися у два, а за необхідності – у три етапи. На першому етапі розробка програми завантаження повинна проводитися на основі аналізу та вибору раціонального розподілу рудних навантажень за радіусом колошника; на другому етапі необхідно здійснити вибір раціонального (найбільш економічного) розподілу компонентів порцій шихтових матеріалів із мінімізацією відхилень розподілу рудних навантажень від прийнятого на першому етапі. Якщо за результатами розрахунково-аналітичного прогнозу високотемпературних властивостей суміші компонентів у зонах печі досягти заданих температур розм'якшення і плавлення не вдається, необхідно змінити склад шихтових матеріалів з урахуванням технологічних обмежень, що стосуються розподілу компонентів, їхніх сумішей та розплавів, які з них утворюються (третій етап).

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРУВАННЯ ПЛАКОВАНОГО ПІСКУ В МІКРОХВИЛЬОВОМУ ВИПРОМІНЮВАННІ ПІД ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ ЛИВАРНИХ ФОРМ ЗА ЗАМОРОЖЕНИМИ МОДЕЛЯМИ

Якименко Д.Ю., аспірант кафедри ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій, просп. Науки 4, Дніпро, 49600, Україна (E-mail: iskradnepr@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0002-8861-8966>),

Білий О.П., к.т.н., доцент кафедри ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій, просп. Науки 4, Дніпро, 49600, Україна (E-mail: baplitvo@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1234-5404>),

Осипенко І.О., к.т.н., доцент кафедри ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій, просп. Науки 4, Дніпро, 49600, Україна (E-mail: iralitvo@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7119-9278>),

Таранов А.А., аспірант кафедри ливарного виробництва, Український державний університет науки і технологій, просп. Науки 4, Дніпро, 49600, Україна (E-mail: taranovartema@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-6773-7079>)

Реферат. У роботі представлено аналіз процесу структурування плакованого піску під впливом мікрохвильового випромінювання під час виготовлення ливарних форм за замороженими моделями. Розглянуто механізми теплопереносу, характер зміни структури формувального матеріалу, вплив основних технологічних параметрів на фізико-механічні властивості форм. Отримано експериментальні залежності та встановлено оптимальні режими обробки для досягнення високої якості та міцності форм.

RESEARCH ON STRUCTURING OF CLAD SAND IN MICROWAVE RADIATION DURING THE MANUFACTURE OF CASTING MOLDS BASED ON FROZEN MODELS

Dmyrto Yakimenko, Ph.D student, Department of Foundry Production, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky avenue, 4, Dnipro, 49600, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0002-8861-8966>, e-mail: iskradnepr@gmail.com

Oleksandr Bilyi, Ph.D, Ass. Prof., Department of Foundry Production, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky avenue, 4, Dnipro, 49600, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0003-1234-5404>, e-mail baplitvo@gmail.com

Iryna Osypenko, Ph.D, Ass. Prof., Department of Foundry Production, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky avenue, 4, Dnipro, 49600, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-7119-9278>, e-mail: iralitvo@gmail.com

Artem Taranov, Ph.D student, Department of Foundry Production, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky avenue, 4, Dnipro, 49600, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0005-6773-7079>, e-mail taranovartema@gmail.com

Abstract. This paper analyzes the structuring process of coated sand under microwave radiation during the production of casting molds based on frozen patterns. The mechanisms of heat transfer and structural changes in the molding mixture are considered. The influence of technological parameters on mold quality is experimentally studied. Optimal processing regimes are proposed to ensure improved strength and uniformity of the molds.

Вступ

Сучасне ливарне виробництво активно впроваджує нові технології, які дозволяють скорочувати час виготовлення форм, зменшувати енергоспоживання та підвищувати точність виливків. Одним із перспективних напрямів є застосування моделей виливків з заморожених піщаних сумішей, що мінімізують деформації при витяганні моделі, а також створюють умови для формування складної геометрії [1]. Водночас технологія виготовлення форм за такими моделями висуває нові вимоги до формувальних сумішей та методів їх затвердіння.

Плакований пісок, завдяки наявності полімерного покриття навколо кожної зернини, демонструє високі технологічні властивості, зокрема точне копіювання поверхні моделі, стабільні механічні характеристики та низьку газоутворюваність. Однак реалізація потенціалу цього матеріалу без застосування термічної чи каталізованої обробки є неможливою. Традиційні методи затвердіння (термокамери, інфрачервоне нагрівання) мають значні обмеження — низька енергоефективність, нерівномірне прогрівання, високі втрати часу.

Мікрохвильове випромінювання як спосіб енергоактивного впливу на формувальні суміші демонструє ряд переваг: глибоке проникнення енергії, швидкий розігрів у товщі матеріалу, можливість локального керування температурним полем [2, 3]. Проте структура плакованого піску та наявність термочутливих компонентів (наприклад, смол) вимагає ретельного підбору режимів обробки [4, 5].

Мета

Метою дослідження є виявлення закономірностей процесу структурування плакованого піску під дією мікрохвильового випромінювання під час виготовлення ливарних форм за замороженими моделями, визначення оптимальних технологічних параметрів опромінення та їх впливу на міцність і точність виготовлених форм.

Методика

Матеріали та обладнання:

- Формувальна суміш: кварцовий пісок (фракція 0,2–0,4 мм), плакований фурановою смолою;
- Модельний матеріал: суміш кварцового піску і прісної води;
- Установка для мікрохвильового випромінювання: СВЧ-камера з потужністю магнітрону 900 Вт, частотою випромінювання 2,45 ГГц з регулюванням рівня потужності і часу опромінення.

Експериментальний план:

1. Формування ливарної форми навколо замороженої моделі у двох половинах опок;
 - Після завершення заповнення – миттєве опромінення в мікрохвильовій установці впродовж 4, 6, 9, 12, 15 хв;
2. Контрольні зразки оброблялися традиційним способом (сушіння в термокамері при 150°C протягом 120 хвилин).
3. Вимірювали:
 - Час повного затвердіння;
 - Межу міцності на стиск;
 - Розміри робочих порожнин ливарних форм.

Результати та їх обговорення

Загальні закономірності:

Мікрохвильове випромінювання забезпечує нагрівання формувальної суміші зсередини, що суттєво відрізняється від поверхневого прогріву в традиційних термокамерах. Це дозволяє уникнути утворення термонапружень і тріщин при швидкому нагріві.

Найкращі результати отримано при тривалості опромінення 6–9 хв. В цих умовах забезпечується рівномірне структурування всієї товщі форми (до 70 мм), без перегріву чи локального обвуглення смоли.

Механічні властивості:

1. Межа міцності на стиск (після затвердіння):
 - традиційна сушка: 2,8 МПа;
 - мікрохвильова обробка (900 Вт, 6 хв): 3,5 МПа (+25%).
2. Час повного затвердіння:
 - традиційна сушка: 100–120 хв;
 - мікрохвильова обробка: 9 хв.
3. Енергоспоживання знижене на ~90% у порівнянні з термокамерами.

Геометрична точність:

Оскільки заморожені моделі зберігають стабільну форму під час виготовлення форми, а опромінення не викликає деформації суміші, точність готової форми покращилася на 15–20% порівняно з аналогами за традиційною технологією. Максимальне відхилення розмірів — до 0,3 мм.

Особливості технології:

Не рекомендується перевищувати потужність понад 900 Вт або тривалість понад 9 хв: спостерігалось обвуглення смоли, зменшення міцності, відшарування.

Позитивним є відсутність необхідності у витяганні моделі — після опромінення вона просто розморожується, випаровується, а кварцовий пісок висипається, залишаючи точну форму.

Висновки

1. Мікрохвильове випромінювання забезпечує ефективне, рівномірне та контрольоване структурування плакованого піску.

2. Оптимальні режими: 900 Вт, 6–9 хв – забезпечують високу міцність, однорідність і точність форм.
3. Час виготовлення форм скорочується до 10 хвилин, на 90% зменшується енергоспоживання.
4. Застосування технології у виробництві можливе без масштабних змін обладнання та з використанням стандартних СВЧ-компонентів.
5. Метод дозволяє уникати значних шкідливих викидів та токсичних каталізаторів.
6. Подальші дослідження мають бути спрямовані на дослідження впливу типу смол, адгезійних добавок та мікроструктурних модифікаторів.

Бібліографічний список

1. Спосіб виготовлення ливарних форм за одноразовими замороженими моделями: Пат. 125146 Україна: МПК В22С 9/04, 9/02, 7/02. № а 201910047; заявл. 27.09.2019; опубл. 19.01.2022, Бюл. № 3. 6 с.
2. Солоненко Л.І., Реп'ях С.І. Структурування плакованого кварцового піску паро-мікрохвильовим затвердінням. XIII Міжнародна науково-технічна конференція Нові матеріали і технології в машинобудуванні-2021: матеріали науково-технічної конференції, 28...29 квітня 2021 р., м. Київ. Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2021. С. 168-169.
3. Солоненко Л.І., Реп'ях С.І., Усенко Р.В., Кириченко Р.Д. Виготовлення ливарних форм паро-мікрохвильовим затвердінням по заморожених піщано-водяних моделях. Литво. Металургія. 2021: Матеріали XVII Міжнародної науковопрактичної конференції (18-20 вересня 2021 р., м. Запоріжжя). Запоріжжя, Тандем, 2021. С. 190-192.
4. Солоненко Л.І. Деякі особливості процесу структурування піщанорідкоскляної суміші у паро-мікрохвильовому середовищі. Процеси лиття. 2022. №1. С. 57-66. <https://doi.org/10.15407/plit2022.01.057>
5. Берлизева Т.В. Влияние фурфуролоксипропилциклокарбонатов (ФОПЦК) с различными добавками на свойства холоднотвердеющих смесей на жидком стекле/ Т.В. Берлизева, О.И. Пономаренко, А.М. Каратеев, Д.А. Литвинов // Компрессорное и энергетическое оборудование – 2013 – 3 (33) – С. 26-29

СЕКЦІЯ 2. ТРАНСПОРТНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

SECTION 2. TRANSPORT AND INDUSTRIAL ENGINEERING

СТРАТЕГІЧНІ ПРІОРИТЕТИ ТА ІННОВАЦІЙНІ ПЕРСПЕКТИВИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ МЕТАЛУРГІЙНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ РЕГІОНІВ У ФАКТАХ

Кудря Ярослав Валерійович, кандидат економічних наук, старший науковий співробітник, відділ проблем реального сектора економіки регіонів, Інститут регіональних досліджень ім. М.І. Долишнього НАН України”, вул. Козельницька, 4, 79026, м. Львів, Україна.

Анотація. Ідентифіковано і підтверджено існування потреби сталого розвитку металургійного машинобудування регіонів, обґрунтовано їхню важливість та доцільність такого поступу. Визначено системоутворюючі стратегічні орієнтири та пріоритети, наведено низку фактів успішної реалізації розвитку шляхом окреслення потенційних і реальних можливостей для України. У доповіді зазначено, що одним з них є використання політики сталого розвитку металургійного машинобудування регіонів на засадах реституції та адекватних ринковим ситуаціям відповідних механізмів, які покликані стимулювати приріст значень показників інвестиційної та інноваційної привабливості промислових виробництв, часток металургії і галузевого машинобудування у валовій доданій вартості переробної промисловості.

Ключові слова: інновації, машинобудування (галузеве і металургійне), металургія, можливості, промисловість, регіони, сталий розвиток, стратегічні пріоритети.

STRATEGIC PRIORITIES AND INNOVATIVE PROSPECTS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF REGIONS METALLURGICAL MACHINE INDUSTRY IN THE FACTS

Kudria Yaroslav Valeriyovuch, PhD (Econ.), Senior researcher of the department of problems of the real sector of the regional economy, Dolishniy Institute of Regional Research of the National Academy of the Sciences of Ukraine, Kozelnutska Str., 4, 79026, Lviv, Ukraine, ORCID ID: 0000-0001-6336-2410, e-mail: swiss.inc.com@gmail.com

Abstract. The existence of the need for sustainable development of metallurgical engineering in the regions has been identified and confirmed their importance and the expediency of such progress have been substantiated. Some of basic system-forming strategic priorities have been identified, a number of the facts of its successful implementation have been given by outlining potential and the real opportunities for Ukraine. It has been noted that one of them is the formation and use of a policy of sustainable development of metallurgical engineering in the regions of the country on the basis of restitution, as well as known mechanisms adequate to market situations, designed to stimulate an increase in the values of indicators of the investment and innovation attractiveness levels, the shares of metallurgy and the branch machine building in the gross added value of the processing industry.

Keywords: industries, industrial and metallurgical machine industry, machine building, innovate, metallurgy, opportunities, regions, strategic priorities, sustainable development.

Introduction

In the conditions of dynamic progress of the international and the world economy, the solution of the development problems of not only metallurgy is gaining more and more attention, relevance every day and the practical significance. This also applies to metallurgical engineering as one of the leading types of industrial activity for the national economy of Ukraine and types of heavy engineering. At the same time, all of the above are irreplaceable and integral components of industrial engineering. Therefore, the current state, prerequisites and vectors, the progressive forms and methods, prospects for the development of metallurgy and metallurgical engineering, and therefore, the industrial engineering, respectively and vice versa, are currently being actively discussed by shareholders and entrepreneurs, scientists and representatives of various levels of government. Thus, it is obvious that further progress and a qualitative increase in the efficiency levels of the industrial machine building sector in terms of the machine building production, the competitiveness of domestic industrial production and industrial products are possible provided that the modern tools and means are used that can ensure sustainable development at the regional level as a comprehensive and the rational one, up to the integration of the same metallurgy and metallurgical machine building into the global market infrastructure.

Purpose and Methods

The purpose of the report is to determine the potential and the real opportunities for sustainable development of metallurgical engineering at the regional level. In turn, the object of discussion is the process of sustainable development of industrial engineering through the prism of the regional economy, while the subject of discussion is the facts and the prospects of such development at the level of the regions of the country. Also, in the process of determining the potential and real opportunities for sustainable development of metallurgical engineering in the regions, the speaker used, firstly, the general scientific, industry and interdisciplinary research methods, and secondly, a comprehensive approach to carrying out economic scientific research. The main theoretical and methodological bases of the research are domestic and world scientific achievements, industry and statistical reference books.

Results and Discussion

The machine industry, in fact, is nothing more than a set of interconnected and interacting industrial productions (or manufacturers of mechanical engineering products), representing and integrating into the mechanical engineering complex or, in the other words, the sector. Under the sustainable development of metallurgical (or the branch) mechanical engineering of regions, the author of the report suggests understanding the type of progress that is focused on ensuring the modernization of industrial products at the level of the regional economy in a real-time range by reducing energy, resource and labor intensity, the duration of technological processes and cycles of industrial production (and/or consumption), integrating production processes and service (or pre-sales) and after-sales (or the warranty) service for consumers of products and increasing its

environmental safety [2; 3; 5]. It is natural to understand the fact that the modernization of these products is both nothing else than an effect and a consequence of increasing the efficiency of management systems, functioning and development of various economic entities. It follows that we are not only talking about the search for and implementation of opportunities to modernize the technological characteristics of industrial products, but also about the need for a much more thorough specification, detailing of the concept, content of the development process of machine industry and industrial manufacturers in accordance with the modern postulates of the neo-industrial paradigm of industrial policy.

In general, the machine building sector integrates about 30 machine building industries, which accumulates and concentrates more than 5% of the value of current tangible assets of the industry, and 13% of fixed capital. The machine building complex provides about 5% of the sold industrial products. In the branch of the national machine industry, which is closely related and comprehensively developing with metalworking, more 15% of workforce is employed [1–4].

It has long been known that machine industry is one of the largest in terms of volume and levels of competitiveness of segments of industrial sectors of the international, and in the world economy. The location of industrial production in the countries of the world is determined by the influence of a large number of different factors, the general of which is cheap labor. By the way, the orientation towards it determines the key shifts in the location of machine industry.

At the same time, another equally important factor influencing the location of engineering production is the level of development of scientific and technological progress of the country. It determines structural shifts in domestic and world engineering. The economic trends caused by the scientific and technological revolution led to an increase in the share of labor into the cost of industrial products. The economic and social situation of countries with cheap labor has become much better, compared to those that owned raw materials.

Under the influence of extensive and the rapid progressive development of information technologies, there is a systematic complication of machine building production. This has led to the division of countries into producers of the mass, highly qualified high-tech products. Thus, according to [3, p. 18–19; 5, p. 34; 6; 7], this subjective fact has stimulated the transfer of mass machine building productions that do not require any costs of highly qualified labor, as well as the lack of the need to ensure the sustainable development of highly qualified machine building productions. In turn, the processes of the globalization and internationalization, specialization of countries stimulate deepening and strengthening of production cooperation in machine industry both in countries and the world. The emergence of this trend is primarily due to the advantages of increasing the scale of machine building productions.

The sustainable development of the branch of mechanical engineering and the systematic development of modern information technologies and systems form the mechanical engineering sector of the world economy with the highest values of level of potential for the implementation of technological innovations. The latter in modern conditions are decisive for achieving a high socio-economic standard of living.

In particular, the results of the analysis of literary sources [2–6] showed, that the strategic importance of sustainable development of the branch of mechanical engineering is confirmed by tendency to increase the shares of national mechanical engineering production in the processing

industry of industrially developed countries. For example, according to [6, p. 4–5], the shares of mechanical engineering in the gross added value of the processing industry of such countries of the world as France, Germany and Poland at the end of 2024 were on average equal from 30% to 50% respectively. In the contrast, in Ukraine there was a steady trend to reduce the value of this indicator on average to 20%, compared to 26% at the end of 2023 [6, p. 5]. At the same time, the share of the domestic machine building production in the volume of exports of the processing industry of Ukraine decreased on average to 15% by the end of 2024, compared to 21% as of 2023, when the share of machine industry in imports of the processing industry was on average identical from 32% to 39% [6, p. 6].

Taking into account the above facts, it can be stated that domestic industrial machine building in terms of the level of participation into the development of the national economy of Ukraine, unfortunately, lags behind the global dynamics. Despite this, undoubtedly and in fact, the industrial machine building is always an extremely necessary foundation for ensuring the sustainable development of not only the domestic industry, but also the national economy – it is characterized, in the words of [6, p. 10–15], by a sufficient level of production, and the resource potential and human capital, the assortment and nomenclature of machine building products.

The results of economic research in [1–7] clearly demonstrated that the broadest range of inter-sectoral relations is inherent in the machine industry. This is due to the fact that machine building industries provide industrial products for intermediate and final consumption; close ties are the basis for at least its interpretation as a systemic sector of the real economy of the country, its regions with the high levels of multiplicative and applied a synergistic effect of influence on society. Moreover, the sustainable development of the machine building industry can encourage the solution of the problems of increasing productivity levels and average wages, employment, improving the material and technical base and scientific, technological progress etc.

The main imperative for organizing sustainable development of the industrial mechanical engineering sector, in particular at the level of the regional economy, is the principle of refusing to use any tangible and intangible assets that do not meet the progressive modern conditions for the formation of market relations in the world and are therefore incapable of in any way ensuring an increase in the level of competitiveness of industrial products.

Conclusions

In general, the evolutionary or revolutionary increase in the level of competitiveness of industrial machine building and, accordingly, machine building products both in the domestic and foreign markets is one of a number of strategically important challenges for Ukraine, and therefore, systemic tasks for the national machine industry. Fulfilling this task by increasing the added value and also the level of efficiency of the infrastructure for machine building industries through the balanced mass involvement of not only cheap, but also highly qualified labor into the combination with other administrative, economic measures will ultimately ensure the systematic synergistic sustainable development of the industrial machine building, including at the regional level. Among others, in the author's opinion, into the list of such measures, extremely special attention would be paid, for example, to the formation of a policy of sustainable development of the industry of regions on the base principles of reproduction and, as a rule, applied mechanisms adequate to

market situations (in this case, – machine industry). It would be noted that this is due to the next fact: use of such policy in conjunction with the corresponding models of mechanisms can encourage an increase in the level of structural rationalization and a much more efficient use of material assets in the production process, expected innovative activity and reduction of import dependence.

References

1. *Ekonomichna statystyka. Ekonomichna diyal'nist'. Diyal'nist' pidpryyemstv*. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy [State Statistics Service of Ukraine]: website. Retrieved from <http://www.ukrstat.gov.ua/>
2. Hakhovych, N., & Zavhorodnya, M. (2018). *Mashynobuduvannya. Entsyklopediya suchasnoyi Ukrainy*. Kiev: Natsional'na akademiya nauk Ukrainy; Naukove tovarystvo imeni Tarasa Shevchenka.
3. Kas'yanova, N.N., Vetsepura, N. D., & Solokha, D. N. (2010). *Modelyuvannya systemy rozvytku mashynobudivnoho pidpryyemstva* [Modeling of the development system of a machine building enterprise]. Donetsk: Donetskyy natsional'nyy pedahohichnyy universytet.
4. *Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy* [State Statistics Service of Ukraine]: website. Retrieved from <http://www.ukrstat.gov.ua>
5. Denisov, V. V., & Grishchenko, A. K. (2005). *Protsessnoye upravleniye mashinostroitel'nyy predpriyatiyem: metodologicheskiye polozheniya i praktika* [Process management of a mechanical engineering enterprise: methodological provisions and practice]. Donetsk: Instytut ekonomiky promyslovosti Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrainy.
6. Ishchuk, S. O. (2022). *Rozvytok mashynobuduvannya v Ukraini: problemy ta shlyakhy yikh vyrishennya* [Development of machine building in Ukraine: problems and ways to solve them]. L'viv: Instytut rehional'nykh doslidzhen' imeni M.I. Dolishn'oho Natsional'noyi akademiyi nauk Ukrainy.
7. O'Connell, D. (2023). *The sustainable development of industrial corporations: theory, methodology and practice*. United Kingdom: The Sun.

Бібліографічний список

1. Економічна статистика. Економічна діяльність. Діяльність підприємств [Текст] / Державна служба статистики України. 2024 [Електронний ресурс]. – К. : Державна служба статистики України, 2024. – Режим доступу : <http://www.ukrstat.gov.ua/>
2. Машинобудування [Текст] / Н. Гахович, М. Завгородня // Енциклопедія сучасної України [Електронний ресурс]; НАН України, НТШ; ред. колегія: І. Дзюба, А. Жуковський, М. Железняк [та ін.]. – К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2018. – Режим доступу : <https://esu.com.ua/article-67454>
3. Моделювання системи розвитку машинобудівного підприємства [Текст] : [монографія] / Н. Касьянова, Н. Вецепура, Д. Солоха. – Донецьк : ДонУЕП, 2010. – 260 с.
4. Офіційний сайт Державної служби статистики України 2024 [Текст] ; [Електронний ресурс]. – К., Державна служба статистики України, 2024. – Режим доступу :

<http://www.ukrstat.gov.ua/>

5. Процессное управление машиностроительным предприятием: методологические положения и практика [Текст] : [монография] / В. Денисов, О. Грищенко. – Донецк : НАН Украины ; Ин-т экон. пром-сти, 2005. – 188 с.
6. Розвиток машинобудування в Україні: проблеми та шляхи їх вирішення [Текст] : [монографія] / [Електронний ресурс]; ДУ “Інститут регіональних досліджень імені М.І. Долишнього НАН України”; наук. редактор д.е.н., проф. С. Іщук. – Львів, 2022. – 137 с. – Режим доступу : <http://ird.gov.ua/irdp/p20220002.pdf>
7. O’Connell The sustainable development of industrial corporations: theory, methodology and practice [Text] : [monograph] / David O’Connell. – UK : The Sun, 2023. – 325 p.

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ РЕМОНТУ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ НА ЗАВОДАХ ПАТ УКРЗАЛІЗНИЦЯ

Бобирь Д. В., кафедра Локомотиви, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна, d.v.bobyr@ust.edu.ua, 0000-0003-1441-3861.

Сердюк В.Н., кафедра Локомотиви, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна, v.n.serdiuk@ust.edu.ua, 0009-0003-2973-8447

ANALYSIS OF THE TECHNOLOGY OF REPAIRING TRACTION ELECTRIC MOTORS AT THE PLANTS OF THE PRIVATE JOINT-STOCK COMPANY UKRZALIZNYTSIA

Bobyr D. V., chair of Locomotives, Ukrainian State University of Science and Technologies, c. Dnipro, Ukraine, d.v.bobyr@ust.edu.ua, 0000-0003-1441-3861.

Serdiuk V. N., chair of Locomotives, Ukrainian State University of Science and Technologies, c. Dnipro, Ukraine, v.n.serdiuk@ust.edu.ua, 0009-0003-2973-8447

One of the areas of modernization of the traction electric motor (TEM) electrical insulation system is the use of modern domestic electrical insulation materials with an increased thermal conductivity coefficient, which allows increasing the service life of the electric motor and increasing the heat resistance of the electrical insulation. In turn, the use of new electrical insulation materials requires improving the technology of their processing into the electrical insulation system during the manufacture and repair of traction electric motors.

One of the greatest successes in the creation of such polymers is polyimide. Until now, it has been successfully used as winding and housing insulation in traction electric motors. Polyimide is a heat-resistant and fire-resistant polymer that withstands fairly high temperatures (up to 500°C), and retains high mechanical strength after prolonged exposure to temperatures of 250-300°C.

Порівняно із закордонними аналогами, електроізоляційні матеріали та системи ізоляції в Україні відстають приблизно на 50 років. Ще наприкінці 60-х років з'явилася поліамідна плівка для ізоляції класу нагрівостійкості Н і С, яка широко застосовувалася за кордоном [1-8]. В Україні аналогічні розробки проводилися, однак широкого впровадження матеріалів високої нагрівостійкості не відбулося.

Нині в Україні використовуються застарілі електроізоляційні матеріали і технології виготовлення тягових електродвигунів. Більшість ремонтних підприємств застосовують голий мідний дріт марки ПММ для якірних секцій та неізольовану мідну шину для полюсних і компенсаційних котушок, іноді навіть повторно відпалену мідь. Для ізоляції використовують просочені слюдяні стрічки класу В і лаки типу ФЛ-98. Існуюче технологічне обладнання не забезпечує якісного просочення компаундами: котли витримують тиск лише до 2 Атм, а вакуумні насоси неспроможні створити глибокий вакуум через малу потужність і негерметичність систем.

На рис. 1 представлена діаграма сушки, просочення і термообробки якоря, просоченого в просочувальному лаку ФЛ-98.

Підготовлений для просочення вузол сушать при 170 °С протягом 10 годин для видалення вологи. За цей час полімеризується сполучне склослюдинітової стрічки, але через нерівномірну полімеризацію між шарами залишаються повітряні включення. Це призводить до немонолітної ізоляції: при подальшому просоченні лак лише покриває поверхню, а внутрішня ізоляція залишається незаповненою. Повітряні включення знижують електричні характеристики ізоляції, погіршують теплопровідність і зменшують ресурс двигуна.



Рисунок 1– Діаграма сушки, просочення і термообробки вузлів ТЕД, просочених в лаку ФЛ-98

Сьогодні при ремонті тягових електродвигунів використовуються матеріали переважно класу нагрівостійкості В: голий мідний дріт, просочені слюдяні стрічки (ЛСК-110ТПл, ЛСЕР-934ТПл), склострічка, композиційні матеріали типу «Ізофлекс», текстоліт для пазів, просочувальні лаки (ФЛ-98, МЛ-92, ГФ-95) і покривні емалі (ГФ-92 ГС, ХС). Однак двигуни сертифіковані за класом ізоляції F.

Для підвищення ресурсу необхідно використовувати матеріали одного класу нагрівостійкості, сумісні за хімічними та технологічними властивостями. Рекомендовано застосовувати: ізольований обмотувальний дріт, корпусну ізоляцію із просоченої слюдяної стрічки, просочувальні компаунди без епоксидної смоли, склопластикові клини СПП-ЕП, бандажі з односпрямованого склостікна та покривні емалі відповідного класу.

Виткова ізоляція в старих конструкціях ТЕД виконана зі слюдяних стрічок (склотканина + слюдяний папір + поліетилентерефталатна плівка + сполучне). Для підвищення характеристик пропонується застосовувати ізольований дріт із емаль-лаковим покриттям і склотіткою, або слюдяні стрічки з сучасними компаундами класу F і H.

Корпусна ізоляція і надалі складається з склотканини, слюдяного паперу, полімерної плівки та просочувального складу, однак для нових систем пропонується використовувати поліамідні плівки та компаунди без епоксидів. Також можливе використання просочених, напівпросочених або непросочених стрічок залежно від технологічних можливостей.

Враховуючи, що основне електричне навантаження несуть виткова і корпусна ізоляції, необхідно ретельно вивчити вплив кожного їх компонента на електричні та теплові характеристики тягового електродвигуна. У табл. 1 наведені дані, що характеризують властивості кожного матеріалу, що входить в корпусні ізоляцію.

Електрична ізоляція тягового електродвигуна повинна забезпечувати не лише високі електричні характеристики, а й довготривалу роботу при підвищених навантаженнях і температурах. Для стабільної роботи необхідне не лише ефективне охолодження, а й система ізоляції з підвищеним коефіцієнтом теплопровідності.

Таблиця 1 – Властивості, що характеризують кожен матеріал, що входить в систему ізоляції

Компонент корпусної ізоляції		E _{пр}	M _{пр}	λ при t = 150÷200° С	ρ, Ом·м	ε	Нагрівостійкість	Технологічність в переробці
Слюдяний папір		низька	низька	0,06÷0,08			>300°С	мало технологічна
Скляна тканина		низька	висока	0,06÷0,08	10 ¹⁷	6,3	>300°С	технологічна
Полімерна плівка		висока	висока	0,08÷0,14	>10 ¹⁷	2,1÷3,5	F÷С	технологічна
Просочувальний склад	неполімеризований	низька	низька					технологічний
	полімеризований	висока	висока	0,24÷0,35	10 ¹⁴	6,0	F÷С	не технологічний

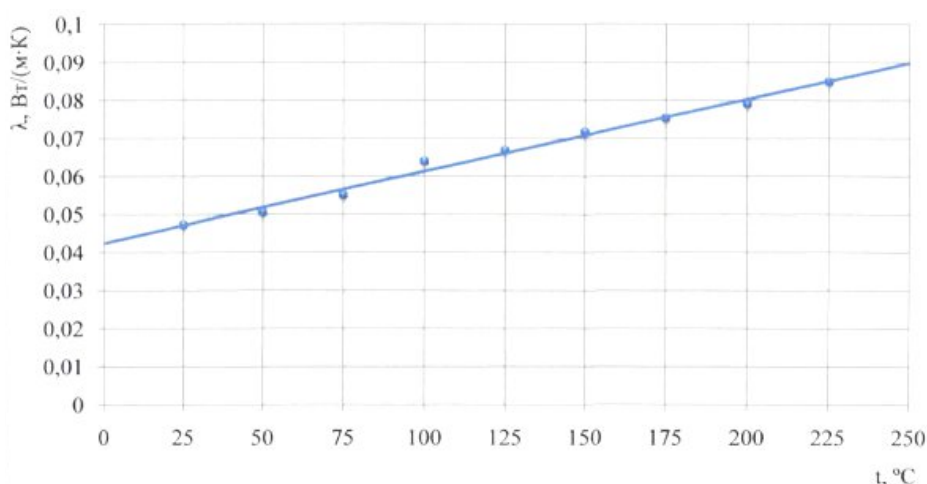


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнту теплопровідності склотканини від температури

Найкращими провідниками тепла є тверді неорганічні матеріали, здебільшого метали ($\lambda = 3\text{--}418$ Вт/м·К), де теплопровідність забезпечують вільні електрони. У пористих матеріалах теплопровідність визначається співвідношенням твердого «скелета» і повітряних включень. Зі зростанням температури теплоізоляційні властивості пористих матеріалів погіршуються через збільшення теплопровідності газів і розвиток конвекції.

Ці закономірності частково стосуються й електроізоляційних матеріалів, таких як склотканина та слюдяний папір, що мають пористу структуру і низьку теплопровідність. Це підтверджується залежностями теплопровідності від температури, наведеними на рис. 2 і 3.

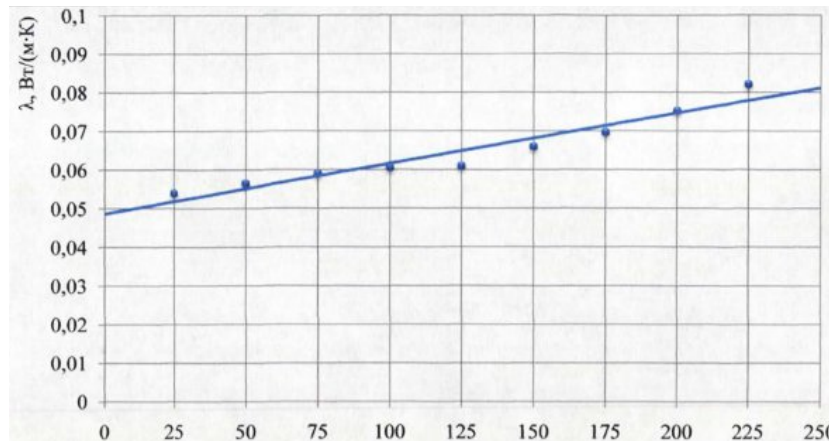


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнту теплопровідності слюдяного паперу від температури

У системі електричної ізоляції тягового електродвигуна можуть залишатися повітряні включення, що виникають через технологічні особливості ремонту та використання електроізоляційних лаків. Вони знижують теплопровідність і електричну міцність системи.

Тверді неметалеві матеріали (наприклад, полімерні плівки, смоли) мають низьку теплопровідність через особливості їхньої структури. Метали, навпаки, характеризуються високою теплопровідністю: для міді $\lambda = 385$ Вт/м·К, для електротехнічної сталі – 20–45 Вт/м·К. У той час теплопровідність традиційних електроізоляційних матеріалів становить лише 0,10–0,23 Вт/м·К, що спричиняє значні температурні перепади в обмотках, ускладнюючи їх охолодження. Схема відведення тепла від провідника наведена на рис. 4 [11].

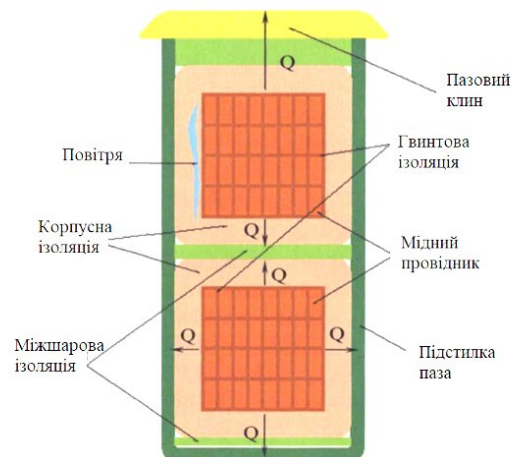


Рисунок 4 – Схема відводу тепла від провідників якірної секції

Матеріали системи електричної ізоляції мають різні коефіцієнти теплопровідності. Для ефективного відведення тепла ізоляція повинна мати високий коефіцієнт

теплопровідності, однак через багатокomпонентність системи це важко досягти. Тягові електродвигуни, що працюють в екстремальних умовах, повинні мати ізоляцію класу Н із теплопровідністю 0,25–0,3 Вт/м·К.

Корпусна ізоляція зазвичай складається зі склотканини, слюдяного паперу, полімерної плівки і просочувального складу. Органічні компоненти (полімерна плівка і просочувальний склад) мають нижчу теплопровідність, ніж неорганічні (склотканина і слюда).

Склотканину виготовляють із алюмоборосилікатного скла, що має високу теплопровідність і нагрівостійкість до +550 °С. Слюда проявляє анізотропію властивостей: теплопровідність $\lambda \approx 0,5$ Вт/м·К, яка при підвищенні температури зростає до 0,75 Вт/м·К, причому паралельно шарам вона у 10 разів більша.

Поліамідна плівка, за даними компанії DuPont (США), також демонструє зростання теплопровідності з підвищенням температури.

При проведенні дослідження теплопровідності ізоляції котушок тягових електродвигунів електровозів були отримані результати на наступних зразках: Ізоляція типу ЛМК-ТТ мала $\lambda = 0,06-0,09$ Вт/м·К; ізоляція типу МОНОЛІТ-2 (ЛСКН-160-ТТ + компаунд ЕМТ-1) $\lambda = 0,1-0,25$ Вт/м·К; ізоляція типу МОНОЛІТ-4 (ЛСЕК-5-СПл + плівка Ф-4Э0 + ЛЕС + компаунд ЕМТ-1) мала $\lambda = 0,15 \div 0,17$ Вт/м·К; ізоляція типу ЛСЕК-5-СПл (ЛСЕК-5-СПл + ЛЕС + ФЛ-98) $\lambda = 0,06 \div 0,12$ Вт/м·К.

З представлених даних видно, що найбільшою теплопровідністю володіє система електричної ізоляції типу МОНОЛІТ-2. Також з літературних джерел [10-11] і з практики ізоляція такого типу має високі електричними характеристиками.

Недоліком такої системи електричної ізоляції є компаунд на основі епоксидної смоли. У компаунда великий час желатинізації, що вимагає тривалого часу термообробки (24 години і більше), система неремонтоздатна, має велику твердість і має більші внутрішні перенапруги. При частих і різких змінах температури виникають мікротріщини, що веде до зниження електричної міцності.

Висновки

Для зменшення виходу з ладу тягових електродвигунів необхідно використовувати при ремонті матеріали одного класу нагрівостійкості.

Слід замінити тривалу сушку вузлів при високих температурах на розігрів до 70–80 °С, щоб уникнути передчасної полімеризації і забезпечити монолітність ізоляції.

Рекомендується вдосконалити процес до вакуум-нагнітального просочення та впроваджувати нові електроізоляційні матеріали для зниження перегрівів.

Бібліографічний список

1. Electric motors for rolling mills MZZ: Catalog / General Electric Co. - DK №3898-68-1 (USA).
2. "Kapton doubled mileage on rebuilt traction motors", Du Pont, Cast history of "Kapton", Wilmington, DE, 19898, NA-70070.
3. "Subsea Oiline rugged downhole pump" - Prospectus / Oiline - 1973 (USA).

4. Бобирь, Д. В. Електричне обладнання тепловозів: підручник / Д. В. Бобирь, В. Н. Сердюк, М. В. Микуленко; за ред. В. Н. Сердюка; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро : УДУНТ, 2024. – 316 с.
5. Електроніка і мікросхемотехніка: у 4-х т. Том 4. Книга 1. Силова електроніка: Навч. посібник. За ред. В. І. Сенька. К.: Каравела, (2012)
6. <https://ua.weshare-china.com/polyimide-film/insulation-polyimide-film/high-temperature-resistant-insulation.htm>.

ІНТЕГРАЦІЯ СТАНДАРТУ ІЕС/ISO 31010:2009 У СИСТЕМУ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ ЛОКОМОТИВНОГО ГОСПОДАРСТВА

Очкасов Олександр Борисович, Доцент каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій (УДУНТ), вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, ел. пошта o.b.ochkasov@ust.edu.ua ORCID <https://orcid.org/0000-0002-7719-7214>

Десяк Андрій Євгенійович, Асистент каф. «Локомотиви» Український державний університет науки і технологій (УДУНТ), вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010 ел. пошта a.e.desyak@ust.edu.ua ORCID 0000-0001-8650-5242

Жовніренко Олександр, Аспірант каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій (УДУНТ), вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, ел. пошта o.s.zhovnirenko@ust.edu.ua ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5484-7430>

Анотація. В роботі виконано дослідження можливості застосування стандарту ІЕС/ІБО 31010:2009 в локомотивному господарстві з метою удосконалення системи утримання тепловозів шляхом використання методів оцінки ризиків різного походження. Описано ключові методи аналізу ризиків FMEA, FTA та HAZOP із прикладами їх використання для виявлення несправностей, попередження відмов та аварійних ситуацій на залізничному транспорті. Показано, як ці методи дозволяють підвищити надійність, зменшити аварійність і оптимізувати обслуговування локомотивів.

Ключові слова: ризик, локомотивне господарство, управління ризиками, управління ризиками, локомотивне господарство, стандарт ІЕС/ISO 31010:2009, аналіз ризиків, технічне обслуговування, безпека, надійність.

INTEGRATION OF IEC/ISO 31010:2009 STANDARD INTO THE RISK MANAGEMENT SYSTEM OF LOCOMOTIVE OPERATIONS

Oleksandr Ochkasov, Associate Professor of the Department of "Locomotives", Ukrainian State University of Science and Technologies (UDUST), 2 Lazaryana St., Dnipro, Ukraine, 49010, Email: o.b.ochkasov@ust.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7719-7214>

Andriy Desyak, Assistant of the Department of "Locomotives", Ukrainian State University of Science and Technologies (UDUST), 2 Lazaryana St., Dnipro, Ukraine, 49010, Email: a.e.desyak@ust.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8650-5242

Zhovnirenko Oleksandr, Postgraduate Student of the Department of "Locomotives", Ukrainian State University of Science and Technologies (UDUST), 2 Lazaryana St., Dnipro, Ukraine, 49010, Email: o.s.zhovnirenko@ust.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5484-7430>

Abstract. The study investigates the possibility of applying the IEC/ISO 31010:2009 standard in the locomotive industry to improve the locomotive maintenance system through the use of risk assessment methods of various origins. The key risk analysis methods, such as FMEA, FTA, and HAZOP, are described with examples of their application for identifying faults,

preventing failures, and avoiding emergency situations in railway transport. It demonstrates how these methods can enhance reliability, reduce accidents, and optimize locomotive servicing.

Keywords: risk, locomotive industry, risk management, IEC/ISO 31010:2009 standard, risk analysis, maintenance, safety, reliability.

У сучасних умовах експлуатації рухомого складу залізничного транспорту, зокрема локомотивів, особливої актуальності набуває питання ефективного контролю технічного стану тягового рухомого складу. Локомотив, як одиниця рухомого складу, функціонує в умовах значних динамічних навантажень, складних кліматичних умовах, в умовах обмежених ресурсах на ремонт та обслуговування в поєднанні з високими вимогами до надійності вузлів та агрегатів. Усі ці фактори є передумовами значних експлуатаційних ризиків, які охоплюють технічні, технологічні, організаційні та людські аспекти функціонування тягового складу.

Втрата працездатності окремих систем та елементів локомотива, може призвести до аварійних ситуацій, незапланованих простоїв, що призводить до порушення графіків руху поїздів та зниження ефективності перевізного процесу в цілому. У зв'язку з цим виникає необхідність удосконалити планово-попереджувальну систему утримування локомотивів, шляхом провадження ризик-орієнтованої моделі утримання, яка передбачає моніторинг технічного стану та обґрунтоване планування ремонтних і профілактичних заходів.

Застосування методів оцінки ризиків, згідно зі стандартом IEC/ISO 31010:2009, дозволяє ідентифікувати критичні елементи як тягового рухомого складу так і системи утримування, оцінити ймовірність відмов і їх потенційні наслідки для експлуатаційного процесу. Це створює підґрунтя для впровадження удосконаленої системи технічного утримання, яка сприяє підвищенню надійності, зменшенню експлуатаційних витрат та забезпеченню безперебійності перевізного процесу з дотриманням безпеки руху.

У системі утримування локомотивів важливим завданням є забезпечення високого рівня обслуговування та ремонту тягового рухомого складу, мінімізація часу простоїв у ремонтах та запобігання непланових відмовам під час експлуатації. Враховуючи сучасні постійно зростаючі вимоги до ефективності перевізного процесу, підвищення інтенсивності використання локомотивів та обмеженість ресурсів на ремонт та обслуговування, особливої актуальності набуває впровадження удосконаленої системи утримання тепловозів, заснованої на принципах управління ризиками.

Метою цієї роботи є обґрунтування доцільності впровадження методів оцінки ризиків до технічного утримання тепловозів, передбачених стандартом IEC/ISO 31010:2009. Такий підхід дає змогу виявити критичні елементи як системи утримування так і елементів рухомого складу, оцінити ймовірність і наслідки потенційних відмов, визначити пріоритети для удосконалення системи обслуговування.

У рамках дослідження передбачається аналіз практичного застосування методів FMEA, FTA та HAZOP для оцінки ризиків у ключових системах локомотивного господарства. Також розглядається можливість інтеграції результатів ризик-аналізу в систему планово-попереджувального обслуговування з метою зниження експлуатаційних витрат, покращення безпеки та підвищення загальної надійності локомотивного парку.

Стандарт ІЕС/ІСО 31010:2009 визначає загальну методологію аналізу та управління ризиками, надаючи широкий спектр інструментів, які можуть бути адаптовані до специфіки різних галузей промисловості, зокрема й залізничного транспорту. Застосування положень цього стандарту в локомотивному господарстві дозволяє системно підходити до ідентифікації, аналізу та зменшення технічних і експлуатаційних ризиків, пов'язаних із відмовами елементів конструкції локомотива.

У сфері технічного утримання тягового рухомого складу застосування методів аналізу ризиків забезпечує перехід від жорстко регламентованої, календарної моделі обслуговування до адаптивної системи, що враховує фактичний технічний стан агрегатів та їх вплив на безпеку і надійність експлуатації. Оцінка ризиків на основі аналізу несправностей дозволяє сформувати технічно обґрунтовану стратегію обслуговування, орієнтовану на забезпечення максимальної експлуатаційної готовності тягового рухомого складу при оптимальному використанні матеріально-технічних і людських ресурсів.

Процес оцінювання ризиків згідно з ІЕС/ІСО 31010:2009 включає логічний і послідовний підхід, спрямований на отримання відповідей на такі ключові запитання:

~ Що може статися з вузлами локомотива (ідентифікація потенційних відмов вузлів та агрегатів) та які можуть бути помилки при організації системи утримування?

~ Якими можуть бути наслідки для безпеки руху, експлуатаційної надійності та ресурсу тягового рухомого складу?

~ Яка ймовірність настання цих відмов у рамках планового міжремонтного пробігу чи інтервалу?

~ Чи існують механізми, що пом'якшують наслідки повної чи часткової відмови елемента чи системи локомотива (дублювання систем, системи діагностики, резервні системи)?

~ Чи допустимий рівень ризику з урахуванням вимог безпеки руху та нормативної бази Укрзалізниці?

Стандарт ІЕС/ІСО 31010:2009 надає цілий ряд методів для оцінки та управління ризиками. Для локомотивного господарства найбільш ефективними є наступні методи.

FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) – дозволяє виявити можливі види відмов вузлів та систем локомотива, оцінити їх вплив на роботу всього залізничного транспорту, а також визначити пріоритетні технічні заходи для усунення або запобігання цим відмовам.

FTA (Fault Tree Analysis) – дає можливість побудувати логічну модель причинно-наслідкових зв'язків між базовими відмовами окремих елементів та аварійними подіями.

HAZOP (Hazard and Operability Study) – метод структурованого та систематизованого дослідження планованих або наявних продукції, процесу, процедури чи системи. Він дає змогу ідентифікувати ризики для персоналу, устаткування, довкілля та/або цілей організації, дозволяє прийняти рішення щодо обробки конкретного ризику, дозволяє оцінити потенційні відхилення від нормальної роботи систем.

Метод Дельфі (Delphi Method) – це експертний метод, який використовується для отримання достовірного узагальненого прогнозу або оцінки шляхом багаторазового опитування групи експертів, тобто залучається колективний досвід. Він є ефективним інструментом у випадках, коли кількісні дані відсутні або недостатні, а рішення потрібно

приймати на основі якісної оцінки досвідчених фахівців. **Метод Дельфі** є доцільним інструментом для формування ризик-орієнтованої стратегії технічного утримання локомотивів у випадках, коли статистичних даних недостатньо, а рішення потрібно приймати на основі професійних суджень. Його можна ефективно поєднувати з методами FMEA або HAZOP для уточнення експертних оцінок.

Приклади застосування методу Дельфі (Delphi Method) IEC/ІБО 31010:2009 в локомотивному господарстві:

- ~ визначення пріоритетності систем тепловоза, які потребують першочергової діагностики та модернізації;

- ~ оцінка ризиків безпеки на залізницях – метод Дельфі допомагає визначити потенційні ризики, які можуть виникнути в експлуатації локомотивів. Це може включати аварійні ситуації, пов'язані з технічними несправностями локомотивів, небезпеки для пасажирів або аварії на залізничних переїздах;

- ~ прогнозування потреби в нових локомотивах або модернізації існуючих – методом Дельфі можна визначити потреби в оновленні парку локомотивів, враховуючи майбутні вимоги до перевезень, розвитку залізничної інфраструктури або нових стандартів екологічності;

- ~ оцінка ефективності систем моніторингу і діагностики локомотивів – експерти можуть використовувати метод Дельфі для оцінки впровадження нових технологій моніторингу та діагностики в реальному часі, таких як системи для виявлення технічних несправностей до їх виникнення, що дозволяє мінімізувати витрати на ремонт.

Аналіз відмов і наслідків (FMEA). Цей метод дозволяє визначити можливі відмови систем та наслідки цих відмов. В локомотивному господарстві цей метод можна застосувати для аналізу відмов у критичних вузлах та системах, таких як силова енергетична установка, гальмівна система та система керування.

Застосування методу FMEA відповідно до IEC/ISO 31010:2009 в локомотивному господарстві дозволяє систематично ідентифікувати можливі відмови у критичних системах локомотивів, оцінювати їх наслідки та вживати відповідні заходи для зниження ризиків, що сприяє підвищенню безпеки та надійності транспорту.

Приклади застосування методу FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) IEC/ІБО 31010:2009 в локомотивному господарстві:

1. Аналіз відмов гальмівної системи рухомого складу:

Можливі відмови: нормальний знос чи пошкодження гальмівних колодок, нещільності гальмівної системи (понаднормовий витік повітря), збої в системі управління.

Наслідки відмови: зниження ефективності гальмування, затримка у гальмуванні, збільшення гальмівного шляху і як наслідок виникнення аварійної ситуації.

Заходи з мінімізації ризиків: регулярна перевірка стану гальмівних колодок, контроль щільності гальмівної магістралі, перевірка системи гальмівної системи.

2. Аналіз відмов дизельного двигуна:

Можливі відмови: зниження потужності через зношення поршнів, забруднення пального, перегрів через проблеми з охолоджувальною системою.

Наслідки відмови: аварійна зупинка двигуна, небезпека для локомотивної бригади, потенційно небезпечні ситуації на залізниці.

Заходи з мінімізації ризиків: регулярна перевірка роботи усіх систем дизеля, контроль температури, моніторинг стану поршневої системи, перевірка цільності систем дизеля.

Аналіз дерева відмов (FTA). За допомогою цього методу можна побудувати модель ймовірних шляхів розвитку аварійних ситуацій, що може допомогти у плануванні заходів під час аварій та підвищення рівня безпеки.

Метод FTA використовувався для створення дерева відмов, що показує потенційні шляхи розвитку аварійної ситуації, наприклад через, перепади напруги, перегрів обладнання чи відмову системи охолодження тягового електричного обладнання, потрапляння вологи та конденсату, зношеність, пробій або пошкодження ізоляції, низька якість обслуговування або ремонту, помилки працівників під час експлуатації, збій у системах керування та помилки в алгоритмах управління. Дану методику також можна використовувати для попередження несправностей дизелів, екіпажної та ходової частини.

В результаті після раціонального аналізу та використання дерева відмов можна попередити значну кількість аварійних ситуацій пов'язаних з відмовами та несправностями в роботі тягового обладнання.

Приклад застосування методу FTA (Fault Tree Analysis) IEC/ІСО 31010:2009 в локомотивному господарстві. Аналіз відмови тепловозного дизеля.

Основна подія (Top Event) – відмова двигуна локомотива під час руху.

Події нижчого рівня з ймовірними причинами: забруднення пального (використання неякісного пального, пошкодження паливного фільтра), перегрів двигуна (забруднення радіатора, витік охолоджувальної рідини), знос поршневої системи (недотримання графіка обслуговування, використання низькоякісних масел), поломка паливного насоса (неправильна експлуатація, зношення деталей насоса)

Заходи з мінімізації ризиків: встановлення системи фільтрації пального, перевірка і чистка охолоджувальних систем, впровадження регулярних перевірок стану поршневих систем і заміна масел.

Дослідження небезпек і експлуатаційної здатності (HAZOP). HAZOP – це потужний інструмент аналізу ризиків, рекомендований стандартом IEC/ISO 31010:2009, особливо для складних технічних систем із високими вимогами до безпеки. Цей метод дозволяє оцінити не лише технічні аспекти, а й взаємодію людського фактору з локомотивом під час експлуатації, що є критичним для мінімізації людських помилок. У рамках даної доповіді було проведено аналіз можливих ризиків, пов'язаних із різними компонентами локомотивів, та оцінку їх впливу на безпеку перевезень і надійність рухомого складу.

Приклад застосування методу HAZOP (Hazard and Operability Study) IEC/ІСО 31010:2009 в локомотивному господарстві.

Дизельний двигун локомотива.

1. Ідентифікація ключових параметрів. Для дизельного двигуна визначаємо основні параметри, що впливають на його роботу: температура охолоджуючої рідини, тиск масла

в системі змащення, частота обертання двигуна, тиск дизельного палива в системі, рівень палива в баку.

2. Ідентифікація можливих відхилень для кожного параметра. Для кожного вищезгаданого параметра визначаються потенційні відхилення.

3. Ідентифікація можливих причин і наслідків. Для кожного відхилення визначаються можливі причини і наслідки.

4. Оцінка ризиків. Оцінюється ймовірність виникнення кожного з відхилень і їх серйозність.

5. Визначення заходів для зниження ризиків. Для кожного відхилення пропонуються заходи для зниження ризиків.

8. Моніторинг і перевірка ефективності заходів. Після впровадження заходів здійснюється постійний моніторинг.

Отже, застосування методу HAZOP для аналізу дизельного двигуна локомотиву дозволяє виявити критичні фактори, які можуть призвести до відмови двигуна або аварійної ситуації, та впровадити заходи для зниження цих ризиків. Це підвищує надійність та безпеку локомотиву, мінімізуючи ймовірність серйозних пошкоджень або зупинок в процесі експлуатації.

В сучасних умовах, де вимоги до безпеки, надійності та ефективності залізничного транспорту є надзвичайно високими, важливим кроком є впровадження систем управління ризиками, що дозволяє оптимізувати систему утримання локомотивів. Застосування стандарту IEC/ISO 31010:2009 у локомотивному господарстві дозволяє впровадити структурований підхід до оцінки та зниження ризиків, пов'язаних з можливими відмовами критичних систем, що забезпечують стабільну та безперебійну роботу залізничного транспорту.

Застосування методів оцінки ризиків, таких як FMEA, FTA, HAZOP та метод Дельфі, дозволяє не лише ідентифікувати критичні елементи як тягового рухомого складу, так і системи утримання, а й визначити ймовірність та наслідки відмов, що є основою для подальшого вдосконалення системи обслуговування. Впровадження цих методів у технічне утримання локомотивів дозволяє перейти до більш гнучкої та адаптивної моделі, орієнтуючись на реальний технічний стан елементів локомотива та забезпечуючи підвищення надійності, безпеки та зниження витрат.

Аналіз практичних прикладів застосування вищезазначених методів показав їх ефективність у виявленні потенційних проблемних зон, прогнозуванні можливих аварійних ситуацій та визначенні пріоритетів для заходів щодо покращення безпеки та зменшення експлуатаційних витрат. Зокрема, застосування методу FMEA дозволяє оцінити наслідки відмов ключових систем, таких як гальмівна система та дизельний двигун, тоді як методи FTA та HAZOP допомагають у побудові моделей причинно-наслідкових зв'язків та визначенні найкритичніших елементів, що потребують особливої уваги при обслуговуванні.

Впровадження ризик-орієнтованого підходу до технічного утримання локомотивів дозволить значно підвищити ефективність обслуговування, знизити ризики аварійних ситуацій, що мають серйозні наслідки для безпеки руху та експлуатаційної надійності.

Отже, застосування методів оцінки ризиків згідно зі стандартом IEC/ISO 31010:2009 є доцільним та ефективним кроком для покращення процесу утримання та експлуатації локомотивів в сучасних умовах.

Бібліографічний список

1. IEC/ISO 31010:2009. Методи оцінки ризиків: міжнародний стандарт. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iec.ch/> [Дата звернення: 09.04.2025].
2. Дацун Ю. М. Розвиток наукових основ формування інтелектуалізованої системи ремонту локомотивів: дис. ... докт. техн. наук: 05.22.07 – рухомий склад залізниць та тяга поїздів / Ю. М. Дацун; наук. консультанти Тараковський Е. Д., Пузир В. Г. – Харків: Український державний університет залізничного транспорту, 2021. – 301 с.
3. Очкасов, О. Б. Підходи до моделювання системи управління локомотивним парком з урахуванням ризиків / Очкасов О. Б., Очеретнюк М. В. // Інжиніринг криз та ризиків транспортних послуг : зб. доп. Міжнар. наук.-метод. конф., Маріуполь, 20–21 січ. 2021 р. / М-во освіти і науки України, ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», Варшав. політехн. ун-т (Польща), Техн. ун-т Берліну (Німеччина). – Маріуполь, 2021. – С. 304–307.
4. Боднар, Б. Є. Вибір стратегій утримання та експлуатації локомотивного парку з використанням теорії управління ризиками / Боднар Б. Є., Очкасов О. Б. // Інжиніринг криз та ризиків транспортних послуг : зб. доп. Міжнар. наук.-метод. конф., Маріуполь, 20–21 січ. 2021 р. / М-во освіти і науки України, ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», Варшав. політехн. ун-т (Польща), Техн. ун-т Берліну (Німеччина). – Маріуполь, 2021. – С. 311–315.
5. Впровадження Risk Based Maintenance для підвищення ефективності експлуатації тепловозів на промисловому транспорті / Очкасов О.Б., Мухіна Н. А., Жовніренко О. С., Петренко В. // Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств : тези 13-ї Міжнар. наук.-практ. конф., м. Дніпро, 28–29 листоп. 2024 р. / М-во освіти і науки України, Укр. держ. ун-т науки і технологій, Навч.-наук. ін-т «Дніпров. ін-т інфраструктури і трансп.». – Дніпро, 2024. – С. 65–67.

МЕТОДИ АНАЛІЗУ ІНДИКАТОРНИХ ДІАГРАМ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ: ОГЛЯД І ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ

О.Б. Очкасов, Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, ел. пошта abochkasov@gmail.com, ORCID 0000-0002-7719-7214

О.І. Студенко, Каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, ел. пошта studentt19@gmail.com

Анотація. У роботі розглядаються актуальні проблеми та перспективи розвитку методів аналізу індикаторних діаграм. Проаналізовано основні тенденції, та практичні рішення аналізу індикаторних діаграм. Представлені висновки, та перспективні напрямки дослідження.

Ключові слова: Дизельні двигуни, технічне діагностування, індикаторні діаграми, оптимізація діагностування.

METHODS OF INDICATOR DIAGRAM ANALYSIS FOR DIAGNOSING THE TECHNICAL CONDITION OF DIESEL ENGINES: REVIEW AND APPLICATION PROSPECTS

O.B. Ochkasov, Department of "Locomotives," Ukrainian State University of Science and Technology, Lazaryana St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, email: abochkasov@gmail.com, ORCID 0000-0002-7719-7214

O.I. Studenko, Department of "Locomotives," Ukrainian State University of Science and Technology, Lazaryana St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, email: studentt19@gmail.com

Abstract. The paper examines current problems and prospects for the development of indicator chart analysis methods. The main trends and practical solutions for analyzing indicator charts are analyzed. Conclusions and promising research directions are presented.

Key words: Diesel engines, technical diagnostics, indicator diagrams, diagnostics optimization.

Розвиток транспортної галузі вимагає удосконалення підходів до організації системи утримання рухомого складу. Однією з задач, яку необхідно для цього вирішити є удосконалення методів діагностики технічного стану силових агрегатів, що дозволяє забезпечити своєчасне виявлення несправностей, оптимізацію режимів роботи та зниження витрат на експлуатацію. Перехід від планово – попереджувальної системи обслуговування до обслуговування локомотивів за фактичним технічним станом дозволить своєчасно виконувати обслуговування та запобігати серйозним поломкам. Але такий перехід вимагає впровадження сучасних інтелектуальних моніторингових систем, призначених для контролю функціонування складних технічних об'єктів, які описані в [1] та [2]. Проблемою впровадження інтелектуальних моніторингових систем є складність адаптації застарілої техніки, яка не має вбудованих систем діагностування. Тому впровадження більш традиційних методів діагностування технічного стану дизеля є більш актуальним в умовах інтенсивної експлуатації.

Завдання, поставлене практикою експлуатації дизелів, полягає в необхідності підтримки його працездатного стану протягом усього періоду експлуатації. Тому повстає питання розробки та вдосконалення вже існуючих методів визначення основних параметрів робочого процесу дизеля, що дозволяють здійснювати ефективно діагностування технічного стану без впровадження систем діагностування високої вартості.

Для визначення основних параметрів робочого процесу дизеля частіше за все використовують аналіз індикаторних діаграм, які були отримані під час експлуатації. Індикаторні діаграми відображають зміну тиску в циліндрі залежно від кута повороту колінчастого валу та є ключовою характеристикою робочого циклу двигуна. Їх аналіз дозволяє визначати миттєві параметри робочого середовища та основні індикаторні показники циклу P_i - середній індикаторний тиск, η_i - індикаторний ККД, N_i – індикаторна потужність, g_i - індикаторна питома витрата палива. Індикаторні діаграми є важливим інструментом аналізу робочого процесу дизеля. Вони являють собою графічне відображення зміни тиску в циліндрі залежно від ходу поршня або кута повороту колінчастого валу. Основна цінність таких діаграм полягає в їхній здатності наочно демонструвати реальні фізичні процеси всередині дизеля без додаткових розрахунків. А завдяки комп'ютерному та математичному моделюванню можна детальніше аналізувати процеси, які відбуваються в циліндрі двигуна під час робочого циклу.

Сучасні системи реєстрації тиску під час згоряння можуть досліджувати окремі цикли, але для отримання точних і достовірних результатів необхідно аналізувати велику кількість послідовних циклів у стабільному режимі роботи двигуна. Проте аналіз індикаторних діаграм хоча і є одним із найважливіших методів оцінки робочого процесу дизельного двигуна, але не є єдиним. Можуть також використовуватися методи, які описуються в роботах [2] і [3]. Але нажаль описані методи не забезпечують достатню ефективність для точної оцінки технічного стану дизеля. Тому основним завданням є дослідження найбільш значущих методів аналізу робочого процесу для діагностування дизеля.

Так в роботі [4], описаний аналіз індикаторних діаграм отриманих за допомогою сучасних цифрових реєстраційних систем, та описане їх усереднення. Таке усереднення обґрунтовується необхідністю зменшення впливу нерівномірності роботи двигуна та підвищення точності оцінки параметрів його робочого циклу. Оскільки умови формування паливо-повітряної суміші, ступінь її згоряння та інші чинники постійно змінюються, миттєві значення тиску можуть значно відрізнятись. Це ускладнює аналіз характеристик двигуна, тому застосовується усереднення даних для отримання більш репрезентативної індикаторної діаграми.

Методика описана в [4] базується на аналізі послідовних робочих циклів двигуна з використанням сигналів датчика повороту колінчастого валу. Це дозволяє компенсувати вплив нерівномірності обертання та отримати усереднені значення тиску для кожного кута повороту валу. Відзначено, що особливу проблему становлять коливання сигналів, спричинені турбулентними потоками, вібраціями та нерівномірністю подачі палива. Тому необхідно опрацьовувати великі масиви даних – від 50 до 100 циклів – для отримання достовірних результатів. Для апроксимації отриманих даних застосовують різні методи, серед яких змінна середня, фільтр Савітського-Голлея, низькопропускний фільтр, а також спеціальна методика кускової апроксимації. Проте описаний метод має і певні недоліки,

які можуть впливати на точність отриманих даних. Основною проблемою є похибка, що виникає через дискретизацію сигналів, особливо якщо частота збору даних недостатньо висока. Також вплив нерівномірності обертання колінчастого вала може спричинити неточності при визначенні середніх значень тиску в циліндрі, якщо не використовуються спеціальні корекційні алгоритми. Додатковою складністю є необхідність попереднього калібрування датчиків та корекції отриманих даних, щоб зменшити вплив випадкових факторів, таких як вібрації, турбулентність потоків та затримки в роботі вимірювальної апаратури.

Хоча метод описаний в роботі [4] і дозволяє перетворювати шкалу часу в шкалу кута повороту колінчастого вала, що спрощує подальший аналіз та інтерпретацію отриманих результатів, похибка при отриманні координати ВМТ має найбільший вплив на вирішення задачі аналізу. Як зазначено в [5] вплив похибки визначення положення ВМТ на точність розрахунку середнього індикаторного тиску дуже великий: 6...9 % на 1° помилки ВМТ. Таким чином, щоб отримати прийнятний розрахунок середнього індикаторного тиску та індикаторної потужності, необхідно визначати положення ВМТ з мінімальною погрешністю.

Проблему точного визначення ВМТ описано у роботі [5], та запропонований метод аналітичної синхронізації даних моніторингу робочого процесу дизеля. Основою запропонованого методу є послідовне застосування трьох етапів визначення ВМТ, що включають лінійну регресію, синусоїдальну апроксимацію та розв'язання рівняння нуля першої похідної тиску в циліндрі. Лінійна регресія застосовується для первинного визначення положення ВМТ, використовуючи дані про зміну тиску. Вона дає можливість отримати початкові дані про положення ВМТ, яке згодом уточнюється за допомогою синусоїдальної апроксимації, що дозволяє точніше описати характер змін тиску у критичній фазі робочого процесу. На завершальному етапі використовується рівняння $P'=0$, яке базується на припущенні, що у момент проходження ВМТ швидкість зміни тиску в циліндрі набуває нульового значення. Використання цього підходу дозволяє досягти високої точності визначення ВМТ, зводячи абсолютну похибку до 0,1-0,3 градуса повороту колінчастого вала, що забезпечує відносну похибку розрахунку індикаторної потужності двигуна не більше 2,5%. Описаний метод аналітичної синхронізації більш точний у визначенні миттєвих параметрів двигуна у порівнянні з [4] і дозволяє отримати високоточні дані в реальному часі. Він не потребує встановлення додаткових датчиків і може використовуватися на існуючих системах моніторингу. Проте його реалізація складніша, оскільки потребує використання складних математичних алгоритмів та цифрової обробки сигналів.

В роботі [6] основним напрямком дослідження є розробка методики отримання еталонних індикаторних діаграм судових дизелів для режимів, які відрізняються від номінальних. Так як тенденція зниження швидкості руху суден, які спричинені економією палива та змінами у логістиці, унеможливають отримання індикаторних діаграм на номінальних режимах експлуатації, що призводить до того, що ефективність використання індикаторних діаграм для діагностики стану дизеля значно знижується, а отже, виникає потреба у розробці нових підходів до аналізу та обробки цих даних. Запропонований метод ґрунтується на використанні результатів стендових випробувань двигуна, їхньому оцифруванню та подальшій обробці. Для цього застосовується побудова тривимірних

полігональних поверхонь, відомих як поверхні Кунса. Вони дозволяють отримати аналітичні залежності між тиском у циліндрі, кутом повороту колінчастого валу та навантаженням двигуна. Використання цього підходу дає змогу аналітично визначити «еталонні» індикаторні діаграми для будь-якого режиму роботи двигуна без необхідності проведення фізичних вимірювань у конкретних умовах експлуатації. Розроблений у межах дослідження алгоритм дозволяє автоматизувати обробку індикаторних діаграм та отримати 46 параметрів, які характеризують робочий процес двигуна. Ці параметри можуть використовуватися для діагностування технічного стану двигуна та виявлення відхилень від нормативних значень. Впровадження такої методики дає змогу значно підвищити точність аналізу та виявлення можливих проблем у роботі двигуна ще до їхнього критичного розвитку. Запропонований метод дозволяє компенсувати обмеження, пов'язані з відсутністю можливості проведення вимірювань на номінальних режимах, та забезпечує можливість отримання достовірних еталонних діаграм для будь-якого режиму роботи двигуна. Це значно покращує можливості діагностування та контролю технічного стану дизеля.

Усі розглянуті методи аналізу індикаторних мають спільну мету – підвищення точності оцінки технічного стану двигуна шляхом аналізу параметрів робочого процесу. Однак вони використовують різні підходи та мають свої переваги та недоліки. Порівняння розглянутих методів аналізу індикаторних діаграм та оцінка придатності їх використання для аналізу індикаторних діаграм приведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняння методів аналізу індикаторних діаграм

Метод аналізу	Переваги	Недоліки	Придатність застосування на локомотивах
Усереднення індикаторних діаграм [4]	Стабільність, простота	Потребує багато циклів вимірювань	Середня
Аналітична синхронізація даних [5]	Висока точність	Складність реалізації	Висока
Побудова еталонних діаграм [6]	Діагностика без вимірювань	Потребує моделей і обчислень	Висока

На основі проведеного аналізу можемо стверджувати, майбутні дослідження повинні бути спрямовані на підвищення точності та оперативності обробки індикаторних діаграм, що дозволить створити ефективні системи прогнозування технічного стану дизеля тепловоза. Впровадження удосконалених методів аналізу індикаторних діаграм одночасно з удосконаленням технічних засобів діагностування, здатних працювати у складних умовах експлуатації без значного зносу та втрати точності, забезпечать більш високу роздільну здатність вимірювань та зменшення похибок при зборі даних у реальному часі. А використання штучного інтелекту та методів машинного навчання дозволять розробити нові алгоритми обробки даних, які дозволять не лише швидше і точніше ідентифікувати

відхилення у роботі дизеля, а й прогнозувати можливі несправності задовго до їх виникнення.

Бібліографічний список

1. Скалозуб В. В., Очкасов О. Б., Кібець Д. В. Автоматизований експертний комплекс із дослідження та прогнозування параметрів силових енергетичних установок локомотивів. Інформ.-керуючі системи на залізн. трансп. 2020. Т. 25. № 2. С. 8–18.
2. Bodnar, B. Diesel Engines In-Place Diagnosis of Diesel Locomotives: Modern Approaches and Practical Application / B. Bodnar, O. Ochkasov, O. Studenko // Transport Means 2024 : Proc. of the 28th Intern. Sci. Conf. (Oct. 02–04, 2024, Kaunas, Lithuania) / Kaunas University of Technology [et al.]. – Kaunas, 2024. – P. 351–357. – DOI: 10.5755/e01.2351-7034.2024.P351-357.
3. Боднар Б. С., Очкасов О. Б., Черняєв Д. В., Децюра О. Я. Моделювання нерівномірності обертання колінчатого вала дизеля // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 31. – С. 18–22.
4. Левченко Д. В. Усереднення індикаторних діаграм ДВЗ, знятих сучасними цифровими системами реєстрації / Д. В. Левченко // Автомобильный транспорт. - 2017. - Вып. 41. - С. 71-76.
5. Варбанец Р. А. Метод аналитической синхронизации данных мониторинга рабочего процесса транспортных дизелей в эксплуатации / Р. А. Варбанец, В. И. Залож, Т. В. Тарасенко, Т. П. Белоусова, А. В. Ерыганов // Авіаційно-космічна техніка і технологія. - 2020. - № 7. - С. 118–128.
6. Bilousov I., Bulgakov M., Savchuk V. Modern Marine Internal Combustion Engines. Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping, Springer, Cham., 2020. XIII, 385 p.

РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ КЕРУВАННЯ РУХОМИМ СКЛАДОМ ПРИ ВИМУШЕНОМУ ЗНИЖЕННІ ШВИДКОСТІ

Капіца М.І., директор ННІ «ДІТ», Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна, m.i.kapica@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-3800-2920

Бобирь Д. В., каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна, d.v.bobyr@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-1441-3861

Кислий Д. М., каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна, d.m.kyslyi@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-4427-894X

Самілик Д.О., аспірант каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна, samilykd@gmail.com, ORCID 0009-0001-5252-4944

Анотація. У роботі досліджено питання енергоефективності руху поїздів при зміні режимів руху. Актуальність дослідження обумовлена недостатньою вивченістю впливу режиму вибігу на енерговитрати та час руху поїзда, незважаючи на широке використання сучасних технологій оптимізації режимів ведення. Метою роботи є визначення оптимальної тривалості вибігу та зміни швидкості для досягнення максимальної енергоефективності при забезпеченні зниження швидкості поїзда або зупинки. На основі тягово-енергетичних розрахунків побудовано залежності зменшення витрат електроенергії від збільшення часу руху поїзда для різних початкових швидкостей переходу в режим вибігу та різних ухилів колії. Результати дослідження дозволили визначити раціональні інтервали зміни швидкості та довжини ділянок руху в режимі вибігу для різних профілів колії.

Ключові слова: режим вибігу, енергоефективність, тягово-енергетичні розрахунки, оптимізація режимів ведення, ухил колії.

DEVELOPMENT OF ENERGY-EFFICIENT DRIVING MODES FOR ROLLING STOCK DURING FORCED SPEED REDUCTION

Kapica M.I., ESI Dnipro Institute of Infrastructure and Transport, Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine, m.i.kapica@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-3800-2920

Bobyr D.V., Chair of Locomotives, Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine, d.v.bobyr@ust.edu.ua, ORCID 0000-0003-1441-3861

Kyslyi D. M., Chair of Locomotives, Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine, d.m.kyslyi@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-4427-894X

Samilyk D.O., Postgraduate student of the chair of Locomotives, Ukrainian State University of SCIENCE and Technologies, Dnipro, Ukraine, samilykd@gmail.com, ORCID 0009-0001-5252-4944

Abstract. The study investigates the issue of energy efficiency in train movement during mode transitions. The relevance of the research is driven by the insufficient understanding of the impact of coasting mode on energy consumption and travel time, despite the widespread use of modern technologies for optimizing driving modes. The aim of the work is to determine the optimal duration of coasting and speed changes to achieve maximum energy efficiency while ensuring a reduction in train speed or a complete stop. Based on traction-energy calculations,

dependencies of reduced electricity consumption on increased travel time were constructed for various initial speeds of transitioning to coasting mode and different track gradients. The research results allowed for the identification of rational intervals for speed changes and the lengths of track sections for coasting mode under various track profiles.

Keywords: coasting mode, energy efficiency, traction-energy calculations, driving mode optimization, track gradient.

Вступ. При прямуюванні поїзда по дільниці виникає необхідність переходу з режиму тяги в режим гальмування. Це необхідно, наприклад, при наближенні до ділянки, де потрібно знизити швидкість або зупинитися, при виході на небезпечний схил тощо. Зазвичай під час такого переходу протягом певного відрізка шляху поїзд рухається у режимі вибігу.

Аналіз джерел та публікацій. Згідно з Правилами тягових розрахунків, під час виконання розрахунків за методом максимуму рух поїзда у режимі вибігу не враховується, що пов'язано з недостатньою вивченістю цього питання. Сучасні технології, такі як використання режимних карт та систем енергоефективного керування, дають змогу зменшити витрати енергоресурсів на тягу. Проте навіть різноманітні алгоритми оптимізації режимів руху не завжди забезпечують досягнення максимальної енергоефективності.

Мета. У цій роботі здійснено спробу визначити оптимальну тривалість вибігу та зміну швидкості під час переходу з режиму тяги в режим гальмування, включаючи процес повної зупинки поїзда.

Постановка завдання. Поїзд рухається по довільній дільниці, що має однорідний профіль. Щоб забезпечити зупинку поїзда в заданому пункті або зниження швидкості до заданої величини, гальмування повинно бути виконане з таким розрахунком, щоб швидкість змінювалася відповідно залежності розв'язання рівняння руху поїзда в режимі гальмування. У разі застосування вибігу поїзда додається залежність розв'язання рівняння руху поїзда в режимі вибігу. Вона дозволить зменшити витрату енергоресурсів локомотивом, але для дотримання умови зупинки або зменшення швидкості, необхідно розв'язувати рівняння руху поїзда комплексно для всіх застосованих режимів ведення.

Зменшення витрат енергоресурсів при застосуванні режиму вибігу відбувається на відповідній дільниці прямуювання. Але це призводить до зменшення технічної швидкості й, відповідно, до збільшення часу ходу поїзда на всій дільниці.

Визначимо збільшення часу ходу поїзда Δt із застосуванням вибігу:

$$\Delta t = t - t_1 - t_2, \quad (1)$$

де t – час руху в режимі вибігу; t_1 – час руху в режимі тяги; t_2 – час в режимі гальмування.

Методика. Для визначення залежності між зменшенням витрат енергоресурсів та збільшенням часу руху рухомого складу проведено тягові розрахунки для різних варіантів вхідних даних [1]: зміна початкової швидкості 90-40 км/год; зниження швидкості під час вибігу 0-50 км/год; різні профілі ділянки: $i \in [0-10]\%$.

Розрахунки траєкторії руху поїзда та визначення тягово-енергетичних параметрів виконувалися на ідеалізованій математичній моделі поїзда, яка розглядається як однорідне

тіло з одним ступенем свободи. Модель базується на класичних принципах теорії локомотивної тяги при зміні швидкості з інтервалом 0,5 км/год.

Для спрощення розрахунків та їх узагальнення в якості вхідних даних було обрано електровоз серії ВЛ8 з поїздом масою 4000 т, що складається з чотиривісних вагонів із навантаженням на вісь 15 т. В результаті отримано вираз для основного питомого опору руху поїзда:

$$w_x = 0,966 + 0,686 \cdot 10^{-2} \cdot v + 0,175 \cdot 10^{-3} \cdot v^2. \quad (2)$$

Для розрахунків прийнято, що службове гальмування відбувається з натисненням гальмівних колодок, рівним половині повної гальмівної сили. При гальмівному коефіцієнті поїзда

$$g_p = \frac{\sigma \cdot \Sigma k_p}{Q \cdot g} \quad (3)$$

отримуємо наступну залежність гальмівної сили

$$b_z = 0,5 \cdot 1000 \cdot g_p \cdot \varphi_{dp}. \quad (4)$$

При використанні у складі чавунних гальмівних колодок, розрахунковий гальмівний коефіцієнт складе

$$\varphi_{dp} = 0,27 \frac{V + 100}{5 \cdot V + 100}. \quad (5)$$

З врахуванням (5) і (3), питома сила, що діє на поїзд в режимі гальмування описується рівнянням [1]

$$\omega_{ox} + 0,5 \cdot b_z = 0,966 + 0,686 \cdot 10^{-2} \cdot v + 0,175 \cdot 10^{-3} \cdot v^2 + \frac{199 \cdot (0,27 \cdot V + 27)}{5 \cdot V + 100}. \quad (6)$$

За результатами тягово-енергетичних розрахунків отримані дані про витрату енергоресурсів A та час ходу поїзда t для різних значень ухилів та рівнів зниження швидкостей за час вибігу (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати тягово-енергетичних розрахунків

V_n , км/год	ΔV , км/год	$i = 0\%$		$i = 5\%$		$i = 10\%$	
		A , кВт·год	t , хв	A , кВт·год	t , хв	A , кВт·год	t , хв
90	0	139	4,26	274	4,83	471	5,84
	5	95,7	4,30	253	4,87	455	5,89
	25	—	—	184	5,20	417	6,11
	30	—	—	168	5,32	417	6,26
80	0	139	4,30	326	5,13	560	6,50
	5	99,3	4,33	306	5,15	545	6,49
	30	—	—	220	5,62	506	6,92
70	0	146	4,36	368	5,35	635	7,02
	5	107	4,39	348	5,36	627	7,08
	30	—	—	263	5,84	589	7,51

На основі результатів тягово-енергетичних розрахунків [2, 3] побудовано графіки залежності зменшення споживання електроенергії від збільшення часу руху поїзда. Ці залежності проаналізовано для різних значень початкової швидкості переходу до режиму вибігу та різних додатних ухилів профілю (рис. 1).

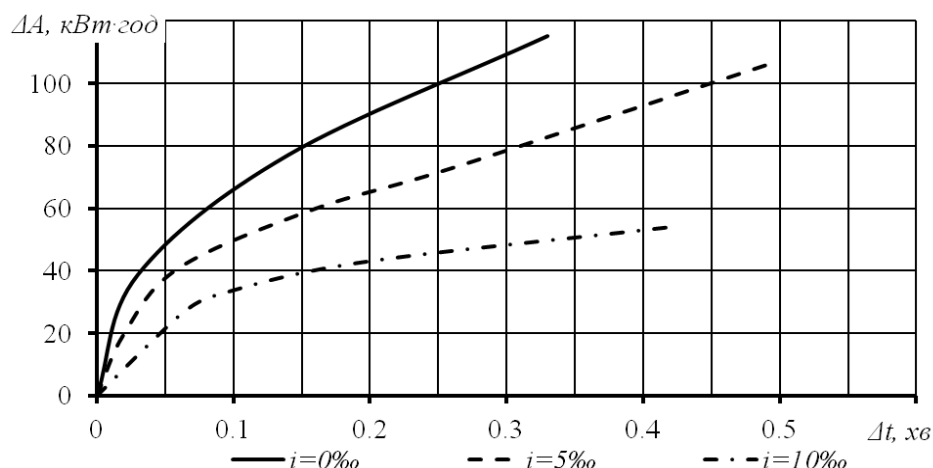


Рисунок 1 – Залежність зниження витрати енергоресурсів від збільшення витрати часу при варіативних значеннях ухилу профілю колії для початкової швидкості виходу в режим вибігу 80 км/год

Залежності зниження витрати енергоресурсів від збільшення витрати часу при різних швидкостях переходу в режим вибігу та ухилу колії накладаються між собою та не надають інформації для оптимізації режимів ведення.

Залежності зниження витрати енергоресурсів від збільшення витрати часу являють собою зростаючі функції, що проходять через початок координат та мають наступний вираз в кожній точці кривої

$$\Delta A = a \cdot \Delta t, \quad (7)$$

де a – додатний коефіцієнт, що зв'язує зниження витрати електроенергії та збільшення часу ходу поїзда, являє собою відношення витрати енергії ΔA до збільшення часу ходу Δt і вимірюється в кВт·год/хв.

Визначаємо значення коефіцієнта a за формулою:

$$a = \frac{\Delta A}{\Delta t}. \quad (8)$$

Цей коефіцієнт можна вважати коефіцієнтом ефективності вибігу. Його значення збільшується із зростанням економії електроенергії та зменшенням втрат часу.

Якщо проаналізувати залежність (рис. 1), то можна зробити висновок, що економія енергоресурсів за рахунок використання проміжного режиму вибігу між режимами тяги та гальмування безпосередньо залежить від величини нахилу ділянки колії.

При зниженні швидкості на 5-10 км/год у режимі вибігу час руху поїзда збільшується незначно, а економія енергоресурсів може досягати 50 кВт·год.

Із збільшенням інтервалу зміни швидкості в режимі вибігу час прямування зростає через зменшення технічної швидкості на даній ділянці. При цьому спостерігається зниження витрат енергоресурсів. У випадках значних знижень швидкості (до 40 км/год) та невеликого ухилу підйому час руху може збільшитися на 3-5 хвилин, а економія енергоресурсів може скласти кілька сотень кіловат-годин [4, 5].

Для визначення оптимальної довжини ділянки або інтервалу зміни швидкості в режимі вибігу результати тягово-енергетичних розрахунків було згруповано з урахуванням вищенаведених висновків. На основі цих даних розраховано середньоарифметичне

значення економії енергоресурсів та збільшення часу руху поїзда. За отриманими результатами побудовано залежності (рис. 2), на яких позначено точки інтервалів швидкості в режимі вибігу.

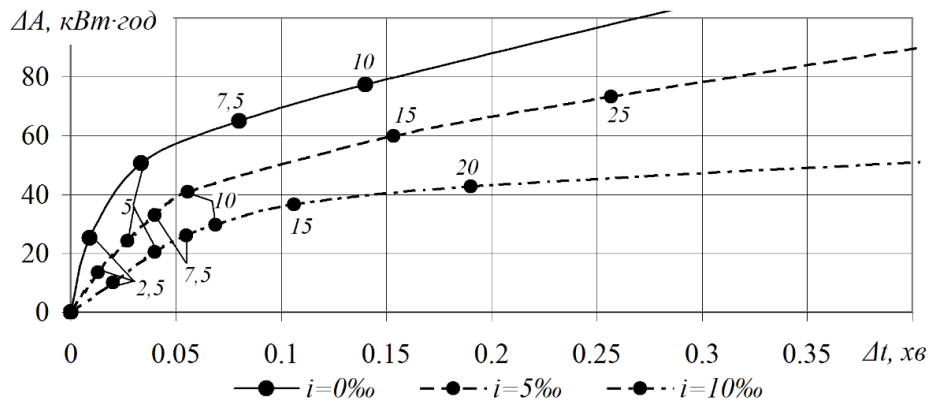


Рисунок 2 – Залежність зниження витрати електроенергії від збільшення витрати часу при різних ухилах

Оскільки при малих інтервалах часу Δt кут нахилу кривої економії енергоресурсів більше, ніж при великих інтервалах, то позначимо точки зміни крутизни кривих $\Delta A = f(\Delta t)$. Для крутизни $i = 0\text{‰}$ раціональним буде зменшення швидкості в режимі вибігу $\Delta V = 0 - (\overline{5} \div \underline{10})$ км/год, для ухилу $i = 5\text{‰}$ — $\Delta V = 0 - (\overline{10} \div \underline{15})$ км/год, для ухилу $i = 10\text{‰}$ — $\Delta V = 0 - (\overline{15} \div \underline{20})$ км/год. Отримані дані узагальнимо у вигляді залежності (рис. 3).

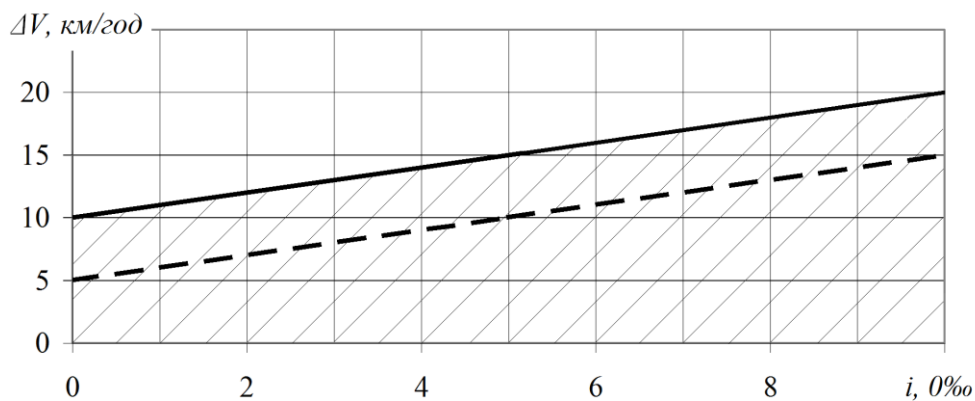


Рисунок 3 – Раціональний інтервал зміни швидкості в режимі вибігу залежно від ухилу

Для визначення відповідної довжини ділянки, на якій доцільно застосовувати режим вибігу, скористаємось теорією тягових розрахунків, результати яких наводимо у вигляді рис. 4.

Перевірку та доведення актуальності отриманих даних виконано шляхом проведення багатоваріантних тягових розрахунків при варіативних значеннях маси складу, серіях локомотива та профілях колії.

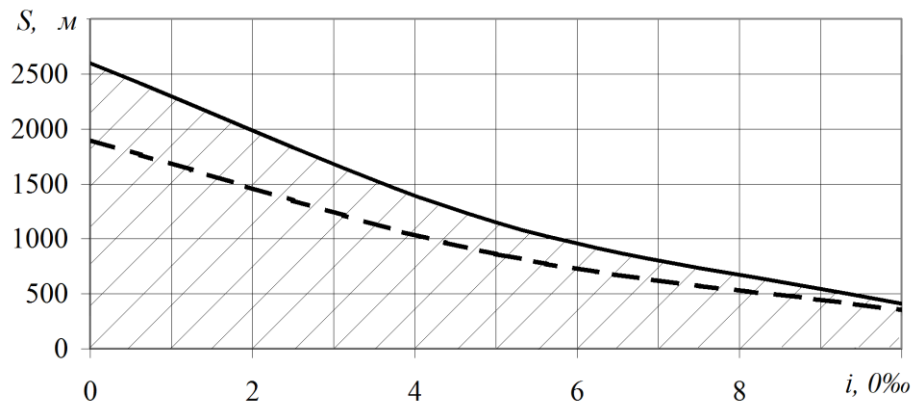


Рисунок 4 – Раціональна довжина ділянок в режимі вибігу залежно від ухилу

Результати та їх обговорення. На основі проведеного дослідження можна зробити такі висновки. Витрата енергоресурсів та час руху поїзда залежать, зокрема, від тривалості руху в режимі вибігу, застосованими між режимами тяги та гальмування. Початкова швидкість переходу з режиму тяги в режим вибігу не впливає на зменшення витрат енергоресурсів. Зниження енерговитрат у режимі вибігу безпосередньо пов'язане з величиною ухилу ділянки та інтервалом зміни швидкості. В результаті проведених розрахунків отримано значення раціональних інтервалів зміни швидкості та відповідних довжин ділянок руху в режимі вибігу, що дозволяють ефективно використовувати енергоресурси для різних ухилів колії.

Бібліографічний список

1. Kapica M., Bobyr D., Hryshchenko M., Kyslyi D., Desiak A. (2024). Determining the Energy Efficiency Indicators of the Diesel Train DPKr-2 and the Rail Bus 620M Based on Traction Calculations Using the Numerical Method of Solving the Equation of Train Movement. MATEC Web of Conferences. 2024. Vol. 390: 3rd International Scientific and Practical Conference “Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport” (EOT-2023). P. 1–7. DOI: 10.1051/mateconf/202439001002.
2. Bodnar B., Kapitsa M., Bobyr D., Kyslyi D. (2019). Defining the Limits of Application and the Values of Integration Variables for the Equations of Train Movement. *Наук. вісн. Нац. гірн. ун-ту*. 2019. № 6. С. 59–65.
3. Bobyr D., Bodnar E., Kislyi D., Desiak A. (2023). Vyznachennya parametriv obmezheniya pozdovzhnoho pryskorenniya dlya optymizatsiyi vytrat enerhoresursiv na tyahu poyizdiv. *Science and Transport Progress*, 4 (104), 13-24 (in Ukrainian)
4. Ochkasov O., Ocheretniuk M., Skvireckas R. (2021). Approaches to the Improving the Locomotive Fleet Management System. *Transport Means*, 1054-1058.
5. Bodnar B., Ochkasov A., Bobyr D. (2016). Improving Operation and Maintenance of Locomotives of Ukrainian Railways. *Technologijos ir Menas = Technology and Art*, 7, 109-114.

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ КОМУТАЦІЙНОГО БЛОКУ З КОРИГУВАЛЬНИМИ ЛАНКАМИ В ТИРИСТОРНИХ DC-DC ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ

Бобирь Д.В., кафедра Локомотиви, Український державний університет науки і технологій,
м. Дніпро, Україна, d.v.bobyr@ust.edu.ua, 0000-0003-1441-3861

Колодій Д.О., кафедра Локомотиви, Український державний університет науки і
технологій м. Дніпро, Україна, danilkakolod@gmail.com, 0009-0004-5156-089X

CALCULATION OF PARAMETERS OF SWITCHING UNIT WITH CORRECTIVE LINKS IN THRUSTER DC-DC CONVERTERS

Bobyr D.V., chair of Locomotives, Ukrainian State University of Science and Technologies, c.
Dnipro, Ukraine, d.v.bobyr@ust.edu.ua, 0000-0003-1441-3861

Kolodii D.O., chair of Locomotives, Ukrainian State University of Science and Technologies,
c. Dnipro, Ukraine, danilkakolod@gmail.com, 0009-0004-5156-089X

Abstract. The engineering method of calculating parameters of commutation unit at the stage of designing thruster converters is considered.

Operability and energy performance of thruster dc-dc converters (TDC) are largely determined by the electrical scheme of the commutation unit (CU), the structure of which significantly affects the shape and properties of output pulses.

Improvement of the energy performance of the CU is achieved by forming a switching current pulse of rectangular shape, which can be accomplished in various ways. One of the methods is based on the fact that the alternating current of rectangular form is represented by the sum of harmonic components with numbers $K=1, 3, 5, 7, \dots$ and amplitudes decreasing proportionally to the harmonic number [1].

The second method consists in the fact that the CU is made in the form of an artificial long line. The advantages of forming long lines over the oscillating LC-loop have been identified and evaluated in [1, 2] and are mainly reduced to stabilization of thruster turn-off time, reduction of voltage level and pulse load on semiconductor devices due to the possibility to form a current pulse of trapezoidal shape.

To the disadvantages of multilink forming long lines should be attributed the need to use capacitors at full voltage and high values of the rate of rise of current and voltage, which requires the introduction of a saturation choke in the thruster circuit.

Free from these disadvantages is the CU with corrective links (Fig. 1).

We propose an engineering method for calculating the parameters of the CU with corrective links at the stage of designing the TDC, in which the main thrusters are covered by counter-parallel diodes.

The converter for power supply of auxiliary circuits of traction aggregates can serve as an example of such TDC.

Significant factors affecting the performance of the TDC should be considered as the time t_s provided by the circuit for switching off the thrusters; the switching capacity coefficient K_{cr} ,

which is the ratio of the amplitude of the current overcharge current of the switching capacitor to the amplitude of the current flowing through the switched device before the commencement of switching; the rate of rise of direct current di/dt and voltage du/dt .

The calculated values of the above factors are mainly determined by the parameters of the forming circuits, which include switching capacitance and inductance. Calculation of the latter, in turn, is carried out taking into account the passport data for the corresponding semiconductor devices. Therefore, one of the important tasks in estimating the parameters of the CU with corrective links is to determine the quantitative composition of the links, since this index combines all of the above values [2].

The process of capacitor C_0 discharge in a circuit of the form (Fig. 1) is described by a system of differential equations:

$$\begin{aligned}\frac{di}{dt} &= \frac{1}{L_0}U_{C_0} - \frac{1}{L_0}U_{C_1} - \dots - \frac{1}{L_0}U_{C_n}; \\ \frac{dU_{C_0}}{dt} &= -\frac{1}{C_0}i; \\ \frac{dU_{C_j}}{dt} &= y_j, \quad j = \overline{1, n};\end{aligned}\tag{1}$$

$$\begin{aligned}\frac{dy_j}{dt} &= \frac{1}{L_0 C_j}U_{C_0} - \frac{1}{L_0 C_j}U_{C_1} - \dots \\ &\dots - \frac{1}{C_j} \left(\frac{1}{L_0} + \frac{1}{L_j} \right) U_{C_j} - \dots - \frac{1}{C_j L_0} U_{C_n}, \quad j = \overline{1, n}\end{aligned}$$

with initial conditions:

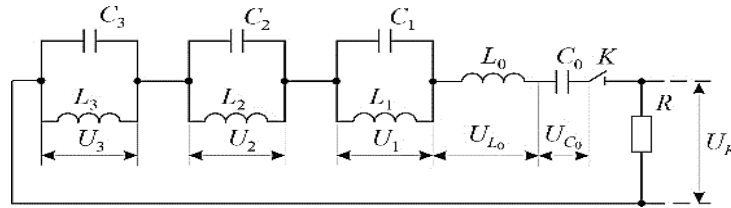


Fig. 1. Scheme of the CU with corrective links

$$\left\{ \begin{array}{l} i(0) = 0; \\ U_{C_0}(0) = U_0; \\ \dots\dots\dots \\ U_{C_j}(0) = 0; \\ U_{C_n}(0) = 0; \\ y_j(0) = 0, \quad j = \overline{1, n}. \end{array} \right. \quad (2)$$

The system of equations (1) with initial conditions (2) was solved by the operator method using the linear algebra apparatus and the method of mathematical induction. As a result of the solution, analytical expressions of the switching current in the n -link switching node were obtained

$$i(t) = \frac{U_0}{L_0} \sum_{k=1}^{n+1} z_k \sin \sqrt{-\alpha_k} \cdot t \quad (3)$$

and voltage on the switching capacitor C_0 :

$$U_{C_0} = U_0 - \frac{U_0}{L_0} \sum_{k=1}^{n+1} \frac{z_k}{\sqrt{-\alpha_k}} \left(1 - \cos \sqrt{-\alpha_k} \cdot t \right), \quad (4)$$

where

$$z_k = \frac{b_n \alpha_k^n + b_{n-1} \alpha_k^{n-1} + b_{n-2} \alpha_k^{n-2} + \dots}{\begin{aligned} & \left(-1 \right)^{n+2} a_{n+1} (n+1) \left(\sqrt{-\alpha_k} \right)^{2 \binom{n+1}{-1}} + \\ & \frac{\dots + b_1 \alpha_k + b_0}{+ \left(-1 \right)^{n+1} a_n n \left(-\sqrt{-\alpha_k} \right)^{2n-1}} + \\ & \frac{\sin \sqrt{-\alpha_k} \cdot t}{\left(-1 \right)^{n-j+1} a_{n-j} (n-j) \left(\sqrt{-\alpha_k} \right)^{2 \binom{n-j}{-1}} + \left(-1 \right)^2 a_1 \sqrt{-\alpha_k}} \end{aligned}},$$

and the coefficients $a_k, b_k, k = \overline{1, n+1}$, depend on the parameters $L_j, C_j, k = \overline{1, n}$; $\alpha_k, k = \overline{1, n+1}$ – roots of the characteristic polynomial of the denominator; n – number of correcting links. However, the current pulse described by expression (3) has a trapezoidal form not at any ratio of parameters $L_j, C_j, k = \overline{1, n}$. Therefore, such ratios between LC the parameters of the form $C_j = V_j C_0, L_j = W_j L_0, j = \overline{1, n}$ were found so that the switching current in the n -link switching node had a trapezoidal form.

The problem of determining the optimal coupling coefficients $V_j, W_j, j = \overline{1, n}$ was solved by minimizing by simplex method the function equal to the ratio of areas F_1/F_2 , where F_1 – the area of a rectangle, one side of which is equal to the maximum amplitude of the switching current, and the other – the half-period of current oscillations; F_2 – the area of a curvilinear trapezoid formed by the curve of the current pulse at some values of parameters $V_j, W_j, j = \overline{1, n}$.

The calculations led to the following results:

$n=1$	$V_1=0,667$	$W_1=0,313$		
$n=2$	$V_1=0,637$	$W_1=0,332$		
	$V_2=0,331$		$W_2=0,068$	(5)
$n=3$	$V_1=0,592$	$W_1=0,071$		
	$V_2=0,649$	$W_2=0,386$		
	$V_3=0,566$	$W_3=0,040$		

The plots of current pulses plotted according to the obtained results are shown in Fig. 2. The current-circuit curve is plotted there as an example.

The choice of a rational composition of the switching unit with corrective links is carried out on the basis of the analysis of real pulses, plotted according to the calculation results for $n = 1, 2, 3$.

For convenience of comparison and estimation of duration of the studied pulses, the latter were analyzed in relative units assuming unchanged values of capacitance C_0 and inductance L_0 .

The analysis of the obtained curves showed that in order to rationally use multilink structures of the switching node, it is advisable to include in its composition one corrective link, the parameters of which are related by relations (5). The use of a greater number of corrective links is inexpedient, as it does not lead to significant changes in the parameters and shape of the pulse, as well as is not rational for design and technological reasons. Moreover, the efficiency of using the switching unit with corrective links increases with the decrease of the calculated value of the switching capacity coefficient K_{cr} . Therefore, the reserve for the amplitude of the forward current of the main thruster contained in the numerical value of K_{cr} , for the switching unit with corrective links can be reduced to 1,1 compared to 1,5 for the LC -circuit.

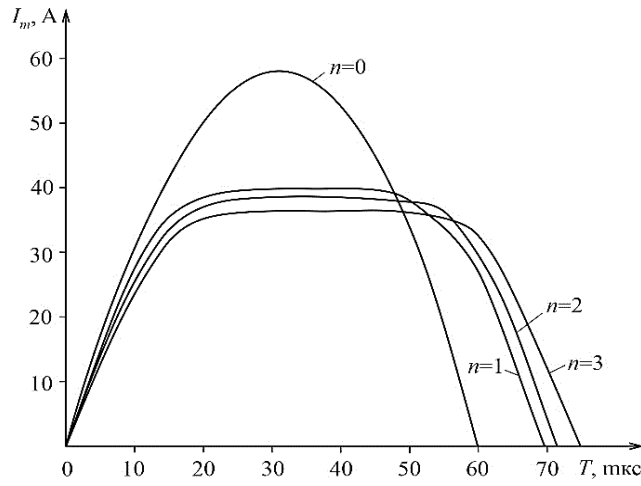


Fig. 2. Graph of current pulses

To ensure reliable switching in an inverter, it is necessary that the time allowed for the thruster to regain electrical strength is greater than the minimum allowable time. Therefore, an important characteristic of the switching process is the recovery angle ωt_s . In this connection, an expression for determining the recovery angle of valve thrusters commutated by the CU with corrective links for $n = 0, 1, 2, 3$ at a given value has been obtained K_{cr}

$$\omega t_s = 3,14 + 1,065n + 1,315n^2 - 0,37n^3 - \left(2 - 0,84n + 1,35n^2 - 0,28n^3 \right) \frac{1}{K_{cr}}. \quad (6)$$

To illustrate the effectiveness of expression (6), the solid line in Fig. 3, the solid line shows the shape of the current pulse plotted according to the trigonometric polynomial for $n = 1$, and the dots show the values of the pulse edge and cutoff calculated by formula (6).

Here is also shown the experimental curve obtained on the 8 kW voltage converter for power supply of auxiliary circuits of the traction unit. Input voltage is $U_{in} = 110$ V, load current is $I_l = 50$ A, parameters of the switching unit: $C_1 = 0,68C_0$, $L_1 = 0,313L_0$. Good convergence of the results of calculation and experiment allows us to recommend the expression (6) as the initial one when calculating the circuit time of thrusters switching off by the switching unit with corrective links. Expression (6) is also valid for the usual LC -circuit ($n = 0$).

To calculate the switching capacitance C_0 and inductance L_0 , as well as the parameters of the correcting links n obtained the following expressions:

$$L_0 = \frac{U_0 z t_s}{I_1 \sqrt{k_1 k_2} (AK_{cr} - B)}; \quad C_0 = \frac{I_1 K_{cr} t_s}{U_0 z \sqrt{k_1 k_2} \left(A - \frac{B}{K_{cr}} \right)};$$

$$L_i = W_i \frac{U_0 z t_s}{I_1 \sqrt{k_1 k_2} (AK_{cr} - B)}; \quad C_0 = V_i \frac{I_1 K_{cr} t_s}{U_0 z \sqrt{k_1 k_2} \left(A - \frac{B}{K_{cr}} \right)},$$

where t_s – passport time of thrusters switching off; I_1 – load current; U_0 – input voltage.

The values of coefficients A , B , z , k_1 and k_2 are summarized in the table.

Table 1. The values of coefficients A , B , z , k_1 , k_2

n	0	1	2	3
A	3,14	5,15	7,57	8,18
B	2	2,22	3,4	3,8
z	—	0,695	0,695	0,642
k_1	—	0,40	0,18	0,17
k_2	—	1,31	1,40	1,50

Calculations and experiments have shown that it is sufficient to include one corrective link with parameters related by the following relations: $C_1 = 0,667C_0$, $L_1 = 0,313L_0$. The use of the CU with a corrective link makes it possible to obtain a switching current pulse of trapezoidal shape. In this case the circuit time of thrusters switching off is stabilized, the amplitude of switching current is reduced by 1,5 times, that increases the switching stability of the converter and improves its energy performance.

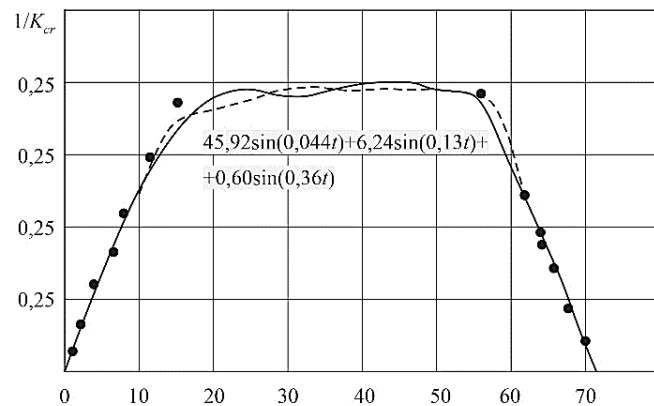


Fig. 3. Current pulse shape, plotted according to trigonometric polynomial for 1, and dots - values of the pulse edge and cutoff, calculated by formula (6).

List of references

1. М. М. Казачковський Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: Навчальний посібник. Дніпропетровськ: НГА України, (2000)
2. Електроніка і мікросхемотехніка: у 4-х т. Том 4. Книга 1. Силова електроніка: Навч. посібник. За ред. В. І. Сенька. К.: Каравела, (2012)
3. Proc. 6-th Electr. Insulat. Conf. (1965, USA, New York) - p.82-84, 95-97.
4. "Insulation", 1969, vol. 15, № 7, p. 48-52.
5. "Kapton doubled mileage on rebuilt traction motors", Du Pont, Cast history of "Kapton", Wilmington, DE, 19898, NA-70070.
6. "Insulation/Circuits", 1971, vol.17, № 3, p. 21-22.
7. "Toshiba Rev.", 1968, vol. 23, № 8, p. 976-981.
8. Proc. of 10-th Electr. Insulat. Conf. (1971 USA, Chicago)-p. 163-165, 360-362.
9. "Elektr. Mashinen", 1972, Bd 51, № 15, s. 140-141
10. Бобирь Д. В. Електричне обладнання тепловозів: підручник/Д. В. Бобирь, В. Н. Сердюк, М. В. Микуленко; за ред. В. Н. Сердюка; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро: УДУНТ, 2024. – 316 с.
11. <https://ua.weshare-china.com/polyimide-film/insulation-polyimide-film/high-temperature-resistant-insulation.htm>

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВІДВЕДЕННЯ В РАДІАТОРАХ З РІЗНИМИ ПРОФІЛЯМИ ТРУБОК

Професор каф. «Локомотиви» Капіца Михайло Іванович, Український державний університет науки і технологій (УДУНТ), вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. ел. пошта m.i.kapica@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-3800-2920

Асистент каф. «Локомотиви» Десяк Андрій Євгенійович, Український державний університет науки і технологій (УДУНТ), вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010 ел. пошта a.e.desyak@ust.edu.ua ORCID 0000-0001-8650-5242

Анотація. У роботі розглянуто особливості теплотехнічного розрахунку секції радіатора тепловоза за допомогою програмного комплексу SOLIDWORKS Flow Simulation. Запропоновано методику визначення теплового потоку, що проходить через секції радіаторів, а також проаналізовано вплив конструктивних параметрів трубок (форма трубок, розташування та напрямок продувки) на ефективність охолодження. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкції секцій радіаторів та теплообмінників.

Ключові слова: тепловий потік, тепловоз, радіатор, коефіцієнт теплопередачі.

EVALUATION OF COOLING PERFORMANCE IN RADIATORS WITH DIFFERENT TUBE PROFILES

Professor of the Department of "Locomotives" Mykhailo Ivanovych Kapitsa, Ukrainian State University of Science and Technology (UDUST), Lazaryana St. 2, Dnipro, Ukraine, 49010, Phone, Email: m.i.kapica@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-3800-2920.

Assistant of the Department of "Locomotives", Andriy Yevheniyovych Desyak, Ukrainian State University of Science and Technologies (UDUST), 2 Lazaryana St., Dnipro, Ukraine, 49010, Email: a.e.desyak@ust.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8650-5242

Abstract. The paper examines the features of the thermal calculation of a locomotive radiator section using the SOLIDWORKS Flow Simulation software suite. A methodology for determining the thermal flux passing through the section is proposed, and the influence of tube design parameters (tube shape, placement, and airflow direction) on cooling efficiency is analyzed. The obtained results can be used to optimize the design of radiator sections and heat exchangers.

Keywords: thermal flux, locomotive, radiator, heat transfer coefficient.

Вступ

У системі охолодження дизельного двигуна тепловоза важливе значення має ефективність тепловіддачі секцій радіаторів. Від ефективності охолодження залежить температура роботи двигуна, його надійність та термін служби. У зв'язку з цим розробка та вдосконалення методів розрахунку теплотехнічних параметрів секції радіатора є актуальним завданням.

Сучасні умови експлуатації залізничного транспорту вимагають від енергетичного обладнання високої ефективності, зниження енергоспоживання, надійності та довговічності. Одним із шляхів підвищення ефективності роботи тепловозів є

удосконалення систем охолодження, зокрема, оптимізація конструкції теплообмінних апаратів, що входять до складу радіаторів. Це забезпечує стабільну роботу дизеля в усьому діапазоні режимів та зменшує ризик його перегріву [1].

Мета

Метою дослідження є оцінка теплотехнічної ефективності секції радіатора тепловоза шляхом аналізу її конструктивних параметрів та умов експлуатації. Основне завдання – визначити найоптимальнішу конфігурацію форми та розташування трубок в секції радіатора, оцінити вплив геометричних характеристик на загальну тепловіддачу.

Крім того, метою є розробка спрощеної методики розрахунку, що може бути використана при проектуванні або модернізації секцій радіатора, з урахуванням доступних даних та умов реальної експлуатації тепловоза. Це дозволить забезпечити ефективне охолодження двигуна при мінімальних енергетичних та матеріальних витратах.

Методика

Відповідно до положень класичної термодинаміки, інтенсивність теплопередачі в трубчасто-пластинчастих теплообмінних апаратах значною мірою визначається товщиною температурного граничного шару теплоносія, зокрема повітря. Через низьку теплопровідність повітря у приповерхневому шарі ефективність тепловіддачі істотно знижується. Для підвищення теплової продуктивності широко застосовуються методи інтенсифікації тепловіддачі, такі як зміна кута атаки повітряного потоку, змочування оребрених поверхонь, перфорація пластин оребрення тощо. Основною метою зазначених методів є зменшення товщини ламінарного температурного граничного шару та перехід до турбулентного режиму теплообміну поблизу охолоджуваної поверхні [2, 3].

Таким чином, оптимізація турбулентного повітряного потоку та геометрія обтічної поверхні відіграють ключову роль у забезпеченні ефективного теплообміну. Згідно з результатами фундаментальних досліджень процесів тепловіддачі тіл різної форми в повітряному потоці, встановлено, що поверхні у вигляді плоского овалу демонструють вищу інтенсивність тепловіддачі порівняно з круглими, еліптичними та іншими формами труб. Саме тому плоскоовальні трубки на сьогоднішній день є найбільш поширеним рішенням у конструкції секцій радіаторів систем охолодження як вітчизняних, так і зарубіжних тепловозів.

Підвищена ефективність плоскоовальних труб пояснюється положеннями гідродинамічної теорії теплообміну, що базується на ідеях О. Рейнольдса про єдність процесів переносу теплової та механічної енергії. Згідно з цією теорією, відношення площі поверхні трубки, що бере участь в інтенсивному теплообміні, до площі зони з неефективним відведенням тепла (зони формування вихорів) є максимальним саме для плоскоовальної форми й досягає орієнтовно 90%.

З позицій аеродинаміки найбільш сприятливу форму має тіло у вигляді краплі – вона характеризується мінімальним коефіцієнтом лобового опору. Краплеподібна форма забезпечує найкращі обтікальні властивості, суттєво знижуючи інтенсивність утворення вихорів у зоні позаду тіла.

Враховуючи зазначене, краплеподібна геометрія має переваги з точки зору аеродинамічного опору та тепловіддачі, що може позитивно вплинути на загальну ефективність охолодження. У межах даного дослідження запропоновано вдосконалити конструкцію секції радіатора шляхом заміни традиційних плоскоовальних трубок на трубки краплеподібної форми.

Для досягнення поставленої мети у програмному комплексі SOLIDWORKS Flow Simulation було побудовано спрощену тривимірну модель секції радіатора типу BB-12, загальна кількість елементів якої становить 920 одиниць [4].

Для порівняльного аналізу ефективності тепловіддачі для різних варіантів трубок проведено моделювання трьох конфігурацій:

- ~ плоскоовальні трубки (базова модель);
- ~ краплеподібні трубки з продуванням з боку загостреної частини;
- ~ краплеподібні трубки з продуванням з боку заокругленої (тупої) частини.

Умови моделювання відповідають експлуатаційним параметрам радіаторної секції тепловоза [5, 6]. У розрахунковій моделі враховано два теплоносії:

- ~ внутрішній потік – вода, що протікає крізь трубки з заданими параметрами температури, тиску та витрати;
- ~ зовнішній потік – повітряний потік від вентилятора, призначений для відведення тепла від води шляхом зовнішнього обдуву трубок.

На рисунку 1 наведено ескізи поперечного перерізу плоскоовальної та каплеподібної трубки.

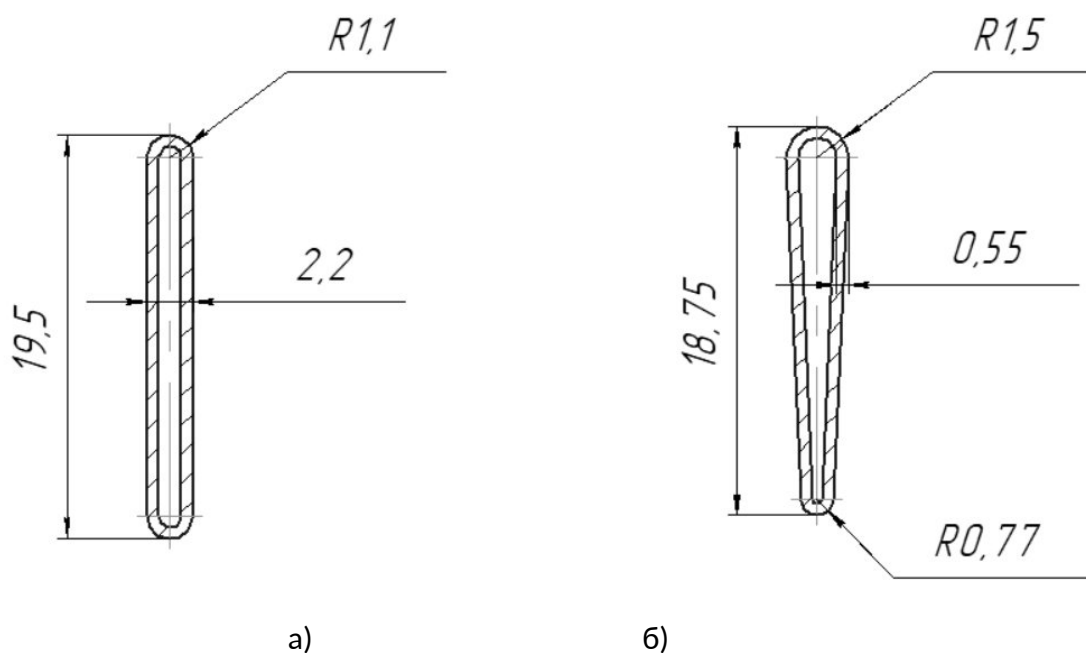
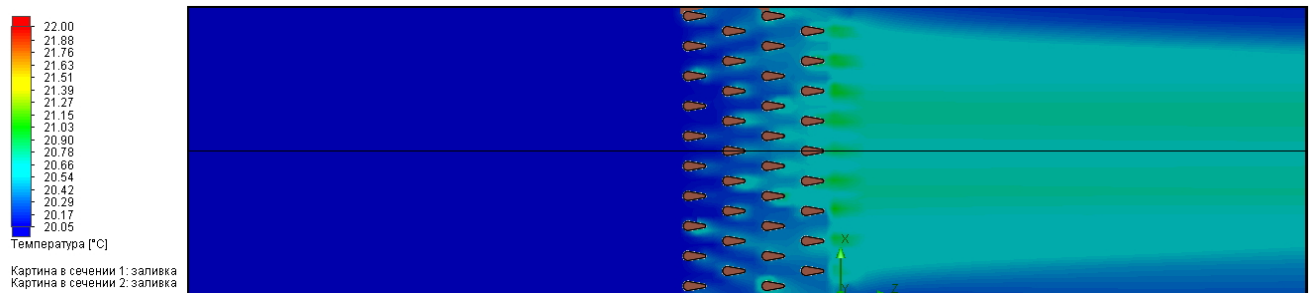


Рис. 1. Ескізи поперечного перерізу плоскоовальної та каплеподібної трубки:

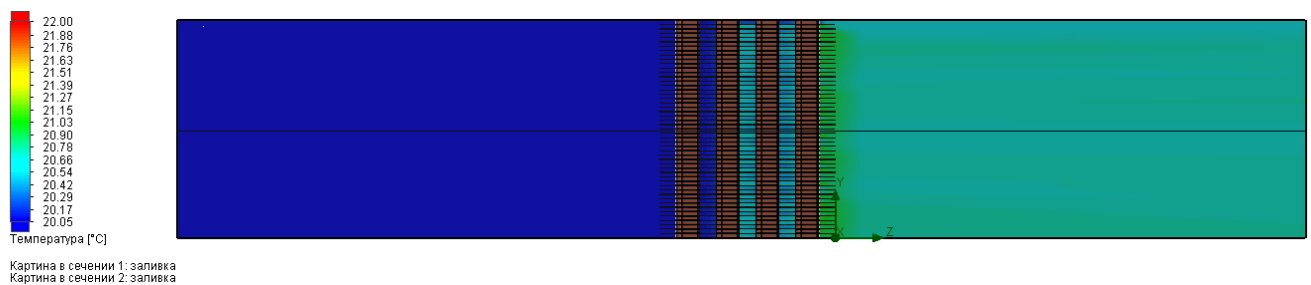
а) плоскоовальний переріз; б) каплеподібний переріз

Результати розрахунків секції радіатора з каплеподібними трубками (продувка з тупої сторони) представлені у вигляді кольорової градієнтної епюри температури яка

представлена на рисунку 2. Але в дослідженні виконувався аналіз більшої кількості епюр, а саме епюр тиску, швидкості потоку та температури при різних конфігурація розташування, форми та напрямку продувки.



а)



б)

Рис. 2. Епюри температури повітряного потоку: а) вигляд зверху; б) вигляд збоку

Висновки

Порівняння епюр швидкості потоку повітря показує, що в секції з плоскоовальними трубками швидкість повітря падає до 2 м/с, в каплеподібній з продувкою з гострого боку – до 1,2 м/с, а в каплеподібній з продувкою з тупого боку – до 0,6 м/с при початковій швидкості 10 м/с. Хоча на перший погляд плоскоовальні трубки виглядають найбільш ефективними через менше зниження швидкості потоку, насправді найкращим варіантом є каплеподібні трубки з продувкою з тупого кінця. Це пояснюється тим, що зниження швидкості в таких трубках відбувається більш рівномірно, що сприяє більш рівномірному охолодженню трубок у секції. Це також підтверджується епюрами розподілу температури в пластинах, де температура розподіляється більш рівномірно у випадку каплеподібних трубок з продувкою з тупого кінця, на відміну від плоскоовальних трубок та каплеподібних з продувкою з гострого кінця, де температура змінюється нерівномірно.

Результати випробувань показують, що каплеподібні трубки з продувкою з тупого кінця забезпечують найкраще тепловідведення: на відстані 10 см від входу температура знижується на 11,2°C при початковій температурі води 75°C, що є вищим, ніж для плоскоовальних трубок, де зниження температури становить 8,3°C. Також з епюр видно, що така схема розташування трубок забезпечує більш рівномірний відвід тепла по всій секції радіатора. Найефективнішими для тепловідведення є каплеподібні трубки з

продувкою з тупого кінця, оскільки вони забезпечують більш рівномірний розподіл температури і зменшення тепла по всій секції радіатора.

Бібліографічний список

1. Боднар, Б. Є., Нечаєв, Є. Г., & Бобир, Д. В. Теорія та конструкція локомотивів. Допоміжні системи та устаткування: підручник для ВНЗ залізнич. трансп. / Б. Є. Боднар, Є. Г. Нечаєв, Д. В. Бобир. – Д.: ПП Ліра ЛТД, 2010. – 369 с.
2. Боднар, Б. Є., Очкасов, О. Б., Децюра, О. Я., & Черняєв, Д. В. Методи нерозбірного діагностування дизелів при експлуатації рухомого складу // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2012. – Вип. 41. – С. 56–60. – DOI: 10.15802/stp2012/7666.
3. Капіца, О. М., & Очкасов, О. Б. Аналіз технічних характеристик дизелів локомотивів при різних режимах роботи // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2014. – Вип. 45. – С. 78–83.
4. Плашихін, С. В. Параметричне моделювання технологічних процесів. Розділ 2. Моделювання фізичних процесів в CAD/CAE системі SolidWorks: навч. посіб. – Київ: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2022. – 125 с.
5. Бобирь, Д. В., & Черняєв, Д. В. Моделювання теплових процесів в дизельних двигунах локомотивів // Вісник Національного університету залізничного транспорту. – 2016. – Вип. 52. – С. 104–112.
6. Gorib, S., & Seddik, O. Thermodynamic analysis of diesel engines used in locomotives // Journal of Mechanical Engineering and Automation. – 2016. – Vol. 7, No. 3. – P. 73-81.

ЗАСТОСУВАННЯ ПІДХОДІВ RISK-BASED MAINTENANCE ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ УТРИМАННЯ ЛОКОМОТИВНОГО ПАРКУ

Боднар Б.Є, проф, зав. кафедрою «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна. b.e.bodnar@ust.edu.ua, ORCID: ORCID 0000-0002-3591-4772

Очкасов О.Б, доцент каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна. o.b.ochkasov@ust.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7719-7214>

Анотація. Розглянуто підходи до побудови комбінованої системи технічного обслуговування локомотивного парку з урахуванням оцінки ризиків. Обґрунтовано переваги впровадження Risk-Based Maintenance у поєднанні з CBM та PdM. Запропоновано принципи вибору стратегій утримання для різних підсистем локомотива, наведено обмеження реалізації RBM в умовах Укрзалізниці. Зазначено напрями подальшого розвитку — впровадження моніторингових систем, використання штучного інтелекту та інформаційних технологій.

Ключові слова: утримання локомотивного парку, Risk-Based Maintenance, технічний стан, обслуговування за станом, аналіз ризиків

APPLICATION OF RISK-BASED MAINTENANCE APPROACHES TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF LOCOMOTIVE FLEET MAINTENANCE SYSTEM

Bodnar B.Ye., Prof., Head of the Department of "Locomotives", Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine. b.e.bodnar@ust.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3591-4772

Ochkasov O.B. Associate Professor of the Department of "Locomotives" Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine, o.b.ochkasov@ust.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7719-7214>

Abstract. The paper considers the formation of a combined locomotive maintenance system based on risk assessment. The advantages of applying Risk-Based Maintenance in conjunction with CBM and PdM are substantiated. The principles for selecting maintenance strategies for locomotive subsystems are proposed. Key implementation limitations under Ukrainian Railways are analyzed. Further development directions include real-time monitoring, artificial intelligence, and IT integration..

Key words: locomotive fleet maintenance, Risk-Based Maintenance, technical condition, condition-based maintenance, risk analysis

Управління технічним станом локомотивного парку є одним із ключових завдань у забезпеченні безпеки, надійності та ефективності залізничного транспорту. Зважаючи на зростання вартості експлуатації та обслуговування рухомого складу, а також на суттєві фінансові втрати від простоїв і аварій, виникає об'єктивна потреба у впровадженні сучасних підходів до організації системи утримання локомотивів.

Традиційні стратегії обслуговування, що базуються на календарному плануванні або напрузованні, не забезпечують необхідної гнучкості та часто призводять до надлишкових

витрат на регламентні роботи, що не враховують фактичного технічного стану обладнання. Альтернативою є підхід до технічного обслуговування на основі оцінки ризиків (Risk-based Maintenance), що набуває дедалі більшої актуальності у транспортній галузі.

Традиційні стратегії не враховують варіативність умов експлуатації локомотивів, що призводить до двох основних проблем:

- надмірне обслуговування справного обладнання, що зумовлює необґрунтовані витрати ресурсів;
- пропуск ранніх ознак деградації критичних компонентів, що створює ризики аварійних відмов між регламентними роботами.

На відміну від цього, система risk-based maintenance (RBM) базується на постійній оцінці технічного стану обладнання та аналізі ризиків його відмов. Це дозволяє адаптувати графіки обслуговування відповідно до реальних потреб рухомого складу та фокусувати ресурси на найбільш критичних елементах.

Концепція RBM передбачає пріоритетність технічного обслуговування та ремонту залежно від рівня ризику відмови обладнання та наслідків таких відмов для безпеки руху і експлуатаційної ефективності. В основі підходу лежить системна оцінка технічного стану компонентів локомотива, аналіз їхньої критичності, а також моделювання потенційних сценаріїв відмов.

В умовах зростання складності конструкції локомотивів, збільшення вимог до безпеки руху та необхідності оптимізації витрат на обслуговування, застосування підходів RBM відкриває нові можливості для підвищення ефективності системи утримання локомотивного парку. Особливу актуальність така стратегія має для підприємств залізничного транспорту України, де поєднання застарілих типів локомотивів із сучасними моделями вимагає диференційованого підходу до організації технічного обслуговування.

Управління технічним станом рухомого складу є однією з ключових складових забезпечення надійності та безпеки залізничного транспорту. Традиційно система утримання рухомого складу базувалася на календарних регламентах та пробігових нормативах, які визначали періодичність технічного обслуговування та ремонту незалежно від фактичного технічного стану обладнання.

Однак із розвитком аналітичних методів і засобів контролю технічного стану з'явилася можливість гнучкішого управління технічним обслуговуванням локомотивів на основі реальних експлуатаційних даних. Сучасні концепції управління технічним станом передбачають поєднання таких підходів, як обслуговування за станом (Condition-based Maintenance), обслуговування за прогнозом (Predictive Maintenance) та обслуговування на основі ризику (RBM).

Як зазначено у [1], саме поєднання цих підходів дозволяє оптимізувати витрати на обслуговування та підвищити ефективність використання локомотивного парку. Використання даних моніторингу технічного стану у режимі реального часу, а також застосування алгоритмів діагностування і прогнозування відмов дає змогу більш обґрунтовано планувати обслуговування та ремонт рухомого складу.

RBM базується на систематичній ідентифікації потенційних відмов, аналізі їхніх наслідків і розрахунку рівня ризику для кожного компонента. У результаті формується

карта ризиків, яка служить основою для ухвалення рішень щодо технічного обслуговування [5,6]. Для локомотивного парку особливу увагу приділяють аналізу критичних компонентів — тягових електродвигунів, силових установок.

У практичному аспекті RBM дозволяє організувати диференційований підхід до обслуговування, за якого найбільше уваги приділяється обладнанню з високим рівнем ризику, тоді як менш критичні компоненти обслуговуються за спрощеними схемами. Як зазначається у [5], застосування RBM у транспортному секторі сприяє зниженню витрат на технічне обслуговування на 20–30% та зменшенню ймовірності аварійних відмов на 40–50%.

На міжнародному рівні застосування RBM у транспортній галузі вже стало усталеною практикою, особливо в сегменті високошвидкісного залізничного транспорту та вантажних перевезень. Провідні оператори залізничного транспорту впроваджують системи ранньої діагностики, цифрові двійники та системи управління життєвим циклом обладнання для підтримки RBM-стратегій.

В Україні підходи RBM поступово знаходять практичне застосування, насамперед на рівні впровадження локальних систем моніторингу технічного стану критичних компонентів локомотивів. Власні дослідження авторів [1-4] підтверджують доцільність використання таких методик у контексті українських умов експлуатації рухомого складу.

Метою даного дослідження є формування моделі системи утримання локомотивного парку із використанням методів оцінки ризиків для визначення пріоритетності та обсягів технічного обслуговування.

Розробка ефективної системи технічного обслуговування локомотивного парку передбачає поєднання декількох стратегій — від класичного планово-попереджувального ремонту до інтелектуального обслуговування на основі технічного стану та прогнозування відмов. Застосування підходу, що базується на оцінці ризиків, дозволяє інтегрувати ці стратегії в єдину комбіновану модель, орієнтовану на мінімізацію експлуатаційних витрат і зменшення ймовірності відмов критичних компонентів.

У межах комбінованої системи утримання вибір стратегії технічного обслуговування для окремих підсистем локомотива здійснюється з урахуванням їхньої критичності, доступності даних про технічний стан та рівня ризику відмов. Це передбачає виділення допустимих підходів організації ТОiР для кожної підсистеми — планового, за станом або прогнозного.

Планово-попереджувальне обслуговування (ППР). ППР реалізується як система регламентних робіт із заданими міжремонтними інтервалами. Вибір здійснюється або через модифікацію періодичності технічного обслуговування за незмінного обсягу робіт, або через коригування переліку робіт при сталому інтервалі. Формально це означає оптимізацію обсягів або інтервалів ремонтів з урахуванням мінімізації витрат без перевищення прийнятного рівня ризику.

Обслуговування за станом (Condition-Based Maintenance, CBM): CBM базується на моніторингу контрольних параметрів технічного стану локомотива (наприклад, вібрації, опору ізоляції, товщини бандажу). Для кожного параметра визначаються допустимі граничні значення, при досягненні яких настає потреба в

технічному втручанні. Оцінка ризику продовження експлуатації базується на інтеграції ризиків за кожним параметром. Це дозволяє адаптивно управляти моментом проведення ТОіР без фіксованих інтервалів.

Прогнозне обслуговування (Predictive Maintenance): Визначається не лише факт досягнення граничного значення, але й прогнозований інтервал до цього моменту. Система оцінює залишковий ресурс до настання критичного стану, що дозволяє заздалегідь планувати обслуговування й оптимізувати графіки.

Усі підходи об'єднуються за допомогою RBM, що формує основу інтегрованої системи управління утриманням. У межах цієї системи для кожного компонента визначаються: рівень критичності, імовірність відмови, наслідки відмови.

Запропонований підхід до організації системи утримання локомотивного парку на основі оцінки ризиків забезпечує ряд переваг.

Оптимізація обсягів технічного обслуговування. Застосування RBM дозволяє зменшити частку робіт ТОіР, що виконуються за регламентом, без фактичної технічної потреби. При використанні RBM обслуговування орієнтується на фактичний стан обладнання та його критичність, що дозволяє скоротити надлишкові операції ТОіР.

Зниження витрат на ремонт та утримання. Завдяки ранньому виявленню ознак деградації та концентрації ресурсів на обслуговуванні компонентів із високим рівнем ризику, зменшується загальний обсяг затрат на технічне обслуговування. Досвід впровадження RBM демонструє потенційне зниження витрат на рівні 20–30%.

Підвищення експлуатаційної готовності рухомого складу. Ідентифікація критичних елементів та гнучке планування ТОіР дозволяють скоротити кількість непланових простоїв. Це сприяє підвищенню коефіцієнта технічної готовності локомотивного парку.

Зниження ймовірності відмов у міжремонтний період. Врахування ризиків при формуванні графіків ТОіР забезпечує своєчасне втручання у потенційно небезпечні точки деградації обладнання, що дозволяє зменшити частоту аварійних відмов на 40–50%.

Підвищення прозорості прийняття рішень в експлуатації. Формування карти ризиків, що базується на кількісних показниках, дозволяє аргументовано планувати роботи та обґрунтовувати необхідність зміни стратегії утримання для окремих локомотивів або їх складових.

Гнучкість системи при експлуатації парку локомотивів з різним рівнем технічного зносу. Комбінування підходів (ППР, CBM, PdM) у межах єдиної системи дозволяє ефективно обслуговувати як нові локомотиви з розвиненими системами діагностування, так і застарілий рухомий склад без необхідності негайної модернізації.

Усі ці переваги формують передумови для впровадження RBM як стратегічної компоненти системи утримання локомотивного парку, здатної адаптуватися до умов експлуатації, наявних ресурсів й технічного стану рухомого складу без втрати контролю над надійністю та безпекою перевізного процесу.

Попри переваги, впровадження RBM у локомотивному господарстві супроводжується низкою обмежень.

Залежність від якості даних. Для ефективної оцінки ризиків необхідні повні й достовірні дані про технічний стан, історію відмов і умови експлуатації. У більшості депо

ці дані фрагментовані, знаходяться у неструктурованому вигляді на паперових носіях.

Обмежена інструментальна база. Відсутність систем моніторингу у застарілих локомотивах ускладнює реалізацію CBM і PdM. Використання стаціонарних та переносних засобів діагностування також обмежено.

Неадаптованість існуючих моделей. Більшість моделей RBM потребують адаптації до умов залізничної галузі, оскільки розроблені для інших секторів.

Висока вартість впровадження. Реалізація RBM вимагає інвестицій у програмне забезпечення, підготовку персоналу, інтеграцію з ІТ-системами.

Організаційні бар'єри. Зміна стратегії ТОiP потребує перегляду управлінських процедур, що може викликати опір у персоналу.

Подальше вдосконалення системи технічного утримання локомотивного парку потребує переходу до ризик-орієнтованої моделі з використанням цифрових інструментів оцінки технічного стану. Ключовими напрямками є впровадження систем моніторингу в реальному часі, використання методів штучного інтелекту для діагностики та прогнозування, а також інтеграція інформаційних технологій в управління ремонтним процесом. Застосування системного підходу дозволить узгодити структуру обслуговування з фактичними технічними і ресурсними характеристиками локомотивів, забезпечивши обґрунтоване планування втручань і підвищення експлуатаційної надійності без зростання витрат.

Бібліографічний список

1. Впровадження Risk Based Maintenance для підвищення ефективності експлуатації тепловозів на промисловому транспорті / Очкасов О.Б., Мухіна Н. А., Жовніренко О. С., Петренко В. // Перспективи взаємодії залізниць та промислових підприємств : тези 13-ї Міжнар. наук.-практ. конф., м. Дніпро, 28–29 листоп. 2024 р. / М-во освіти і науки України, Укр. держ. ун-т науки і технологій, Навч.-наук. ін-т «Дніпров. ін-т інфраструктури і трансп.». – Дніпро, 2024. – С. 65–67.
2. Ochkasov, O. Approaches to Improving the Locomotive Maintenance Organization System Through the Introduction of Reliability Centered Maintenance / Ochkasov O., Ocheretniuk M., Petrenko V. // Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. – Cham, 2024. – Pt. F2296 : TRANSBALTICA XIV: Transportation Science and Technology : Proc. of the 14th Intern. Conf., Sept. 14–15, 2023, Vilnius, Lithuania. – P. 604–613. – DOI: 10.1007/978-3-031-52652-7_60.
3. Боднар, Б. Є. Вибір стратегій утримання та експлуатації локомотивного парку з використанням теорії управління ризиками / Боднар Б. Є., Очкасов О. Б. // Інжиніринг криз та ризиків транспортних послуг : зб. доп. Міжнар. наук.-метод. конф., Маріуполь, 20–21 січ. 2021 р. / М-во освіти і науки України, ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», Варшав. політехн. ун-т (Польща), Техн. ун-т Берліну (Німеччина). – Маріуполь, 2021. – С. 311–315.
4. Ochkasov, O. Approaches to the Improving the Locomotive Fleet Management System / O. Ochkasov, M. Ocheretniuk, R. Skvireckas // Transport Means 2021 : Proceedings of the 25th International Conference (October 06–08, 2021) / Kaunas University of Technology [et al.]. –

Kaunas, Lithuania, 2021. – Pt. III. – P. 1054–1058.

5. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D.
A Review on Machinery Diagnostics and Prognostics Implementing Condition-Based Maintenance. — Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, Vol. 20(7), P. 1483–1510.
6. Moubray J. Reliability-centered maintenance. New York : Industrial Press Inc., 2001. 408 p.

СЕКЦІЯ 3. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ХІМІЇ ТА ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

SECTION 3. PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF CHEMISTRY AND CHEMICAL TECHNOLOGY

ЗАСТОСУВАННЯ ДИМЕРНИХ ІОННИХ РІДИН ІОНЕНОВОГО ТИПУ ЯК КОМПОНЕНТ СОНЯЧНИХ КОМІРОК

Свердліковська О., Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет», Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна, o.sverdlikovska@gmail.com

Вовчук Б., Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет», Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна

Анотація. У роботі досліджено перспективи застосування димерних іонних рідин іоненового типу як компонентів електролітів для сонячних елементів. Встановлено, що використання цих сполук у системі KI/I_2 у концентрації 0,01 моль/л забезпечує максимальну іонну провідність $10^{-3} - 10^{-4} \text{ С м}^{-1}$. Продемонстровано, що при концентрації іонних рідин у 10 разів меншій порівняно з традиційними електролітами досягається практично однакова іонна провідність, що відкриває шлях до зниження собівартості сонячних елементів. Визначено залежності іонної провідності від концентрації, молекулярної маси та хімічної структури синтезованих сполук.

Ключові слова: іонні рідини, сонячні комірки, іонна провідність, електроліти.

APPLICATION OF DIMERIC IONIC LIQUIDS OF IONENE TYPE AS A COMPONENT OF SOLAR CELLS

Abstract. The present study investigates the potential of dimeric ionic liquids of the ionene type as components of electrolytes for solar cells. It is established that the use of these compounds in the KI/I_2 system at a concentration of 0.01 mol/l provides the maximum ionic conductivity $10^{-3} - 10^{-4} \text{ S cm}^{-1}$. It has been demonstrated that at a concentration of ionic liquids 10 times lower than that of traditional electrolytes, almost the same ionic conductivity is achieved, which opens the way to reducing the cost of solar cells. The dependence of ionic conductivity on the concentration, molecular weight, and chemical structure of the synthesized compounds was determined.

Keywords: ionic liquids, solar cells, ionic conductivity, electrolytes.

Сучасний розвиток альтернативної енергетики вимагає створення нових матеріалів з унікальними властивостями. Особливо актуальним напрямком є розробка димерних матеріалів з високою іонною провідністю, які зберігають рідкий стан у широкому

температурному діапазоні. При цьому важливим завданням залишається зниження собівартості цих сполук шляхом використання традиційної сировини, що дозволить зробити сонячну енергетику більш доступною та конкурентоспроможною порівняно з традиційними джерелами енергії [1, 2].

Розробка наукових основ для створення нових сполук та методів синтезу димерних іонних рідин іоненового типу (ДІР) дозволяє прогнозувати їхні властивості відповідно до сучасних потреб, зокрема для застосування в сонячних комітках. Ці матеріали становлять особливий інтерес для фотовольтаїки завдяки їх унікальним фізико-хімічним характеристикам, таким як висока термічна стабільність, низька леткість, широке електрохімічне вікно та відмінна іонна провідність [3]. Саме ці властивості роблять іонні рідини ідеальними кандидатами для використання в якості електролітів у сонячних елементах нового покоління, як зазначають Wang та співавтори [4].

У результаті проведених досліджень встановлено, що ДІР є перспективними компонентами рідких електролітів для органічних сонячних елементів. Особливо важливим досягненням стало те, що при їх використанні у 10 разів меншій концентрації порівняно з відомими системами можна досягти практично однакової іонної провідності [5, 6]. Це відкриває шлях до значного зменшення кількості необхідного матеріалу при збереженні ефективності роботи сонячних коміток, що безпосередньо впливає на зниження їх собівартості. Експериментально підтверджено, що найбільш ефективною є система KI/I_2 /іонні рідини у співвідношенні 10/1/0,01, яка забезпечує оптимальний баланс між провідністю та стабільністю електроліту, як показано в роботах Gratzel та співавторів [7].

Особливу увагу в дослідженнях було приділено визначенню іонної провідності як функції концентрації, молекулярної маси та хімічної структури синтезованих сполук [8]. Результати цих досліджень демонструють значний потенціал ефективного використання ДІР у сонячних елементах, де висока іонна провідність є критичним параметром для забезпечення ефективного перетворення сонячної енергії в електричну. Встановлення залежності між структурою ДІР та їх провідністю дозволяє проводити цілеспрямований синтез матеріалів з наперед заданими властивостями, що є важливим кроком у розробці високоефективних фотовольтаїчних пристроїв, як зазначають Li та співавтори [9].

З метою встановлення можливості застосування синтезованих ДІР як компонентів органічних сонячних елементів було розроблено модельну систему прототипу сонячних коміток та вивчено її іонну провідність порівняно з реальною системою [10]. Такий підхід дозволив оцінити перспективність використання досліджуваних матеріалів у реальних умовах експлуатації фотовольтаїчних пристроїв без необхідності створення повноцінних сонячних елементів на початкових етапах дослідження, що значно прискорило процес розробки та оптимізації складу електролітів, як описано в роботах Zakeeruddin та Gratzel [11].

В якості модельної системи прототипу сонячних коміток було обрано систему KI/I_2 у співвідношенні 10/1, яка є класичним редокс-електролітом для сенсibilізованих

барвником сонячних елементів [12]. До цієї базової системи додавали ДІР на основі дичетвертинних амонієвих солей – похідні морфоліну з аніоном йоду у різних співвідношеннях: 0,05, 0,1, 0,2, 0,4, 0,8 та 1. Такий підхід дозволив визначити оптимальну концентрацію іонних рідин для досягнення максимальної ефективності роботи сонячних елементів [13]. Крім того, в якості компонентів для модельної системи було також досліджено ДІР на основі дичетвертинних амонієвих солей – похідні морфоліну з аніонами хлору та броду, що дозволило встановити вплив природи аніону на електрохімічні властивості електроліту, як показано в роботах Hagfeldt та співавторів [14].

У результаті проведених експериментів було визначено, що синтезовані ДІР [15] мають високу іонну провідність, природа якої обумовлена будовою їх катіонної та аніонної частини. Це факт має важливе практичне значення, оскільки демонструє, що шляхом добору відповідної пари катіон-аніон можливо цілеспрямовано варіювати властивості іонних рідин для досягнення оптимальних характеристик електроліту сонячних комірок. Зростання іонної провідності ДІР спостерігається при збільшенні кількості можливих носіїв заряду, що обумовлено утворенням іонних пар або агрегатів.

Цей механізм дозволяє пояснити особливості транспорту заряду в електролітах на основі іонних рідин та оптимізувати їх склад для підвищення ефективності сонячних елементів, як зазначають Pringle та співавтори [16].

Особливо важливим результатом досліджень стало виявлення максимуму питомої провідності, як становила $10^{-3} - 10^{-4}$ См·см⁻¹ при концентрації ДІР 0,01 моль/л у системі KI/I₂, що характеризується областю фазового розподілу. Цей факт має важливе практичне значення, оскільки дозволяє визначити оптимальну концентрацію іонної рідини для досягнення максимальної ефективності роботи сонячного елемента. Подальше збільшення концентрації ДІР у системі KI/I₂ призводить до зменшення питомої провідності системи, що пов'язано з утворенням асоційованого стану димерних іонних рідин у системі KI/I₂. Розуміння цього явища дозволяє уникнути надмірного використання іонних рідин, що сприяє зниженню собівартості сонячних елементів без втрати їх ефективності.

Цікавим аспектом досліджень стало виявлення гіперболоїдного характеру кривих концентраційної залежності молярної іонної провідності системи KI/I₂ при введенні ДІР, який не збігається з екстремальним характером кривих концентраційної залежності їх питомої провідності. Таке явище можна пояснити асоціацією ДІР у розчині, що впливає на механізм транспорту заряду в електроліті. Розуміння цих процесів дозволяє більш точно прогнозувати поведінку електроліту в реальних умовах експлуатації сонячних елементів та оптимізувати їх склад для досягнення максимальної ефективності.

У діапазоні температур 15-30°C спостерігається зростання питомої провідності модельної системи KI/I₂ при додаванні досліджуваних ДІР у всьому інтервалі розглянутих концентрацій, що не відповідає нахилу кривих температурної залежності питомої іонної провідності ДІР. Це явище обумовлено зменшенням рухливих носіїв заряду за рахунок зниження в'язкого стану системи KI/I₂.

Враховуючи, що робоча температура експлуатації чутливих сонячних комірок складає 25°C, отримані результати мають безпосереднє практичне значення для розробки електролітів, оптимізованих для роботи в реальних умовах експлуатації, як зазначають Murakami та Grätzel [17].

Таким чином, проведені дослідження демонструють значний потенціал використання ДІР в якості компонентів електролітів для сонячних елементів. Їх застосування дозволяє значно підвищити іонну провідність електроліту при використанні мінімальної кількості матеріалу, що сприяє підвищенню ефективності роботи сонячних комірок та зниженню їх собівартості. Подальші дослідження в цьому напрямку можуть бути спрямовані на розробку нових типів іонних рідин з покращеними властивостями та оптимізацію складу електролітів для різних типів сонячних елементів, що дозволить зробити сонячну енергетику ще більш ефективною та доступною альтернативою традиційним джерелам енергії.

Бібліографічний список

1. Armand M., Endres F., MacFarlane D. R., Ohno, H., & Scrosati, B. Ionic-liquid materials for the electrochemical challenges of the future.// *Nature Materials* – 2019. - №18 (6). - P. 621-632.
2. Watanabe M., Thomas M. L., Zhang S., Ueno K., Yasuda T., Dokko K. Application of ionic liquids to energy storage and conversion materials and devices.// *Chemical Reviews*. – 2017. - № 117 (10). - P. 7190-7239.
3. Hallett J. P., Welton T. Room-temperature ionic liquids: Solvents for synthesis and catalysis.// *Chemical Reviews*. – 2018. - № 118 (2). - P. 747-800.
4. Wang P., Zakeeruddin S. M., Moser J. E., Humphry-Baker R., Grätzel M. A solvent-free, SeCN⁻/(SeCN)³⁻- based ionic liquid electrolyte for high-efficiency dye-sensitized nanocrystalline solar cells.// *Journal of the American Chemical Society*. – 2021. - № 143 (15). - P. 8062-8069.
5. Valkenburg M. E. V., Vaughn R. L., Williams M., & Wilkes J. S. Thermochemistry of ionic liquid heat-transfer fluids.// *Thermochimica Acta*. – 2022. - № 598. P. 95-101.
6. Бурмістр М.В., Свердліковська О.С., Бурмістр О.М., Феденко О.О. Іонні рідини на основі морфоліну: синтез, структура та властивості.// *Вопросы химии и химической технологии*. – 2018. - № 6. - С. 21-28.
7. Grätzel M., Hagfeldt A. Molecular photovoltaics that mimic photosynthesis.// *Accounts of Chemical Research*. – 2020. - №53 (7). - P. 1227-1236.
8. MacFarlane D. R., Forsyth M., Howlett P. C., Kar M., Passerini S., Pringle J. M., Ohno H., Watanabe M., Yan F., Zheng W., Zhang S., Zhang J. Ionic liquids and their solid-state analogues as materials for energy generation and storage.// *Nature Reviews Materials*. – 2016. - №1 (2). - 15005.
9. Li X., Zhang Z., Chen C., Lin Z. Advances in ionic liquid electrolytes for dye-sensitized solar cells.// *Journal of Materials Chemistry A*. - 2023. - №11 (4). - P. 1876-1894.

10. Свердліковська О.С., Бурмістр М.В., Черваков О.В. Синтез та дослідження іонних рідин на основі четвертинних амонієвих солей.// *Вопросы химии и химической технологии*. – 2019. - №3. С. 46-52.
11. Zakeeruddin S. M., Grätzel M. Solvent-free ionic liquid electrolytes for mesoscopic dye-sensitized solar cells.// *Advanced Functional Materials*. – 2017. - №27 (10) - 1605400.
12. O'Regan B., Grätzel M. A low-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitized colloidal TiO₂ films.// *Nature*. – 1991. - №353 (6346). – P. 737-740.
13. Феденко О.О., Свердліковська О.С., Бурмістр М.В. Дослідження іонної провідності систем на основі іонних рідин для сонячних елементів.// *Полімерний журнал*. – 2020 - №42 (3). - С. 179-186.
14. Hagfeldt A., Boschloo G., Sun L., Kloo L., Pettersson H. Dye-sensitized solar cells.// *Chemical Reviews*. – 2019. - №119 (5). - P. 2868-2920.
15. Свердліковська О.С., Вовчук Б.В., Потапчук М.О. Синтез димерних іонних рідин іоненового типу // Тези доповідей IV Міжнародної наукової конференції «АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ХІМІЇ, МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ТА ЕКОЛОГІЇ», 7-9 грудня 2023 року, Луцьк, Україна, С. 120.
16. Pringle J. M., Golding J., Forsyth C. M., Deacon G. B., Forsyth M., MacFarlane D. R. Physical trends and structural features in organic salts of the thiocyanate anion.// *Journal of Materials Chemistry*. – 2018. - №28 (3). P. 512-521.
17. Murakami T. N., Grätzel M. Counter electrodes for DSC: Application of functional materials as catalysts.// *Inorganica Chimica Acta*. – 2018. - №361 (3).- P. 572-580.

ЗМІЦНЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИМ ОСАДОМ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ НИЗЬКОЇ ІНДУКЦІЇ

Ковальов С.В., к.х.н., доцент, Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна, sv_kovalyov@i.ua, ORCID: 0000-0001-8839-2392

Міщенко В.І., зав. лаб., Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна, v.i.mishchenko@ust.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1867-3874

Анотація. У роботі представлено результати порівняльного дослідження двох найбільш поширених типів теплообмінного обладнання, що застосовується у харчовій промисловості. Проведено огляд наукових джерел з метою виявлення переваг та обмежень кожухотрубчастих і пластинчастих теплообмінників. Здійснено відповідні технологічні та механічні розрахунки, на підставі яких створено комп'ютерні моделі обох типів теплообмінників. На основі аналізу отриманих результатів сформульовано рекомендації щодо доцільності застосування кожного з типів обладнання. Продемонстровано, що удосконалення конструкції кожухотрубчастого теплообмінника можливе шляхом зміцнення трубок електрохімічно осадженим мідним шаром у присутності слабого магнітного поля.

Ключові слова: теплообмінник, електрохімічне осадження, магнітне поле, індуктивність.

STRENGTHENING OF DETAILS OF HEAT EXCHANGERS IN FOOD PRODUCTION BY ELECTROCHEMICAL DEPOSIT IN A LOW INDUCTION MAGNETIC FIELD

Kovalyov S.V., Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine, sv_kovalyov@i.ua, ORCID: 0000-0001-8839-2392

Mishchenko V.I., Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine, v.i.mishchenko@ust.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1867-3874

Abstract. The paper presents the results of a comparative study of the two most common types of heat exchange equipment used in the food industry. A review of scientific sources was conducted to identify the advantages and limitations of shell-and-tube and plate heat exchangers. Appropriate technological and mechanical calculations were performed, on the basis of which computer models of both types of heat exchangers were created. Based on the analysis of the results obtained, recommendations were formulated on the feasibility of using each type of equipment. It was demonstrated that improving the design of a shell-and-tube heat exchanger is possible by strengthening the tubes with an electrochemically deposited copper layer in the presence of a weak magnetic field.

Keywords: heat exchanger, electrochemical deposition, magnetic field, inductance.

Вибір раціональної конструкції теплообмінного обладнання для харчової промисловості є складним інженерно-технологічним завданням, що зумовлено значною кількістю наявних конструктивних рішень, широким спектром матеріалів, з яких

виготовляються апарати, а також різноманітним технологічним параметрів процесів теплообміну. У зв'язку з цим актуальним є здійснення комплексного аналізу існуючих конструкцій та розробка напрямів їх удосконалення з метою підвищення ефективності та зниження ресурсозатрат.

Станом на сьогодні розроблено велику кількість типів теплообмінного обладнання, що знаходить застосування у харчовій, хімічній та аграрній промисловості. Згідно з класифікацією, їх можна умовно поділити на дві основні групи — трубчасті (кожухотрубчасті та змієвикові, а також «труба в трубі») та нетрубчасті апарати (пластинчасті, спіральні, апарати типу «сорочка»).

Метою нашого дослідження є проведення порівняльної оцінки експлуатаційних характеристик двох типів теплообмінного обладнання — пластинчастого теплообмінника та кожухотрубчастого апарата з U-подібними трубками — в умовах ідентичних режимів роботи, а також розробка пропозицій щодо зниження матеріаломісткості конструкцій та підвищення теплотехнічної ефективності теплообмінного обладнання.

Проведено окремий аналіз переваг і недоліків кожухотрубчатих теплообмінників відповідно до даних, наведених у літературних джерелах [1, 2, 3–8]. До основних переваг цих теплообмінників належать: добре відпрацьована технологія виготовлення; значна різноманітність конструктивних рішень; можливість масштабування потужності; низький гідравлічний опір; можливість створення турбулентного потоку, що сприяє інтенсифікації теплообміну; відносна стійкість до забруднень і відкладень; придатність до експлуатації при тисках до 6,4 МПа і температурах до 600 °С; а також порівняно низькі витрати на ремонт. До недоліків можна віднести: велику загальну поверхню теплообміну, складність очищення, значні габаритні розміри та ускладнення при виконанні ремонтних робіт.

Пластинчасті теплообмінники також характеризуються низкою переваг і недоліків, що описані у роботах [1, 2, 3–8]. Серед основних переваг слід відзначити: просту технологію виготовлення, різноманіття конструкцій, зручність очищення пластин, а також велику теплообмінну поверхню за відносно малих габаритів. Основними недоліками є: висока чутливість до забруднень і утворення відкладень; підвищений гідравлічний опір; обмеження щодо робочого тиску (до 1,6 МПа) через ризик руйнування ущільнень; неможливість експлуатації при високих температурах (через обмеження температурної стійкості прокладок); а також висока вартість ремонту (вартість прокладок може сягати 20–40% від вартості теплообмінника).

У рамках даного дослідження було проведено теоретичний розрахунок двох типів теплообмінників. Основним параметром для розрахунку виступала величина теплового потоку, що становила 7693 кВт. Технологічні розрахунки для кожухотрубчатих теплообмінників виконувались на основі методики, викладеної в [1], а для пластинчастих — за рекомендаціями з [7]. Варто окремо відзначити використання перспективних комп'ютерних моделей для розрахунку теплообмінного обладнання, запропонованих у роботах [8, 9]. За результатами проведених розрахунків були створені 3D-моделі конструкцій пластинчастого (рис. 1) та кожухотрубчатого теплообмінників (рис. 2).

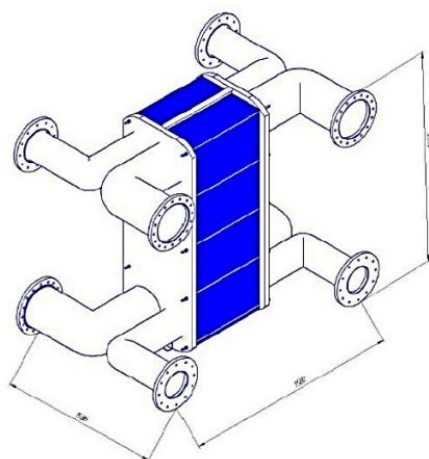


Рис. 1. Спроектована 3D-модель пластинчастого теплообмінника

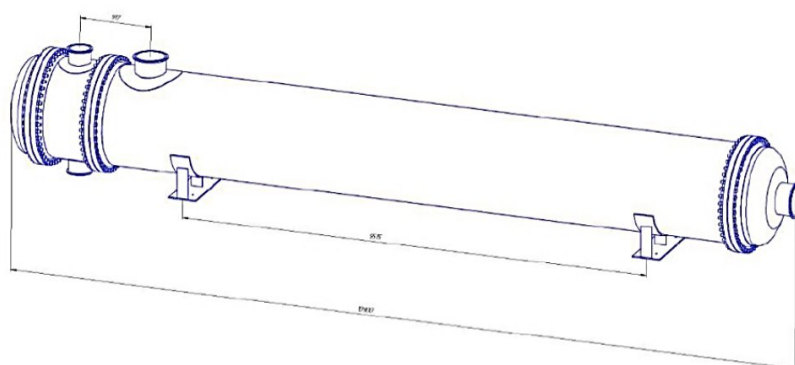


Рис. 2. Спроектована 3D-модель кожухотрубчатого теплообмінника

Було проведено порівняльну оцінку пластинчастого та кожухотрубного теплообмінників, а саме: площа теплообміну, габарити, матеріаломісткість, собівартість, можливість використання при різних тисках та температурах та ін.

Слід зауважити, що за умови зменшення габаритних розмірів і матеріаломісткості кожухотрубчасті теплообмінники можуть не поступатися пластинчастим за ефективністю. Одним із перспективних напрямів удосконалення конструкції кожухотрубчастих теплообмінників є впровадження зміцнювальних покриттів шляхом заміни матеріалу теплопередавальних елементів. В ННІ УДХТУ розроблено технологію електрохімічного осадження міді у слабкому магнітному полі, яка дозволяє суттєво покращити експлуатаційні характеристики теплообмінного обладнання.

Процес формування мідного покриття на конструкційних матеріалах включає попередню підготовку основи, після чого зразки занурюються в електроліт, що містить 0,4 М CuSO_4 та 0,8 М H_2SO_4 , у температурному діапазоні 15–30 °С та за умов магнітного поля індукцією 0,5–1,5 мТл. Щільність струму становить 1–7 А/дм². У результаті утворюються мідні покриття, твердість яких на 50–100 % перевищує аналогічні осади, отримані без впливу магнітного поля [10].

Запропоновано використання цієї методики для зміцнення елементів теплообмінників, зокрема, передбачено заміну сталевих труб трубного пучка (товщиною

3 мм) на мідні трубки товщиною 0,2–0,5 мм, з обов'язковим нанесенням зміцнювального мідного покриття за зазначеною технологією [11]. Незважаючи на підвищення вартості внаслідок використання міді, цей підхід забезпечує низку переваг, зокрема:

1. Коефіцієнт теплопровідності міді більш ніж у 8 разів перевищує аналогічний показник сталі, що значно підвищує ефективність теплопередачі;
2. Зменшення товщини трубки у 5 разів без втрати механічної міцності значно підвищує тепловіддачу;
3. Отримане покриття характеризується високою твердістю та забезпечує захист від абразивного зносу, що дає змогу застосовувати тонкостінні трубки;
4. Загальна маса конструкції знижується в 4,5 рази, що полегшує монтаж і зменшує витрати;
5. Застосування покриття з ідентичного матеріалу до основи виключає ризик температурних деформацій;
6. Мідні трубки мають вищу корозійну стійкість у порівнянні зі сталевими;
7. Тривалість експлуатації теплообмінника та міжремонтний інтервал істотно зростають.

Висновки:

1. Запропоновано принципи вибору теплообмінного обладнання для підприємств харчової промисловості, ґрунтуючись на аналізі літературних джерел і власних інженерних розрахунків.
2. Ефективність кожухотрубчастих теплообмінників може бути суттєво підвищена шляхом заміни сталевих труб на тонкостінні мідні трубки з нанесеним електрохімічним способом високотвердим мідним покриттям у магнітному полі низької індукції.

Бібліографічний список

1. Справочник по теплообменникам: справочник / под ред. Б. С. Петухова, В. К. Шикова. Москва: Энергоиздат, 1987. Т. 2. 352 с.
2. Василенко С. М., Шутюк В. В. Теплообмінні апарати. Основи розрахунку та вибору: цикл лекцій. Київ: УДУХТ, 2000. 36 с.
3. Design optimization and validation of high-performance heat exchangers using approximation assisted optimization and additive manufacturing / Daniel Bacellar et al. Science and Technology for the Built Environment. 2017. Vol. 23, № 6. P. 896–911. DOI: 10.1080/23744731.2017.1333877.
4. Lan Xiangyun. The Design of Shell-and-tube Heat Exchanger in the Project of the Coal Bed Methane Electrical Power Generation. Journal of Chemical, Environmental and Biological Engineering. 2020. Vol. 4, № 2. P. 53-59. DOI: 10.11648/j.jcebe.20200402.14.
5. Pankaj C. Jena. Chapter 6 - Design and analysis of heat exchanger by using computational fluid dynamics. Sustainable Engineering Products and Manufacturing Technologies. Academic Press, 2019. P. 159-176. DOI: 10.1016/B978-0-12-816564-5.00006-2
6. Разоренов Р. Н., Миргородский А. И. Теплообменные аппараты: Кожухотрубные vs Пластинчатые – 3:0! Энергосовет. 2017. № 49. С. 19-24. URL:

https://tai.ru/images/data/gallery/183_2871_Teploobmennie-apparatiKOZhUHOTRUBNIE-vs-PLASTINChATIE-%E2%80%933.0.pdf

7. Мамченко В. О., Малышев А. А. Пластинчатые теплообменники в низкотемпературной технике и биотехнологических процессах: учеб. пособие. Санкт-Петербург: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. 116 с.
8. Ram Kishan, Devendra Singh and Ajay Kumar Sharma. CFD Analysis of Heat Exchanger Models Design Using Ansys Fluent. International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2020. № 11 (2). P. 1-9. DOI: 10.31224/osf.io/drn4.
9. Рогачов В. А., Баранюк А. В., Проценко П. Ю. CFD-моделирование теплогидравлических и прочностных характеристик пластинчатого теплообменного аппарата. Молодой ученый. 2018. № 4(56). С. 175-181.
10. Ковальов С. В., Науменко О. П., Міщенко В. І., Плахотін К. О., Кенюх Д. В. Порівняння та поліпшення теплообмінних апаратів харчових виробництв шляхом зміцнення деталей електрохімічним осадом у слабкому магнітному полі. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. 2021. № 21 (1). С. 28-34. <http://www.tsatu.edu.ua/ophv/wp-content/uploads/sites/13/praci-tdatu-vyp.-21-t.-1.pdf>
11. Спосіб електрохімічного одержання покриттів в магнітному полі: пат. 119771 Україна. МПК (2006.01) C25D 3/00, C25D 5/00, C25D 7/00, C25D 21/12 / С. В. Ковальов, О. Б. Гірін, А. О. Косолапов. № а201611847; заяв. 23.12.16; опубл. 12.08.2019, Бюл. № 15.

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН ТОНКИХ ПЛІВОК НАНЕСЕНИХ НА МЕТАЛ ОСНОВИ

Ковальов С.В. Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технології, Дніпро, Україна, s.v.kovalyov@ust.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8839-2392

Козлов Я.М. Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технології, Дніпро, Україна, ya.m.kozlov@ust.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6987-3753

Анотація. Дослідження зосереджене на створенні методики визначення теплопровідності тонких металевих плівок, які осажені на металеву підкладку методом гальванічного покриття. Було розроблено й зібрано експериментальне обладнання для проведення вимірювань теплопровідності таких плівок. У рамках роботи виконано аналіз теплопровідних властивостей нікелевого шару, нанесеного гальванічним способом на мідну основу. Одержано значення теплопровідності плівки та здійснено порівняння результатів для зразків, виготовлених у різних технологічних умовах.

Ключові слова: теплопровідність, теплоємність, тонкі плівки, гальванічне покриття, металеві основи.

IMPROVING THE METHODOLOGY FOR DETERMINING THERMOPHYSICAL QUANTITIES OF THIN FILMS DEPOSITED ON A BASE METAL

Kovalyov Stanislav. Educational and Scientific Institute «Ukrainian State University of Chemical Technology» Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine, s.v.kovalyov@ust.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8839-2392

Kozlov Yaroslav. Educational and Scientific Institute «Ukrainian State University of Chemical Technology» Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine ya.m.kozlov@ust.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6987-3753

Abstract. The research focuses on the creation of a method for determining the thermal conductivity of thin metal films deposited on a metal substrate by the method of galvanic coating. Experimental equipment was developed and assembled to measure the thermal conductivity of such films. As part of the work, an analysis of the thermal conductivity properties of a nickel layer deposited by galvanic method on a copper base was performed. The thermal conductivity of the film was obtained and the results were compared for samples manufactured under different technological conditions.

Keywords: thermal conductivity, heat capacity, thin films, galvanic coating, metal substrates.

Вступ та Мета. На сучасному етапі розвитку хімічної технології зростає потреба у створенні ефективних методів захисту теплопровідних конструкцій, які експлуатуються в агресивних середовищах, зокрема в умовах дії високих температур, вологи та хімічно активних речовин. Одним з ефективних способів підвищення їх довговічності є нанесення

гальванічних покриттів, які не лише виконують захисну функцію, але й здатні впливати на теплофізичні властивості матеріалу в цілому.

Особливої актуальності набуває питання точного вимірювання таких властивостей, як теплопровідність та теплоємність тонких плівок, нанесених на металеву основу. Враховуючи складну багат шарову структуру матеріалів з гальванічними покриттями, стандартні методи вимірювання теплофізичних характеристик не завжди забезпечують належну точність та надійність. Саме тому актуальною задачею хімічної технології є вдосконалення методик дослідження теплофізичних величин таких матеріалів із застосуванням простого, доступного та відтворюваного експериментального підходу.

У представленій роботі розглянуто вдосконалений підхід до визначення теплопровідності та теплоємності тонких металевих плівок, нанесених електрохімічним шляхом на металеву підкладку. Методика базується на використанні лабораторного пристрою власної розробки, що дозволяє проводити дослідження в умовах, наближених до реальних експлуатаційних. Окрему увагу приділено прикладному аспекту використання таких матеріалів у теплотехнічному обладнанні, зокрема при створенні елементів систем відновлюваної енергетики.

Метою даного дослідження є вдосконалення методики визначення теплофізичних характеристик тонких металевих плівок, осаджених гальванічним способом на металеву основу, шляхом розробки експериментального підходу та створення доступного лабораторного обладнання, що дозволяє з високою точністю визначати теплопровідність і теплоємність матеріалів для потреб хіміко-технологічного виробництва.

Проведений аналіз сучасних методів визначення теплопровідності та міжфазного теплового опору як для об'ємних матеріалів, так і для тонкоплівкових покриттів показав, що для характеристики масивних зразків найчастіше застосовують стаціонарний абсолютний метод, метод порівняння, лазерно-спалаховий дифузійний метод та методику перехідного плоского джерела (TPS) [1-6]. Щодо дослідження тонких плівок, тут найбільше поширення отримали метод 3ω та методика перехідного термовідбивання (табл. 1.).

Таблиця 1 - Поширені підходи до дослідження теплофізичних властивостей матеріалів

Метод	Тонке покриття	Масивний матеріал
Стаціонарний	Методи стаціонарного електричного нагріву	Абсолютний метод Порівняльний метод Метод радіального теплового потоку Метод паралельної провідності
Динамічний (частотна область)	Метод 3ω Метод FDTR	Метод імпульсного напруження (Pulsed power technique)
Динамічний (у часовій області)	Метод TDTR	Метод гарячого дроту (метод голчастого зонда) Метод лазерного спалаху Метод плоского джерела (TPS)

Абсолютні та порівняльні підходи в основному використовують для зразків з великою товщиною, однак ці методики мають довший час збору експериментальних даних. У той час як методи термовідбивання дозволяють оперативно аналізувати навіть надтонкі шари матеріалів. Разом із тим, точне визначення теплопровідності й контактного термоупору з похибкою менше 5% залишається технічно складним завданням.

Вибір оптимальної методики вимірювання має ґрунтуватися на кількох ключових факторах: наявності детальної інформації про зразок — його розміри, форму, метод виготовлення, ступінь шорсткості поверхні тощо; знанні особливостей експериментальної установки та принципів функціонування обраного методу, враховуючи обмеження за геометрією зразка та діапазоном його теплофізичних характеристик; врахуванні можливих джерел похибок, включно з втратами тепла через конвекцію чи випромінювання.

Зважаючи на специфіку тонких металевих плівок, отриманих гальванічним шляхом, доцільним є використання комбінованого підходу, який поєднує переваги як статичних, так і динамічних методів. Запропонована нами методика забезпечує оперативне та досить точне вимірювання теплопровідності як самого гальванічного покриття, так і цілісного матеріалу — основи з нанесеним покриттям.

Пристрій для вимірювання теплотехнічних характеристик тонких металевих плівок, які осажені на металеву підкладку наведено на рисунку 1.

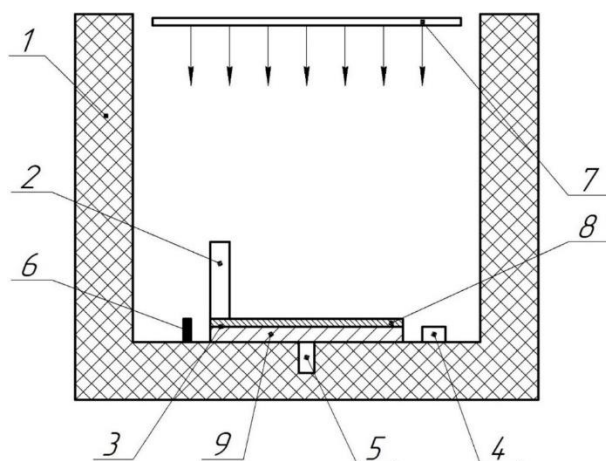


Рис. 1. - Схема пристрою для вимірювання теплопровідності: 1 – корпус із теплоізоляційного матеріалу, 2 – термопара для вимірювання зовнішньої температури зразка (знаходиться в ізольованому корпусі), 3 – зразок з гальванічним покриттям, для вимірювання теплопровідності, 4 – термопара для вимірювання температури в корпусі біля зразка, 5 – термопара для вимірювання внутрішньої температури зразка, 6 – прилад для вимірювання світлового потоку, 7 – джерело енергії, 8 – покриття, 9 – основа

Методика. На нашу думку, доцільно використовувати комбінований підхід, що поєднує елементи як статичних, так і динамічних методів вимірювання. Розрахунок теплофізичних величин доцільно здійснювати на основі відносного методу оцінювання.

Використовуючи відносний метод вимірювання теплопровідності відповідно до нашого пристрою та розрахункової схеми можна записати наступну залежність:

$$\lambda_{\text{зразка}} = \lambda_{\text{Cu}} \frac{A_{\text{Cu}} \cdot \Delta T_{\text{Cu}} \cdot l_{\text{зразка}}}{A_{\text{зразка}} \cdot \Delta T_{\text{зразка}} \cdot l_{\text{Cu}}} \quad (1)$$

де λ_{Cu} – теплопровідність мідної основи;
 A_{Cu} та $A_{\text{зразка}}$ – поверхня мідної основи та нікелевого покриття відповідно;
 l_{Cu} та $l_{\text{зразка}}$ – довжина (товщина) мідної основи та усього зразка відповідно;
 ΔT_{Cu} та $\Delta T_{\text{зразка}}$ – різниця між температурами верху і низу мідного еталону та різниця між температурами верху і низу зразка для якого визначається теплопровідність, відповідно.

Визначити теплопровідність саме покриття можливо з використанням наступної залежності, яка виводиться з умови відносної залежності теплопровідності від товщини матеріалу:

$$\lambda_{\text{зразка}} = \lambda_{\text{Cu}} \frac{l_{\text{Cu}}}{l_{\text{зразка}}} + \lambda_{\text{покриття}} \frac{l_{\text{покриття}}}{l_{\text{зразка}}} \quad (2)$$

де $l_{\text{покриття}}$ – довжина (товщина) покриття (в нашому випадку нікелевого).

Результати та їх обговорення. У межах проведеного дослідження було реалізовано експериментальну методику визначення теплофізичних характеристик зразків, що складаються з мідної основи та тонкого нікелевого покриття, нанесеного гальванічним способом в умовах дії магнітного поля низької індукції. Результати експериментів підтвердили працездатність розробленого лабораторного обладнання та обґрунтували ефективність запропонованого підходу до визначення теплопровідності та теплоємності.

На першому етапі досліджень було визначено теплопровідність чистої мідної пластини товщиною 0,25 мм. Отримане значення (394 Вт/(м×К)) узгоджується з табличними даними, що засвідчує точність застосованої методики. Далі аналогічний аналіз проводився для мідного зразка з нанесеним нікелевим шаром товщиною 0,043 мм. В результаті визначено, що теплопровідність композитного зразка складає 326 Вт/(м×К), тобто нижча, ніж у матеріалу основи. Це пояснюється порівняно меншою теплопровідністю нікелю, а також можливим формуванням перехідного шару на межі металів, який ускладнює тепловідвід.

Подальші розрахунки дозволили визначити теплопровідність самого покриття, яка становить 67,76 Вт/(м×К). Це значення є нижчим за табличне для нікелю (89 Вт/(м×К)), що може бути наслідком зміни кристалічної текстури покриття, отриманого у магнітному полі, зокрема переважної орієнтації кристалічної площини (220), яка, ймовірно, має знижені теплопровідні властивості. Рентгеноструктурний аналіз підтвердив однорідність фазового складу покриття, без наявності сторонніх домішок.

Аналіз морфології поверхні, виконаний за допомогою растрової електронної мікроскопії, показав, що покриття має рівномірну структуру, незалежно від масштабу

збільшення. Це свідчить про відсутність істотного впливу поверхневої нерівності на результати вимірювань.

Щодо теплоємності, експеримент показав, що для міді це значення склало 0,385 кДж/(кг×К), а для зразка з нікелевим покриттям — 0,4285 кДж/(кг×К), що перебуває між значеннями для чистої міді та нікелю. Це підтверджує, що розроблена методика може бути використана також для визначення теплоємності багатошарових зразків.

Висновки

Загалом, дослідження доводить, що нанесення гальванічного покриття змінює теплофізичні властивості матеріалу, зокрема знижує теплопровідність і підвищує теплоємність. Запропонований метод дозволяє швидко та з достатньою точністю проводити аналіз таких змін, що є важливим для подальшого використання подібних матеріалів у складі теплообмінного обладнання та елементів енергетичних систем.

Бібліографічний список

1. *Borca-Tasciuc, T., Kumar, A. R., and Chen, G.*, “Data Reduction in 3ω Method for Thin-Film Thermal Conductivity Determination,” *Rev. Sci. Instrum.* – 2001. - 72(4), pp. 2139-2147.
2. *Cahill, D. G., Goodson, K., and Majumdar, A.*, “Thermometry and Thermal Transport in Micro/Nanoscale Solid-State Devices and Structures,” *ASME J. Heat Transfer.* – 2002.- 124(2), pp. 223-241.
3. *Borca-Tasciuc, T., and Chen, G.*, “Experimental Techniques for Thin-Film Thermal Conductivity Characterization,” *Thermal Conductivity*, T. M. Tritt, ed., Springer, New York. – 2004. - pp. 205-237.
4. *Cahill, D. G., Braun, P. V., Chen, G. and etc.*, “Nanoscale Thermal Transport - II: 2003-2012,” *Appl. Phys. Rev.* – 2014. - 1(1), p. 11305.
5. *Shi, L., Dames, C., Lukes, J. R. and etc.*, “Evaluating Broader Impacts of Nanoscale Thermal Transport Research,” *Nanoscale Microscale Thermophys. Eng.* – 2015. - 19(2), pp. 127-165.
6. *Marconnet, A. M., Panzer, M. A., and Goodson, K. E.*, “Thermal Conduction Phenomena in Carbon Nanotubes and Related Nanostructured Materials,” *Rev. Mod. Phys.* – 2013. - 85(3), pp. 1295-1326.

КОНТРОЛЬ РОЗЧИНОСТІ IN VITRO БІОАКТИВНОГО СКЛА ГРАВІМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ

Македонська-Білих О. М., Український державний університет науки і технологій ННІ УДХТУ, Дніпро, Україна, o.m.makedonska-bilykh@ust.edu.ua

Хоменко О. С., Український державний університет науки і технологій ННІ УДХТУ, Дніпро, Україна, o.s.khomenko@ust.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3753-3033>

Анотація. Біоскло має здатність до взаємодії з живими тканинами, сприяючи їх регенерації, а вимірювання розчинності важливе для оцінки його біоактивності та швидкості деградації. Встановлено особливості застосування гравіметричного методу визначення розчинності біостекол різного гранулометричного складу у фізіологічному розчині Рінгера. Підтверджено, що розмір часток біоскла суттєво впливає на його розчинність: чим менші частки, тим вища швидкість розчинення. В той же час, зниження втрат маси на пізніх етапах розчинення, може свідчити про утворення на поверхні часток шару гідроксиапатиту, що має бути враховане при інтерпретації результатів.

Ключові слова: біоактивне скло, розчинність in vitro, розчин Рінгера; гідроксиапатит.

CONTROL OF IN VITRO SOLUBILITY OF BIOACTIVE GLASS BY GRAVIMETRIC METHOD

Makedonska-Bilykh O. M., Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine, o.m.makedonska-bilykh@ust.edu.ua

Khomenko O. S., Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine, o.s.khomenko@ust.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-3753-3033>

Abstract. Bioglasses have the ability to interact with living tissues and contribute to their regeneration, and solubility measurement is important for assessing their bioactivity and degradation rate. The peculiarities of using the gravimetric method to determine the solubility of bioglasses with different particle size distributions in physiological Ringer's solution have been established. It was confirmed that the size of the bioglass particles has a significant effect on their solubility: the smaller the particles, the higher the dissolution rate. At the same time, a decrease in mass loss in the later stages of dissolution may indicate the formation of a hydroxyapatite layer on the surface of the particles, which should be taken into account when interpreting the results.

Keywords: bioactive glass, in vitro solubility, Ringer's solution, hydroxyapatite.

1 Вступ та мета

Біоматеріали – це природні або штучні речовини, що використовуються для заміни або посилення функцій живих тканин. Біоматеріали повинні гармонійно поєднуватися один з одним in vivo та бути біосумісними [1]. Вони також мають мати такі характеристики, як біоінертність, біоактивність, біостабільність і біорозкладність. Найбільш поширеними синтетичними біоматеріалами, які можуть легко зв'язуватися з кістковою тканиною, є біоактивні скла [2, 3].

Біоактивні стекла використовуються для лікування переломів кісток, кісткових захворювань, а також у стоматології, завдяки своїй здатності до регенерації кісткової тканини. Першим розробленим біоактивним склом було 45S5 (Bioglass®) на основі системи $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O--CaO--P}_2\text{O}_5$ і є найбільш клінічно використовуваним склом для відновлення кісток і регенерації. Інші комерційно розроблені біоактивні скла, такі як 13-93 та S53P4 (BonAlive®), також є системами біоактивного скла на основі силікатів і показали свою придатність для регенерації кісткової тканини та реставрації зубів. Стекла на основі боратів характеризуються більш швидким розчиненням і утворенням апатиту на поверхні в порівнянні з силікатним склом. Такі стекла мають додаткову перевагу в тому, що швидкість утворення апатиту адаптується до метаболізму кісткової тканини і призводить до її поступової заміни, завдяки контрольованому розчиненню [4–6].

З часом біоскло розкладається і вивільняє розчинний кремнезем, кальцій і калій, що сприяє проліферації кісткових клітин, які допомагають в остеогенезі та ангіогенезі, завдяки поєднанню кристалізації апатиту на їх поверхні та вивільненню іонів. Біоскло взаємодіє з тканинами пацієнта, утворюючи зв'язок з кістковою тканиною, в якому шар гідроксиapatиту (ГАП) виступає в якості зв'язуючого між ними. Такий самий шар ГАП утворюється на поверхні біоскла при зануренні в модельовану біологічну рідину, яка має концентрацію іонів, порівнянну з тими, що спостерігаються в плазмі крові людини [2, 7].

Для забезпечення бажаної біологічної взаємодії, що описується як контрольоване вивільнення іонів з подальшим зв'язуванням тканин, вміст кремнезему в склі має становити від 45 до 55 мас.%. Чим нижчий вміст кремнезему, тим легше скло розчиняється в різних водних розчинах [3, 8]. Скло з вмістом SiO_2 понад 60 мас. % розчиняється настільки повільно, що не утворює на поверхні скла багатих на кремнезем і фосфату кальцію реакційних шарів. Отже, такі стекла не будуть з'єднуватися з кістковою та м'якими тканинами.

Контрольована, заздалегідь визначена розчинність біоскла, є критично важливою, оскільки дозволяє прогнозувати темпи регенерації тканин [1, 9]. Інтенсивність розчинення залежить від складу скла, морфології частинок, локального середовища навколо них і співвідношення площі поверхні скла до об'єму розчину. Серед існуючих методів контролю розчинності біостекол (індивідуальний аналіз іонів у розчині ICP-OES / ICP-MS або атомно-абсорбційною спектроскопією, UV-Vis спектрофотометрія, кондуктометрія / іонометрія та ін.), найбільш простим є гравіметричний метод, але з практичної точки зору він має певні особливості, які мають бути враховані.

Метою роботи є дослідження розчинності біологічно активного скла у фізіологічному розчині Рінгера в залежності від його фракційного складу за допомогою гравіметричного методу.

2 Методика

2.1 Синтез скла методом плавлення

Для синтезу скла обрано оксидну систему $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O--CaO--P}_2\text{O}_5\text{--B}_2\text{O}_3$ (табл. 1). Для виготовлення скла застосовано такі сировинні матеріали: SiO_2 (маршаліт), Na_2CO_3 , CaCO_3 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, H_3BO_3 , які є недорогими та доступними на ринку.

Таблиця 1 – Хімічний склад дослідного біоскла, мас. %

Найменування скла	SiO ₂	Na ₂ O	CaO	P ₂ O ₅	B ₂ O ₃
S53P4+ B ₂ O ₃	51,5	22,3	20,4	2,9	2,9

Кількість всіх компонентів була точно визначена з урахуванням втрат при термічній обробці, матеріали були зважені та об'єднані в однорідну масу шляхом ретельного змішування в ступці. Варку скла здійснювали при 1300°C.

2.2 Дослідження розчинності in vitro

Визначення розчинності біостекла здійснювали гравіметричним методом. В якості фізіологічної рідини застосовували розчин Рінгера. Зразки скла були подрібнені до двох фракцій: 0,5–0,2 мм і <0,063 мм. Порошки попередньо зважували (~5 г), занурювали в розчин Рінгера (50 мл для всіх зразків) та інкубували в герметичних ємностях при температурі 36,6±0,5°C протягом 14 та 21 днів. Далі проби фільтрували, сушили та повторно зважували. За втратою маси оцінювали розчинність проб біостекла.

2.3 Дослідження фазового складу

Визначення фазового складу здійснювали за допомогою рентгенофазового аналізу. Цей метод дозволяє виявити та ідентифікувати кристалічні фази в матеріалі на основі характерного дифракційного розсіяння рентгенівського випромінювання атомними площинами кристалів. Кожна фаза має унікальну дифрактограму, тому її наявність у дослідному зразку за допомогою даного аналізу буде встановлена. Рентгенофазовий аналіз здійснювали за допомогою рентгенівського дифрактометру Дрон-3М з Cu_{Kα} випромінюванням, а ідентифікацію фаз – за даними міжнародної бази ICDD PDF.

3 Результати та їх обговорення

Гравіметричний метод полягає у вимірюванні зміни маси біоскла до та після занурення у модельне фізіологічне середовище (наприклад, розчин Рінгера) протягом заданого часу. Зменшення маси вказує на ступінь його розчинення. Усереднені заміри показників розчинності дослідних фракцій біоскла наведені на рис. 1.

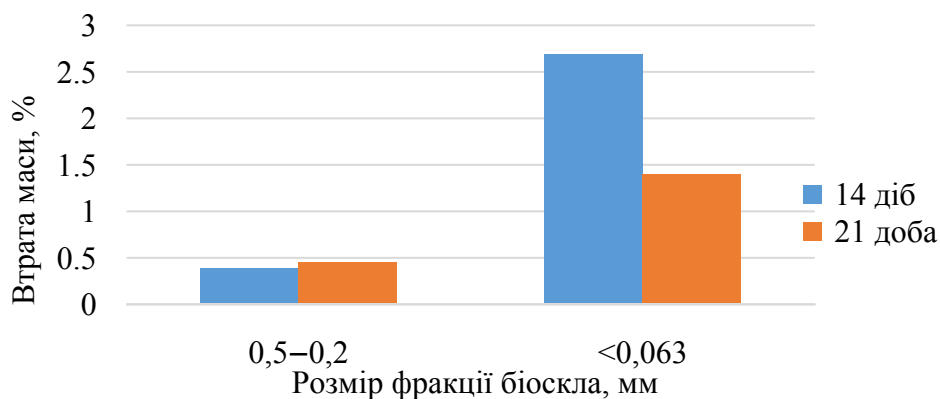


Рисунок 1 - Показники розчинності дослідних фракцій біоскла

Встановлено, що частки крупної фракції біоскла (проби 1 і 2) дуже повільно втрачають масу: через 14 днів – 0,39%, через 21 день – 0,45%. Для проб 3 та 4 (з розміром часток <0,063 мм) зафіксовано значно більші показники втрат: через 14 днів – 2,69%, через 21 день – 1,40%. Менший відсоток втрат проби 4 через 21 день у порівнянні з показником через 14 днів, дозволив припустити, що в результаті взаємодії з фізіологічним середовищем, на поверхні часток біоскла інтенсивно утворюється гідроксиапатит – бажана кристалічна фаза – аналог кісткової складової твердих біологічних тканин.

Відбуваються наступні хімічні реакції: спочатку іонний обмін між модифікаторами сітки зі скла (Na^+/K^+) та H^+ з розчину на поверхні скла утворює зв'язки $\text{Si}-\text{OH}$. Шар, багатий на кремнезем, утворюється, коли розчинений кремнезем зі скла, реконденсується на поверхні. На наступному етапі відбувається міграція та осадження Ca^{2+} і PO_4^{3-} зі скла та розчину з утворенням аморфної плівки $\text{CaO}-\text{P}_2\text{O}_5$ на шарі з високим вмістом кремнезему. Включення гідроксилів і карбонатних груп з розчину призводить до утворення ГАП.

Наявність ГАП у фракції біоскла <0,063 мм після витримки у фізіологічному розчині 21 добу підтверджено за допомогою рентгенофазового аналізу (рис. 2).

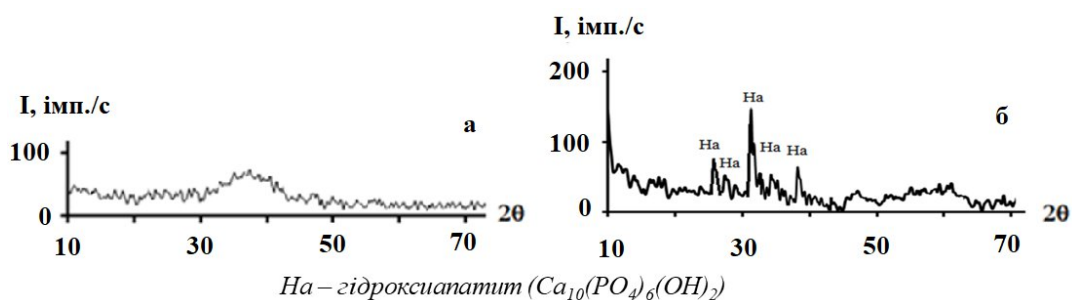


Рисунок 2 – Рентгенограми біоскла фракції <0,063 мм до (а) та після (б) витримки у фізіологічному розчині 21 добу

Після витримки у розчині Рінгера на рентгенограмі (рис. 2б) з'явилися дифракційні максимуми (піки), характерні кристалічній фазі – гідроксиапатиту Ha ($d=3,45$; $3,16$; $2,81$; $2,72$ Å), що пояснює зменшення втрати маси зразків.

Отже, гравіметричний метод визначення розчинності біоскла відрізняється простотою виконання, дозволяє здійснити пряму оцінку розчинності, має низьку вартість та достатньо високу точність при правильній підготовці проб. Але, оскільки біостекла при контакті з фізіологічним розчином перетерплюють не тільки процес розчинення, а і осадження йонів кальцію та фосфору у формі ГАП, то гравіметричний метод визначення розчинності може показати дещо викривлену експериментальну картину. Тому рекомендується здійснювати комплексний аналіз розчинності із застосуванням рентгенофазового аналізу.

4 Висновки

У ході дослідження розчинності біоскла за допомогою гравіметричного методу встановлено, що швидкість втрати маси залежить від розміру часток: дрібнодисперсні фракції (<0,063 мм) демонструють значно вищу розчинність у порівнянні з крупними.

Спостережене зменшення втрати маси дрібної фракції на 21 добу порівняно з 14-ю добою свідчить про утворення ГАП на поверхні часток, що підтверджено рентгенофазовим аналізом. Це утворення, в свою чергу, може знижувати подальше розчинення біоскла. Гравіметричний метод є зручним та доступним для попередньої оцінки розчинності біоскла, однак з огляду на складність фізико-хімічних процесів, що супроводжують розчинення (зокрема осадження біоактивних фаз), його результати можуть бути частково викривленими. Тому доцільним є поєднання гравіметричного методу з рентгенофазовим аналізом для більш повного уявлення про поведінку біоскла у фізіологічному середовищі.

Бібліографічний список

1. Chandra G., Pandey A. Biodegradable bone implants in orthopedic applications: a review. *Biocybernetics and Biomedical Engineering*. 2020. Vol. 40. Is. 2. P. 596–610. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bbe.2020.02.003>
2. Dash P.A., Mohanty S., Nayak S. K. A review on bioactive glass, its modifications and applications in healthcare sectors. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2023. Vol. 614. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2023.122404>
3. Özarslan A. C., Yücel S. Comprehensive assessment of SrO and CuO co-incorporated 50S6P amorphous silicate bioactive glasses in vitro: Revealing bioactivity properties of bone graft biomaterial for bone tissue engineering applications. *Ceramics International*. 2023. Vol. 49. Is. 9. P. 13940–13952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.12.276>
4. Prasad S., Datta S., Adarsh T., Diwan P., Annapurna K., Kundu B., Biswas K. Effect of boron oxide addition on structural, thermal, in vitro bioactivity and antibacterial properties of bioactive glasses in the base S53P4 composition. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2018. Vol. 498. P. 204–215. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.06.027>
5. Prasad S., Fábíán M., Tarafder A., Kant S., Sinha P. K. et al. Factors governing the sinterability, In vitro dissolution, apatite formation and antibacterial properties in B₂O₃ incorporated S53P4 based glass powders. *Ceramics International*. 2022. Vol. 48. Is. 4. P. 4512–4525. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.10.237>
6. Wen C., Xie M., Yan S., Chen Q., Jin J. et al. Effects of B₂O₃ on the structural evolution and biological behavior of borate bioactive glasses by sol-gel and melting methods. *Ceramics International*. 2024. Vol. 50. Is. 22. P. 47864–47875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.09.131>
7. Sinitsyna P., Engblom M., Hupa L. Analysis and modelling of in vitro bioactivity for bioactive glass microspheres and granules in continuous fluid flow conditions. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2024. Vol. 637. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2024.123029>
8. Sinitsyna P., Karlström O., Sevónius C., Hupa L. In vitro dissolution and characterisation of flame-sprayed bioactive glass microspheres S53P4 and 13–93. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2022. Vol. 591. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2022.121736>
9. Vallet-Regi M., Salinas A.J. Mesoporous bioactive glasses for regenerative medicine. *Mater. Today Bio*. 2021. Vol. 11. P. 100–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2021.100121>

ІННОВАЦІЙНІ ПОЛІМЕРНІ ІОННІ РІДИНИ ТА ІОННІ РІДИНИ ІОНЕНОВОГО ТИПУ

Свердліковська О.С. Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технології, Дніпро, Україна, o.sverdlikovska@gmail.com

Потапчук М.О., Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет» Українського державного університету науки і технології, Дніпро, Україна

Анотація. Удосконалено спосіб синтезу полімерних іонних рідин та іонних рідин іоненового типу. Доведено перспективність застосування не розривної схеми «полімер–мономер» при створенні полімерних іонних рідин. Встановлено кореляційні залежності між температурою, хімічною будовою полімерних іонних рідин іоненового типу на основі тетрагідро-1,4-оксазину та їх іонною провідністю і температурою склування, що підтверджено кореляційними рівняннями і пояснено їх хімічну природу. Розроблено практичні рекомендації вирішення науково-прикладної проблеми створення нових полімерних іонних рідин та іонних рідин іоненового типу з високою іонною провідністю зі збереженням їх рідкого стану у широкому діапазоні температур для вирішення нагальних проблем хімічної технології.

Ключові слова: полімерні іонні рідини, іонні рідини, синтез, іонна провідність, температура склування.

INNOVATIVE POLYMER IONIC LIQUIDS AND IONENE-TYPE IONIC LIQUIDS

O.S. Sverdlikovska, Educational and Scientific Institute «Ukrainian State University of Chemical Technology» Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine, o.sverdlikovska@gmail.com

M.O. Potapchuk, Educational and Scientific Institute «Ukrainian State University of Chemical Technology» Ukrainian State University of Science and Technology, Dnipro, Ukraine

Keywords: polymeric ionic liquids, ionic liquids, synthesis, ionic conductivity, glass transition temperature.

Вступ та Мета. В умовах стрімкого розвитку пріоритетності екологічної складової суспільного розвитку розробка нових полімерних іонних рідин з високим рівнем іонної провідності наразі набувають особливої актуальності. Нагальними проблемами цього напрямку є збереження рідкого стану у широкому діапазоні температур та зменшення собівартості іонних рідин. Існуючі іонні рідини знаходять широке використання в якості компонентів рідких і полімерних електролітів для електрохімічних пристроїв, екстрагентів, розчинників і каталітичних середовищ в органічному синтезі та синтезі полімерів, тощо. Серед полімерних матеріалів сучасної індустрії високомолекулярних сполук особливу увагу приділяють полііоненам, що обумовлено їх ефективним застосуванням у різних галузях хімії та хімічної технології, у тому числі як іонні рідини.

Попередні дослідження [1-3] присвячені вирішенню актуальних наукових проблем, а саме розробці нових полімерних іонних рідин та іонних рідин іоноенового типу на основі тетрагідро-1,4-оксазину з високою іонною провідністю, які зберігають рідкий стан у широкому діапазоні температур, що в свою чергу дозволяє розширити області застосування таких сполук.

Тому є підстави вважати, що актуальними слід вважати дослідження, спрямовані на встановлення закономірностей синтезу нових полімерних іонних рідин іоноенового типу на основі четвертинних морфолінієвих солей з низькою температурою склування та високою іонною провідністю. Реалізація стратегічного напрямку удосконалення науково-методичного підходу отримання полімерних іонних рідин та іонних рідин рідкого агрегатного стану у широкому діапазоні температур здійснюється шляхом використання доступної сировини вихідних мономерів із різними функціональними групами, варіювання будови та молекулярної маси полімерів, а також прогнозованої оцінки впливу природи радикалів біля атома Нітрогену макромолекули полімерних іонних рідин іоноенового типу на об'єктах синтезованих іонних мономерів з різними органічними катіонними частинами. Аналіз досліджень [4] показав, що на теперішній час не існує єдиної концепції керованого синтезу полімерних іонних рідин. Тому актуальним слід також вважати дослідження, спрямовані на встановлення залежностей фізико-хімічних властивостей полімерних іонних рідин та іонних рідин, відмінних природою заряду їх макромолекули, типом катіону, ступенем делокалізації і розміру аніонів, рухливістю іонних центрів і зовнішніх факторів для прогнозування можливості ефективного вирішення нагальних науково-технічних проблем хімічної технології. Отримані результати дозволять сформулювати нові гіпотези і теорії існуючих уявлень наукового напрямку у сфері іонних рідин.

Проведені у даній роботі дослідження ставили за мету сформулювати рекомендації для розробки нових полімерних іонних рідин іоноенового типу на основі тетрагідро-1,4-оксазину з високою іонною провідністю в широкому інтервалі температур, обумовлені обґрунтованим вибором структурно-хімічних характеристик носіїв іонних рідин, які забезпечують їх високу ефективність у різних сферах практичних застосувань і дозволяють визначити оптимальні режими роботи іонних рідин у технологічних системах.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі: визначити вплив будови замісників при четвертинному атомі Нітрогену, розміру молекули, кількості зарядів і відстані між атомами четвертинного Нітрогену в ланцюзі макромолекули полімерних іонних рідин іоноенового типу на основі тетрагідро-1,4-оксазину на їх іонну провідність і температуру склування; навести залежності між хімічною будовою полімерних іонних рідин іоноенового типу, температурою на їх технологічно важливі параметри.

Методика. У роботі отримано новий тип моно-, димерних і полімерних іонних рідин іоноенового типу на основі тетрагідро-1,4-оксазину.

Синтез іонних рідин іоноенового типу здійснювали взаємодією третинних амінів на основі тетрагідро-1,4-оксазину з галогенопохідними. Реакцію отримання іонних рідин іоноенового типу проводили при температурі 50-60°C протягом 10-12 годин. На стадії утворення цільових іонних рідин іоноенового типу здійснювалася кватернізація третинного

аміну з галогенопохідними. Встановлено, що мономерні іонні рідини іоненового типу утворюються з високими виходами ~75-98%.

Синтез димерних іонних рідин іоненового типу проводили за реакцією еквімолекулярних кількостей третинних діамінів на основі похідних тетрагідро-1,4-оксазину з галогенопохідними на основі монофункціональних епоксидованих сполук за температури 50-60°C протягом 10 годин. Встановлено, що димерні іонні рідини іоненового типу утворюються з високими виходами ~68-97%.

Синтез полімерних іонних рідин іоненового типу здійснено за реакцією Меншуткіна, яка відбувається за механізмом (S_N2) бімолекулярного нуклеофільного заміщення у різних розчинниках.

Дослідження іонної провідності, температури склування полімерних іонних рідин іоненового типу проводили з використанням кондуктометрії, диференційно-скануючої калориметрії. Порівняльний аналіз впливу хімічної будови полімерних іонних рідин іоненового типу на їх іонну провідність здійснювали за результатами дослідження в діапазоні температур від 15 до 50°C.

Результати та їх обговорення. Результати проведених досліджень є доцільними з практичної точки зору і дозволяють обґрунтовано підходити до удосконалення методології синтезу полімерних іонних рідин іоненового типу з високою іонною провідністю зі збереженням їх рідкого стану у широкому діапазоні температур. Спосіб синтезу полімерних іонних рідин іоненового типу полягає у взаємодії отриманих третинних діамінів і дигалогенідів. Синтез полімерних іонних рідин іоненового типу проводили у розчиннику змінного складу етанол–вода при початковому співвідношенні 70:30 за температури 50°C протягом 20 годин. Реакцію проводили у гомогенному середовищі: додавали суміш етанол–вода зі вмістом етанолу – 30 об.% для полімерних іонних рідин іоненового типу з меншою густиною заряду в ланцюзі полімеру і 50 об.% для полімерних іонних рідин іоненового типу з більшою густиною заряду в ланцюзі полімеру. Враховуючи суттєву роль конформаційного фактору зростаючого ланцюга макромолекули полііонену в реакційному середовищі, ці дії необхідно повторювати до припинення осадження полімеру. Згідно з існуючими уявленнями: у випадку, коли у реакційній суміші полімер випадає в осад, його макромолекула знаходиться у стані клубка, тобто зі збільшенням ступеня перетворення реакції зменшується розчинність продукту зростання ланцюга полімеру і їх реакційна здатність; при додаванні суміші етанол–вода (збільшується діелектрична проникність реакційного середовища), у якій полімер розчиняється, його макромолекула знаходиться у розгорнутому стані, активні кінцеві функціональні групи знаходяться на поверхні клубка полімеру і доступні для реакції зростання ланцюга полімеру, тобто до збільшення швидкості реакції утворення полімеру з більшою молекулярною масою. Початкова концентрація вихідних мономерів для отримання полімерних іонних рідин іоненового типу з найбільшою молекулярною масою, які містять радикали аліфатичної будови, складає 0,3 моль/л, а для полімерних іонних рідин іоненового типу найбільшою молекулярною масою, які містять радикали алкілароматичної будови, – 0,6 моль/л.

У роботі показано, що синтезовані полімерні іонні рідини та іонні рідини іоненового типу на основі похідних тетрагідро-1,4-оксазину з іонною провідністю $\sim 10^{-1}$ – 10^{-5} См·см⁻¹

у діапазоні температур склування $-143^{\circ}\text{C} \div -25^{\circ}\text{C}$ мають більшу на п'ять порядків іонну провідність у порівнянні з відомими світовими аналогами на основі полімерних іонних рідин ($s=10^{-6}-10^{-10} \text{ См} \times \text{см}^{-1}$; $T_m = -8 \div 80^{\circ}\text{C}$) [5], що дозволяє доповнити ряд існуючих ефективних полімерних іонних рідин та їх низькомолекулярних аналогів іоненового типу сполуками з більш високим рівнем іонної провідності у діапазоні -143°C до $+350^{\circ}\text{C}$. Доцільним з практичної точки зору було попереднє визначення впливу природи радикалів біля функціонального центру димерних іонних рідин іоненового типу, що дозволило сформулювати рекомендації для розробки нових полімерних сполук з високою іонною провідністю, що підтверджується встановленими аналогічними залежностями між температурою, замісниками при четвертинному атомі Нітрогену та іонною провідністю іонних рідин.

Узагальнення встановлених результатів даних досліджень може бути сформульовано у вигляді наступного тезису:

1. Зі зменшенням в'язкості розчинів полімерів, їх температури склування та збільшенням температури іонна провідність полімерних іонних рідин іоненового типу зростає. Така залежність пояснюється комплексом внутрішньо- та міжмолекулярних взаємодій макромолекули полімеру.

2. Введення алільних і оксиетиленових груп до бензилових і дибензилових фрагментів при функціональному центрі макромолекули полімерних іонних рідин іоненового типу ланцюг макромолекули полімеру такої будови є більш розгорнутим, що забезпечує більшу жорсткість) приводить до збільшення іонної провідності при низькій температурі склування.

3. Заміщення $-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$ містка на групу $-\text{O}-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-$ у радикалі катіонної частини полімерних іонних рідин іоненового типу спричиняє зменшення іонної провідності, ймовірно, внаслідок збільшення просторових ускладнень.

4. Введення до основного ланцюга макромолекули полімерних іонних рідин іоненового типу радикала алкілароматичної будови збільшує її іонну провідність порівняно з полімером аліфатичної будови. Очевидно це зумовлено «розпушенням» пакування полімерного ланцюга із замісником алкілароматичної будови за рахунок більшої жорсткості макромолекули полімеру, яка більш розгорнута порівняно з полімером, який містить замісники аліфатичної будови.

5. Зі зменшенням відстані між атомами кватернізованого Нітрогену в макромолекулі полімеру іонна провідність полімерних іонних рідин іоненового типу збільшується.

6. Зі збільшенням розміру макромолекули полімеру іонна провідність полімерних іонних рідин іоненового типу зменшується, а температури склування зростає. Така залежність іонної провідності від молекулярної маси полімерних іонних рідин іоненового типу на основі тетрагідро-1,4-оксазину підтверджується кореляційним рівнянням $S = -0,015 \cdot 10^{-5} M + 638,8$, $r=0,998$. Це обумовлено зменшенням лінійності макромолекули полімеру за рахунок зростання кількості зарядів у ланцюзі та просторових перешкоджань, що приводить до зменшення рухливості носіїв заряду.

Висновки. Розроблено теоретичні основи синтезу нових полімерних матеріалів і їх мономерних аналогів – іонних рідин на основі тетрагідро-1,4-оксазину шляхом

прогнозування взаємозв'язку «синтез–структура–властивості», що є підґрунтям створення методології одержання матеріалів з високим рівнем властивостей. Подальшого розвитку набули наукові уявлення щодо полімерних іонних рідин іоненового типу внаслідок встановлених залежностей іонної провідності цих сполук від температури, природи замісників при четвертинному атомі Нітрогену, кількості четвертинних амонієвих груп у радикалі катіона, довжини ланцюгу макромолекули, які підтверджено кореляційними рівняннями. Завдяки встановленим аналітичним залежностям стає можливим узагальнити теорії існуючих знань обґрунтованого вибору структурно-хімічних характеристик носіїв для вирішення науково-прикладної проблеми розробки полімерних іонних рідин та іонних рідин іоненового типу на основі тетрагідро-1,4-оксазину з високою іонною провідністю зі збереженням їх рідкого стану в широкому діапазоні температур.

Бібліографічний список

1. *Свердліковська, О.С.* Полімерні четвертинні амонієві солі та їх аналоги – перспективні іонні рідини. – Дніпропетровськ, 2014. – 264 с.
2. *Sverdlikovs'ka O., Burmistr M., Chervakov O.* Perspective of ionic liquids based on polymeric quaternary salts of ammonium (derivates morpholine) // *European Applied Sciences*. – 2014. – № 10. – P.109-112.
3. *Свердліковська О.С., Бурмістр М.В., Феденко О.А.* Апротонні полімерні іонні рідини іоненового типу // *Наука Технології Інновації*. – 2018. – №2 (6). – P.61-70.
4. *Tomasz Tuzimski, Anna Petruczynik.* Ionic Liquids Applied to Extraction of Xenobiotics from Food, Environmental, and Biological Samples and for Analysis by Liquid Chromatography // *Journal of AOAC INTERNATIONAL* – 2019. – Vol.102, Issue 1. – P.3-22.
5. *Yoshizawa M., Narita A., Ohno H.* Ionic liquids for promising ion-conducting polymers // *Australian J. Chem.* – 2004. – № 2 (57). – P.139-144.

КОРДІЄРИТОВА РАДІОПРОЗОРА КЕРАМІКА, МОДИФІКОВАНА СКЛОМ В СИСТЕМІ $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$: СИНТЕЗ ТА ВЛАСТИВОСТІ.

Зайчук О.В., Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна, o.v.zaichuk@ust.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5209-7498>

Калішенко Ю.Р., Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна, yu.r.kalishenko@ust.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-6189-2629>

Амеліна О.А., Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна, o.a.amelina@ust.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-6902-9229>

Гордєєв Ю.С., Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна, yu.s.hordieiev@ust.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-6425-936X>

Анотація. Представлено результати досліджень радіопрозорої кордієритової кераміки, частина компонентів якої вводилася за допомогою порівняно легкоплавкого скла в системі $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$. Реакційне спікання при $1300 - 1350^\circ\text{C}$ призводить до утворення кристалічної фази α - кордієриту, який формує щільну матрицю з дрібних призматичних кристалів, зв'язаних тонким прошарком скловидної фази. Отримана кераміка має низький коефіцієнт теплового розширення (ТКЛР), високу термічну стійкість та необхідні діелектричні властивості в надвисокочастотному (НВЧ) діапазоні, що свідчить про її потенціал для виготовлення радіопрозорих виробів та конструкцій.

Ключові слова: кордієритова кераміка, радіопрозорість, евтектичне скло, спікання, фазовий склад, мікроструктура

SYNTHESIS AND PROPERTIES OF RADIOTRSPARENT CORDIERITE CERAMICS MODIFIED WITH $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ GLASS

Zaichuk O.V. Ukrainian state university of science and technologies, Dnipro, Ukraine, o.v.zaichuk@ust.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5209-7498>

Kalishenko Yu.R. Ukrainian state university of science and technologies, Dnipro, Ukraine, yu.r.kalishenko@ust.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-6189-2629>

Amelina O.A. Ukrainian state university of science and technologies, Dnipro, Ukraine, o.a.amelina@ust.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-6902-9229>

Hordieiev Yu.S. Ukrainian state university of science and technologies, Dnipro, Ukraine, yu.s.hordieiev@ust.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-6425-936X>

Abstract. The results of research on radiotransparent cordierite ceramics, where some components were introduced using a relatively low-melting glass in the $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{B}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ system, are presented. Reaction sintering at $1300 - 1350^\circ\text{C}$ leads to the formation of the crystalline phase α -cordierite, which forms a dense matrix of small prismatic crystals bound by a thin layer of the glassy phase. The obtained ceramics have a low coefficient of thermal expansion (CTE), high thermal stability, and the necessary dielectric properties in the ultra-high frequency (UHF) range, which indicates its potential for the manufacture of radio-transparent products and structures.

Keywords: cordierite ceramics, radio transparency, eutectic glass, sintering, phase composition, microstructure.

Вступ. Керамічні й склокристалічні матеріали є ефективними діелектриками для роботи в радіочастотному діапазоні 10^5 – 10^{12} Гц, що забезпечує їх використання як радіопрозорих елементів в авіаційній та ракетній техніці [6]. До таких матеріалів висуваються високі вимоги щодо радіотехнічних, термомеханічних властивостей, ерозійної стійкості й мінімальної густини.

Серед перспективних варіантів – кварцова кераміка [4] та склокристалічні матеріали на основі алюмосилікатів [3], проте їх експлуатаційні властивості обмежені високою пористістю і температурною нестабільністю функціональних властивостей [2, 4]. Матеріали на основі цельзіану ($\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) і анортиту ($\text{SrO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) більш термостійкі, але мають вищу щільність й ТКЛР.

Кераміка на основі кордієриту ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) поєднує низький ТКЛР ($(15\text{--}25) \cdot 10^{-7}$ град $^{-1}$), невисоку питому вагу ($2,5\text{--}2,7$ г/см 3), високу термостійкість ($800\text{--}1000$ °С) та добрі діелектричні характеристики, що робить її придатною для НВЧ-застосувань [5]. Однак традиційні методи не забезпечують достатнього ступеня спікання через низьку температуру плавлення кордієриту (1430 °С) та утворення домішкових фаз.

Покращення структури досягається введенням модифікаторів [1], однак ці рішення не завжди відповідають вимогам термо- й хімічної стійкості.

Традиційні способи виробництва щільних склокристалічних і керамічних матеріалів на основі кордієриту пов'язані з енергоємними високотемпературними процесами або не завжди дозволяють досягти бажаних фізико-технічних властивостей. У зв'язку з цим, розробка енергоефективного методу є важливим завданням. В даній роботі пропонується підхід, що передбачає введення частини компонентів кордієриту у вигляді легкоплавкого евтектичного скла системи $\text{MgO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ (MAS) з додатковим введенням B_2O_3 . Це дозволяє керувати мікроструктурою та фазовим складом кераміки шляхом варіювання співвідношення скла та кристалічних складових.

Мета дослідження. Розробка складів та встановлення фізико-хімічних закономірностей формування фазового складу і мікроструктури щільноспеченої кордієритової кераміки при низькотемпературному випалі з використанням евтектичного MAS скла, яке додатково містить B_2O_3 .

Методика. Для отримання кордієритової кераміки були використані скло евтектичного складу в псевдопотрійній системі MAS з додаванням 10 мас.% B_2O_3 , каолін збагачений, магній гідрооксид, технічний глинозем, шамот каоліновий та шамот кордієритовий. Скло варили зі стандартних компонентів: тальку, технічного глинозему, кремнію діоксиду та борної кислоти. Варіння скла проводили у корундових тиглях в електричній печі з карбід кремнієвими нагрівачами при температурі 1400 °С протягом 1 год.

Керамічні шлікери готували спільним мокрим помелом (вологість 26–27 %) з подальшим литвом у гіпсові форми. Зразки мали різну геометрію: циліндри, штабики, диски, піроскопи. Спікання висушених зразків здійснювали в силітовій за заданим

температуро-часовим режимом при максимальній температурі випалу 1250–1350°C з витримкою 1 год (в середовищі повітря).

Визначення основних фізико-хімічних та експлуатаційних характеристик здійснювали стандартними методами.

Результати та їх обговорення. Для синтезу низькотемпературної кордієритової кераміки було обрано евтектичний склад скла E-1 в системі $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, що має найнижчу температуру утворення розплаву 1345°C. В даній точці E-1 при кристалізації утворюються кордієрит, тридиміт (SiO_2) і кліноенстатит ($\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$). Додавання 10 мас.% B_2O_3 дозволило знизити температуру варіння скла до 1400°C без зміни фазового складу при кристалізації скла $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (MABS), що підтверджено термічним аналізом: розм'якшення відбувається при 760°C, а кристалізація – при 990°C.

Після ступінчастої термообробки встановлено, що MABS скло кристалізується з утворенням β -кварцу, кліноенстатиту і незначної кількості α -кордієриту. Розрахунковий вміст кристалічних фаз, які є продуктами кристалізації MABS скла, представлений, мас. %: кордієрит – 47,7; кліноенстатит – 29,6; тридиміт – 13,6.

При отриманні кордієритової кераміки MABS скло вводили в кількості 25–35 мас.% (склади C-1, C-2, C-3). Завдяки взаємодії продуктів кристалізації скла з кристалічними наповнювачами утворюється α -кордієрит, що має більш низький ТКЛР. Скло сприяє реакційному формуванню структури та зменшує температуру спікання. Для забезпечення формування стехіометричного кордієриту вводили наповнювачі, що компенсують дефіцит MgO , Al_2O_3 і SiO_2 .

Використання глинистого компоненту (каоліну) у складі кордієритової кераміки сприяє покращенню реологічних властивостей шлікерів і забезпечує достатню міцність формованих заготовок на ранніх етапах виробництва. Оптимальна концентрація каоліну (30 мас.%) дозволяє ефективно регулювати склад системи. Кераміка містила 30 мас.% каоліну для регулювання реології шлікеру і забезпечення достатньої міцності формованих заготовок на ранніх етапах виробництва. Решту Al_2O_3 і SiO_2 , необхідні для формування кордієриту, вносили за допомогою шамоту каолінового і шамоту кордієритового.

Випал проводили при 1250–1350°C. При температурі 1300°C і вмісті скла 30–35 мас.% отримано матеріал з нульовим водопоглинанням, низькою пористістю, високою щільністю (що зростає з 1,77–1,87 г/см³ до 2,34–2,37 г/см³) та міцністю на стиск (покращення показників з 158–207 МПа до 294–314 МПа). Збільшення температури до 1350°C покращує властивості лише для кераміки складу C-1 який містить мінімальну кількість MABS скла (25 мас.%). При цьому отриманий матеріал, який характеризується нульовими значеннями водопоглинання і відкритої пористості, а також ρ і $\sigma_{\text{ст}}$ на рівні 2,33 г/см³ і 283 МПа відповідно.

Кераміка характеризується стабільним низьким ТКЛР $(13\text{--}14)\cdot 10^{-7}$ град⁻¹. Зразки з найкращими властивостями продемонстрували високу термостійкість для всіх речовинних складів (900 °C), вогнетривкість до 1370 °C (склад C-1) та зі збільшення вмісту MABS скла в складі кордієритової кераміки до 30–35 мас.% вогнетривкість знижується до 1350°C. Розроблена кордієритова кераміка має низькі діелектричні втрати ($\epsilon = 4,3$, $\tan\delta = 0,001$).

Рентгенофазовий аналізом встановлено, що кераміка з додаванням MABS скла містить винятково α -кордієрит, який повністю формується вже при 1250 °С. Підвищення вмісту скла з 25 до 35 мас.% знижує інтенсивність дифракційних максимумів α -кордієриту, що свідчить про зростання частки скловидної фази. Це підтверджується мікроструктурним аналізом: за умов 25 мас.% (С-1) скла структура складається з дрібних (0,5–1,0 мкм) кристалів кордієриту, щільно зв'язаних склофазою. При 35 мас.% (С-1) склофаза переважає, але її кількість недостатня для заповнення об'єму, що призводить до появи пор (2–10 мкм).

Спікання кераміки С-3 (35% MABS) при 1300°С призводить до однорідної мікроструктури з рівномірно розподіленими призматичними кристалами кордієриту (1–3 мкм), оточеними скловидною фазою, що забезпечує оптимальні фізико-технічні показники. Для кераміки С-1 (25% MABS) при 1350°С спостерігається подальше зниження інтенсивності піків α -кордієриту, тоді як для С-2 та С-3 – їх посилення. Скануюча електронна мікроскопія (СЕМ) показала щільну дрібнокристалічну мікроструктуру для С-1 (1350°С) з тетрагональними та гексагональними кристалами (1–2 мкм), міцно зв'язаними скловидною фазою. Навпаки, для С-3 (1350°С) характерне збільшення розміру кристалів кордієриту (до 6 мкм) та зниження міцності на стискання і щільності.

Висновки. У межах даного дослідження було запропоновано метод синтезу щільноспеченої кордієритової кераміки з використанням евтектичного скла MAS-системи. Утворення α -кордієриту, який виступає єдиною кристалічною фазою, відбувалося шляхом кристалізації скла та взаємодії з кристалічними наповнювачами. Сформована мікроструктура кераміки з дрібними призматичними кристалами α -кордієриту та скловидною зв'язкою, що забезпечує однорідність і високу щільність матеріалу.

Серед основних властивостей отриманої кераміки: нульова пористість, висока міцність (до 314 МПа), низький ТКЛР ($(13-14) \cdot 10^{-7}$ град⁻¹), термостійкість до 900°С та відмінні діелектричні показники ($\epsilon \approx 4,3$; $\tan \delta \approx 0,001$).

Матеріал може бути використаний для виготовлення радіопрозорих виробів, зокрема антенних обтічників радіокерованих ракет та захисних вікон. Запропонований підхід є універсальним і може бути адаптований до синтезу інших функціональних алюмосилікатних матеріалів.

Бібліографічний список

1. Obradović N., Dordević N., Filipović S. et al. Influence of mechanochemical activation on the sintering of cordierite ceramics in the presence of Bi_2O_3 as a functional additive. *Powder Technol.* 2012. Vol. 218. P. 157–161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.12.012>.
2. Pilate P., Delobel F. Low thermal expansion ceramic and glass-ceramic materials. *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*. 2021. Vol. 2. P. 47–58. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818542-1.00048-5>.
3. Sebastian M. T., Ubic R., Jantunen H. Low-loss dielectric ceramic materials and their properties. *Int. Mater. Rev.* 2015. Vol. 60. P. 392–412. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743280415Y.0000000007>

4. Zaichuk A., Amelina A. Search for the ways to improve the physical and technical parameters of quartz ceramics. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2017. No. 6. P. 63–67.
5. Zaichuk A., Amelina A., Kalishenko Y., Hordieiev Yu., Saltykov D., Sribniak N., Ivchenko V., Savchenko L. Aspects of development and properties of densely sintered of ultra-high-frequency radio-transparent ceramics of cordierite composition. *J. Korean Ceram. Soc.* 2021. Vol. 58. P. 483–494. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43207-021-00125-5>.
6. Zanolto E. D. A Bright future for glass-ceramics. *Am. Ceram. Soc. Bull.* 2010. Vol. 89, No. 8. P. 19–27.

СЕКЦІЯ 4. ІТ-ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ У ВИРОБНИЦТВІ

SECTION 4. IT-DIGITAL TRANSFORMATION IN PRODUCTION

ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ТА INDUSTRIAL AI В УКРАЇНІ: МОЖЛИВОСТІ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОГО РОЗВИТКУ

Очкасов О.Б, доцент каф. «Локомотиви», Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна. o.b.ochkasov@ust.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7719-7214>

Анотація. У роботі проаналізовано стан цифрової трансформації промисловості України із фокусом на інтеграцію Industrial AI. Розглянуто практичні приклади впровадження рішень класу Smart EAM та систем пошуку аномалій у роботі обладнання. Визначено основні бар'єри впровадження, включно з кадровими та інфраструктурними обмеженнями. Запропоновано напрями подолання проблем, а також перспективи подальших досліджень у сфері промислової аналітики та інтегрованого управління виробництвом.

Ключові слова: Industrial AI, цифрова трансформація, Smart EAM, пошук аномалій, промислова аналітика

INDUSTRIAL AI AND DIGITAL TRANSFORMATION OF UKRAINIAN INDUSTRY: STATUS, CHALLENGES AND PRACTICAL CASES

Ochkasov O.B. Associate Professor of the Department of "Locomotives Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine, o.b.ochkasov@ust.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7719-7214>

Abstract. The paper analyzes the state of digital transformation in Ukrainian industry with a focus on Industrial AI integration. Practical cases of implementing Smart EAM solutions and equipment anomaly detection systems are reviewed. Key implementation barriers, including workforce and infrastructure limitations, are identified. Practical steps to overcome these challenges and directions for future research in industrial analytics and integrated production management are proposed.

Key words: Industrial AI, digital transformation, Smart EAM, search for anomalies, industrial pollicy

Цифрова трансформація є одним із ключових драйверів розвитку сучасної промисловості. Україна, перебуваючи у складних умовах глобальних і внутрішніх викликів, має унікальну можливість інтегрувати сучасні цифрові технології, зокрема промисловий штучний інтелект (Industrial AI), у процес модернізації національної економіки та відновлення промислового потенціалу.

Поняття Industrial AI виходить за межі традиційної автоматизації виробництва, поєднуючи елементи штучного інтелекту, машинного навчання, Інтернету речей (IoT), хмарних технологій та цифрових двійників для створення адаптивних, самонавчальних

виробничих систем. У поєднанні з концепціями Industry 4.0 та Industry 5.0, ці технології формують нову парадигму інтелектуального виробництва, де цифрові рішення не лише підвищують продуктивність, а й забезпечують стійкість, безпеку та людиноцентричність виробничих процесів.

Особливе значення ці трансформації мають для галузей з високою капіталомісткістю та складною інфраструктурою, таких як металургія, транспортне машинобудування та енергетика. При цьому, інтеграція рішень класу Smart EAM (Enterprise Asset Management) і систем пошуку аномалій в роботі обладнання відкриває нові можливості для мінімізації виробничих ризиків, зниження експлуатаційних витрат та підвищення безпеки виробничих процесів.

Враховуючи нагальну потребу у підвищенні ефективності української промисловості та актуальність світових трендів впровадження Industrial AI, дана публікація присвячена аналізу стану цифрової трансформації в Україні, огляду сучасних підходів до впровадження AI у виробництво, виявленню основних проблем інтеграції таких технологій у національний промисловий сектор, а також розгляду практичних кейсів застосування Industrial AI, зокрема у металургії та транспортній галузі.

Цифрова трансформація промисловості, зокрема інтеграція концепцій Industry 4.0 та Industrial AI, стає визначальним вектором розвитку сучасного виробництва. Поєднання штучного інтелекту, Інтернету речей (IoT), хмарних технологій та цифрових двійників дозволяє підприємствам підвищувати ефективність, гнучкість і безпеку виробничих процесів.

У роботі [3] детально розглянуто основні підходи до впровадження технологій Industry 4.0, зокрема у сфері експлуатації локомотивного парку. Йдеться про перехід від статичних систем Industry 3.0 до більш гнучких рішень, що передбачають використання Smart-машин, Smart-виробництва та Smart-обслуговування. Це відкриває можливості для моніторингу технічного стану обладнання у режимі реального часу та застосування концепції обслуговування за фактичним станом (Predictive Maintenance).

В роботах [1][4] акцент зроблено на потенціалі цифровізації для економіки України. Так, за оцінками Яненкової І.Г. [4], впровадження інтелектуальних систем дозволяє зменшити операційні витрати та підвищити ефективність виробництва. Проте головним бар'єром залишається низький рівень готовності підприємств до інтеграції цифрових технологій.

Аналіз звітів міжнародних консалтингових агентств [2] показує, що глобальна тенденція розвитку Industrial AI характеризується поступовим переходом від пілотних проєктів до масштабованих впроваджень. Наприклад, згідно зі звітом Honeywell, тільки 17% підприємств завершили повну імплементацію AI-рішень, тоді як більшість знаходиться на стадії тестування або часткового впровадження. Основними перешкодами є фрагментація даних та відсутність єдиної цифрової інфраструктури.

У роботах [1,6,7] підкреслено важливість пошуку аномалій у роботі обладнання як ключового елемента систем предиктивного обслуговування. Використання штучного інтелекту та машинного навчання дозволяє виявляти потенційні відмови на ранніх стадіях,

що підтверджується статистикою: впровадження таких систем дозволяє скоротити час простою на 30–50%, а витрати на ремонт — на 10–40%.

Додатково варто відзначити роль Smart EAM-рішень від IT-Enterprise [1,5], які на практиці демонструють можливості інтеграції цифрової трансформації у вітчизняному промисловому середовищі. Система, що використовує передові аналітичні інструменти, дозволяє здійснювати управління активами підприємства в реальному часі, що сприяє підвищенню операційної ефективності та зниженню витрат на технічне обслуговування [1].

Таким чином, аналіз публікацій та практичні приклади впровадження свідчать, що в Україні є потенціал для активної інтеграції Industrial AI. Проте для досягнення масштабного ефекту необхідно вирішити низку проблем, пов'язаних із якістю даних, готовністю інфраструктури та формуванням необхідних компетенцій персоналу.

В умовах зростання складності промислових систем та високої конкуренції на глобальних ринках, питання впровадження цифрових технологій, зокрема Industrial AI, стає для України стратегічно необхідним. Окремі приклади реалізації проєктів цифрової трансформації у вітчизняній промисловості вже демонструють позитивні результати від впровадження систем предиктивної аналітики, інтелектуального управління активами та пошуку аномалій у роботі обладнання.

Водночас українські підприємства стикаються з низкою обмежень, серед яких можна виділити фрагментованість даних, обмеженість ресурсів для модернізації обладнання, нестачу висококваліфікованих кадрів та відсутність комплексної цифрової стратегії на рівні підприємств і галузей [2][4]. Ці чинники уповільнюють впровадження Industrial AI на системному рівні та вимагають додаткових досліджень для розробки адаптованих до українських реалій підходів.

Аналіз наявних практик та літературних джерел показав, що розвиток Industrial AI в Україні має переважно точковий характер. Наявні рішення демонструють потенціал підвищення ефективності виробничих процесів, однак впровадження відбувається нерівномірно й часто без системного підходу. Наприклад, поодинокі приклади застосування систем Smart EAM і алгоритмів пошуку аномалій свідчать про ефективність технологій, проте їх використання залишається обмеженим переважно великими підприємствами з необхідними фінансовими та кадровими ресурсами.

Існуючі цифрові ініціативи в промисловості здебільшого концентруються на оперативних завданнях — таких як моніторинг технічного стану обладнання або контроль якості продукції. Водночас комплексне впровадження Industrial AI, що передбачає інтеграцію даних, автоматизоване управління виробничими системами та підтримку стратегічного планування, поки що лишається перспективною задачею на середньострокову перспективу.

Суттєвим обмеженням є також низька інтегрованість інформаційних потоків між підсистемами підприємств. Наприклад, системи збору даних часто функціонують автономно, що ускладнює їх об'єднання для побудови ефективних моделей прогнозування. Без впровадження інтегрованої інфраструктури даних повною мірою реалізувати потенціал Industrial AI не вдасться.

Ще одним аспектом, що потребує уваги, є підготовка кадрів. Навіть за наявності ефективних технічних рішень, відсутність спеціалістів із належною кваліфікацією ускладнює їх впровадження та експлуатацію. Проблема комплексна і включає як потребу в освітніх програмах, так і у внутрішньому навчанні персоналу на підприємствах.

Щоб подолати проблему дефіциту кадрів для впровадження Industrial AI в Україні, доцільно запропонувати такі практичні кроки:

- Розвиток спеціалізованих освітніх програм у закладах вищої освіти.
 - Створення або оновлення навчальних програм для підготовки фахівців з промислової автоматизації, штучного інтелекту у виробництві, аналізу даних та машинного навчання.
 - Співпраця університетів із промисловими підприємствами для розробки практично орієнтованих курсів.
 - Запровадження дуальної освіти, що поєднує теоретичну підготовку та практичне стажування на виробництві.
- Підвищення кваліфікації та перенавчання наявного персоналу.
 - Організація корпоративних тренінгів та навчальних модулів для інженерного та управлінського складу підприємств.
 - Створення внутрішніх центрів компетенцій з промислового AI, які забезпечать постійний розвиток персоналу.
 - Використання онлайн-курсів і відкритих освітніх платформ для розширення доступу до знань.
- Інтеграція програм підтримки від держави та профільних асоціацій.
 - Розробка державних грантових програм на підтримку навчання фахівців у сфері промислових технологій.
 - Стимулювання партнерств між бізнесом, державою та освітніми установами для спільного фінансування підготовки кадрів.
- Популяризація технічної освіти серед молоді.
 - Проведення профорієнтаційних заходів для залучення школярів та студентів до інженерно-технічних спеціальностей.
 - Інформаційні кампанії, що демонструють практичну значущість і перспективність кар'єри у сфері Industrial AI.
- Міжнародна співпраця та обмін досвідом
 - Участь у міжнародних програмах стажування та академічних обмінів.
 - Співпраця з міжнародними компаніями для залучення зовнішніх експертів і тренерів для навчання українських фахівців.

Перспективними напрямками подальших наукових досліджень варто вважати:

- розробку інтегрованих моделей для комплексного управління виробничими процесами на базі Industrial AI;
- поглиблене вивчення ефективності застосування алгоритмів пошуку аномалій у різних галузях промисловості;
- удосконалення підходів до статистичного аналізу технічного стану обладнання з метою підвищення точності прогнозування;

- вивчення організаційних і кадрових аспектів цифрової трансформації, зокрема створення навчальних програм для підготовки фахівців у галузі Industrial AI.

Отримані результати можуть слугувати основою для розробки практичних рекомендацій щодо поступового впровадження Industrial AI на українських підприємствах із урахуванням специфіки галузей та рівня цифрової зрілості виробничих систем.

Бібліографічний список

1. Очкасов, О. Б. Проактивний підхід до обслуговування обладнання: як AI та ML запобігають аваріям / Очкасов О. Б., Очкасов М. О. // Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті : тези XVIII Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Дніпро, 12.12–13.12.2024) / М-во освіти і науки України, Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро, 2024. – С. 96–97.
2. АППАУ. Індустрія 5.0 – підсумки конференції 11-12 березня. [Електронний ресурс]. — Асоціація підприємств промислової автоматизації України (АППАУ). — Режим доступу: <https://appau.org.ua/news/report-industry-5-0/> (дата звернення: 14.04.2025).
3. Боднар, Б. Є. Перспективи впровадження підходів Industry 4.0 в управління локомотивним парком залізниць / Б. Є. Боднар, О. Б. Очкасов, В. Петренко // Логістика і транспортна безпека: проблеми та перспективи розвитку в контексті аналізу сучасних викликів і загроз : матеріали доп. II Міжнар. наук.-практ. конф., 9 листоп. 2023 р.) / Укр. держ. ун-т науки і технологій [та ін.]. – Дніпро, 2023. – С. 49–53.
4. Яненко І.Г. Цифрова трансформація промисловості України: ключові акценти // Проблеми економіки. — 2017. — № 4. — С. 179–184.
5. Smart EAM: система для надійної роботи обладнання [Електронний ресурс]. — IT-Enterprise. — Режим доступу: <https://smart-eam.com/ua/> (дата звернення: 14.04.2025).
6. Signal Analysis of the Armature Rotation Irregularities in the Traction Electric Motor by Unsupervised Anomaly Detection Methods / B. Bodnar, O. Ochkasov, V. Serdiuk, M. Ochkasov // Transport Means 2022 : Proc. of the 26th Intern. Sci. Conf. (05–07 Oct., 2022, Kaunas, Lithuania). – Kaunas, 2022. – Pt. II. – P. 761–766.
7. Bodnar, B., Ochkasov O., Hryshechkina, T., & Petrenko, V. (2025). A case study of the use of statistical processing of the armature rotation irregularities for the diagnostics of locomotive traction electric motors. *Transport*, 40(1), 24–34. <https://doi.org/10.3846/transport.2025.23229>

РОЛЬ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА РОЗРОБКА НОВИХ МЕТОДІВ ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНОГО СКЛАДУ МЕТАЛУРГІЙНИХ ШЛАКІВ

Степаненко Д. О., к.т.н., завідувач відділу фізико-хімічних проблем металургійних процесів, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова 1, м. Дніпро, 49107, Україна (E-mail: d.gorodenskiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5913-2284>),

Тогобицька Д. М., д.т.н., проф. провідний науковий співробітник відділу фізико-хімічних проблем металургійних процесів, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова 1, м. Дніпро, 49107, Україна (E-mail: dntog@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6413-4823>),

Стовпченко Г. П., д.т.н., проф. головний іноземний науковець, Tianjing Heavy Industries Research & Development Co, Ltd, Тяньцзін, Китай (E-mail: anna_stovpchenko@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-6555-5715>),

Лісова Л. О., к.т.н., старший науковий співробітник відділу фізико-хімічних проблем металургійних процесів, Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, пл. Академіка Стародубова 1, м. Дніпро, 49107, Україна (E-mail: llisova@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6298-9115>).

Реферат. Показана перспектива розвитку інформаційних технологій в металургійній галузі. Запропоновано новий підхід до оцінки температурних інтервалів структурних змін, які спричинені зміною енергетичного бар'єру (енергії активації) утворення або дисоціації сполук та взаємодії між різними типами іонів, що відображається на температурних залежностях структурно-чутливих властивостей (в'язкості (η) та електропровідності (χ)) розплавів. Обґрунтовано раціональний склад шлаку для ЕШП з вмістом в ньому компонентів (мас. %): CaF_2 - 31, Al_2O_3 - 31, CaO - 31, SiO_2 - 4, MgO - 3, який забезпечує бажані низькі значення температур фазового переходу $T_1 = 1454\text{K}$, $T_2 = 1153\text{K}$ та широкий інтервал між ними $\Delta T = 301\text{K}$.

THE ROLE OF INFORMATION TECHNOLOGY AND THE DEVELOPMENT OF NEW METHODS FOR SELECTING THE RATIONAL COMPOSITION OF METALLURGICAL SLAGS

Dmytro Stepanenko, PhD, Head of the Department of Physical and Chemical Problems of Metallurgical Processes Z.I. Nekrasov Iron & Steel Institute NASU, Academic square Starodubova, 1, 49107 Dnipro, Ukraine (E-mail: d.gorodenskiy@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5913-2284>),

Daria Togobitska, Dr. of Technical Sciences, Prof., Leading Researcher of Physical and Chemical Problems of Metallurgical Processes Z.I. Nekrasov Iron & Steel Institute NASU, Academic square Starodubova, 1, 49107 Dnipro, Ukraine (E-mail: dntog@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6413-4823>),

Ganna Stovpchenko, Dr. of Technical Sciences, Prof., Chief foreign scientist, Tianjing Heavy Industries Research & Development Co, Ltd, Tianjing, China (E-mail: anna_stovpchenko@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-6555-5715>),

Liudmyla Lisova, PhD, Senior Research Fellow of the Department of Physical and Chemical Problems of Metallurgical Processes Z.I. Nekrasov Iron & Steel Institute NASU, Academic square Starodubova, 1, 49107 Dnipro, Ukraine (E-mail: llisova@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6298-9115>)

Abstract. The prospects for the development of information technologies in the metallurgical industry are presented. A new approach is employed to assess the temperature ranges of structural changes induced by alterations in the energy barrier (activation energy) associated with the formation or dissociation of compounds and interactions between different types of ions. The approach is based on the analysis of temperature dependences of structure-sensitive properties (viscosity (η) and electrical conductivity (χ)) using the adaptive segment regression method. The rational composition of slag for ESR is substantiated with the content of components (wt.%): CaF_2 - 31, Al_2O_3 - 31, CaO - 31, SiO_2 - 4, MgO - 3, providing the desired low values of phase transition temperatures $T_1 = 1454\text{K}$, $T_2 = 1153\text{K}$ and a wide range $\Delta T = 301\text{K}$.

Вступ

Одним з логічних шляхів розвитку інформаційних технологій, який сприятиме переходу на новий рівень організації діяльності людини є технології штучного інтелекту (ШІ). Сьогодні штучний інтелект є технологією, що найбільш швидко розвивається в галузі науки і техніки, що сприяє поступовому її впровадженню у різні сфери людської діяльності і дозволяє вирішувати задачі загального характеру (написання текстів, створення відео та зображень та ін.) та конкретні задачі, зокрема керування автомобілями або діагностика захворювань. Різні напрями досліджень штучного інтелекту зосереджені навколо певних цілей та використання певних інструментів. Традиційні цілі досліджень штучного інтелекту з поміж іншого включають подання знань, що пов'язано зі структуризацією інформації та створенням баз знань. В Інституті чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України з 1987 р. під керівництвом д.т.н., проф. Д. М. Тогобицької та д.т.н., проф. Е. В. Приходько створено концептуальні основи інформаційного забезпечення науки про розплави в рамках банку даних «Металургія» [1], яка включає розробку баз даних про фізико-хімічні властивості металургійних розплавів (сталь, феросплави, шлаки та шлакоутворюючі суміші) та створення моделей для прогнозування і опису поведінки складних систем в металургійних агрегатах. Процес інтеграції розробок цих напрямів, об'єднаних єдиною ідеологією їх створення, у поєднанні з нетрадиційними засобами аналізу та обробки різнотипних даних забезпечує створення елементів інтегрованої бази знань, що є фундаментом для розвитку технологій ШІ в металургійній галузі.

Найбільшою інформаційною потужністю серед існуючих баз є бази даних про властивості шлакових розплавів та шлакоутворюючих сумішей – бази даних «Шлак» і «ШУС». На підставі існуючих баз даних, методів моделювання та сучасних підходів обробки експериментальних даних в Інституті чорної металургії розвиваються теоретичні уявлення про структуру шлакових розплавів спрямовані на розвиток та вдосконалення існуючих технологій виробництва сталі необхідної якості при зниженні витрат на її виробництво та покращенні екологічних показників.

В рамках творчої співпраці між Інституті чорної металургії та Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (м. Берлін, Німеччина) розроблено методику оцінки температур фазового переходу у шлакових розплавах на підставі аналізу температурної залежності їх в'язкості та електропровідності методом адаптивної сегментованої лінійної регресії. З використанням розробленої методики проаналізовані експериментальні дані про в'язкість та електропровідність шлаків ЕШП та запропоновано їх раціональний склад.

Постановка завдання дослідження

Шлаки ЕШП є багатокомпонентними окисно-фторидними системами. Плавлення шлаків зазвичай відбувається в інтервалі температур (окрім евтектичних складів), що спричинено структурними змінами.

Існують різні способи визначення температурного інтервалу плавлення шлаків. Досить поширеним є термодинамічний розрахунок фазового складу шлаку та відстеження його змін в залежності від вхідних параметрів процесу (температура, тиск, концентрація компонентів і т.д.). Точність результатів такого методу залежить від достовірності і повноти вхідної

інформації, що ускладнює визначення температурного інтервалу для реальних процесів. Також широко застосовується експериментальне визначення температури плавлення, що передбачає візуальне спостереження за зміною геометричного розміру зразка при його нагріві і фіксацію температур при візуальному виявленні форм зразка, які чітко визначені у стандарті. Такий метод значно залежить від досвіду експериментатора та від хімічного складу шлаку, що має особливий характер плавлення та не визначений у стандарті.

В даній роботі застосовується новий підхід до оцінки температурного інтервалу плавлення шлаків, який характеризує структурні зміни шлакового розплаву.

Опис дослідження

Новий підхід до оцінки температурного інтервалу плавлення реалізується з використанням:

- апроксимації експериментальних залежностей $\ln(\eta, \chi) = f(1/T)$ методом адаптивної сегментованої лінійної регресії [2];
- моделювання лінійних сегментів (температурних інтервалів) на яких енергії активації в'язкості (E_η) та електропровідності (E_χ) не залежать від температури.

Запропоновані Френкелем рівняння [4] для опису температурної залежності в'язкості та електропровідності лягають в основу їх математичного опису.

$$\eta = A \cdot e^{\frac{E_\eta}{RT}}, \quad (1)$$

$$\chi = B \cdot e^{-\frac{E_\chi}{RT}}, \quad (2)$$

де: T – абсолютна температура (К); A і B — константи; R – універсальна газова стала ($8,314 \cdot \text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$); E_η і E_χ – енергії активації в'язкості та електропровідності ($\text{Дж}/\text{моль}$).

Вирази (1) і (2) є проявом експоненціальної залежності константи швидкості реакції від температури, що базується на фундаментальному рівнянні Арреніуса, відповідно до якого логарифмічні залежності в'язкості ($\ln(\eta)$) та електропровідності ($\ln(\chi)$) від температури ($1/T$) є справедливими за наступної умови:

$$A, B, E_\eta, E_\chi \neq f(T). \quad (3)$$

Виконання умови (3) свідчить про сталість структури шлаку. Якщо значення змінюються при різних температурних інтервалах, то це є ознакою зміни структури.

Таким чином, визначення температурних інтервалів за яких буде виконуватись умова (3) для $\ln(\eta, \chi) = f(1/T)$ надає можливість оцінити зв'язок між складом, структурою та властивостями шлакових розплавів.

Аналіз результатів

Виконано розрахунок температурних інтервалів плавлення для шлакової системи $30\text{CaF}_2\text{-}30\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}30\text{CaO}\text{-(1-4)SiO}_2\text{-(3-12)MgO}$ за експериментальними даними температурних залежностей в'язкості та електропровідності [3] (Табл.1).

Таблиця 1 – Хімічний склад шлаків, прийнятий до розрахунку

№ шлаку	Масова частка компонентів, мас.%				
	CaF_2	Al_2O_3	CaO	MgO	SiO_2
1	31	31	31	3	4
2	31.5	31	32	3	2.5
3	32	32	32	3	1

4	31	31	31	6	1
5	29	29	29	12	1

З використанням адаптивної сегментованої лінійної регресії залежностей $\ln(\eta) = f(1/T)$, $\ln(\chi) = f(1/T)$ розраховано лінійні ділянки та визначено температури структурних переходів T_1 і T_2 (Рис.1).

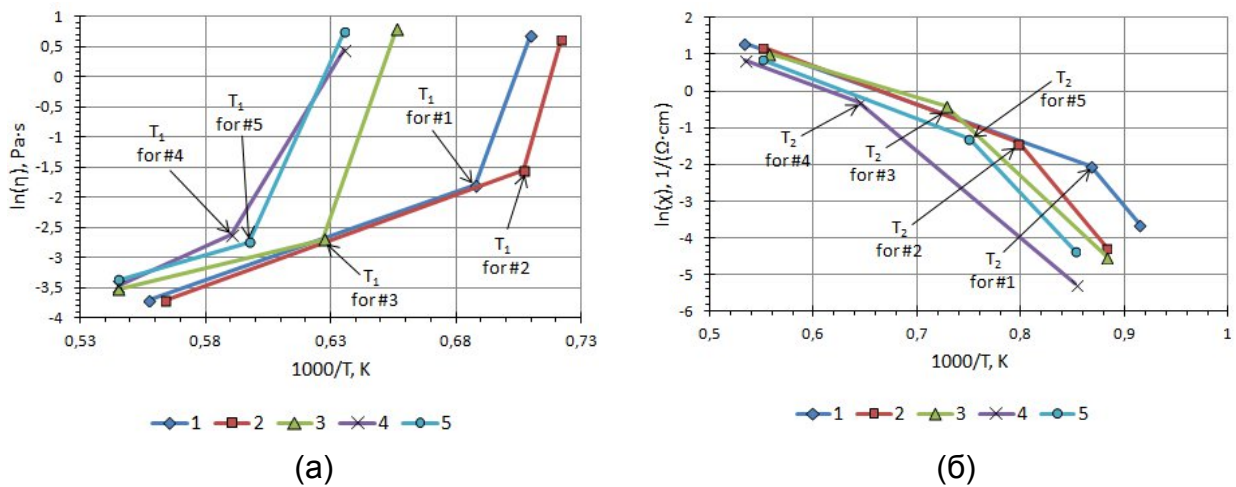


Рисунок 1. Лінійні ділянки логарифмічних залежностей в'язкості ($\ln(\eta)$) – (а) та електропровідності ($\ln(\chi)$) – (б) від температури шлаків (нумерація за табл. 1) розраховані методом адаптивної сегментованої лінійної регресії.

Отримані лінійні ділянки на графіках в межах високих та низьких температур відображають температурні інтервали в яких зберігається сталість зв'язків між іонами в структурі розплаву. Теоретичне і практичне значення мають температури переломів залежностей $\ln(\eta) = f(1/T)$ – температура T_1 та $\ln(\chi) = f(1/T)$ – температура T_2 , інтервал між якими характеризує проміжний стан шлакового розплаву між твердим та рідким (гомогенним) його станом.

Для відображення графічних залежностей температур (T_1 , T_2 та ΔT) від складу шлаку використано параметр ρ – показник стехіометрії системи, що дорівнює відношенню кількості катіонів (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Si^{4+} , Al^{3+} та ін.) до аніонів (O^- , S^{2-} , F^- та ін.) [1]. Результати наведено на рис.2.

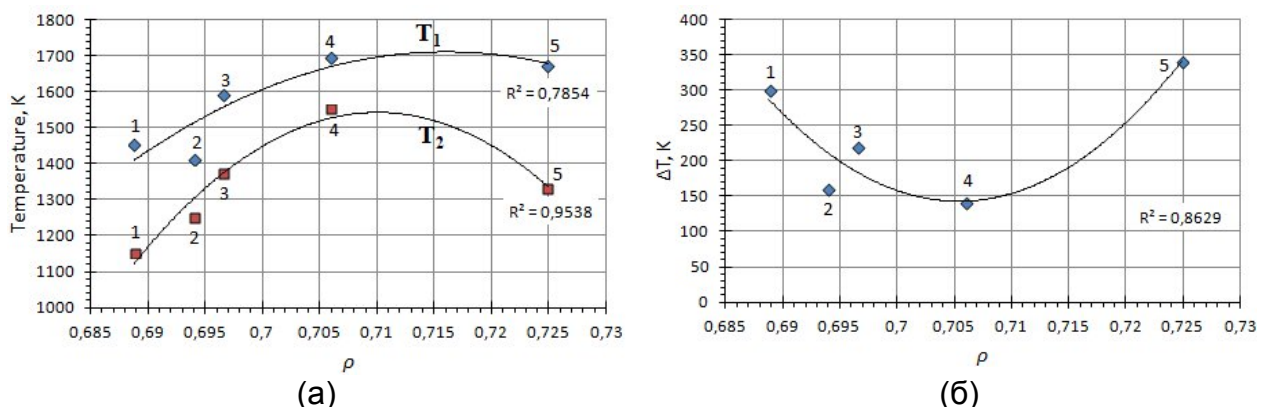


Рисунок 2. Залежність температур T_1 і T_2 (а) та їх різниці ΔT (б) від показника стехіометрії шлаку – ρ . Нумерація шлаків відповідно до табл. 1.

Розрахунками показано, що шлак #1 має найбільш низькі температури фазового переходу $T_1 = 1454\text{K}$, $T_2 = 1153\text{K}$ та широкий інтервал між ними $\Delta T = 301\text{K}$. Такі

характеристики шлакового розплаву відповідають вимогам та свідчать про ефективність шлаків при використанні в процесі електрошлакового переплаву.

В роботі [4], під керівництвом д.т.н., проф. Л. Б. Медовара виконано дослідно-промислове випробування шлаку системи $30\text{CaF}_2\text{-}30\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}30\text{CaO-(1-4)SiO}_2\text{-(3-12)MgO}$ на ПрАТ «Дніпроспецсталь» при ЕШП серійних зливків (565×565 мм, 4300 кг) з високолегованої сталі 15Х11МФ (ГОСТ 5632). Порівняно з шлаком АНФ-6, який використовується за діючою технологією, застосування досліджуваного шлаку показало зниження забрудненості металу оксидними стрічковими неметалевими включеннями на 0,5 бали і підвищення відносного подовження на 12,5 % та досягнуто зниження витрат електроенергії на 17 %.

Висновки

- Створений в Інституті чорної металургії інтелектуальний ресурс – бази експериментальних даних про властивості шлакових розплавів, фонд моделей та математичні методи структуризації і обробки даних є фундаментом для розвитку теоретичних уявлень про структуру шлакових розплавів та впровадження технологій штучного інтелекту в металургійну галузь.
- Запропоновано новий підхід для оцінки температур зміни структурного стану шлакових розплавів, який базується на апроксимації, методом адаптивної сегментованої лінійної регресії залежностей $\ln(\eta, \chi) = f(1/T)$ та моделюванні лінійних сегментів (температурних інтервалів) при яких енергії активації в'язкості (E_η) та електропровідності (E_χ) не залежать від температури.
- Оцінка температур структурного переходу та температурний інтервал шлаку за новою методикою, дає підстави вважати раціональним склад шлаку з вмістом в ньому компонентів (мас. %): CaF_2 - 31, Al_2O_3 - 31, CaO - 31, SiO_2 - 4, MgO - 3, який є перспективним для ЕШП в рухомих кристалізаторах де довготривале існування рідкого шлаку незмінної структури є важливим для формування гладкої поверхні зливка.

Бібліографічний список

1. Приходько Э. В., Тогобицкая Д. Н., Хамхотько А. Ф., Степаненко Д. А. Прогнозирование физико-химических свойств оксидных систем. Днепропетровск: Пороги, 2013. – 344с. ISBN 978-617-518-267-3.
2. 22nd ECMI Conference on Industrial and Applied Mathematics. 23-30 June 2023 – Wroclaw, Poland. Natalia Togobytska, Dmytro Stepanenko and Christoph Möhs. Adaptive segmented regression for the modeling of temperature-dependent material properties. p. 327. <https://ecmi2023.org/book-of-abstracts>.
3. Лісова Л.О., Стовпченко Г.П., Гончаров І.О. та ін. (2020) Термодинаміка взаємодії та фізичні властивості шлаків $30\text{CaF}_2/30\text{CaO}/30\text{Al}_2\text{O}_3$ (SiO_2 , MgO) при електрошлаковому переплаві. Сучасна електрометалургія, 1, 8-13. <https://doi.org/10.37434/sem2020.01.01>.
4. Стовпченко Г. П., С. В. Давидченко, Л. О. Лісова, Я. В. Гусев, Л. Б. Медовар. Дослідження технологічності та ефективності нового шлаку для електрошлакового переплаву. Сучасна електрометалургія, №3, 2020, сс. 11-17. <https://doi.org/10.37434/sem2020.03.01>.

Наукове видання

Загальна редакція Ю. С. Пройдака, О. В. Жаданоса

**ІННОВАЦІЇ В МЕТАЛУРГІЇ І СУМІЖНИХ СТРАТЕГІЧНИХ ГАЛУЗЯХ ДЛЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ І СТАЛОГО РОЗВИТКУ**

МАТЕРІАЛИ МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

Електронне видання

Відповідальні за випуск: Пройдак Ю. С., Жаданос О. В.
Комп'ютерна верстка та дизайн: Жаданос О. В.

*Відповідальність за достовірність інформації, представленої в збірнику,
несуть автори*

Видавець: Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, ауд. 263 (наукова бібліотека)
м. Дніпро, 49010.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022