

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ»

НАУКОВИЙ ТА ІНФОРМАЦІЙНИЙ ЖУРНАЛ

Металознавство
та
термічна обробка металів

З А С Н О В А Н И Й У 1 9 9 7 Р О Ц І

№ 3 (90)

ДНІПРО

2020



УДК 669017
ББК 34.2
М 54

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації **КВ № 2376** від 09.01.1997 р.

Свідоцтво – Серія ДК № 1291 від 20.03.2003 р. про внесення ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» як суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців та поширювачів видавничої продукції.

Засновник журналу:

ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

Позиція ректорату академії та редколегії може не збігатися з думками авторів журналу.

Рекомендовано до друку вченою радою ДВНЗ ПДАБА (протокол № 2 від 22.09.2020 р.).

Мови видання: українська, російська та англійська.

Згідно з додатком 4 до наказу № 886 Міністерства освіти і науки України від 02.07.2020 р. журнал входить до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б»), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора та кандидата технічних наук за спеціальностями 192 – Будівництво та цивільна інженерія; 132 – Металознавство.

Наукометричні бази та електронні бібліотеки, в яких зареєстрований науковий журнал: *Інформаційно-аналітичні системи – РІНЦ (eLibrary), ResearchBib; електронні бібліотеки та пошукові системи – Українські наукові журнали, Національна бібліотека України ім. В. І. Вернадського.*

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

головний редактор – д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, м. Дніпро

В. І. Большаков;

заст. гол. редактора – д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, м. Дніпро

Є. А. Єгоров;

відповідальний секретар та випусковий редактор – к-т техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, м. Дніпро

О. А. Тимошенко.

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

В. М. Волчук, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, м. Дніпро. **С. І. Губенко**, д-р техн. наук, Національна металургійна академія України, м. Дніпро.

В. В. Данішевський, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, м. Дніпро. **С. В. Іванцов**, к-т техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, м. Дніпро. **Т. С. Кравчуновська**, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, м. Дніпро. **В. В. Колохов**,

к-т техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, м. Дніпро. **В. З. Куцова**, д-р техн. наук, Національна металургійна академія України, м. Дніпро. **Ю. Я. Мєшков**, д-р техн. наук, Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, м. Київ. **Т. Д. Нікіфорова**, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, м. Дніпро. **А. Г. Пригунова**, д-р техн. наук, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ. **Г. Д. Сухомлин**, д-р техн. наук, ДВНЗ ПДАБА, м. Дніпро.

Х. А. Аскеров, к-т техн. наук, Університет Карабюк, м. Карабюк (Туреччина). **В. І. Куксенко**, к-т техн. наук, Управління з атомної енергетики Великобританії, м. Оксфорд (Великобританія).

Художній редактор

С. Б. Пономарьов

Технічний редактор та комп'ютерна верстка

О. А. Тимошенко

Перекладач

О. Л. Ляпичева

Редактор, коректор

В. Д. Маловик

ISSN 2413-7405



9 772413 740002

Україна, 49600, м. Дніпро, вул. Чернишевського, 24-а
ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

☎ +38(050) 452-43-63

e-mail : mitomdnipro1997@gmail.com, [http : //www.mtom.pgasa.dp.ua](http://www.mtom.pgasa.dp.ua)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ
«ПРИДНИПРОВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ»

НАУЧНЫЙ И ИНФОРМАЦИОННЫЙ ЖУРНАЛ

Металловедение
И
термическая обработка металлов

О С Н О В А Н В 1 9 9 7 Г О Д У

№ 3 (90)

ДНИПРО

2020



УДК 669017
ББК 34.2
М 54

Свидетельство о государственной регистрации печатного средства массовой информации **КВ № 2376** от 09.01.1997 г.

Свидетельство – Серия ДК № 1291 от 20.03.2003 г. о внесении ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры» как субъекта издательского дела в Госреестр издателей и распространителей издательской продукции.

Основатель журнала:

ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»

Позиция ректората академии и редколлегии может не совпадать с мнением авторов журнала.

Рекомендовано к печати ученым советом ГВУЗ ПГАСА (протокол № 2 от 22.09.2020 г.).

Языки издания: украинский, русский и английский.

В соответствии с приложением 4 к приказу № 886 Министерства образования и науки Украины от 02.07.2020 г. журнал входит в Перечень научных специализированных изданий Украины (категория «Б»), в которых могут публиковаться результаты диссертационных работ на соискание ученых степеней доктора и кандидата технических наук по специальностям 192 – Строительство и гражданская инженерия; 132 – Материаловедение.

Наукометрические базы и электронные библиотеки, в которых зарегистрирован научный журнал: *Информационно-аналитические системы* – РИНЦ (eLibrary), ResearchBib; *электронные библиотеки и поисковые системы* – Украинские научные журналы, Национальная библиотека Украины им. В. И. Вернадского

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

главный редактор – д-р техн. наук, ГВУЗ ПГАСА, г. Днепро

В. И. Большаков;

зам. глав. редактора – д-р техн. наук, ГВУЗ ПГАСА, г. Днепро

Е. А. Егоров;

ответственный секретарь и выпускающий редактор – к-т техн. наук, ГВУЗ ПГАСА, г. Днепро

Е. А. Тимошенко.

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

В. Н. Волчук, д-р техн. наук, ГВУЗ ПГАСА, г. Днепро.

С. И. Губенко, д-р техн. наук, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепро.

В. В. Данишевский, д-р техн. наук, ГВУЗ ПГАСА, г. Днепро. **С. В. Иванцов**, к-т техн. наук, ГВУЗ ПГАСА, г. Днепро. **Т. С. Кравчуновская**, д-р техн. наук, ГВУЗ ПГАСА, г. Днепро.

В. В. Колохов, к-т техн. наук, ГВУЗ ПГАСА, г. Днепро. **В. З. Куцова**, д-р техн. наук, Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепро.

Ю. Я. Мешков, д-р техн. наук, Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, г. Киев. **Т. Д. Никифорова**, д-р техн. наук, ГВУЗ ПГАСА, г. Днепро. **А. Г. Пригунова**, д-р техн. наук, Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев. **Г. Д. Сухомлин**, д-р техн. наук, ГВУЗ ПГАСА, г. Днепро.

Х. А. Аскеров, к-т техн. наук, Университет Карабюк, г. Карабюк (Турция). **В. И. Куксенко**, к-т техн. наук, Управление атомной энергетики Великобритании, г. Оксфорд (Великобритания).

Художественный редактор

С. Б. Пономарев

Технический редактор и компьютерная верстка

Е. А. Тимошенко

Переводчик

Е. Л. Ляпичева

Редактор, корректор

В. Д. Маловик

ISSN 2413-7405



9 772413 740002

Украина, 49600, г. Днепро, ул. Чернышевского, 24-а
ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»

☎ +38(050) 452-43-63

e-mail : mitomdnipro1997@gmail.com, [http : //www.mtom.pgasa.dp.ua](http://www.mtom.pgasa.dp.ua)

© ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», 2020

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE

STATE HIGHER EDUCATION INSTITUTION
“PRYDNIPROVSKA STATE ACADEMY OF CIVIL ENGINEERING
AND ARCHITECTURE”

SCIENTIFIC AND INFORMATION JOURNAL

Metal Science
and
Heat Treatment of Metals

Established in 1997

№ 3 (90)

DNIPRO
2020

Metal Science and Heat Treatment of Metals



SCIENTIFIC AND INFORMATION
JOURNAL

UDC 669017
LBC 34.2
M 54

State Registration Certificate of Publication Media, series
KB № 2376 dated 09.01.1997.

Certificate – Series ДК № 1291 dated 20.03.2003 about
admitting SHEI “Prydniprovskaya State Academy of Civil
Engineering and Architecture” as the subject
of publishing in the State Register of publishers
and publishing products distribution

Founder of the journal:

SHEI “Prydniprovskaya State Academy of Civil
Engineering and Architecture”

The position of the rectorate of the academy and the
editorial board can do not coincide with the opinions of
the authors of the magazine.

Recommended for publication by the Academic Council
of the SHEI PDABA (protocol № 2 from 22.09.2020).

Languages: Ukrainian, Russian and English.

According to Annex 4 to Order № 886 of the Ministry of
Education and Science of Ukraine dated 02.07.2020, the
journal is included in the List of scientific professional
publications of Ukraine (category "B"), which may
publish the results of dissertations for the degree of
doctor and candidate of technical sciences by specialties
192 – Construction and Civil Engineering; 132 –
Materials Science.

Scientometric databases and electronic libraries in which
was the scientific journal: *Information and analytical
systems* – Russian Science Citation Index (eLibrary),
ResearchBib; *electronic libraries and search engines* –
Ukrainian scientific journals, National library of Ukraine
named after V. I. Vernadskyi

EDITORIAL BOARD:

V. I. Bolshakov, Chief Editor, Doctor of Engineering
Science, SHEI PSACEA, Dnipro

Ye. A. Yehorov, Deputy Chief Editor, Doctor
of Engineering Science, SHEI PSACEA, Dnipro

O. A. Tymoshenko, Executive Secretary & Editor,
Candidate of Engineering Science, SHEI PSACEA, Dnipro

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

V. M. Volchuk, Doctor of Engineering Science, SHEI
PSACEA, Dnipro. **V. V. Danishevskiy**, Doctor
of Engineering Science, SHEI PSACEA, Dnipro.

S. V. Ivantsov, Candidate of Engineering Science, SHEI
PSACEA, Dnipro. **T. S. Kravchunovska**, Doctor
of Engineering Science, SHEI PSACEA, Dnipro.

V. V. Kolokhov, Candidate of Engineering Science, SHEI
PSACEA, Dnipro. **S. I. Gubenko**, Doctor
of Engineering Science, *National Metallurgical Academy
of Ukraine, Dnipro*.

V. Z. Kutsova, Doctor
of Engineering Science, *National Metallurgical Academy
of Ukraine, Dnipro*. **Yu. Ya. Mieshkov**, Doctor
of Engineering Science, *G. V. Kurdyumov Institute
for Metal Physics of the N. A. S. of Ukraine, Kyiv*.

T. D. Nikiforova, Doctor of Engineering Science, SHEI
PSACEA, Dnipro. **A. G. Pryhunova**, Doctor
of Engineering Science, *Physico-Technological Institute
of Metals and Alloys of the N. A. S. of Ukraine, Kyiv*.

H. D. Sukhomlyn, Doctor of Engineering Science, SHEI
PSACEA, Dnipro. **H. Askerov**, Candidate
of Engineering Science, *Karabük University, Karabük
(Turkey)*.

V. I. Kuksenko, Ph.D. in Physics (France),
UK Atomic Energy Authority, Oxford, Great Britain.

Art Editor

S. B. Ponomarov

Technical Editor and Desktop Publishing

O. A. Tymoshenko

Translator

O. L. Liapicheva

Editor and Proof-reader

V. D. Malovyk

ISSN 2413-7405



9 772413 740002

Ukraine, 49600, Dnipro 24-a, Chernyshevskoho St.,
SHEI “Prydniprovskaya State Academy of Civil Engineering and Architecture”

☎ +38(050) 452-43-63

e-mail : mitomdnipro1997@gmail.com

<http://www.mtom.pgasa.dp.ua>

© SHEI “Prydniprovskaya State Academy of Civil
Engineering and Architecture”, 2020


ЗМІСТ

Беліков А. С., Дзюбан О. В., Крекнін К. А., Железняков Є. О. Забезпечення умов мікроклімату в приміщеннях будівель під час аварійних ситуацій в системах тепlopостачання.....	10
Гришко Г. М. Дослідження впливу поверхнево-активних речовин на структуроутворення гідратованого гіпсового в'язучого.....	20
Губенко С. І. Окиснення неметалевих включень та сталеві матриці під час лазерної дії.....	26
Ляховецька-Токарєва М. М., Адегов О. В. Визначення коефіцієнта для оцінювання роботи установки із використанням вторинної теплоти.....	34
Мороз Л. В. Модифікація в'язучих та бетонів шляхом нанотехнологій. Огляд досягнень.....	44
Субботіна В. В., Білозеров В. В., Соболев О. В. Кінетика росту, фазово-структурний стан та твердість мікродугових оксидних покриттів на ливарних алюмінієвих сплавах АЛ2, АЛ9, АЛ25.....	52
Тієн Хієп Нгуєн, Та Дінь Суан, Нгуєн Тхань Хунг, Нгуєн Дінь Чієн, Ле Мінь Дієн Основні характеристики процесів отримання нанопорошків магнетиту та заліза водневим відновленням гідроксидної сполуки.....	64
Труш В. С., Федірко В. М., Лук'яненко О. Г. Вплив зміцненого елементами проникнення (О, С) приповерхневого шару на опір руйнуванню титану за втомного та ударного навантажень.....	73

СОДЕРЖАНИЕ

Беликов А. С., Дзюбан А. В., Крекнин К. А., Железняков Е. О. Обеспечение условий микроклимата в помещениях зданий при аварийных ситуациях в системах теплоснабжения.....	10
Гришко А. Н. Исследование влияния поверхностно-активных веществ на структурообразование гидратированного гипсового вяжущего.....	20
Губенко С. И. Окисление неметаллических включений и стальной матрицы при лазерном воздействии.....	26
Ляховецкая-Токарева М. М., Адегов А. В. Определение коэффициента для оценки работы установки с использованием вторичной теплоты.....	34
Мороз Л. В. Модификация вяжущих и бетонов путем применения нанотехнологий. Обзор достижений.....	44
Субботина В. В., Белозеров В. В., Соболев О. В. Кинетика роста, фазово-структурное состояние и твердость микродуговых оксидных покрытий на литейных алюминиевых сплавах АЛ2, АЛ9, АЛ25.....	52
Тиен Хиеп Нгуен, Та Динь Суан, Нгуен Тхань Хунг, Нгуен Динь Чиен, Ле Минь Дык Основные характеристики процессов получения нанопорошков магнетита и железа водородным восстановлением гидроксидного соединения.....	64
Труш В. С., Федирко В. Н., Лукьяненко А. Г. Влияние упрочненного элементами внедрения (O, C) приповерхностного слоя на сопротивление разрушению титана при усталостной и ударной нагрузках.....	73

CONTENT

Belikov A. S., Dziuban O.V., Kreknin K.A., Zheleznyakov Yev. O. Provision on microclimatic conditions in buildings in emergency situations in heat supply systems taking into account the latest construction technologies.....	10
Hryshko H.M. Study of the impact of surfactants on the structure formation of hydrated gypsum binder.....	20
Gubenko S.I. Oxidation of non-metal inclusions and steel matrix with laser action.....	26
Lyakhovetska-Tokareva M.M., Adehov O.V. Determination of the coefficient for evaluating the operation of the installation using secondary heat.....	34
Moroz L.V. Modification of binders and concretes by application of nanotechnologies. Review of achievements.....	44
Subbotina V.V., Bilozerov V.V., Sobol O.V. Growth kinetics, phase-structural state and hardness of micro-arc oxide coatings on cast aluminum alloys AL2, AL9, AL25.....	52
Tien Hiep Nguyen, Ta Dinh Xuan, Nguyen Thanh Hung, Nguyen Dinh Chien, Le Minh Duc Main characteristics of synthesizing processes of magnetite and iron nanopowders by hydrogen reduction from hydroxide compound.....	64
Trush V.S., Fedirko V.M., Lukyanenko O.G. Influence of the strengthened surface layer by elements interstitial of (O, C) on the fracture resistance of titanium during fatigue and impact loads.....	73

УДК 697.1:621.178:697.34

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.290920.10.664

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УМОВ МІКРОКЛІМАТУ В ПРИМІЩЕННЯХ БУДІВЕЛЬ ПІД ЧАС АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ У СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

БЕЛІКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
ДЗЮБАН О. В.², *канд. техн. наук, доц.*,
КРЕКНІН К. А.³, *канд. техн. наук, ас.*,
ЖЕЛЕЗНЯКОВ Є. О.^{4*}, *аспір.*

¹ Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Кафедра технології будівельного виробництва, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. ++38 (0562) 47-02-37, e-mail: 0410dav@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6279-346x

³ Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1812-7400

^{4*} Кафедра безпеки життєдіяльності, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 045-51-22, e-mail: e.zheleznyakov1996@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6124-201X

Анотація. *Постановка проблеми.* У своїй життєдіяльності людина постійно взаємодіє з навколишнім середовищем, яке в основному має штучний характер. Тому її здоров'я і працездатність багато в чому визначаються умовами мікроклімату житлових і цивільних будівель. Важливу роль у підтриманні мікроклімату відіграють системи теплопостачання. Однак їх загальний стан в Україні часто спричинює аварійні ситуації, тому забезпечення умов мікроклімату в системах теплопостачання вимагає великої уваги. **Мета статті** – огляд матеріалів, що стосуються проблематики забезпечення умов мікроклімату в аварійних ситуаціях у системах теплопостачання. **Висновок.** Мікроклімат житлових і громадських будівель безпосередньо впливає на працездатність і здоров'я людей. Тому підтримання оптимальних і допустимих умов мікроклімату в приміщеннях житлових і громадських будівель необхідне для забезпечення якісних умов життєдіяльності людини, підвищення продуктивності праці, збереження її здоров'я і безпеки. Але аварійні ситуації, що трапляються в системах теплопостачання, викликають погіршення умов мікроклімату, в результаті чого виникають негативні фактори, що діють на організм людини. При цьому тривалість аварійної ситуації в системах теплопостачання безпосередньо впливає на ступінь погіршення умов мікроклімату. Отож час, витрачений на усунення аварійних ситуацій в системах теплопостачання, не повинен перевищувати часу перебування людини в аварійних умовах.

Ключові слова: *мікроклімат; системи життєзабезпечення; параметри мікроклімату; людина; самопочуття; умови праці*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСЛОВИЙ МИКРОКЛИМАТА В ПОМЕЩЕНИЯХ ЗДАНИЙ ПРИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

БЕЛИКОВ А. С.¹, *докт. техн. наук, проф.*,
ДЗЮБАН А. В.², *канд. техн. наук, доц.*,
КРЕКНІН К. А.³, *канд. техн. наук, ас.*,
ЖЕЛЕЗНЯКОВ Е. О.^{4*}, *аспір.*

¹ Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Кафедра технологии строительного производства, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-02-37, e-mail: 0410dav@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6279-346x

³ Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 756-34-73, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1812-7400

^{4*} Кафедра безопасности жизнедеятельности, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (050) 045-51-22, e-mail: e.zheleznyakov1996@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6124-201X

Аннотация. Постановка проблемы. В своей жизнедеятельности человек постоянно взаимодействует с окружающей средой, которая в основном имеет искусственный характер. Поэтому его здоровье и работоспособность в значительной степени определяются условиями микроклимата жилых и гражданских зданий. Немаловажную роль в поддержании микроклимата играют системы теплоснабжения. Однако их общее состояние в Украине является причиной частых аварийных ситуаций, поэтому обеспечение условий микроклимата при аварийных ситуациях в системах теплоснабжения требует большого внимания. **Цель статьи** – обзор материалов, относящихся к проблематике обеспечения условий микроклимата при аварийных ситуациях в системах теплоснабжения. **Вывод.** Микроклимат жилых и общественных зданий непосредственно влияет на работоспособность и здоровье людей. Поэтому поддержание оптимальных и допустимых условий микроклимата в помещениях жилых и общественных зданий необходимо для обеспечения качественных условий жизнедеятельности человека, повышения производительности труда, сохранения его здоровья и безопасности. Но аварийные ситуации, которые случаются в системах теплоснабжения, приводят к ухудшению условий микроклимата, в результате чего возникают негативные факторы, воздействующие на организм человека. При этом продолжительность аварийной ситуации в системах теплоснабжения непосредственно влияет на степень ухудшения условий микроклимата. Поэтому время, затраченное на устранение аварийных ситуаций в системах теплоснабжения, не должно превышать времени пребывания человека в аварийных условиях.

Ключевые слова: аварийные ситуации; микроклимат; системы жизнеобеспечения; параметры микроклимата; человек; самочувствие; условия труда

PROVISION OF MICROCLIMATIC CONDITIONS IN BUILDINGS IN EMERGENCY SITUATIONS IN HEAT SUPPLY SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT THE LATEST CONSTRUCTION TECHNOLOGIES

BELIKOV A.S.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
 DZIUBAN O.V.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
 KREKNIN K.A.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assist.*,
 ZHELEZNYAKOV Yev.O.^{4*}, *Postgrad. Stud.*

¹ Department of Life Safety, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-5822-9682

² Department of Technology of Construction Production, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-02-37, e-mail: 0410dav@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-6279-346x

³ Department of Life Safety, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 756-34-73, e-mail: bgd@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-1812-7400

^{4*} Department of Life Safety, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (050) 045-51-22, e-mail: e.zheleznyakov1996@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-6124-201X

Abstract. Problem statement. In his life, a person constantly interacts with the environment. The environment that surrounds modern man is mostly artificial. Therefore, his health and efficiency are largely determined by the microclimate conditions of residential and civil buildings. Heating systems play an important role in maintaining the microclimate. However, the general state of heat supply systems in Ukraine leads to frequent emergency situations, therefore, ensuring microclimate conditions in emergency situations in heat supply systems requires great attention. **Purpose of the article.** Review of materials related to the problem of ensuring microclimatic conditions in emergency situations in heat supply systems. Determination of the main criteria characterizing the provision of microclimatic

conditions in the event of emergency situations in heat supply systems. **Conclusion.** The microclimate of residential and public buildings directly affects the performance and health of people. Therefore, maintaining optimal and acceptable microclimate conditions in residential and public buildings is necessary to ensure high-quality living conditions for a person, increase labor productivity, preserve his health and safety. But emergencies arising in heat supply systems lead to a deterioration in microclimate conditions. As a result, negative factors arise that affect the human body. At the same time, the duration of an accident in heat supply systems directly affects the degree of deterioration of microclimatic conditions. Therefore, the time spent on eliminating emergency situations in heat supply systems should not exceed the life of a person in emergency conditions.

Keywords: *emergency situations, microclimate; life support systems; microclimate parameters; human; well-being; working condition*

Постановка проблеми. Мікроклімат житлових і громадських будівель безпосередньо впливає на працездатність і здоров'я людей. Тому підтримка оптимальних і допустимих умов мікроклімату в приміщеннях житлових і громадських будівель необхідна для забезпечення якісних умов життєдіяльності людини, підвищення продуктивності праці, збереження її здоров'я і безпеки. Але аварійні ситуації, що трапляються в системах теплопостачання, спричинюють погіршення умов мікроклімату, в результаті чого виникають негативні фактори, котрі діють на організм людини. Тому зношеність систем тепло-постачання України потребує великої уваги до забезпечення умов мікроклімату під час аварійних ситуацій в системах теплопостачання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання вивчення умов праці і визначення впливу умов мікроклімату на безпеку життєдіяльності людини розглядали як сучасні закордонні [17; 18], так і вітчизняні вчені, зокрема, вчені Придніпровської державної академії будівництва та архітектури (А. С. Беліков, Е. Є. Стрежекуров, І. А. Колесник) [1–7].

Необхідно відзначити також внесок таких досліджень як К. Ф. Фокін, В. Н. Богословський, Ю. В. Кононович, С. Ю. Рагімов, М. А. Касьянов та ін. [8–11; 16]. Вчені розглянули як загальні питання, пов'язані із впливом умов мікроклімату на безпеку життєдіяльності людини [1–4; 8–11; 16], так і більш специфічні, як, наприклад: вплив стану огорожувальних конструкцій на зміну параметрів мікроклімату в приміщенні [5–7]

та для мікроклімату на стан теплового комфорту людини [17–19].

Мета статті – огляд питань, що стосуються забезпечення умов мікроклімату в аварійних ситуаціях у системах теплопостачання.

Виклад основного матеріалу. Здоров'я й умови праці людини визначаються умовами мікроклімату житлових і цивільних будівель. Підвищення комфортності в приміщенні шляхом підтримання оптимальних (достатніх) параметрів мікроклімату в будь-якій його точці спрямоване на поліпшення умов життя людини, зростання продуктивності праці, зниження витрат теплової енергії на забезпечення параметрів мікроклімату, – важливе наукове та практичне завдання сучасності. Мікроклімат – це стан внутрішнього середовища приміщення, що впливає на людину і характеризується показниками температури повітря та огорожувальних конструкцій, вологістю і рухливістю повітря [12].

Необхідно врахувати, що вимоги до мікроклімату повинні бути забезпечені як у зоні обслуговування, так і в робочій зоні. Тому всі параметри, що впливають на внутрішнє середовище, повинні бути задані для цієї зони. Хоча загальна площа приміщення може використовуватися для оцінювання вимог, необхідні умови внутрішнього середовища поза зоною не гарантуються.

Варіанти умов мікроклімату для зони обслуговування і робочої зони приміщень житлових, громадських і адміністративно-побутових будівель визначаються такими нормативними документами: ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та

кондиціонування» [13], ДСТУ Б EN ISO 7730 «Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту» [14], ДСТУ Б EN 15251 «Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування

та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики» [15].

Розглянемо варіанти умов мікроклімату в приміщенні з наведених вище нормативних документів у таблиці 1.

Таблиця 1

Умови мікроклімату для зони обслуговування і робочої зони приміщень житлових, громадських і адміністративно-побутових будівель та сфери їх застосування

Умови мікроклімату			Сфера застосування
згідно з ДБН В.2.5-67:2013	згідно з ДСТУ Б EN ISO 7730	згідно з ДСТУ Б EN 15251	
Підвищені оптимальні	A	I	Приміщення з дуже чутливими людьми з особливими потребами, такими як: інваліди, хворі, маленькі діти та люди похилого віку
Оптимальні	B	II	Приміщення з постійним перебуванням людей у нових будівлях і в існуючих будівлях під час реконструкції та капітального ремонту, у тому числі термомодернізації
Допустимі	C	III	Приміщення з тимчасовим перебуванням людей у нових будівлях і в існуючих будівлях під час реконструкції та капітального ремонту, в тому числі термомодернізації; існуючі будівлі
Обмежено допустимі	—	IV	Будівлі з обмеженим використанням упродовж року

Отже, в Україні існують декілька документів, що описують умови мікроклімату для зони обслуговування і робочої зони приміщень житлових, громадських і адміністративно-побутових будівель і сфери їх застосування, тому у випадках розбіжності розрахункових параметрів мікроклімату необхідно застосовувати [13]:

1) параметри, зазначені в будівельних нормах для відповідного типу будівель за призначенням;

2) параметри, зазначені в інших нормативних документах, якщо вони перебувають у межах допустимих діапазонів параметрів відповідно до ДСТУ Б EN ISO 7730 та ДСТУ Б EN 15251 і мають менші за них допустимі діапазони;

3) параметри згідно з ДСТУ Б EN ISO 7730 та ДСТУ Б EN 15251, за

відсутності їх нормування у будівельних нормах та інших нормативних документах відповідно до призначення будівлі (приміщення).

Умови мікроклімату в робочій зоні виробничих приміщень відповідно до ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» вказані в таблицях 2 та 3.

Як можна побачити з таблиць 1–3, діючі нормативи вимагають обов'язкового підтримання в практично всіх споруджуваних в Україні будівлях оптимальних (допустимих) умов мікроклімату. Якнайповнішого виконання цих вимог можна досягти лише з урахуванням новітніх технологій та застосування нових матеріалів. При цьому з практичної точки зору слід приділити головну увагу визначенню допустимого критичного періоду відключення та

відновлення систем теплозабезпечення з оптимальних, допустимих, критичних. урахуванням забезпечення умов праці:

Таблиця 2

Умови мікроклімату в робочій зоні виробничих приміщень, частина перша

Період року	Категорія робіт	Оптимальні норми на постійних і непостійних робочих місцях		
		Температура повітря, °С	Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с, не більше
Холодний і перехідний	Легка: Іа	22...24	60...40	0,1
	Іб	21...23	60...40	0,1
	Середньої важкості: Іа	19...21	60...40	0,2
	Іб	17...19	60...40	0,2
	Важка: ІІІ	16...18	60...40	0,3
Теплий	Легка: Іа	23...25	60...40	0,1
	Іб	22...24	60...40	0,2
	Середньої важкості: Іа	21...23	60...40	0,3
	Іб	10...22	60...40	0,3
	Важка: ІІІ	18...20	60...40	0,4

Таблиця 3

Умови мікроклімату в робочій зоні виробничих приміщень, частина друга

Період року	Категорія робіт	Допустимі норми			
		Температура повітря, °С		Відносна вологість повітря, %	Швидкість руху повітря, м/с, не більше
		на постійних робочих місцях	на непостійних робочих місцях		
Холодний і перехідний	Легка: Іа	21...25	18...26	75	0,1
	Іб	20...24	17...25	75	0,2
	Середньої важкості: Іа	17...23	15...24	75	0,3
	Іб	15...21	13...23	75	0,4
	Важка: ІІІ	13...19	12...20	75	0,5
Теплий	Легка: Іа	22...28	20...30	75	0,2
	Іб	21...28	19...30	75	0,3
	Середньої важкості: Іа	18...27	17...29	75	0,4
	Іб	15...27	15...29	75	0,5
	Важка: ІІІ	15...26	13...28	75	0,6

За визначенням, оптимальні мікрокліматичні умови – це таке поєднання параметрів мікроклімату, що за систематичного та тривалого впливу на людину зберігають нормальний тепловий стан організму без активізації механізмів терморегуляції. Вони створюють передумови для високого рівня працездатності та забезпечують тепловий комфорт. Оптимальні умови мікроклімату встановлюються для постійних робочих місць. Показники температури повітря в робочій зоні по горизонталі і по висоті, а також протягом робочої зміни не повинні виходити за межі нормованих величин оптимальної температури [13–15].

За всіх умов роботи відпочинок і відновлення сил відбуваються в приміщенні, тому його мікроклімат його повинен бути таким, щоб відновні процеси в організмі здійснювалися на оптимальному рівні, а функція терморегуляції, подібно будь-якій іншій, перебувала б у стані спокою або найменшої активності. Відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень», серед параметрів, що визначають мікроклімат приміщення, слід виділити п'ять найважливіших, які піддаються прямому чи непрямому регулюванню:

- 1) температура повітря, її розподіл і зміна в просторі і в часі, t_v , °C;
- 2) відносна вологість повітря, φ_v , %;
- 3) швидкість повітряного потоку (рухливість), v_v , м/с;
- 4) швидкість повітряного потоку (рухливість), Вт/м²;
- 5) температура поверхонь, звернених усередину приміщення (радіаційна температура), t_r , °C.

Аналіз дослідження [1–11] впливу мікрокліматичних параметрів (температура, рухливість, вологість, радіаційна температура, дія променевої енергії) в приміщенні на людину показав, що людський організм прагне підтримати відносну динамічну сталість своїх функцій у різних мікрокліматичних умовах. Цей баланс метаболізму забезпечує

найважливіший фізіологічний механізм – механізм терморегуляції.

Однак природним наслідком аварійних ситуацій в системах теплопостачання постає неминуче порушення цієї вимоги. Адже негативні чинники, що виникають через аварійні ситуації в системах теплопостачання, погіршують, іноді дуже суттєво, умови мікроклімату в приміщеннях, що надзвичайно негативно позначається на життєдіяльності та здоров'ї людини.

Отже, необхідно забезпечити комфортне підтримання життєдіяльності людини в аварійних ситуаціях у системах теплопостачання, тобто її перебування якщо не в оптимальних, то хоча б допустимих умовах мікроклімату.

Необхідно зазначити, стан комфорту – це суб'єктивне відчуття, що виникає в людей за комплексної дії параметрів мікроклімату.

Комфортними вважаються такі умови, в яких людина, перебуваючи в робочій або обслуговуваній зоні приміщення, відчувається зручно. Під дискомфортом зазвичай розуміють негативні відчуття, викликані перегріванням або переохолодженням організму в цілому. Необхідно також враховувати, що тепловий дискомфорт може бути викликаний небажаним нагріванням тіла чи місцевим охолодженням.

До найбільш поширених місцевих факторів дискомфорту відносять: вертикальний перепад температури повітря, температуру випромінювання асиметрії (теплої або холодної поверхні), теплі або холодні підлоги і протяг (який визначається як місцеве охолодження тіла, викликане рухом повітря) [14; 15].

Але в будь-якому випадку, як можна бачити, комфорт людини пов'язаний з її тепловими відчуттями. А вони, своєю чергою, змінюються за дії основних мікрокліматичних факторів у приміщенні. Коливання відчуття комфорту людини позначаються на її фізіологічних реакціях. Перегрів або переохолодження організму можуть спричинити втрату працездатності, швидку стомлюваність, втрату свідомості, погіршення здоров'я і теплову смерть.

Як зазначалося вище, стан комфорту досить суб'єктивний і індивідуальні теплові відчуття людини так чи інакше відрізняються від нормативних середньостатистичних показників мікроклімату в приміщенні. Однак, використовуючи очікуване значення тепловідчуття PMV (Predicted Mean Vote) і прогнозований відсоток незадоволеності PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), можна дати характеристику дискомфорту тіла людини в цілому. Суб'єктивний стан психологічного тепловідчуття людини оцінюють шкалою значень PMV (табл. 4) [14; 15]:

Таблиця 4

Шкала оцінювання психологічного тепловідчуття людини

Тепловідчуття	Оцінка
Жарко	+3
Тепло	+2
Злегка тепло	+1
<i>Продовження таблиці 4</i>	
Тепловідчуття	Оцінка
Нормально	0
Злегка прохолодно	-1
Прохолодно	-2
Холодно	-3

Ці показники використовують разом із нормованими параметрами мікроклімату для оцінювання працездатності системи опалення або кондиціювання повітря залежно від виду діяльності працівників. Зокрема, для осіб, що працюють у приміщеннях житлових будинків, залежність комфортної температури приміщення від різних видів діяльності можна побачити на рисунку [16].

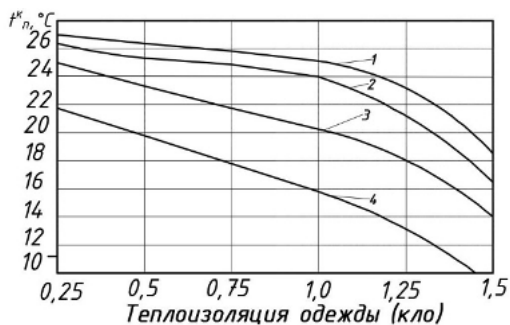


Рис. Залежність комфортної температури приміщення від різних видів діяльності людини (теплопродукції, Вт/м²) і ступеня утеплення її одягу (за даними П.О.Фангера): 1 – стан спокою (58);

2 – те ж саме, сидючи або стоячи (70); 3 – звичайна домашня робота (87); 4 – важка домашня робота (116)

В результаті у приміщенні формується охолоджувальний мікроклімат, тобто таке поєднання параметрів, за якого відбувається зміна теплообміну організму, що викликає появу загального або локального дефіциту тепла в організмі ($> 0,87$ кДж/кг) внаслідок зниження температури глибоких та поверхневих шарів тканин організму [14; 15].

Отже, відбувається поступове охолодження приміщень, а людина відчуває наростаюче відчуття дискомфорту. Людина може реагувати на зміни температури зовні свого тіла завдяки наявності відповідних рецепторів у шкірі. Загалом вони називаються температурними, але функціонально вирізняють теплові і холодні рецептори. Теплові рецептори розташовані на глибині 0,3 мм від поверхні шкіри, холодні – 0,17 мм. У людини в 10 разів менше рецепторів, які реагують на тепло, ніж тих, які реагують на холод. Таким чином, на низькі температури шкіра реагує швидше, ніж на високі. Температурні рецептори розташовуються в шкірі в шаховому порядку, на майданчиках близько 1 мм², а в проміжках між ними розміщені інші рецептори: болю та тиску.

Коли починають реагувати рецептори холоду, кров перерозподіляється до глибоких капілярів шкіри, а отже знижується приплив крові до рук і ніг. Завдяки цьому втрати тепла всередині тіла мінімізуються. Значна частина крові починає концентруватися серед внутрішніх органів, зігріваючи їх. Це адаптаційна реакція організму, що допомагає зберігати тепло та створювати його більше [19].

У капілярах шкіри кровотік не зупиняється: залишається рівно стільки, скільки необхідно для підтримання її функцій. Потім шкіра червоніє: капілярний кровотік посилюється, сюди стало надходити більше крові. Отже, організм почав дбати про шкіру, а зниження її температури зменшує проникність судин і

клітин, що підвищує їх опірність. Підвищується тонус судин і м'язів.

Під час подальшого охолодження людина починає тремтіти, намагаючись виробити додаткову енергію. Через низьку температуру виникає мимовільне скорочення м'язів, що спричиняє за собою тремтіння по всьому тілу – спочатку в м'язах тулуба і рук, потім щелепи, викликаючи стукіт зубів і трясіння всього тіла. Коли людина тремтить, її тіло може в 4...5 разів підвищувати вироблення власної теплової енергії, оскільки надмірне охолодження організму пов'язане з його великими тепловтратами. Ця ситуація може спричинити підвищену захворюваність дихальних шляхів і появу ревматичних захворювань. За впливу холоду висихає і тріскається шкіра. Охолодження зменшує рухливість і чутливість нижніх кінцівок [19].

Як в результаті тривалого впливу холоду, викликаного аварійною ситуацією в системі теплопостачання, будь-яка корисна діяльність людини у приміщенні стає неможливою. У загальному вигляді залежність зміни реакції організму людини на зміщення тепловідчуття від стану «комфорт» до стану «холодно» наведена в таблиці 5 [14; 15].

Найбільшу загрозу негативні реакції в організмі людини, викликані дискомфортом від охолодження, становлять для дітей молодшого віку, літніх, вимушено знерухомлених, фізично виснажених людей, що перебувають у несвідомому стані. Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що стан здоров'я людини та безпека життєдіяльності повинні підтримуватись на рівні комфортних (допустимих) умов з урахуванням критичного періоду виникнення аварійних ситуацій у системах теплопостачання.

Таблиця 5

Тепловий стан людини і реакція організму

Тепловідчуття	Фізіологічна дія	Реакція організму
Комфорт	Регуляція м'язовим кровообігом	Нормальна
Злегка прохолодно	Посилення явної тепловіддачі та регуляція за допомогою одягу	–
Прохолодно	Звуження кровоносних судин ніг і рук	Сухість слизової оболонки і шкіри
Холодно	–	Болі в м'язах, порушення периферійного кровообігу

Висновки. Мікроклімат житлових і громадських будівель безпосередньо впливає на працездатність і здоров'я людей. Тому підтримування оптимальних і допустимих умов мікроклімату в приміщеннях таких будівель необхідне для забезпечення якісних умов життєдіяльності людини, підвищення продуктивності праці, збереження її здоров'я і безпеки. Але аварійні ситуації, що трапляються в системах теплопостачання, погіршують умови мікроклімату, в результаті чого виникають негативні фактори, які негативно впливають на організм людини.

При цьому тривалість аварійної ситуації в системах теплопостачання безпосередньо впливає на ступінь погіршення умов мікроклімату. Отож, витрачений на усунення аварійних ситуацій в системах теплопостачання, не повинен перевищувати часу перебування людини в аварійних умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беликов А. С., Кожушко А. П., Сафонов В. В. Охрана труда на предприятиях строительной индустрии. Днепропетровск : ЧП Федоренко А. А., 2010. 528 с.
2. Грудзинский М. М., Ливчак В. Н., Поз М. Я. Отопительно-вентиляционные системы зданий повышенной этажности. Москва : Стройиздат, 1982. 256 с.
3. Губернский Е. Д., Кореневская Е. И. Гигиенические основы кондиционирования микроклимата жилых и общественных зданий. Москва : Медицина, 1978. 192 с.

4. Дуганов Г. В., Чистяков В. Л., Стрежекуров Э. Е. Новые приборы, применяемые для измерения теплофизических характеристик горных пород. *Приборостроение*. 1972. Вып. 12. С. 3–5.
5. Петренко В. О., Петренко А. О., Голякова І. В. Фактори, які впливають на мікроклімат у приміщенні, що має дефекти огорожувальних конструкцій і систем ОВК. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2016. Вып. 93. С. 286–291.
6. Ветвицкий И. Л., Каспийцева В. Ю., Колесник И. А., Шевченко А. А. Исследование влияния теплопроводных включений на параметры микроклимата помещений при отключении системы отопления. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2013. Вып. 70. С. 65–69.
7. Беликов А. С., Колесник И. А., Рагимов С. Ю., Маладыка И. Г., Вовк Д. В. Исследование влияния теплопроводных включений на микроклимат помещений при аварийных ситуациях в системах теплоснабжения. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2017. Вып. 98. С. 20–24.
8. Стрежекуров Э. Е., Стрежекуров Э. Е., Гашко С. В. Исследование терморadiационной напряженности в горячих цехах металлургического производства. *Гигиена и санитария*. 1980. Вып. 9. С. 62–64.
9. Табунщиков Ю. А. Строительные концепции зданий XXI века в области теплоснабжения и климатизации. *АВОК*. 2005. № 4. С. 4–7.
10. Борхерт Р., Юбиц В. Техника инфракрасного нагрева. Ленинград : Госэнергоиздат, 1963. 278 с.
11. Шкловер А. М., Васильев В. Ф., Ушаков Ф. В. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий. Москва : Стройиздат, 1982. 256 с.
12. ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. Общие требования. Введ.01.01.89. Ч. 1. Система стандартов безопасности труда. Москва, 1996. С. 165–239.
13. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2013. (Державні будівельні норми України). URL : <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1018>
14. ДСТУ Б EN ISO 7730. Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2012. (Державні будівельні норми України). URL : http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=28002
15. ДСТУ Б EN 15251. Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2012. (Державні будівельні норми України). URL : http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=28004
16. Кононович Ю. В. Тепловой режим зданий массовой застройки. Москва : Стройиздат, 1986. 158 с.
17. Veronica Lucia Castaldo, Paria Pigliautile, Federica Rosso, Anna Laura Pisello, Franco Cotana. Investigation of the impact of subjective and physical parameters on the indoor comfort of occupants: a case study in central Italy. ScienceDirect : web-site. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217336184> (Accessed : 01 September 2020).
18. Kostantinos Gobakis, Dionysia Kolokotsa. Coupling building energy simulation software with microclimatic simulation for the evaluation of the impact of urban outdoor conditions on the energy consumption and indoor environmental quality. Science Direct: web-site. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778817304735> (Accessed : 01 September 2020).
19. Braian M Beker, Camila Cervellera, Antonella De Vito, Carlos G Musso. Human Physiology in Extreme Heat and Cold. ClinMed International Library : web-site. URL : <https://clinmedjournals.org/articles/iacph/international-archives-of-clinical-physiology-iacph-1-001.php>

REFERENCES

1. Belikov A.S., Kozhushko A.P. and Safonov V.V. *Okhrana truda na predpriyatiyakh stroitel'noy industriyi* [Protection of labour on the enterprises of build industry]. Dnepropetrovsk : PE Fedorenko A.A. Publ., 2010, 528 p. (in Russian).
2. Grudzynskiy M.M., Livchak V.N. and Poz M.Ya. *Otopstselvo-ventilyatsionniye sistemy zdaniy povyshennoy etazhnosti* [Heating-ventilation systems of buildings of the promoted floor]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1982, 256 p. (in Russian).
3. Gubernsky Ye.D., Korenevskaya Ye.I. *Gigiyenicheskiye osnovy konditsionirovaniya mikroklimate zhilykh i obshchestvennykh zdaniy* [Hygienic bases of conditioning of microclimate of dwelling and public buildings]. Moscow : Medicine Publ., 1978, 192 p. (in Russian).
4. Duganov G.V., Chistyakov V.L. and Strezhekurov T.Ye. *Novye pribory, primenyaemye dlya izmereniya teplofizicheskikh harakteristik gornyykh porod* [New devices applied for measuring of heating-physical descriptions of mine breeds]. *Pryboroostroeniye* [Instrumentation]. 1972, no. 12, pp. 3–5. (in Russian).
5. Petrenko V.O., Petrenko A. O. and Holyakova I.V. *Faktory, yaki vplyvayut' na mikroklimat v prymyshchenni, shcho maye defekty ohorodzhuyuchykh konstruksiy i system OVK* [Factors influencing the microclimate in the premises, which has a building faults and HVAC systems]. *Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2016, iss. 93, pp. 286–291. (in Ukrainian).

6. Vetrovskiy I.L., Kaspiytseva V. Yu., Kolesnik I.A. and Shevchenko A.A. *Issledovanie vliyaniya teploprovodnykh vklyuchenii na parametry mikroklimate pomeshchenii pri otklyuchenii sistemy otopleniya* [Investigation of the influence of heat-conducting inclusions on the parameters of the microclimate of premises when the heating system is turned off]. *Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2013, iss. 70, pp. 65–69. (in Russian).
7. Belikov A.S., Kolesnik I.A., Ragimov S.Yu., Maladyka I.G. and Vovk D.V. *Issledovaniye vliyaniya teploprovodnykh vklyucheniy na mikroklimat pomeshcheniy pri avariynnykh situatsiyakh v sistemakh teplosnabzheniya* [Study of the influence of heat-conducting inclusions on the microclimate of premises in emergency situations in heat supply systems.]. *Stroitel'stvo, materialovedeniye, mashinostroyeniye* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering]. 2017, iss. 98, pp. 20–24. (in Russian).
8. Strezhekurov E.Ye. and Gashko S.V. *Issledovaniye termoradiatsionnoy napryazhennosti v goryachikh tsekhakh metallurgicheskogo proizvodstva* [Investigation of thermo-radiation stress in hot shops of metallurgical production]. *Gigiyena i sanitariya* [Hygiene and sanitation]. 1980, iss. 9, pp. 62–64. (in Russian).
9. Tabunshchikov Yu.A. *Stroitel'nyye kontseptsii zdaniy KHKH' veka v oblasti teplosnabzheniya i klimatizatsii* [Construction concepts for buildings of the XXI century in the field of heat supply and air conditioning]. *ABOK* [ABOK]. 2005, iss. 4, pp. 4–7. (in Russian).
10. Borkhert R. and Yubits V. *Tekhnika infrakrasnogo nagreva* [Infrared heating technique]. Moscow : Gosenergoizdat Publ., 1963. (in Russian).
11. Shklover A.M., Vasil'yev V.F. and Ushakov F.V. *Osnovy stroitel'noy teplotekhniki zhilykh i obshchestvennykh zdaniy* [Fundamentals of building heat engineering for residential and public buildings]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1982. (in Russian).
12. GOST 12.1.005-88. *Obshchiye sanitarno-gigiyenicheskiye trebovaniya k vozdukhу rabochey zony. Obschie trebovaniya. Ch. 1. Sistema standartov bezopasnosti truda* [GOST 12.1.005-88. General sanitary and hygienic requirements for the air in the working area. General requirements. P. 1. System of occupational safety standards]. Valid from 1989-01-01. Official edition. Moscow, 1996, pp. 165–239. (in Russian).
13. DNB V.2.5-67:2013. *Opalennya, ventylyatsiya ta kondytsionuvannya* [SCN V.2.5-67:2013. Heating, ventilation, air conditioning]. Valid from 2013-01-01. Official edition. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2013. (State Building Codes of Ukraine). (in Ukrainian).
14. DSTU B EN ISO 7730. *Erhonomika teplovoho seredovyscha. Analitychne vyznachennya ta interpretatsiya teplovoho komfortu na osnovi rozrakhunkiv pokaznykiv PMV i PPD i kryteriyiv lokal'noho teplovoho komfortu* [DSTU B EN ISO 7730. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria]. Valid from 2012-01-01. Official edition. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2012. (State Building Codes of Ukraine). (in Ukrainian).
15. DSTU B EN 15251. *Rozrakhunkovi parametry mikroklimatu prymishchen' dlya proektuvannya ta otsinky enerhetychnykh kharakterystyk budivel' po vidnoshenni do yakosti povitrya, teplovoho komfortu, osvillennya ta akustyky* [DSTU B EN 15251. Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics]. Valid from 2012-01-01. Official edition. Kyiv : Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2012. (State Building Codes of Ukraine). (in Ukrainian).
16. Kononovich Yu.V. *Teplovoy rezhim zdaniy massovoy zastroyki* [Infrared heating technique]. Moscow : Stroyizdat Publ., 1986. (in Russian).
17. Veronica Lucia Castaldo, Ilaria Pigliautile, Federica Rosso, Anna Laura Pisello and Franco Cotana. Investigation of the impact of subjective and physical parameters on the indoor comfort of occupants : a case study in central Italy. Science Direct: web-site. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217336184> (Accessed : 01 September 2020).
18. Kostantinos Gobakis and Dionysia Kolokotsa. Coupling building energy simulation software with microclimatic simulation for the evaluation of the impact of urban outdoor conditions on the energy consumption and indoor environmental quality. ScienceDirect: web-site. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778817304735> (Accessed : 01 September 2020).
19. Braian M. Beker, Camila Cervellera, Antonella De Vito and Carlos G Musso. Human Physiology in Extreme Heat and Cold. ClinMed International Library : web-site. URL : <https://clinmedjournals.org/articles/iacph/international-archives-of-clinical-physiology-iacph-1-001.php>

Надійшла до редакції: 12.07.2020.

УДК 666.9017:[691.311+661.872'053.2-12]
DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.290920.21.665

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНИХ РЕЧОВИН НА СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ГІДРАТОВАНОГО ГІПСОВОГО В'ЯЖУЧОГО

ГРИШКО Г. М., *канд. техн. наук, доц.*

Кафедра цивільної інженерії, технології будівництва та захисту довкілля, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. Сергія Єфремова, 25, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: gryshko.anna0101@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7046-1177

Анотація. Актуальність. Українські та зарубіжні фахівці, включаючи працівників охорони здоров'я, вважають гіпс найефективнішим матеріалом завдяки його специфічним властивостям. За своїми якостями, екологічній чистоті важко знайти більш підходящий матеріал, що забезпечує комфортні умови для життєдіяльності людини. Виробництво будівельних матеріалів на основі гіпсового в'язучого не має шкідливих відходів і викидів, тому не створює проблем для навколишнього середовища. До того ж, на виробництво гіпсових в'язучих витрачається у 3...5 разів менше енергії порівняно з вапном і цементом. Ці переваги спонукають дослідників повертатись до спроб одержання гіпсової структури із властивостями цементних в'язучих речовин. Один із напрямків формування такої структури – дослідження впливу добавок на процес гідратації. Особливо великий інтерес викликає використання пластифікаторів у цій сфері досліджень. **Постановка проблеми.** Процес структуроутворення в загальному вигляді залежить від початкового складу в'язучих речовин і речовин, які взаємодіють у процесі гідратації. Аналіз технічної літератури показує, що у виготовленні мінеральних в'язучих речовин перевага віддається створенню композиційних в'язучих, а у другу чергу – використанню різних добавок і факторів впливу на процес гідратації. Більшість досліджень з використанням добавок пов'язано зі структуроутворенням гіпсових та цементних матеріалів із метою поліпшення фізико-механічних властивостей. Аналіз літератури показав недостатню наявність інформації про механізм процесу гідратації та вплив пластифікаторів на структуроутворення мінеральних в'язучих речовин. **Мета статті** – визначення впливу поверхнево-активних речовин (ПАР) на механізм процесу гідратації та структуроутворення гіпсових в'язучих. **Висновок.** У результаті проведених досліджень визначено вплив ПАР на структуру і властивості гідратованого гіпсового в'язучого, а також виділено найбільш ефективні добавки, що дозволяють значно знизити водогіпсове співвідношення, підвищити показники міцності та отримати в'язуче більш щільної структури. За вирощування кристалів, утворених розчином $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaCl}$, мікроструктура гіпсових зразків волокниста із значною кількістю пор. За зустрічного вирощування кристалів гіпсу за присутності поверхнево-активних речовин на мікрофотографіях спостерігається заростання порожнин між шарами. Ріст кристалів починається з однієї точки, що пов'язано зі зміною поверхневого натягу. Дослідження показали, що пластифікатори сприяють росту кристалів і залежно від типу добавки можна змінювати поверхневу енергію кристалів, що дозволить впливати на структуру затверділого в'язучого. Найкращі результати спостерігаються за умови використання пластифікаторів Sika і ACE 430. Рентгеноструктурний аналіз одержаних кристалів $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ показав, що інтенсивність процесу гідратації в'язучого пов'язана із впливом добавок на форму та розміри кристалів двоводного сульфату кальцію і залежить від поверхневої енергії грані.

Ключові слова: *гіпсове в'язуче; поверхнево-активна речовина; добавка; гідратація; структуроутворення; поверхнева енергія*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ ГИДРАТИРОВАННОГО ГИПСОВОГО ВЯЖУЩЕГО

ГРИШКО А. Н., *канд. техн. наук, доц.*

Кафедра гражданской инженерии, технологии строительства и защиты окружающей среды, Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет, ул. Сергея Ефремова, 25, 49600, Днепро, Украина, e-mail: gryshko.anna0101@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7046-1177

Аннотация. Актуальность. Украинские и зарубежные специалисты, включая работников здравоохранения, считают гипс наиболее эффективным материалом благодаря его специфическим свойствам. По своим качествам, экологической чистоте трудно найти более подходящий материал, обеспечивающий комфортные условия для жизнедеятельности человека. Производство строительных материалов на основе гипсового вяжущего не имеет вредных отходов и выбросов, поэтому не создает проблем для окружающей среды. К тому же на производство гипсовых вяжущих тратится в 3...5 раз меньше энергии по сравнению с известью и цементом. Эти преимущества побуждают исследователей возвращаться к попыткам получения гипсовой структуры со свойствами цементных вяжущих веществ. Одним из направлений формирования такой структуры является исследование влияния добавок на процесс гидратации. Особенно большой интерес вызывает использование пластификаторов в данной области исследований. **Постановка проблемы.** Процесс структурообразования в общем виде зависит от начального состава вяжущих веществ и веществ, которые взаимодействуют в процессе гидратации. Анализ технической литературы показывает, что при изготовлении минеральных вяжущих веществ предпочтение отдается созданию композиционных вяжущих, а во вторую очередь – использованию различных добавок и факторов влияния на процесс гидратации. Большинство исследований с использованием добавок связано со структурированием гипсовых и цементных материалов с целью улучшения физико-механических свойств. Анализ литературы показал недостаточное наличие информации о механизме процесса гидратации и влиянии пластификаторов на структурообразование минеральных вяжущих веществ. **Цель статьи** – определение влияния поверхностно-активных веществ (ПАВ) на механизм процесса гидратации и структурообразования гипсовых вяжущих. **Вывод.** В результате проведенных исследований определено влияние ПАВ на структуру и свойства гидратированного гипсового вяжущего, а также выделены наиболее эффективные добавки, позволяющие значительно снизить водогипсовое соотношение, повысить показатели прочности и получить вяжущее более плотной структуры. При выращивании кристаллов, образованных раствором $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaCl}$, микроструктура гипсовых образцов является волокнистой с большим количеством пор. При встречном выращивании кристаллов гипса в присутствии поверхностно-активных веществ на микрофотографиях наблюдается зарастание пустот между слоями. Рост кристаллов начинается с одной точки, что связано с изменением поверхностного натяжения. Исследования показали, что пластификаторы способствуют росту кристаллов и в зависимости от типа добавки можно менять поверхностную энергию кристаллов, что позволит влиять на структуру затвердевшего вяжущего. Наилучшие результаты наблюдаются при использовании пластификаторов Sika и ACE 430. Рентгеноструктурный анализ полученных кристаллов $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ показал, что интенсивность процесса гидратации вяжущего связана с влиянием добавок на форму и размеры кристаллов двуводного сульфата кальция и зависят от поверхностной энергии грани.

Ключевые слова: гипсовое вяжущее; поверхностно-активное вещество; добавка; гидратация; структурообразование; поверхностная энергия

STUDY OF THE IMPACT OF SURFACTANTS ON THE STRUCTURE FORMATION OF HYDRATED GYPSUM BINDER

HRYSYSHKO H.M., *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

Department of Civil Engineering, Construction Technology, and Environmental Protection, Dnipro State Agrarian-Economic University, 25 Serhii Efremov St., 49600, Dnipro, Ukraine, e-mail: grysyshko.anna0101@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-7046-1177

Abstract. Relevance. Ukrainian and foreign researches consider gypsum the most effective material due to its peculiar properties. You can hardly find a material like this that would have the same characteristics, sustainability, and ensure adequate standard of living. The production of building materials based on gypsum binders is not associated with hazardous wastes and emissions and does not cause negative environmental impacts. Besides, the manufacture of gypsum binders requires 3...5 times less energy compared to lime and cement. These advantages encourage researchers to proceed with further attempts to obtain a gypsum structure exhibiting the properties of cement binders. One of the trends involving the formation of this kind of structure is studying the impact of additives on the hydration process. The use of plasticizers is of particular interest in this research area. **Problem statement.** Structure formation process generally depends on the initial content of binding substances and substances interacting during the hydration process. The analysis of technical publications shows that production of composite binders is a priority in the manufacture of mineral binders. A second priority is the use of various additives and factors affecting the hydration process. Most studies using additives involve the structuring of gypsum- and cement-based materials in order to improve physical and mechanical properties. The literature review conducted shows that there is insufficient information on the hydration process mechanism and impact of plasticizers on the structure formation of mineral binders. **The purpose of the article.**

Assessing the effects of surfactants on the mechanism of structure formation and hydration processes in gypsum binders. **Conclusion.** The studies conducted helped to identify the effects of surfactants on the structure and properties of hydrated gypsum binder; furthermore, the most effective additives were identified, allowing to reduce water-to-gypsum ratio significantly, improve strength values, and obtain a binder with a higher density structure. If crystals are grown using $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaCl}$ solution, gypsum specimens will have a high-porosity fibrous microstructure. During counterdiffusion growth of gypsum crystals in the presence of surfactants, filling of interlayer voids can be observed in the microphotographs. Crystals begin to grow from one point, which is due to changes in surface tension. The studies have revealed that plasticizers promote the growth of crystals and the surface energy can be modified depending on the type of additive, which can affect the hardened binder structure. The best results have been achieved with Sika and ACE 430 plasticizers. The X-ray diffraction analysis of the produced $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ crystals has shown that binder hydration process intensity is related to the impact of additives on the shape and size of calcium sulfate crystals and calcium sulfate dihydrate and depends on facial surface energy.

Keywords: gypsum binder; surfactant; additive; hydration; structure formation; surface energy

Актуальність. Українські та зарубіжні фахівці, включаючи працівників охорони здоров'я, вважають гіпс найефективнішим матеріалом завдяки його специфічним властивостям.

За своїми якостями, екологічною чистотою це найбільш підходящий матеріал, що забезпечує комфортні умови для життєдіяльності людини. Виробництво будівельних матеріалів на основі гіпсового в'язучого не має шкідливих відходів і викидів, тому не створює проблем для навколишнього середовища. До того ж, на виробництво гіпсових в'язучих витрачається у 3...5 разів менше енергії порівняно з вапном і цементом [1–4].

Ці переваги спонукають дослідників повертатись до спроб одержання гіпсової структури із властивостями цементних в'язучих речовин.

Один із напрямків формування такої структури – дослідження впливу добавок на процес гідратації. Особливо великий інтерес викликає використання пластифікаторів у цій сфері досліджень.

Аналіз літератури. Вивченням впливу добавок на твердіння та формування структури неводостійких гіпсових в'язучих займалися О. О. Пащенко, В. Д. Глуховський, Р. Ф. Рунова, П. В. Кривенко, М. А. Саницький, А. В. Ушеров-Маршак, В. Б. Ратінов, К. Н. Рожкова, Т. І. Розенберг, П. Роланд, В. Риддель, Л. Шассевен та інші вчені. Згідно з П. Роландом, присутність у гіпсовому в'язучому добавок, котрі сприяють підвищенню або зниженню його розчинності, створює умови для

прискорення чи уповільнення процесів гідратації. Швидкість гідратації залежить як від природи розчиненої речовини, так і від її концентрації в розчині.

Процес твердіння гіпсових в'язучих відбувається в декілька етапів [1–3]. Перший (підготовчий) період характеризується пластичним станом гіпсового тіста.

На другому етапі кристалики двогідрату зв'язані слабкими силами молекулярного зчеплення Ван-дер-Ваальса. Перехід характеризується загустінням.

Далі нестійкий гель перекристалізується в більш крупні кристали. Потім вони з'єднуються між собою в кристалічні зростки, що супроводжується твердненням системи і посиленням її міцності.

Процес формування центрів кристалізації гідрату $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ відбувається в умовах, коли ступінь пересичення розчину швидко змінюється [5].

Розвиток структури тверднення під час кристалізації двоводного гіпсу відбувається також у декілька етапів. У процесі першого етапу формується каркас кристалізаційної структури і виникають контакти зростання між кристалами нової фази. На другому – ріст кристалів. І третій етап – заповнення об'ємів і виникнення напружень [6]. Кінець процесу гідратації завершується формуванням структури з відповідними властивостями.

Процес структуроутворення в загальному вигляді залежить від початкового складу в'язучих речовин і речовин, які взаємодіють у ході гідратації.

Аналіз технічної літератури показує [7–10], що у виготовленні мінеральних в'язучих речовин перевага віддається створенню композиційних в'язучих, тоді як, у другу чергу – використанню різних добавок і факторів впливу на процес гідратації.

Більшість досліджень із використанням добавок пов'язана зі структуруванням гіпсових та цементних матеріалів із метою поліпшення фізико-механічних властивостей.

Аналіз літератури показав недостатню наявність інформації про механізм процесу гідратації та вплив пластифікаторів на структуроутворення мінеральних в'язучих речовин.

Мета досліджень – визначення впливу поверхнево-активних речовин (ПАР) на механізм процесу гідратації та структуроутворення гіпсових в'язучих.

Відповідно до мети визначали структуроутворення гіпсового в'язучого, сформованого за мінімального впливу інших факторів. Для цього застосовано методику зустрічного вирощування кристалів на основі розчинів CaCl_2 , Na_2SO_4 та H_2O .

Друга частина досліджень включає зустрічне вирощування кристалів гіпсу за присутності поверхнево-активних речовин, тобто вплив ПАР на структуру і властивості гідратованого гіпсового в'язучого.

Результати досліджень. Розглядаючи форму кристалів, що утворилися розчином $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaCl}$, можна помітити, що кожний кристал має вигляд тонких ниток, які формують просторову валоподібну структуру (рис. 1).

На фотографії розрізняються два шари. Нижній відносно щільний, верхній – у вигляді хвойного лісу, з якого ростуть вертикальні кристали висотою 25...30 мм. Вірогідно, процес формоутворення залежить від концентрації початкових компонентів і відбувається у три стадії. Це і виражає сформовану структуру. Характерно, що кристал являє собою ниткоподібну основу (рис. 1 б), із якої ростуть голчаті кристали.

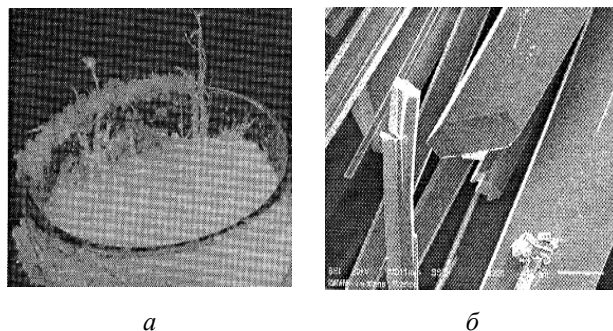


Рис. 1. Фотографія (а) і мікрофотографія (б) кристалів, одержаних методом зустрічного вирощування на основі CaCl_2 , Na_2SO_4 , H_2O

Мікроструктура гіпсових зразків, виготовлених без добавок, волокниста із значною кількістю пор. Дуже добре видно, що ріст кристалів відбувається по гранях (010) з енергією 240 мДж/м² (рис. 1 б).

Відповідно до плану експерименту для порівняння впливу ПАР провели вирощування кристалів за присутності добавок Sika Visco Grete, Glenium ACE 430, Master Air 81AIR, X- SEED 100 та ін.

Дослідження показали, що використання пластифікаторів сприяє росту кристалів у довжину. Найкращі результати спостерігаються у разі використання пластифікаторів Sika і ACE 430 (рис. 2–3).

Кристали, вирощені в середовищі з пластифікатором Sika (рис. 2), мають стовпчасту гексагональну структуру. Довжина кристалів 0,7 до 1,5 см, товщина 1...1,5 мм. На мікрофотографіях спостерігається, що ріст кристалів починається з однієї точки, а також заростання пустот між шарами. Це, певно, пов'язано із зміною поверхневого натягу.

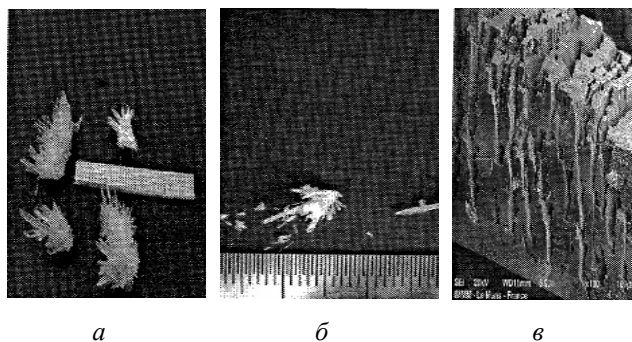


Рис. 2. Фотографії (а, б) і мікрофотографія (в) кристалів, вирощених у середовищі з пластифікатором Sika

За присутності ACE 430 кристали теж мають стовпчасту, щільну структуру (рис. 3).

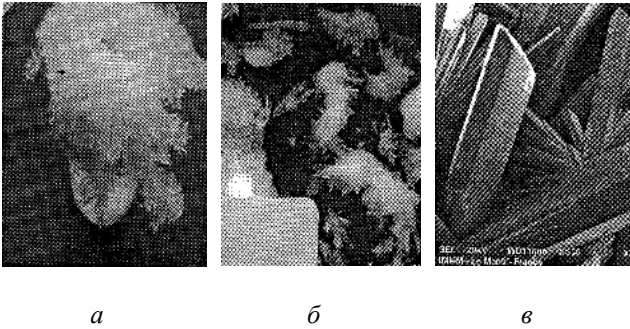
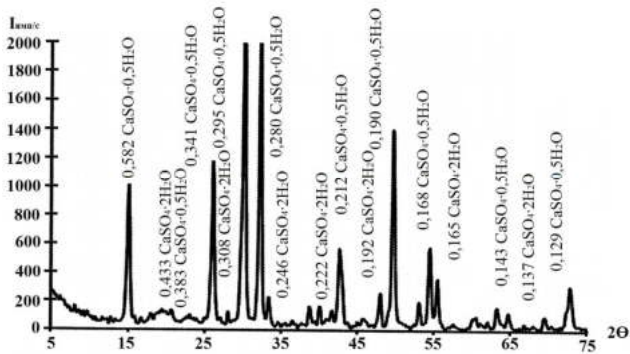


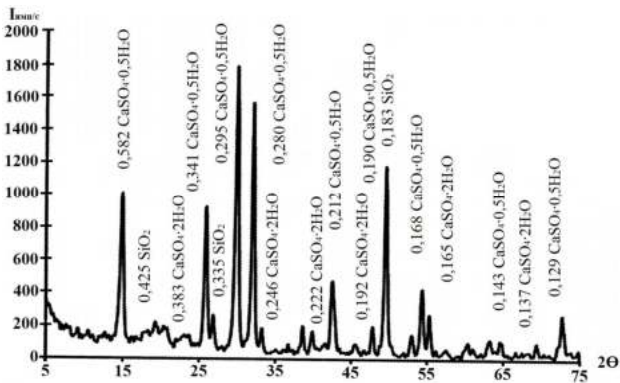
Рис. 3. Фотографії (а, б) і мікрофотографія в) кристалів, вирощених у середовищі з пластифікатором ACE 430

У середовищі Seed структура стовпчаста гексагональна, довжина 5...6 см, ширина 0,5...0,8 мм, товщина 0,1...0,2 мм. Усі шари мають гексагональну форму і ростуть по ширині і довжині кристалів.

Дослідженням з'ясовано, що на форму кристалів впливає також масова частка (%) відношення добавок до початкових компонентів [11].



а



б

Рис. 4. Рентгенівська дифрактограма зразків: а – гіпс Г-5; б – гіпс Г-5 + пластифікатор Sika

Рентгеноструктурний аналіз одержаних кристалів (рис. 4) $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ показав, що молекули добавок не вступають у хімічну взаємодію. Це підтверджують дослідження [12–14].

Але інтенсивність процесу гідратації в'язучого пов'язана із впливом добавок на форму та розміри кристалів двоводного сульфату кальцію і залежить від поверхневої енергії грані (рис. 2–3). Так, без добавок розвиток іде по грані (010) з поверхневою енергією 240 ± 80 мДж/м² (рис. 2).

Висновок. У результаті досліджень визначено вплив ПАР на структуру і властивості гідратованого гіпсового в'язучого, а також виділено найбільш ефективні добавки, що дозволяють значно знизити водогіпсове співвідношення, підвищити показники міцності та отримати в'язуче більш щільної структури.

Під час вирощування кристалів, утворених розчином $\text{CaCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{NaCl}$, мікроструктура гіпсових зразків волокниста із значною кількістю пор.

Під час зустрічного вирощування кристалів гіпсу за присутності поверхнево-активних речовин на мікрофотографіях спостерігається заростання пустот між шарами. Ріст кристалів починається з однієї точки, що пов'язано зі зміною поверхневої енергії.

Дослідження показали, що пластифікатори сприяють росту кристалів і залежно від типу добавки можна змінювати поверхневу енергію кристалів, що дозволить впливати на структуру затверділого в'язучого. Найкращі результати спостерігаються за умови використання пластифікаторів Sika і ACE 430.

Рентгеноструктурний аналіз одержаних кристалів $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ показав, що інтенсивність процесу гідратації в'язучого пов'язана із впливом добавок на форму та розміри кристалів двоводного сульфату кальцію і залежить від поверхневої енергії грані.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пашченко А. А., Сербин В. П., Старчевская Е. А. В'язучі матеріали : підруч. Київ : Вища школа, 1985. 440 с.
2. Волженский А. В., Буров Ю. С., Колокольчиков В. С. Минеральные вяжущие вещества : учеб. пособ. Москва : Стройиздат, 1974. 328 с.
3. Волженский А. В., Федоровская А. В. Гипсовые вяжущие и изделия : учеб. пособ. Москва : Стройиздат, 1974. 328 с.
4. Шуман В. Горные породы и минералы : учеб. пособ. Москва : Мир, 1986. 215 с.
5. Фишер Х.-Б., Кривенко П. В., Саницкий М. А. Исследование процесса стабилизации свойств гипсовых вяжущих. Строительные материалы и изделия. 2013. № 1. С. 3–6.
6. Большаков В. И., Дворкин Л. Й. Строительное материаловедение : учеб. Днепропетровск : РВА, Днепр-VAL, 2004 . 678 с.
7. Бутт Ю. М., Сычев М. М., Тимашев В. В. Дегидратация. Химическая технология вяжущих материалов : учеб. Москва : Высшая школа, 1980. 472 с.
8. Murat M., Karmazsin E. Cinétique d'hydratation des sulfates de calcium sémi-hydratés. Essai d'interprétation des courbes "Vitesse – degré d'avancement". In : Comptendu du Colloque International de la R.I.L.E.M. (25–27 Mai). Saint-Remy-Les-Chevreuse, France, 1977. Pp. 217–236.
9. Mishra R. K., Flatt R. J., Heinz H. Molecular Understanding of Directional Surface and Interface Tensions of Gypsum and Calcium Sulfate Hemihydrate. Proceedings of the XIII ICCI International Congress on the Chemistry of Cement. Madrid, Spain, 3–8 July, 2011. P. 8.
10. Murat M. Structure, cristalochimie, et reactivite des sulfates de calcium – Colloq. Int. de la Rilem: Sulfates de calcium et matereaux derives. Lion, 1977. P. 99.
11. Бут В. М., Тимашев В. В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов : учеб. пособ. для хим.-тех. спец. вузов. Москва : Высшая школа, 1973. 504 с.
12. Миркин Л. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. Москва : ГСФМЛ, 1961. 862 с.
13. Гоц В. І. Бетони і будівельні розчини : навч. посіб. Київ : ТОВ УВПК «ЕксОб», КНУБА, 2003. 472 с.
14. Ратинов В. Б., Розенберг Т. И. Добавки в бетон : монография. Москва : Стройиздат, 1979. 256 с.

REFERENCES

1. Pashchenko O.O., Serbin V.P. and Starchevskaya O.O. *Viazhuchi materialy* [Binding Materials] : pidruch. Kyiv : Vyshcha shkola Publ., 1985, 440 p. (in Ukrainian).
2. Volzhenskiy A.V., Burov Yu.S. and Kolokolchikov V.S. *Mineralnyie viazhushchiye veshchestva* [Mineral Binders] : ucheb. posob. Moscow : Stroyizdat Publ., 1974, 328 p. (in Russian).
3. Volzhenskiy A.V. and Fedorovskaya A.V. *Gipsovyie viazhushchiye i izdeliya* [Gypsum Binders and Products] : ucheb. posob. Moscow : Stroyizdat Publ., 1974, 328 p. (in Russian).
4. Schuman V. *Gornye porody i mineraly* [Rocks and Minerals] : ucheb. posob. Moscow : Mir Publ., 1986, 215 p. (in Russian).
5. Fischer H.-B., Kryvenko P.V. and Sanytskyi M.A. *Issledovaniye protsessy stabilizatsyi svoistv gipsovykh viazhushchikh* [Study of the Process of Stabilization of Properties of Gypsum Binders]. *Stroitelnyie materialy i izdeliya* [Building Materials and Products]. 2013, no. 1, pp. 3–6. (in Ukrainian).
6. Bolshakov V.I. and Dvorkin L.Yos. *Stroitelnoye Materialovedeniye* [Building Materials Science] : ucheb. Dnipropetrovsk : RVA, Dnipro-VAL, 2004, 678 p. (in Ukrainian).
7. Butt Yu.M., Sychov M.M. and Timashov V.V. *Degidratatsiya. Khimicheskaya tekhnologiya viazhushchikh materialov* [Dehydration. Chemical Technology of Binding Materials] : pidruch. Moscow : Vysshaya Shkola Publ., 1980, 472 p. (in Russian).
8. Murat M. and Karmazsin E. Cinétique d'hydratation des sulfates de calcium sémi-hydratés. Essai d'interprétation des courbes "Vitesse – degré d'avancement". In : Comptendu du Colloque International de la R.I.L.E.M. (25–27 Mai). Saint-Remy-Les-Chevreuse, France, 1977, pp. 217–236. (in France).
9. Mishra R. K., Flatt R. J. and Heinz H. Molecular Understanding of Directional Surface and Interface Tensions of Gypsum and Calcium Sulfate Hemihydrate. Proceedings of the XIII ICCI International Congress on the Chemistry of Cement. Madrid, Spain, 3–8 July, 2011, p. 8. (in Spain).
10. Murat M. Structure, cristalochimie, et reactivite des sulfates de calcium – Colloq. Int. de la Rilem: Sulfates de calcium et matereaux derives. Lion, 1977, p. 99. (in France).
11. But V.M. and Timashov V.V. *Praktikum po khimicheskoy tekhnologii viazhushchikh materialov* [Workshop on Chemical Technology of Binding Materials] : ucheb. posob. dlia khim.-tekh. spets. vuzov. Moscow : Vysshaya Shkola Publ., 1973, 504 p. (in Russian).

12. Mirkin L.I. *Spravochnik po rentgenostrukturnomu analizu polikristallov* [Reference Book on X-Ray Diffraction Analysis of Polycrystals]. Moscow : GSFML, 1961, 862 p. (in Russian).

13. Hots V.I. *Betony i budivelni rozchyny* [Concretes and Mortars] : navch. posib. Kyiv : TOV UVPK ExOb, KNUBA, 2003, 472 p. (in Ukrainian).

14. Ratinov V.B. and Rozenberg T.I. *Dobavki v beton* [Concrete Admixtures] : monografiya. Moscow : Stroyizdat Publ., 1979, 256 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 23.08.20.

УДК 669.18

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.290920.28.666

ОКИСЛЕНИЕ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ И СТАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

ГУБЕНКО С. И., *докт. техн. наук, проф.*

Кафедра материаловедения, Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

Аннотация. Постановка проблемы. Необходимы исследования процессов окисления сталей при их взаимодействии с атмосферой в момент лазерной обработки. **Цель работы** – изучение процессов окисления сталей при лазерном воздействии. **Методика.** Материалами для исследований служили промышленные стали, содержащие различные неметаллические включения. Образцы различных сталей с предварительно полированной поверхностью подвергали лазерному нагреву на установках ГОС-30М и КВАНТ-16. Применяли методы исследования: петрографию и оптическую микроскопию (Неофот-21). **Результаты.** Установлено, что в момент лазерного воздействия вследствие взаимодействия поверхности стали с воздушной атмосферой происходит окисление стали. При этом велика роль неметаллических включений, в которых происходят фазовые превращения. Продукты окисления имеют различную морфологию и химический состав, зависящие от химического состава стали, а также от смачиваемости в системе сталь – жидкий оксид. Показаны особенности структуры оксидных пленок. Проанализировано взаимодействие стали с воздушной атмосферой в процессе лазерной обработки. **Научная новизна.** Установлены особенности окисления поверхности сталей в процессе взаимодействия с воздушной атмосферой в условиях лазерного воздействия. Определены особенности фазовых превращений в неметаллических включениях и локальных зонах стальной матрицы вблизи включений. Показано влияние включений на окислительные процессы. Установлены особенности морфологии и химического состава оксидных пленок в разных сталях. **Практическая значимость.** Использование полученных результатов поможет разработать технологии лазерной обработки сталей с регламентированными параметрами качества поверхности, что позволит предупредить образование различного рода дефектов. Предложен способ удаления оксидных пленок с поверхности изделий.

Ключевые слова: сталь; лазерная обработка; воздушная атмосфера; окисление; неметаллические включения

ОКИСНЕННЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ ТА СТАЛЕВОЇ МАТРИЦІ ПІД ЧАС ЛАЗЕРНОЇ ДІЇ

ГУБЕНКО С. І., *докт. техн. наук, проф.*

Кафедра металознавства, Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 374-83-57, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

Анотация. Постановка проблемы. Необходимы дослідження процесів окиснення сталей за їх взаємодії з атмосферою в момент лазерної обробки. **Мета роботи** – вивчення процесів окиснення сталей за лазерного впливу. **Методика.** Матеріалами для досліджень були промислові сталі, які містять різні неметалеві включення. Зразки різних сталей з попередньо полірованою поверхнею піддавали лазерному нагріву на установках ГОС-30М і КВАНТ-16. Застосовували методи дослідження: петрографію й оптичну мікроскопію (Неофот-21). **Результати.** Встановлено, що в момент лазерного впливу внаслідок взаємодії поверхні з

повітряною атмосферою відбувається окиснення сталі. При цьому велика роль неметалевих включень, в яких відбуваються фазові перетворення. Продукти окиснення мають різні морфологію та хімічний склад, що залежать від хімічного складу сталі, а також від змочуваності в системі сталь – рідкий оксид. Показано особливості структури оксидних плівок. Проаналізовано взаємодію сталі з повітряною атмосферою в процесі лазерної обробки. **Наукова новизна.** Встановлено особливості окиснення поверхні сталей у процесі взаємодії з повітряною атмосферою в умовах лазерного впливу. Показано особливості фазових перетворень у неметалевих включеннях і локальних зонах сталеві матриці поблизу включень, вплив включень на окиснювальні процеси, а також особливості морфології та хімічного складу оксидних плівок у різних сталях. **Практична значимість.** Використання отриманих результатів дозволить розробити технології лазерної обробки сталей з регламентованими параметрами якості поверхні, що допоможе попередити утворення різного роду дефектів. Запропоновано спосіб видалення оксидних плівок із поверхні виробів.

Ключові слова: сталь; лазерна обробка; повітряна атмосфера; окиснення; неметалеві включення

OXIDATION OF NON-METAL INCLUSIONS AND STEEL MATRIX WITH LASER ACTION

GUBENKO S.I., DR. SC. (TECH.), PROF.

Material Science Department, National Metallurgical Academy of Ukraine, 4, Naharina ave., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (056) 374-83-57, e-mail: sigubenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-0002-0003

Abstract. Purpose. It is necessary to study the processes of oxidation of steels during their interaction with the atmosphere at the time of laser treatment. The aim of the work was to study the processes of steel oxidation under laser action. **Methods.** The materials for investigation were commercial steels containing different non-metallic inclusions. The specimens of different steels with preliminary polished surface were exposed to laser beaming on the installations GOS-30M and GUANTUM-16. Methods of investigation – petrography and optical microscopy (Neophot-21) – were used. **Results.** It was found that at the time of laser exposure due to the interaction of the steel surface with the air atmosphere, steel oxidizes. At the same time, the role of nonmetallic inclusions in which phase transformations occur is of great importance. The oxidation products have different morphology and chemical composition, depending on the chemical composition of steel, as well as on the wettability in the steel-liquid oxide system. The structural features of oxide films are shown. The interaction of steel with the air atmosphere during laser processing is analyzed. **Scientific novelty.** The features of the oxidation of the surface of steels in the process of interaction with the air atmosphere under conditions of laser exposure are established. The features of phase transformations in nonmetallic inclusions and local zones of a steel matrix near inclusions are shown. The effect of inclusions on oxidative processes is shown. The features of the morphology and chemical composition of oxide films in different steels are shown. **Practical significance.** The use of the results obtained will allow us to develop laser processing technologies for steels with regulated surface quality parameters, which will prevent the formation of various kinds of defects. A method for removing oxide films from the surface of products is proposed.

Keywords: steel; laser treatment; air atmosphere; oxidation; non-metallic inclusions

Введение. Лазерная обработка является одним из распространенных способов локального поверхностного упрочнения деталей машин и механизмов. Вследствие неравномерного износа поверхности катания железнодорожных колес [1–9] возможно лазерное упрочнение зоны выкружки. При лазерной обработке деталей машин и механизмов на воздухе, когда поверхности разогреваются до либо выше температуры плавления стали [10], возможно взаимодействие обрабатываемых поверхностей с окружающей атмосферой, что вызывает окислительные процессы [11].

Появление оксидов на поверхности приводит к концентрации напряжений и деформаций и может вызывать появление трещин в процессе эксплуатации [12–26].

Цель работы – изучение процессов окисления сталей при лазерном воздействии.

Материалы и методики. Для изучения взаимодействия с атмосферой при лазерной обработке образцы сталей R7, НБ-57, 08кп, 08Х, 08Т, ЭЗ, 08Ю, ШХ15, 60Г, 12Х25Н16Г7АР, 08Х18Н10Т подвергали лазерному облучению на установках ГОС-30М и КВАНТ-16. Параметры

лазерного воздействия приведены в работах [10; 11]. Металлографические исследования проводили при высоких температурах, а также с помощью микроскопа Неофот-21. Применяли петрографический метод идентификации включений, а также микрорентгеноспектральный анализ (MS-46 Cameca).

Результаты. Следует отметить, что к превращениям окислительного характера во включениях и в стальной матрице вблизи включений при лазерной обработке, связанных с взаимодействием облучаемой поверхности с окружающей атмосферой, следует отнести окисление включений и стальной матрицы вблизи включений, высокотемпературное разрушение и избирательное испарение включений, образование оксидных пленок на поверхности [27]. При лазерном воздействии в самих включениях структурные и фазовые превращения протекают с очень высокой скоростью, что обусловлено специфическими признаками этой обработки, а именно: большие энергии лазерного излучения, высокие температуры нагрева, большие скорости нагрева и охлаждения [10; 11].

Включения имеют большую поглощательную способность, чем стальная матрица [19; 11] и разогреваются сильнее, а после прекращения действия лазера в них сохраняется определенное количество тепла. Это способствует их взаимодействию с окружающей воздушной атмосферой. Поскольку скорость охлаждения довольно высока, в очень редких случаях на поверхности включений наблюдали тончайшие (толщиной 5...7 мкм) оксидные пленки (рис. 1 а), которые являются высшими оксидами по сравнению с основным включением.

Например, у включения MnO была пленка состава Mn_2O_3 , у шпинелей $Me_1O(Me_2)_2O_3$ могут окисляться низшие оксиды MeO и получаются твердые растворы типа $(Me_1, Me_2)_2O_3$ (пленка $(Fe, Al)_2O_3$ на включении $FeO \cdot Al_2O_3$). На поверхности силикатных включений, также

принадлежащих к оксидной группе FeO – SiO_2 , MnO – SiO_2 , $2FeOSiO_2$, $2MnO \cdot SiO_2$, выявлены тонкие пленки высших оксидов, что свидетельствует об окислительных процессах, прошедших в низших оксидах, которые входят в их состав (FeO, MnO) (рис. 1 б).

Сульфиды, находящиеся вблизи поверхности образцов, также претерпевали изменения, связанные с их окислением (рис. 1 в).

При термической активации в условиях скоростного лазерного нагрева происходит активное взаимодействие атомов кислорода, находящихся в атмосфере, с элементами включения. Таким образом, в процессе лазерного воздействия происходила трансформация сульфидов, находящихся вблизи поверхности образцов, в окисульфидные включения. В некоторых включениях карбонитрида титана TiCN после лазерной обработки наблюдали локальные участки оксидов титана (рис. 1 г). Очевидно, окисление произошло в момент оплавления включений при взаимодействии с окружающей атмосферой в результате скоростного замещения атомов углерода и (или) азота атомами кислорода.

Взаимодействие включений с воздушной атмосферой может быть и чисто механическим. При плавлении сульфидов и силикатов в момент лазерного воздействия включения под действием ударной волны разбрызгиваются, растекаются по поверхности и захватывают воздушные пузырьки, которые при быстрой кристаллизации не успевают всплыть и остаются во включениях (рис. 1 д).

Взаимодействие включений с воздушной атмосферой происходит при высокотемпературном избирательном испарении атомов с поверхности включения и уходе их в окружающее пространство (рис. 1 е, ж). Разная упругость паров различных элементов, входящих в их состав, приводит к избирательному испарению. На поверхности включений появляются кратеры. Продукты разрушения содержат сильно нагретый пар и частицы конденсата.

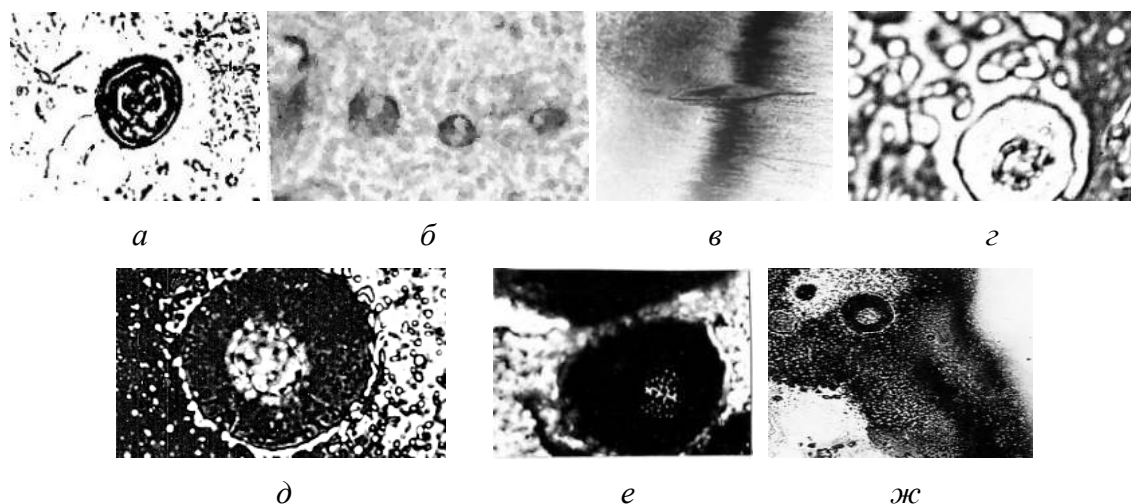


Рис. 1. Окисление (а–д), тепловое разрушение и высокотемпературное испарение (е, ж) включений в условиях лазерного воздействия; а–в – $\times 500$, г, д – $\times 1\,000$, е, ж – $\times 500$

Вблизи включений возможно появление зон локального окисления стальной матрицы (рис. 2 а, б), что свидетельствует о скоростном проникании атомов кислорода из воздушной среды, активируемом не только высокой температурой нагрева, но и оплавлением стальной матрицы.

Поверхностное окисление сталей при лазерной обработке имеет большое значение, поскольку в процессе образования и роста оксидных пленок происходит изменение оптических свойств объекта облучения, приводящее к увеличению эффективной поглотительной способности и изменению температуры поверхности.

Структура оксидных пленок свидетельствует об их образовании, в основном, когда сталь находится в жидком состоянии. Толщина пленок составляла 10...30 мкм. Механизм окисления стали состоит в диффузии кислорода из газового потока к поверхности стали, адсорбции его на этой поверхности, диффузии в глубь стали и реакций с компонентами стали. Легирующие элементы и примеси в стали окисляются вместе с железом, что приводит к образованию многокомпонентных оксидов.

Особенностью окисления стали при лазерном воздействии является то, что оно сопровождается ударной волной и происходит за очень короткое время при значительной энергии импульса, вызывающей ионизацию воздуха. Эти

условия значительно ускоряют диффузионные процессы, облегчают взаимодействие ионов кислорода с компонентами стали. В зонах оплавления жидкая сталь взаимодействует с ионами кислорода и образуются жидкие оксиды, которые растекаются по поверхности образца и кристаллизуются с высокой скоростью (рис. 2 в). Иногда жидкий оксид не успевает растекаться и застывает в виде капель (рис. 2 г).

Морфология оксидных пленок зависит также от характера смачиваемости твердой стали жидким оксидом. Следует отметить, что возможно окисление поверхности и без оплавления стали. На рисунке 2 д видны два вида оксидной пленки, образовавшейся с оплавлением и без него, что можно объяснить неоднородностью температурного поля в зоне лазерного воздействия. Состав оксидных пленок зависит от химического состава сталей. Качественный анализ показал, что в них находятся окиселобразующие компоненты стали, прореагировавшие с ионами кислорода. В сталях Р6М5, 08ГСЮТФ, Э3, 08Х18Н10Н, 08кп, 08Х, 08Т, НБ-57, ШХ15 это соответственно Fe, Cr, W, V, Mo, Mn, Si; Fe, Mn, Si, V, Ti, Al; Fe, Si, Mn; Fe, Mn, Si, Cr, Ti; Fe, Mn, Si; Fe, Mn, Al, Si, Fe, Mn, Si, Cr, Al; Fe, Ti, Mn, Si, Al; Fe, Mn, Si; Fe, Cr, Mn, Si, Mg, Al.

О сложном составе оксидов свидетельствует и тот факт, что при

петрографическом анализе получены значения показателей светопреломления, не соответствующие значениям последних для оксидов определенного, стехиометрического состава [11]. Количественный спектральный анализ позволил определить состав оксидных пленок, в которых основная доля принадлежит железу и кислороду, а остальные элементы присутствуют в незначительных

количествах, однако достаточных для влияния на состав и структуру оксидов.

В большинстве случаев образовавшиеся оксиды представляют собой твердые растворы сложного состава, однородные или имеющие зоны ликвации элементов (рис. 2 *е, ж*). Однако во включениях иногда встречаются частицы второй фазы, отличающиеся по составу.

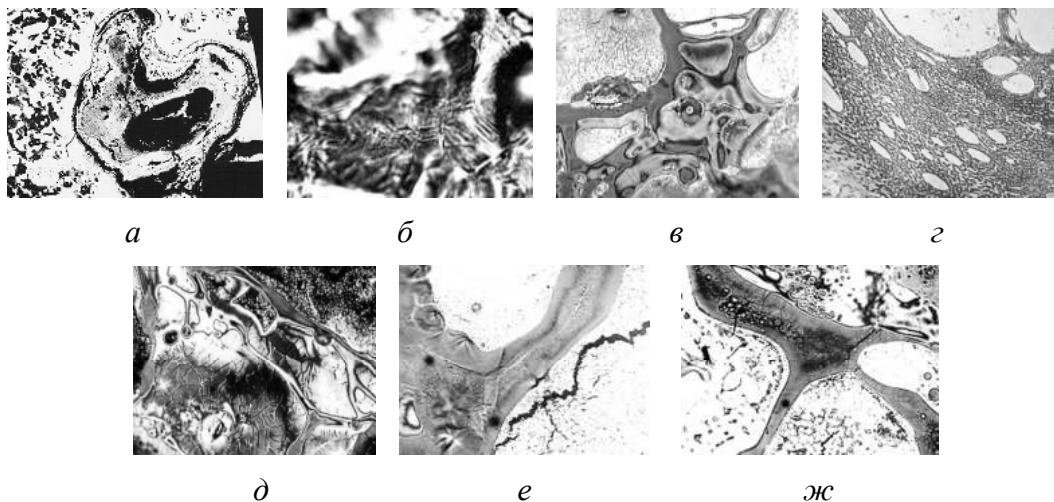


Рис. 2. Локальное окисление стальной матрицы вблизи включений (*а, б*) и оксидные пленки на поверхности образцов сталей 08X18H10T (*в, д*), ЭЗ (*г*) и Р6М5 (*е, ж*); после лазерного воздействия; *а, б* – $\times 700$, *в–ж* – $\times 500$

Для удаления окисных пленок необходимо травление. Оптимальным оказался следующий режим: 20 % раствор H_2SO_4 с добавкой отходов коксохимического производства 40 г/л раствора, температура раствора 70...80 °С, время травления 10...20 с.

Выводы. Исследованы окислительные процессы, происходящие при лазерной обработке сталей. Показана роль неметаллических включений и локальных зон стальной матрицы в образовании оксидных пленок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Воробьев А. А., Губенко С. И., Иванов И. А. и др. Ресурс и ремонтпригодность колесных пар подвижного состава железных дорог : монография. Москва : ИНФРА-М, 2011. 264 с.
2. Таран Ю. Н., Есаулов В. П., Губенко С. И. Повышение износостойкости железнодорожных колес с разным профилем поверхности катания. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2000. № 2. С. 42–44.
3. Богданов А. Ф., Губенко С. И., Жуков Д. А., Иванов И. А. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства обода цельнокатаного колеса. Конструкционно-технологическое обеспечение надежности колес рельсовых экипажей : сб. науч. тр. Санкт-Петербург : ПГУПС, 2009. С. 15–23.
4. Sladkowski A., Gubenko S., Pogorelov D., Iwnicki S., Licciardello R. V. Rail vehicle dynamics and associated problems : monograph. Gliwice : Silesian University of Technology, 2005. 187 p.
5. Таран Ю. Н., Есаулов В. П., Губенко С. И. Структурные изменения в ободьях железнодорожных колес с разным профилем поверхности катания. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1989. № 9. С. 101–105.
6. Губенко С. И., Иванов И. А., Соболев А. А. Особенности износа поверхности катания цельнокатаных колес. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. Санкт-Петербург : изд-во ПГУПС, 2013. С. 73–84.

7. Кушнер В. С., Кутько А. А., Воробьев А. А., Губенко С. И., Иванов И. А. Влияние структуры и механических характеристик колесных сталеи на изнашивание и режимы восстановления профиля колесных пар : монография. Омск : OmSTU, 2015. 221 с.
8. Губенко С. И. Некоторые структурные аспекты колесной стали, определяющие качество железнодорожных колес. Современные технологии производства транспортного металла. Нижний Тагил : НМТК, 2008. 394 с. С. 88–113.
9. Sladkovsky A., Yessaulov V., Shmurygin N., Taran Yu., Gubenko S. An Analysis of Stress and Strain in Freight Car Wheels. *Transactions on Modelling and Simulation*. 1997. № 16. Pp. 15–24.
10. Gubenko S. I. Melting And Crystallization of Non-metallic Inclusions And Steel Matrix Under Laser Treatment. *Physcal-Chemical Mechanics of Materials*. 2010. № 3. Pp.73–79.
11. Губенко С. И., Ошкадеров С. П. Неметаллические включения в стали : монография. Киев : Наукова думка, 2016. 528 с.
12. Бельченко Г. И., Губенко С. И. Микронеоднородная деформация стали, содержащей неметаллические включения. *Известия АН СССР. Металлы*. 1981. № 4. С. 94–97.
13. Gubenko S., Proidak Yu., Kozlovsky A., Shramko A., Iskov M. Influence of Nonmetallic Inclusions on Microbreaks Formation in Wheel Steel and Railway Wheels. *Telematics, Logistics and Transport Safety (TLTS'08) : mater. of VIII scient. conf. (October 16–18)*. Poland : Katowice-Cieszyn, 2008.
14. Губенко С. И. Неметаллические включения и прочность сталеи : монография. Саарбрюкен : LAP LAMBERT – Palmarium Academic Publishing, 2015. 476 с.
15. Губенко С. И. Физика разрушения сталеи вблизи неметаллических включений. Днепропетровск : НметАУ, ИЦ Системные технологии, 2014. 301 с.
16. Губенко С. И. Межфазные границы включение – матрица в сталях : монография. Germany–Mauritius, Beau Bassin, Palmarium Academic Publishing, 2017. 506 с.
17. Губенко С. И. Неметаллические включения и пластичность сталеи. Физические основы пластичности сталеи. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium Academic Publishing, 2016. 549 с.
18. Бельченко Г. И., Губенко С. И. Деформация неметаллических включений при прокатке стали. *Известия АН СССР. Металлы*. 1983. № 4. С. 80–84.
19. Gubenko S. I., Pinchuk S. I., Belaya E. V. The influence of the structural state of wheel steel on the development of corrosion. *Metallurgical and Mining Industry*. 2009. № 2. Pp. 69–73.
20. Губенко С. И. Гетерофазные микрокомпозитные включения в сталях. Germany – Mauritius, Beau Bassin, Palmarium Academic Publishing, 2019. 330 с.
21. Gubenko S. I. Features of wear of railway wheels tread. *MTM : Machines, Technologies, Materials*. 2019. Vol. XIII, iss. 7. Pp. 324–327.
22. Губенко С. И. Влияние неметаллических включений и продуктов коррозии на износостойкость железнодорожных колес. *Сталь*. 2019. № 6. С. 51–55.
23. Губенко С. И. Особенности износа поверхности катания железнодорожных колес. *Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 9* : матер. міжнар. наук. конф. (18–19.12. 2019 р.). Київ : КПІ ім. Сікорського, 2019. С. 83–86.
24. Губенко С. И., Беспалько В. Н. Механические свойства колесной стали в активных средах. *Perspectives of world science and education : the 7th Intern. scient. and pract. conf. (March 25–27, 2020)*. Osaka, Japan : CPN Publishing Group, 2020. 719 p. Pp. 265–273.
25. Губенко Светлана. Физическая природа пластичности и упрочнения металлов при деформации. Germany – Mauritius, Beau Bassin : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020. 341 с.
26. Губенко С. И. Превращения в неметаллических включениях. *Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід* : III міжнар. конф. (12–14.11.19 р.). Амстердам : Університет Амстердама, 2019.
27. Губенко С. И., Никульченко И. А. Особенности образования трещин вблизи неметаллических включений при разных режимах деформационной и предварительной лазерной обработок. *Advances of Science. procedings of the intern. scient. conf. (27.07.2019)*. Czech Republic, Karlovy Vary – Ukraine, Kyiv : Scleneny Mustek, 2019. Pp. 28–39.

REFERENCES

1. Vorobiov A.A., Gubenko S.I., Ivanov I.A. and etc. *Resurs I remontoprigradnost kolesnih par podvixhnogo sostava zheleznih dorog* [Resource and maintainability of wheel sets of rolling stock of railways]. Moscow : INFRA-M, 2011, 264 p. (in Russian).
2. Taran Yu.N., Esaulov V.P. and Gubenko S.I. *Povishenie iznosostojkosti zheleznodorozhnikh koles s raznim profilem poverhnosti kataniy* [Increasing the wear resistance of railway wheels with a different tread profile]. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'* [Metallurgical and Mining Industry]. 2000, no. 2, pp. 42–44. (in Russian).
3. Bogdanov A.F., Gubenko S.I., Zhukov D.A. and Ivanov I.A. *Poverkhnostnyy sloy i ekspluatatsionnyye svoystva oboda tsel'nokatanogo koleasa* [The surface layer and the operational properties of the rim of a seamless-rolled wheel].

Konstrukcionno-tehnologicheskoe obespechenie nadezhnosti koles rel'sovyh `ekipazhej : sb. nauch.tr. [Structural and technological support for the reliability of the wheels of rail crews : coll. scient. works]. Saint-Petersburg : PGUPS Publ., 2009, pp. 15–23. (in Russian).

4. Sladkowski A., Gubenko S., Pogorelov D., Iwnicki S. and Licciardello R.V. Rail vehicle dynamics and associated problems: monograph. Gliwice : Silesian University of Technology, 2005, 187 p.

5. Taran Yu.N., Esaulov V.P. and Gubenko S.I. *Strukturnie izmeneniya v obodiah zheleznodorozhnykh koles s raznim profitem poverhnosti kataniya* [Structural changes in the rims of railway wheels with a different tread d profile]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Proceedings of Universities. Ferrous Metallurgy]. 1989, no. 9, pp. 101–105. (in Russian).

6. Gubenko S.I., Ivanov I.A. and Sobolev A.A. *Osobennosti iznosa poverkhnosti kataniya tsel'nokatanykh koles* [Features of wear of the rolling surface of solid-rolled wheels]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Proceedings of the Saint-Petersburg University of Railway Engineering]. Saint-Petersburg : Publishing House of State University of Railway Transport, 2013, pp. 73–84. (in Russian).

7. Kushner V.S., Kutko A.A., Vorobyov A.A., Gubenko S.I. and Ivanov I.A. *Vliyaniye struktury i mekhanicheskikh kharakteristik kolesnykh staley na iznashivaniye i rezhimy vosstanovleniya profilya kolesnykh par* [The influence of the structure and mechanical characteristics of wheel steels on wear and restoration modes of the wheelset profile]. Omsk : OmSTU Publ., 2015, 221 p. (in Russian).

8. Gubenko S.I. *Nekotoryye strukturnyye aspekty kolesnoy stali, opredelyayushchiye kachestvo zheleznodorozhnykh koles. Sovremennyye tehnologii proizvodstva transportnogo metalla* [Some structural aspects of wheel steel that determine the quality of railway wheels. Modern technologies for the production of transport metal]. Nizhny Tagil : NMTK Publ., 2008, 394 p, pp. 88–113. (in Russian).

9. Sladkovsky A., Yessaulov V., Shmurygin N., Taran Yu. and Gubenko S. An Analysis of Stress and Strain in Freight Car Wheels. Transactions on Modelling and Simulation. 1997, no. 16, pp. 15–24.

10. Gubenko S.I. Melting And Crystallization of Non-metallic Inclusions And Steel Matrix Under Laser Treatment. Phisycal-Chemical Mechanics of Materials. 2010, no. 3, pp. 73–79.

11. Gubenko S.I. and Oshkadepov S.P. *Nemetallicheskie vkluchenija v stali* [Non-metallic inclusions in steel]. Kyiv : Naukova dumka Publ., 2016, 528 p. (in Russian).

12. Belchenko G.I. and Gubenko S.I. *Mikroneodnorodnaya deformatsiya stali, sodержashchey nemetallicheskiye vklucheniya* [Microinhomogeneous deformation of steel containing nonmetallic inclusions]. *Izvestiya AN SSSR. Metals* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1981, no. 4, pp. 94–97. (in Russian).

13. Gubenko S., Proidak Yu., Kozlovsky A., Shramko A. and Iskov M. Influence of Nonmetallic Inclusions on Microbreaks Formation in Wheel Steel and Railway Wheels. Telematics, Logistics and Transport Safety – TLTS'08 : mater. of the VIII scient. conf. (October 16–18 2008). Poland, Katowice – Cieszyn, 2008.

14. Gubenko S.I. *Nemetallicheskie vkluchenija i prochnost stali* [Non-metallic inclusions and strength of steel]. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium Academic Publishing, 2015, 476 p. (in Russian).

15. Gubenko S.I. *Fizika razrusheniya staley vblizi nemetallicheskikh vklucheniy* [Physics of steel fracture near non-metallic inclusions]. Dnipropetrovsk : NMetAU, Information Cenyer “System Technologies”, 2014, 301 p. (in Russian).

16. Gubenko S.I. *Mezhpfaznie granitsi vkluchenie-matritsa I svoisrva stalej* [Interphase boundaries inclusion-matrix and properties of steels]. Germany – Mauritius : Palmarium Academic Publishing, 2017, 506 p. (in Russian).

17. Gubenko S.I. *Nemetallicheskiye vklucheniya i plastichnost' staley* [Non-metallic inclusions and ductility of steels. The physical basis of the ductility of steels]. Saarbrücken : LAP LAMBERT. Palmarium Academic Publishing, 2016, 549 p. (in Russian).

18. Belchenko G.I. and Gubenko S.I. *Deformatsiya nemetallicheskikh vklucheniy pri prokatke stali* [Deformation of non-metallic inclusions during steel rolling]. *Izvestiya vuzov. Mmetally* [News of the USSR Academy of Sciences. Metals]. 1983, no. 4, pp. 80–84. (in Russian).

19. Gubenko S.I., Pinchuk S.I. and Belaya E.V. The influence of the structural state of wheel steel on the development of corrosion. Metallurgical and Mining Industry. 2009, no. 2, pp. 69–73. (in Russian).

20. Gubenko S. *Geterofaznyke mikrokompozitnyye vklucheniya v stalyakh* [Heterophase microcomposite inclusions in steels]. Germany – Mauritius, Beau Bassin, Palmarium Academic Publishing, 2019, 330 p. (in Russian).

21. Gubenko S.I. Features of wear of railway wheels tread. MTM : Machines, Technologies, Materials. 2019, vol. XIII, iss. 7, pp. 324–327.

22. Gubenko S.I. *Vliyaniye nemetallicheskikh vklucheniy i produktov korrozii na iznosostoykost' zheleznodorozhnykh koles* [Influence of nonmetallic inclusions and corrosion products on wear resistance of railway wheels]. *Stal'* [Steel]. 2019, no. 6, pp. 51–55. (in Russian).

23. Gubenko S.I. *Osobennosti iznosa poverkhnosti kataniya zheleznodorozhnykh koles* [Features of wear of the rolling surface of railway wheels]. *Materiali dlya roboti v ekstremal'nih umovah – 9 : mater. mizhnar. nauk. konf.* [Materials for Robots in Extreme Minds – 9 : mater. Intern. scient. conf.]. (18–19.12. 2019). Kyiv : KPI named after Sikorskyi, 2019, pp. 83–86. (in Russian).

24. Gubenko S.I. and Bespalko V.N. *Mekhanicheskiye svoystva kolesnoy stali v aktivnykh sredakh* [Mechanical properties of wheel steel in active media]. Perspectives of world science and education : the 7th Intern. scient. and pract. conf.]. March 25–27, Osaka, Japan : CPN Publishing Group, 2020, 719 p., pp. 265–273. (in Russian).

25. Gubenko Svetlana. *Fizicheskaya priroda plastichnosti i uprochneniya metallov pri deformatsii* [Physical nature of plasticity and strengthening of metals upon deformation]. Germany – Mauritius, Beau Bassin, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020, 341 p. (in Russian).

26. Gubenko S.I. *Prevrashcheniya v nemetallicheskiy vklyucheniyyakh* [Transformations in nonmetallic inclusions]. *Innovatsionnyye tekhnologii v nauke i osvitenii. Evropeyskiy dosvid : III mizhnar. konf.* [Innovation technologies in science and education. European Dosvid : III Intern. conf.]. 12–14.11.19. Amsterdam : University of Amsterdam, 2019. (in Russian).

27. Gubenko S.I., Nikulchenko I.A. *Osobennosti obrazovaniya treshchin vblizi nemetallicheskiy vklyucheniy pri raznykh rezhimakh deformatsionnoy i predvaritel'noy lazernoy obrabotok* [Features of the formation of cracks near non-metallic inclusions in different modes of deformation and preliminary laser treatment]. *Advances of Science : Proceedings of the Intern. scient. conf. (27.07.2019)*. Czech Republic, Karlovy Vary – Ukraine, Kyiv Scieny Mustek, 2019, pp. 28–39.

Поступила в редакцію: 15.08.2020.

УДК 628.87

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.290920.35.667

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РОБОТИ УСТАНОВКИ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВТОРИННОЇ ТЕПЛОТИ

ЛЯХОВЕЦЬКА-ТОКАРЄВА М. М.¹, канд. техн. наук, доц.,
АДЕГОВ О. В.^{2*}, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-00, e-mail: ventilation@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-0338-4930

^{2*} Кафедра опалення, вентиляції, кондиціонування та теплогазопостачання, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-00, e-mail: ventilation@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-8837-4936

Анотація. Постановка проблеми. Якщо за різного стану атмосферних умов повинні братися до уваги не тільки температура, а і якість атмосфери, потрібно враховувати також як припливну вентиляцію, так і витяжну. Прості системи часто працюють як припливні або витяжні установки. При цьому в приміщення подається тільки припливне повітря, а зворотне проходить через стики за наявності герметичності або повітря відсмоктується з приміщення, а необхідне вирівнювання тиску відбувається через потоки повітря, що надходять зовні в приміщення через стіни. Для того, щоб за контрольованої припливної та витяжної вентиляції використовувати систему вторинного використання теплоти, необхідно змонтувати як витяжну установку, так і припливну. Особливо сприятливе поєднання припливного і витяжного колекторів, у цьому випадку можна уникнути проміжного холодоносія для подачі теплоти з витяжного повітря в припливне. Кожен процес вторинного використання теплоти характеризується тим, що тепло надходить із витяжного і подається в припливне повітря. **Мета роботи** – визначення коефіцієнта (показника) вторинної теплоти, який допускає порівняння різних систем вторинного використання теплоти, якщо масові потоки змінні, а зовнішня потреба енергії мала. Надалі повинен бути введений новий показник вторинної теплоти при постійних масових потоках і малої зовнішньої потреби енергії на вже діючі визначення. **Висновок.** Для спрощеного поділу двох можливих варіантів для визначення показника вторинної теплоти слід враховувати повітряний потік, що відноситься до тепловіддавальної сторони, як потенціал зворотної теплоти, а теплоприймальної сторони – потенціал припливної теплоти. Як широке поняття обох форм слід застосовувати поняття коефіцієнта вторинного використання теплоти.

Ключові слова: вентиляція; коефіцієнт; вторинна теплота; витяжне повітря; припливне повітря; кондиціонування; температура; припливні установки; витяжні установки

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДЛЯ ОЦЕНКИ РАБОТЫ УСТАНОВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРИЧНОЙ ТЕПЛОТЫ

ЛЯХОВЕЦКАЯ-ТОКАРЕВА М. М.¹, канд. техн. наук,
АДЕГОВ А. В.^{2*}, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра отопления, вентиляции, кондиционирования и теплогазоснабжения, Государственное высшее учебное заведение «Приднiproвская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (0562) 47-16-00, e-mail: ventilation@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-0338-4930

^{2*} Кафедра отопления, вентиляции, кондиционирования и теплогазоснабжения, Государственное высшее учебное заведение «Приднiproвская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина, тел. +38 (0562) 47-16-00, e-mail: ventilation@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-8837-4936

Аннотация. Постановка проблемы. Если при разном состоянии атмосферных условий должны приниматься во внимание не только температура, но и качество атмосферы, нужно учитывать также как приточную вентиляцию, так и вытяжную. Простые системы часто работают как приточные или вытяжные установки. При этом в помещение подается только приточный воздух, а обратный проходит через стики при наличии герметичности или отсасывается из помещения, а необходимое выравнивание давления происходит через потоки воздуха, поступающие снаружи в помещение через стены. Для того, чтобы при контролируемой

приточной и вытяжной вентиляции использовать систему вторичного использования теплоты, необходимо смонтировать как вытяжную установку, так и приточную. Особенно благоприятно сочетание приточного и вытяжного коллекторов, в этом случае можно избежать промежуточного хладоносителя для подачи теплоты из вытяжного воздуха в приточный. Каждый процесс вторичного использования теплоты характеризуется тем, что тепло поступает из вытяжного воздуха и подается в приточный воздух. **Цель работы** – определение коэффициента (показателя) вторичной теплоты, который допускает сравнение различных систем вторичного использования теплоты, если массовые потоки переменные, а внешняя потребность энергии мала. В дальнейшем должен быть введен новый показатель вторичной теплоты при постоянных массовых потоках и малой внешней потребности энергии на уже действующие определения. **Вывод.** Для упрощенного разделения двух возможных вариантов для определения показателя вторичной теплоты необходимо учитывать воздушный поток, относящийся к теплоотдающей стороне как потенциал обратной теплоты, а теплопринимающей стороне – потенциал приточной теплоты. Как широкое понятие обеих форм должно применяться понятие коэффициента вторичного использования теплоты.

Ключевые слова: вентиляция; коэффициент; вторичная теплота; вытяжной воздух; приточный воздух; кондиционирование; температура; приточные установки; вытяжные установки

DETERMINATION OF THE COEFFICIENT FOR EVALUATING THE OPERATION OF THE INSTALLATION USING SECONDARY HEAT

LYACHOVETSKA-TOKAREVA M.M.¹, *Cand. Sc. (Tech.)*,
ADEGOV A.V.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

¹ Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning and Heat and Gas Supply, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-16-00, e-mail: ventilation@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-0338-4930

^{2*} Department of Heating, Ventilation, Air Conditioning and Heat and Gas Supply, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, tel. +38 (0562) 47-16-00, e-mail: ventilation@pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-8837-4936

Abstract. Raising of problem. If in different atmospheric conditions not only the temperature of the atmosphere but also the quality of the atmosphere must be taken into account, then both supply and exhaust ventilation must be taken into account. Simple systems often work as supply or exhaust systems. In this case, only supply air is given in the room, and return air passes through the joints in the presence of tightness or air is sucked out of the room, and the necessary pressure equalization occurs through air flows coming from outside the room through the walls. In order to use the system of secondary use of heat at the controlled supply and exhaust ventilation, it is necessary to mount both the exhaust installation and supply one. Particularly favorable is the combination of supply and exhaust manifolds, in which case you can avoid the intermediate coolant to supply heat from the exhaust air to the supply one. Each process of secondary use of heat is characterized by the fact that the heat comes from the exhaust air and is supplied to the supply air. **Purpose.** The purpose of this work is to determine the coefficient (indicator) of secondary heat, which allows the comparison of different systems of secondary heat use, if the mass flows are variable and the external energy demand is small. In the future, a new indicator of secondary heat should be introduced at constant mass flows and low external energy demand for existing definitions. **Conclusion.** To simplify the separation of the two possible options for determining the rate of secondary heat, take into account the air flow related to the heat transfer side as the return heat potential, and the heat receiving side – the potential of the heat input. As a broad concept of both forms, the concept of the coefficient of secondary use of heat should be used.

Keywords: ventilation; coefficient; secondary heat; exhaust air; supply air; air conditioning; temperature; supply units; exhaust units

Постановка проблеми. Якщо за різного стану атмосферних умов повинні братися до уваги не тільки температура, а і якість атмосфери, потрібно враховувати також як припливну вентиляцію, так і витяжну. Прості системи часто працюють як припливні або витяжні установки [1]. При цьому в приміщення подається тільки

припливне повітря, а зворотне повітря проходить через стики за наявності герметичності або відсмоктується з приміщення, а необхідне вирівнювання тиску відбувається через потоки повітря, що надходять зовні в приміщення через стіни.

Мета статті. Щоб для контрольованої припливної та витяжної вентиляції

використовувати систему вторинного використання теплоти [2], необхідно змонтувати як витяжну установку, так і припливну. Особливо сприятливе поєднання припливного і витяжного колекторів, у цьому випадку можна уникнути проміжного холодоносія для

подачі теплоти з витяжного повітря в припливне.

Кожен процес вторинного використання теплоти характеризується тим, що тепло надходить із витяжного повітря і подається в припливне. Різні види системи вторинного використання теплоти, про які йдеться, наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Класифікація систем рекуперації тепла

№	Система вторинного використання теплоти
I	Простий теплообмінник перехресний потік – протитечія
II	Теплообмінник із вмонтованим вентилятором
III	Замкнута система
IV	Регенератор (наприклад, роторний акумулювальний теплообмінник)
V	Тепловий насос

Фактично застосування системи вторинного використання теплоти пов'язане з додатковими потребами у високопотенційній енергії, яка повинна подаватися залежно від системи різним способом, а також і враховуватися.

Коефіцієнти для процесів вторинного використання теплоти. З тих пір як стали враховуватися процеси вторинного використання теплоти, спостерігається прагнення оцінювати ефективність процесу схожим параметрами. Це спонукало до пропозиції встановлення рекомендацій в установках із використанням вторинного тепла (рис. 1).

Згідно з пропозиціями, показники для оцінювання роботи системи А, яка являє собою простий теплообмінник (або система вторинного використання теплоти без зовнішнього припливу енергії), мають вигляд:

– співвідношення нагріву Φ :

$$\Phi_1 = \frac{\Delta t_1}{g_0}$$

$$\Phi_1 = \frac{(t_{11} - t_{12})}{(t_{11} - t_{21})} \quad (1)$$

$$\Phi_1 = \frac{\Delta t_2}{g_0}$$

$$\Phi_1 = \frac{(t_{22} - t_{21})}{(t_{11} - t_{21})} \quad (2)$$

– співвідношення потоків теплоємності

ω :

$$\omega = \frac{\dot{M}_1 \cdot c_1}{\dot{M}_2 \cdot c_2} = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}$$

$$0 \leq \omega \leq 1 \quad (3)$$

– число регенерації N :

$$N_1 = \frac{k \cdot A}{\dot{M}_1 \cdot c_1} \quad (4)$$

$$N_1 = \frac{k \cdot A}{\dot{M}_2 \cdot c_2} \quad (5)$$

Коефіцієнти, що використовувались для розрахунків системи В (або система вторинного використання теплоти):

– значення вторинної теплоти:

$$\Phi_{t1} = \frac{t_{11} - t_{12}}{t_{11} - t_{21}} \quad (6)$$

$$\Phi_{t2} = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{21}} \quad (7)$$

– значення вторинної вологості:

$$\psi_1 = \frac{x_{11} - x_{12}}{x_{11} - x_{21}} \quad (8)$$

$$\psi_2 = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{21}} \quad (9)$$

Коефіцієнти використання вторинної теплоти для непостійних спеціальних теплоємностей:

$$\Phi_{h1} = \frac{h_{11} - h_{12}}{h_{11} - h_{21}} \quad (10)$$

$$\Phi_{h2} = \frac{h_{22} - h_{21}}{h_{11} - h_{21}} \quad (11)$$

$$\Phi_{\dot{H}1} = \frac{\dot{H}_{11} - \dot{H}_{12}}{\dot{H}_{11} - \dot{H}_{21}} \quad (12)$$

$$\Phi_{\dot{H}2} = \frac{\dot{H}_{22} - \dot{H}_{21}}{\dot{H}_{11} - \dot{H}_{21}} \quad (13)$$

(Рівняння 6 і 7 збігаються з рівняннями 12 і 13 у разі, якщо $c_1 = c_2$).

(Рівняння 10 і 11 збігаються з рівняннями 12 і 13 в разі, якщо $M_1 = M_2$).

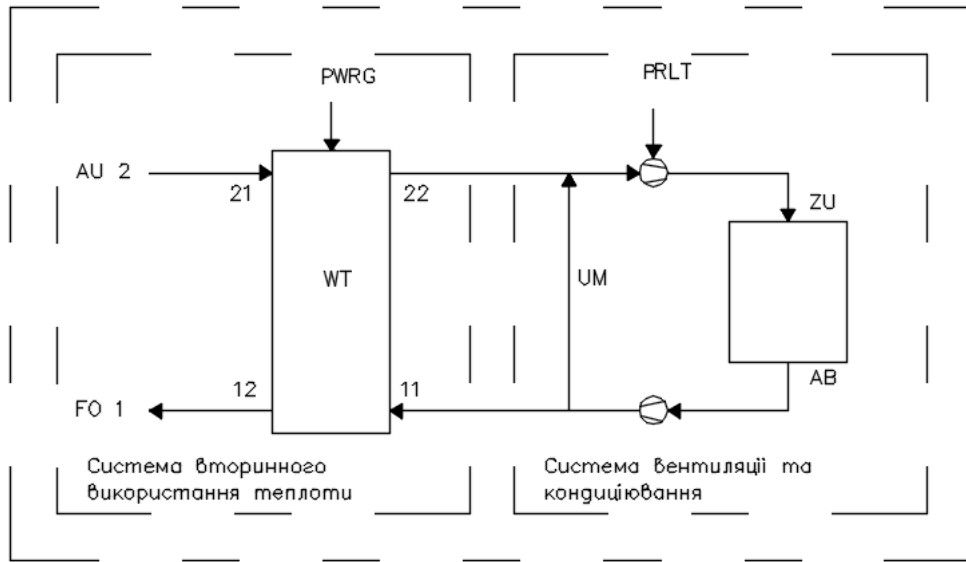


Рис. 1. Встановлення системних кордонів для оцінювання якості процесу вторинного використання теплоти:

A – система вторинного використання теплоти без зовнішнього припливу енергії;

B – система вторинного використання теплоти + приміщення (установка з використанням вторинного тепла);

11 – стан відпрацьованого повітря перед входом у систему вторинного використання теплоти;

12 – стан відпрацьованого повітря після виходу із системи вторинного використання теплоти;

21 – стан зовнішнього повітря перед входом у систему вторинного використання теплоти;

22 – стан зовнішнього повітря після виходу із системи вторинного використання теплоти

Матеріали статті. З урахуванням аналізу даних різних розрахунків [4] можна запропонувати нові коефіцієнти для розрахунків системи В:

1) без урахування зовнішньої потреби енергії:

$$\Phi_{\dot{M}1} = \frac{\dot{M}_1(h_{11} - h_{12})}{\dot{M}_{LW}(h_{11} - h_{21})}; \quad (14)$$

$$\Phi_{\dot{M}2} = \frac{\dot{M}_2(h_{22} - h_{21})}{\dot{M}_{LW}(h_{11} - h_{21})}, \quad (15)$$

де \dot{M}_{LW} – повітрообмін певного масового потоку повітря (збільшується від M_1 і M_2):

$$\dot{M}_{LW} = \dot{M}_1 \quad \text{якщо} \quad \dot{M}_1 > \dot{M}_2$$

$$\dot{M}_{LW} = \dot{M}_2 \quad \text{якщо} \quad \dot{M}_1 < \dot{M}_2$$

2) з урахуванням зовнішньої потреби енергії:

$$\Phi_{E1} = \frac{\dot{M}_1(h_{11} - h_{12})}{\dot{M}_{LW}(h_{11} - h_{21})} \cdot Y_{E1}, \quad (16)$$

$$\Phi_{E2} = \frac{\dot{M}_1(h_{22} - h_{21})}{\dot{M}_{LW}(h_{11} - h_{21})} \cdot Y_{E2}, \quad (17)$$

де Y_E – зовнішній фактор потреби енергії:

$$Y_{E1} = \left(1 - \frac{1}{\varphi_{h1}}\right), \quad Y_{E2} = \left(1 - \frac{1}{\varphi_{h2}}\right),$$

φ_h – теплота згоряння, що відноситься до процесу вторинного використання теплоти:

$$\varphi_{h1} = \frac{\dot{M}_1 \cdot (h_{11} - h_{12})}{P_{WRG} / \eta}, \quad \varphi_{h2} = \frac{\dot{M}_2 \cdot (h_{22} - h_{21})}{P_{WRG} / \eta},$$

P_{WRG} – вся потреба енергії системи вторинного використання теплоти; η – загальний ККД (первинна енергія – енергія подачі).

У літературних даних для оцінювання процесів по вторинному використанню теплоти застосовуються два показники: показник вторинної теплоти (відповідно рівняння 6 і 7) і показник вторинної вологості (рівняння 8 і 9). Залежно від застосування можна відносити їх як до сторони, що віддає зворотне тепло, так і до сторони, яка приймає непридатну теплоту. Поділ всієї вторинної теплоти на значно відчутну частину, позначену показником зворотної теплоти, і приховану частку, що враховує показник зворотної вологості, відбувся з точки зору врахування економії [5]. Також можна відразу ж обчислити скорочення потреби енергії для попереднього нагріву і скорочення потреби води або пари для зволоження повітря і визначити потребу на рік.

Визначення показника непридатного тепла за рівняннями 6 і 7 містить багато обмежень, які часто ускладнюють застосування на практиці або роблять його неможливим. Так, залишається без уваги погіршення показника вторинної теплоти через конденсацію, що виступає частково на зворотній тепловіддавальній стороні за рідких температур зовнішнього повітря і пов'язане з цим часткове використання ентальпії конденсату, а також поліпшення коефіцієнта тепловіддачі. Цього обмеження можна уникнути простим способом – за допомогою визначення коефіцієнта вторинного тепла зі спеціальними різницями ентальпії, як показують рівняння 10 і 11.

Застосовуючи ці рівняння, можна здійснити розрахунки необхідних потоків енергії, проте необхідну кількість води або пари слід визначати за допомогою роздільного обліку вмісту вологи. На практиці це нескладно, тому що повинні бути відомі при обчисленні (обліку) зміни

параметрів у системі з використанням вторинної теплоти.

Обмеження колишніх коефіцієнтів.

Для нерівних специфічних потужностей теплових потоків в установці для вторинного використання теплоти можна уникнути обмеження показників за допомогою рівнянь 10 і 11. Для цього випадку ще немає загальноприйнятих визначень. Часто застосовується визначення за рівняннями 12 і 13, утворене через баланс енергії за допомогою ентальпії. Це правильне, однак збігається з кількістю зворотного тепла тільки тоді, коли потоки теплоємності однаково високі при обох сторонах системи вторинного використання теплоти. Якщо таке не відбувається, дають розрахунок вторинної енергії з потенціалом зворотного тепла.

Наведені визначення показника вторинної теплоти застосовуються без обмежень залежно від даних умов, якщо мова йде про те, щоб обчислити скорочення енергетичного потенціалу, досягнутого за допомогою системи вторинного використання теплоти, і потреби енергії за рік. Повністю непридатні вони для прямого порівняння більшості систем вторинного використання теплоти, особливо в тому випадку, коли масові потоки на обох сторонах різні за величиною, а наявні зовнішні потоки енергії малі.

Майже для всіх термодинамічних процесів існують внутрішні відносні ККД, які допускають порівняння різних систем, так, наприклад, в опалювальних котлів коефіцієнт корисної дії або величина нагріву [6]. Остання дає можливість поряд із завданням опалення також зіставлення між нагрівальним котлом і тепловим насосом. Такого роду можливості порівняння були несумісні із системами вторинного використання теплоти, оскільки встановлені показники вторинної теплоти відносяться тільки до перенесених потокам теплоти. Правильне порівняння проте можливе тільки прямої величини всіх енергетичних потоків, які входять у систему і залишають її.

Наступні поняття і рівняння відносяться у принципі до систем вторинного використання теплоти I ÷ IV (табл. 1). Під час використання теплового насоса системи вторинного використання теплоти можна не відразу застосувати такі визначення, тому що обмеження максимально регенеративної (зворотної) теплоти з відпрацьованого витяжного повітря відноситься тільки до теплообміну. За допомогою теплового насоса можна цю межу перейти, тобто можливі також температури відпрацьованого повітря нижчі за температури зовнішнього повітря. Фіктивне обмеження застосування теплового насоса на максимальне охолодження, що лежить в основі показника зворотної теплоти, не втрачає показників системи, оскільки може бути економічним використання безпосередньо зовнішнього повітря як джерела теплоти.

Найважливіший крок – це встановлення для уніфікації визначення коефіцієнта вторинного використання теплоти є установка єдиної системи кордонів. Вся система вторинного використання теплоти може поділятися на три різні групи, які знову ж таки є сенс групувати в дві системи. На рисунку 1 показані пов'язані границі системи.

Система А діє, якщо мова йде про оцінювання процесу чистого теплообміну. Але тільки в системі В, системі вторинного використання теплоти і приміщення, описується (представляється) використання теплоти і приміщення, описується повністю весь процес вторинного використання теплоти, причому порівняно із системою А, яка повинна брати до уваги подачу високоякісної енергії, необхідної додатково для системи вторинного використання теплоти. Подача високоякісної енергії виникає з потреби енергії під час транспортування повітря для подолання подаючого тиску в системі вторинного використання теплоти, тобто частини високоякісної енергії для приведення в дію вентиляторів і насосів, що належать до системи вторинного використання теплоти.

Коефіцієнти для системи А: простий теплообмінник. Для оцінювання дії процесу простого теплообміну застосовується вже довгий час співвідношення нагріву, наведене в коефіцієнтах рівнянь 1 і 2. Якщо мова йде про оцінювання простого теплообмінника, можна користуватися цим показником.

Обчислення різних масових потоків і специфічної теплоємності на обох сторонах виконують за допомогою співвідношення потоків теплоємності ω (рівняння 3). Разом із коефіцієнтом обміну k (рівняння 4–5, які показують якість і величину теплообмінника або конструкційні витрати щодо перенесеного потоку теплоти за зміни температури за Кельвіном), можна повністю описати процеси теплообміну в теплообміннику. Залежно від проходження потоку в апарат є прямий зв'язок між трьома вищезгаданими показниками (коефіцієнтами).

Коефіцієнти для системи В: система вторинного використання теплоти та приміщення. На противагу до системи А, менше проявляється інтерес в системі вторинного використання теплоти до оцінювання якості окремої ланки системи, ніж до взаємозв'язку між системою вторинного використання теплоти і приміщення і до економії, досягнутої в процесі вторинного використання теплоти, як з енергетичної точки зору, так і з господарської. При цьому можна порівняти систему вторинного використання теплоти безпосередньо з припливною або витяжною вентиляцією без системи вторинного використання теплоти і покриттям опалювального навантаження за допомогою відповідної системи опалення.

Маючи визначення коефіцієнта вторинного використання теплоти, треба перевірити, чи повинен застосовуватися цей коефіцієнт для обчислення енергетичних потоків і потреби енергії. Друге застосування виникає при порівнянні різних систем вторинного використання теплоти. Якщо це має місце, то можна не враховувати зовнішні потреби енергії. У цьому випадку повинна враховуватися зовнішня потреба

енергії. Таким чином виникають два різні визначення для коефіцієнта використання вторинної теплоти:

I. Без урахування зовнішньої потреби енергії.

Як уже показано, встановлюється визначення коефіцієнта вторинного використання теплоти при рівних масових потоках припливного і витяжного повітря. Наступне визначення для різних масових потоків виходить із припущення, що великим є той масовий потік, який визначає необхідний повітрообмін і для якого

обчислюється необхідна кількість повітря на основі даного стану повітря приміщення.

Баланс масового потоку на рисунку 2 показує, що при різних масових потоках припливного і витяжного повітря на основі встановленого вирівняного тиску виникає масовий потік обліку повітря. Величина цього масового потоку повітря є саме різниця між масовим потоком припливного і витяжного повітря. У разі надлишку витяжного повітря ця його частина проникає через пази і щілини в приміщенні.

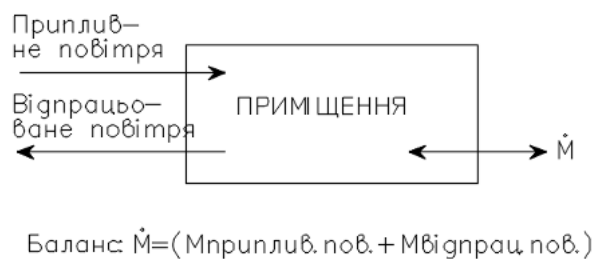


Рис. 2. Баланс масового потоку будь-якої системи вентиляції

Визначення коефіцієнтів вторинного використання теплоти щодо сторін, які віддають або приймають витяжну теплоту, передаються відповідно рівняннями 14 і 15. При цьому визначенні коефіцієнта витяжної або припливної теплоти стає при нерівних масових потоках числове значення менше, ніж при рівних масових потоках. Це можна пояснити додатковою потребою теплоти, яка виникає тоді, коли один із двох масових потоків не допускає необхідного показника. До перенесеної частини прихованої теплоти є додаткова потреба теплоти як частка надлишку припливного повітря, так і для надлишку витяжного повітря.

Подача додаткової необхідної енергії опалення може відбуватися у разі надлишку припливного повітря в блоці вентиляції.

До тих пір, поки не конденсується на стороні від повітря в приміщенні вологість, є ідентичним коефіцієнт витяжної теплоти при рівному співвідношенні масового потоку як надлишок для припливного повітря так і для надлишку витяжного. Але як тільки з'являється конденсат, що практично найчастіше буває, обумовлює

надлишок припливного повітря велику різницю в змісті води між повітрям приміщення і витяжним повітрям. Оскільки крива конденсації не є прямою, зростає при більшій охолодженні повітря приміщення пропорційно отриманій частки латентної теплоти. В цьому випадку мають коефіцієнти витяжної теплоти для надлишку припливного повітря нерівного показника як для надлишку витяжного повітря при співвідношенні масового потоку.

II. З урахуванням зовнішньої потреби енергії, всі до сих пір наведені визначення для коефіцієнта витяжної і припливної, не враховують наявну необхідність зовнішньої високоякісної енергії. Пряме порівняння двох систем використання вторинної теплоти неможливо через це без повного підрахунку економічності. Описані коефіцієнти використання вторинної теплоти відчувають вплив отриманої зовнішньої енергії. В таблиці 2 показано, яким чином потрібно враховувати зовнішню енергію при даній системі використання вторинної теплоти.

Матриця для зовнішньої потреби енергії в залежності від системи вторинного використання теплоти

№	Зовнішня потреба енергії	Система вторинного використання теплоти			
		I	II	III	IV
1	Додаткова енергія приводу для наявних витяжного і припливного вентиляторів	X		X	X
2	Енергія приводу для вентиляторів, які відносяться до системи вторинного використання теплоти		X		
3	Енергія приводу для насосів, які відносяться до системи вторинного використання теплоти			X	
4	Енергія приводу для моторів, які відносяться до системи вторинного використання теплоти				X

Для рекуперативного теплообмінника відбувається це тільки через вимушене збільшення потужності приводу, наявних вентиляторів для подолання додаткового спаду тиску в теплообміннику. Явне поліпшення коефіцієнта витяжної теплоти по загальновибраному визначенню могло бути досягнуте за допомогою збільшення втрати тиску, так як велика втрата тиску пов'язана з тепловіддачею. Не враховуючи зовнішні потреби енергії можна було б скоротити при двох однакових за площею теплообмінниках енергію з більшою втратою тиску. Наявний оптимум між поліпшенням тепловіддачі за допомогою прискорення зниження тиску і додатковими витратами на енергію харчування стає при даних визначеннях неявним і може бути визначений тільки при різних витратах в зв'язку з повним підрахунком економічного ефекту.

В системі вторинного використання теплоти з сепараторними вентиляторамі потрібно використовувати всю потребу енергії для наявних вентиляторів, тому що вентилятори мають тільки одну задачу: подолання зниження тиску в системі вторинного використання теплоти. Основна область застосування такого роду установки є там, де є система вентиляції і кондиціонування, як, наприклад, при провітрюванні ферм або як окрема

установка для видалення і припливу повітря в житлове приміщення.

Замкнута система вторинного використання теплоти характеризується тим, що канали припливного і витяжного повітря не збігаються і теплота, отримана з витяжного повітря, виходить через проміжний теплоносій в зовнішнє повітря. У цій системі повинні враховуватися разом з необхідною додатковою потребою енергії для наявних вентиляторів для подолання втрати тиску в системі вторинного використання теплоти, а також потреба енергії для переміщення середовища проміжного теплоносія. Використовувати при цьому треба в нормальному випадку потужність насоса.

Додаткова потреба енергії для подолання втрати тиску в системі вторинного використання теплоти повинна враховуватись також в так званих регенераторах, наприклад, роторний акумулюючий теплообмінник. Замість потреби енергії для насоса тут виступає необхідна потужність для приводу ротаційного теплообмінника.

Запропоноване збільшення коефіцієнта вторинного використання теплоти для обліку зовнішньої потреби енергії виникло з точки зору того, що максимум коефіцієнт вторинного використання теплоти повинен бути досягнутий тільки тоді, коли прийнята

до уваги, отримана з витяжного повітря теплота, буде без додаткової зовнішньої потреби енергії. Кожна додаткова потреба енергії повинна вести внаслідок цього до погіршення коефіцієнта вторинного використання теплоти.

Рівняння 16 і 17 є множинними збільшеннями і враховують зовнішню потребу енергії. При системі без зовнішньої

потреби енергії стає $\gamma = 1$; якщо необхідна енергія приводу поділена на загальний ККД перетворена первинної енергії відповідно відновленої теплоті, то $\gamma = 0$.

На рисунку 3 показано функціональний взаємозв'язок між зовнішнім фактором споживання енергії і кількістю теплоти згорання, що лежить в основі процесу регенерації теплоти [3].

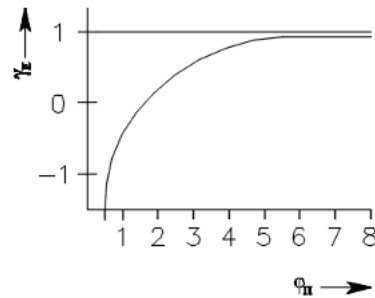


Рис. 3. Графічний взаємозв'язок між зовнішнім фактором потреби енергії і теплотою згорання, яка стосується процесу вторинного використання теплоти

З рисунку 3 видно, що можливі також негативні коефіцієнти вторинного використання теплоти, а саме тоді, коли з витяжного повітря виходить менше теплоти і воно вводиться в систему як зовнішня енергія. Відповідністю для цього є кількість теплоти згорання, що лежить в основі фактору енергії споживання, яке показує, скільки зовнішньої первинної енергії необхідно, щоб зуміти перенести кількість теплоти, яку треба розглядати як корисну. Це, наприклад, тоді має місце, коли регулюється потік зовнішнього повітря при потоці витяжного повітря поступово до показника нуль. Коефіцієнт вторинного використання теплоти може привести до втрати теплоти з співвідношенням витраченої первинної енергії, обумовленої необхідним обміном повітря, і стати негативним. Зовнішній фактор потреби енергії стає нульовим, якщо до системи підводиться більшу кількість первинної енергії, яка береться з витяжного повітря

при процесі вторинного використання теплоти. Існує друга гранична величина, якщо немає зовнішніх потреб енергії. Фактор потреби енергії стає також як 1 і коефіцієнт вторинного використання теплоти збігається в своєму масовому значенні з наведеними визначеннями, що береться з витяжного повітря при процесі вторинного використання теплоти.

Висновки. Визначення коефіцієнта вторинного використання теплоти по рівняннях 14 і 15 дає можливість вирішити проблему установки якісного кругообігу для різних систем рекуперації тепла на різних потоках маси на обох сторонах. Ця форма співвідношення коефіцієнта рекуперації тепла може також використовувати всі відомі визначення для розрахунку теплової потужності. Для прямого порівняння різних систем рекуперації тепла також необхідно визначати зовнішній попит енергії системи рекуперації тепла і повинні бути розглянуті, наприклад у випадках рівнянь 16 і 17.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Стефанов Е. В. Вентиляция и кондиционирование воздуха : монография. Санкт-Петербург : Авок Северо-Запад, 2005. 400 с.
2. Чейлитко А. М. Використання вторинних енергоресурсів : навч. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2014. 246 с.
3. Закон України «Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу». *Відомості Верховної Ради України*. 2005. № 20. С. 278; 285.

4. Курбатов Ю. Л., Масс Н. С., Кравцов В. В., Касютина Т. Г. Вторичные энергоресурсы, энерготехнологическое комбинирование и ресурсоэнергосбережение : учеб. пособ. Донецк, 2011. 161 с.
5. Руководство по разработке энергетического паспорта потребителя энергоресурсов производственного назначения. Сб. 3. Москва : Московское агентство по энергосбережению, 1997. 243 с.
6. Вагин Г. Я., Дудникова Л. В., Зенютич Е. А., Лоскутов А. Б., Солнцев Е. Б. Экономия энергоресурсов в промышленных технологиях : справ.-метод. пособ. Под ред. Сергеева С. К. Нижний Новгород : НГТУ, НИЦЭ, 2001. С. 133, 193–196, 200–201.

REFERENCES

1. Stefanov Yev.V. *Ventilyaciya i kondicionirovanie vozduha : monografiya* [Ventilation and air conditioning : monograph]. Saint-Petersburg : Avok North-West Publishing House, 2005, 400 p. (in Russian).
2. Cheylytko A.M. *Vikoristannya vtorinnykh energoresursiv : navch. posib.* [The use of secondary energy resources : textbook]. Zaporozhye : ZDIA, 2014, 246 p. (in Ukrainian).
3. *Zakon Ukraïni «Pro kombinovane virobnytvo teploï ta elektrichnoï energii (kogeneraciyu) ta vikoristannya skidnogo energopotencialu»* [Law of Ukraine “On combined heat and power (cogeneration) and the use of waste energy potential”]. *Vidomosti Verhovnoi Radi Ukraïni* [Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine]. 2005, no. 20, pp. 278; 285. (in Ukrainian).
4. Kurbatov Yu.L., Mass N.S., Kravtsov V.V. and Kasyutina T.G. *Vtorichnye `energoresursy, `energotehnologicheskoe kombinirovanie i resurso`energoberezhnie : ucheb. posob* [Secondary energy resources, energy-technological combination and resource-energy saving : tutorial]. Donetsk, 2011, 161 p. (in Russian).
5. *Rukovodstvo po razrabotke `energeticheskogo pasporta potrebitelya `energoresursov proizvodstvennogo naznacheniya* [Guidelines for the development of an energy passport for a consumer of industrial energy resources]. Coll. 3. Moscow : Moscow Agency for Energy Saving, 1997, 243 p. (in Russian).
6. Vagin G.Ya., Dudnikova L.V., Zenyutich E.A., Loskutov A.B. and Solntsev E.B. Ed. Sergeev S.K. *`Ekonomiya `energoresursov v promyshlennykh tehnologiyah : sprav.-metod. posob.* [Saving of energy resources in industrial technologies: Reference guide]. Nizhnyi Novgorod : NSTU, NITsE Publ., 2001, pp. 133, 193–196, 200–201. (in Russian).

Надійшла до редакції : 16.08.2020.

УДК 691. 620.3

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.290920.45.668

МОДИФІКАЦІЯ В'ЯЖУЧИХ ТА БЕТОНІВ ШЛЯХОМ НАНОТЕХНОЛОГІЙ. ОГЛЯД ДОСЯГНЕНЬ

МОРОЗ Л. В., канд. техн. наук, доц.

Кафедра цивільної інженерії, технології будівництва та захисту довкілля, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. Сергія Єфремова, 25, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: linysek83@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3150-7472

Анотація. Стаття містить огляд досліджень, щодо застосування наночастинок та нанотехнологій у виробництві різноманітних будівельних матеріалів, зокрема, бетонів та в'язучих. Наведено історичні приклади застосування нанотехнологій та позитивний вплив наночастинок на властивості різноманітних матеріалів, що застосовувалися задовго до того, як учені змогли пояснити походження незвичних властивостей цих матеріалів; сформульовано необхідність появи нормативної бази та будівельних матеріалів із поліпшеними властивостями для зведення унікальних будівель та споруд; проведено аналіз існуючих способів модифікації в'язучих речовин та матеріалів на їх основі та наведено пропозиції щодо подальших досліджень у сфері використання наночастинок у бетонах.

Ключові слова: нанотехнології; наночастинки; дослідження; бетони; властивості; вплив

МОДИФИКАЦИЯ ВЯЖУЩИХ И БЕТОНОВ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОР ДОСТИЖЕНИЙ

МОРОЗ Л. В., канд. техн. наук, доц.

Кафедра гражданской инженерии, технологии строительства и защиты окружающей среды, Днепропетровский государственный аграрно-экономический университет, ул. Сергея Ефремова, 25, 49600, Днепро, Украина, e-mail: linysek83@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3150-7472

Аннотация. Выполнен обзор исследований по применению наночастиц и нанотехнологий при производстве различных строительных материалов, а именно, бетонов и вяжущих. Приведены исторические примеры применения нанотехнологий и положительного влияния наночастиц на свойства разнообразных материалов, которые применялись задолго до того, как ученые смогли объяснить происхождение необычных свойств этих материалов; сформулирована необходимость появления нормативной базы и строительных материалов с улучшенными свойствами для возведения уникальных зданий и сооружений; проведен анализ существующих способов модификации вяжущих веществ и материалов на их основе и представлены предложения относительно дальнейших исследований в сфере использования наночастиц в бетоне. Целью статьи является систематизация результатов существующих исследований, которые касаются применения наночастиц и нанотехнологий при производстве разнообразных строительных материалов, а именно вяжущих и бетонов на их основе, для формулирования состояния вопроса и выделения малоизученных участков, которые сдерживают внедрение нанотехнологий в сферу бетонного производства. **Выводы:** основная масса выполненных исследований направлена на разработку составов наномодифицированных бетонов, которые имеют улучшенные свойства по сравнению с обычными (нормативными) бетонами. Эти исследования выполняются для определения потенциальных возможностей нанобетона разнообразного назначения. Однако остаются малоизученными вопросы, которые связаны с поиском оптимального способа изготовления и области применения (массовое или индивидуальное использование) нанобетона, а также экологических рисков применения такого бетона. С научной точки зрения, дальнейшего детального изучения требуют процессы структурообразования бетона, содержащего наночастицы, и поиск взаимосвязи между свойствами, количеством или другими характеристиками наночастиц, которые вводятся в состав бетона, и свойствами непосредственно готового искусственного камня.

Ключевые слова: нанотехнологии; наночастицы; исследования; бетоны; свойства; влияние

MODIFICATION OF BINDERS AND CONCRETES BY APPLICATION OF NANOTECHNOLOGIES. REVIEW OF ACHIEVEMENTS

MOROZ L.V., *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

Department of Civil Engineering, Construction Technology and Environmental Protection, Dnipro State Agrarian and Economic University, 25, S. Efremova Str., 49600, Dnipro, Ukraine, e-mail: linysek83@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3150-7472

Abstract. The article provides a review of research on the use of nanoparticles and nanotechnology in the production of various building materials, namely concrete and binders. The article provides historical examples of the use of nanotechnology and the positive effect of nanoparticles on the properties of various materials, which were used long before scientists could explain the origin of the unusual properties of these materials; formulated the need for the emergence of a regulatory framework and construction with improved properties for the construction of unique buildings and structures; the analysis of existing methods for modifying binders and materials based on them is made and proposals for further research in the use of nanoparticles in concrete are presented. The aim of the article is to systematize the results of existing studies that relate to the use of nanoparticles and nanotechnology in the production of a variety of building materials, namely binders and concrete based on them, to formulate the state of the issue and highlight poorly studied areas that hamper the introduction of nanotechnology in the field of concrete production. The studies and results described in the article allow us to draw the following conclusions: the bulk of research is aimed at developing compositions of nanomodified concrete, which have improved properties compared to conventional (normative) concrete. These studies are carried out to determine the potential capabilities of nano-concrete for various purposes. However, there are poorly studied issues related to the search for the optimal manufacturing method and field of application (mass or individual use) of nanoconcrete, as well as environmental risks of using such concrete. From a scientific point of view, further detailed study requires the processes of structure formation of concrete containing nanoparticles and the search for the relationship between the properties, quantity or other characteristics of nanoparticles that are introduced into the concrete and the properties of the directly prepared artificial material.

Keywords: *nanotechnology; nanoparticles; research; concrete; properties; influence*

Вступ. Перші 15 років XXI століття ознаменувалися появою дев'яти найвищих у світі будівель:

– Фінансовий центр Наньцзин Грінленд, Нанкін, Китай, висота – 450 м, 2010 р.;

– Міжнародний комерційний центр, Гонконг, висота – 484 м, 2010 р.;

– Шанхайський всесвітній фінансовий центр, Шанхай, Китай, висота – 492 м, 2008 р.;

– хмарочос Гайбей, Гайбее, Тайвань, висота – 508 м, 2004 р.;

– Міжнародний фінансовий центр, Гуанчжоу, Китай, висота – 437,5 м, 2010–2016 рр.;

– Вежа Свободи, Нью-Йорк, США, висота – 541,3 м, 2013 р.;

– Годинникова королівська вежа, Мекка, Саудівська Аравія, висота – 601 м, 2012 р.;

– Шанхайська вежа, Шанхай, Китай, висота 632 м;

– Бурдж Халіфа, Дубай, ОАЕ, висота 828 м, 2010 р.

Людство намагається зводити як можна вищі будівлі через велику вартість землі

(оренда чи купівля) та скорочення територій, що можуть бути забудовані. При цьому особливий, не схожий на будь-які інші, вигляд таких споруд робить їх візитівкою місць, де вони збудовані. Однак зведення таких будівель стикається з обмеженнями в нормативній галузі (відсутність вимог до будівель вище 100 м) та певними обмеженнями властивостей матеріалів, що застосовуються для їх спорудження.

Індивідуальне будівництво давно вже стало пріоритетом будівельної галузі та вимагає використання новітніх матеріалів і технологій, що задовольняють його потреби. Поліпшення властивостей будівельних матеріалів, удосконалення технологій їх отримання та використання постає метою більшості наукових досліджень.

Аналіз публікацій. Модифікація в'язучих речовин, розширення сфери застосування окремих їх видів, використання відходів промисловості як сировини – основні напрями досліджень, що дозволяють скоротити витрати речовин,

поліпшити їх властивості, зберегти енергетичні, сировинні та інші ресурси.

Серед способів модифікації в'язучих речовин та матеріалів на їх основі можна виділити такі:

1. Використання багатокомпонентних сумішей – гіпсоцементнопуццоланових, гіпсоцементношлакових тощо. Ці суміші досліджували О. В. Волженський, Г. Г. Буличов, Р. В. Іванников, П. І. Боженів та ін.

2. Механічна активація в'язучих речовин. Дослідження таких процесів виконували Л. Й. Дворкін, В. М. Вировий, І. В. Барабаш, М. А. Саницький, А. В. Ферронська та ін.

3. Дисперсне армування в'язучих речовин та матеріалів. Використання в якості армуючого компоненту металевих, полімерних, базальтових та інших типів волокон дозволяє покращити різноманітні властивості матеріалів (підвищити міцність, зменшити деформації тощо). Серед дослідників цього питання можна виділити А. А. Пашенко, В. П. Сербіна, Ф. Н. Рабіновича, В. М. Дерев'янка, К. Л. Бірюковича та інших.

4. Використання добавок різноманітного походження в матеріалах на основі неорганічних в'язучих речовин. Розвитком цього напрямку займалися П. В. Кривенко, А. В. Ушерів-Маршак, Р. Ф. Рунова, К. О. Пушкарьова та багато інших.

Разом із тим поява наночастинок зумовила отримання наносистем, що мають модифікацію структури та властивостей речовини чи матеріалу на нанорівні.

Упровадження нанотехнологій у сферу будівництва дозволило збудувати такі об'єкти як церква зі збірного залізобетону та скла у Римі. Вигнуті конструкції цієї споруди нагадують пелюстки квітки. Особливість конструкції полягає в тому, що стіни будівлі білосніжні й самоочищаються. Такий ефект був досягнутий завдяки додаванню до складу цементу наночастинок діоксиду титану.

Аналогічний цемент був використаний у будівництві пам'ятника жертвам Голокосту

в Берліні в 2005 році. Великий Національний театр у Пекіні, скляна поверхня купола якого завжди прозора, тому що покрита тонкою плівкою з каталізатора діоксиду титану – це ще один експериментальний проект. Аналогічні рішення використані у стінах Шанхайського музею науки та технологій. Вони дозволяють зберігати тепло взимку і прохолоду влітку завдяки нанопористому покриттю [1].

Використання сучасних нанотехнологічних рішень має більш глибоке коріння з історичного боку. Так, існування деяких артефактів та їх особливих властивостей не мало пояснення до систематизації та відкриття наночастинок. Зокрема, кубок Лікурга – витвір складувів Стародавнього Риму датований приблизно IV століттям до н. е. Кубок змінює свій колір залежно від освітлення.

Спочатку вчені мали припущення, що причина такого оптичного ефекту – колоїдне золото. Пізніше, з удосконаленням науково-дослідницького обладнання, вчені за допомогою електронного мікроскопа та рентгенограм відкрили частинки золота та срібла розмірами приблизно 50...100 нм. Саме ці частинки і відповідають за незвичайне забарвлення стародавнього артефакту.

У 800 році до н. е. індіанці майя відкрили антикорозійний пігмент синього кольору, відомого як Maya Blue. Для створення першого стабільного органічного пігменту стародавні майя застосували навички в галузі органічної хімії і мінералогії. Унікальний колір і стабільність Maya Blue можна пояснити на основі сучасних уявлень про нанотехнології, згідно з якими барвник кольору індиго заповнює заглиблення на поверхні палигорськітової глини, утворюючи органічні чи неорганічні комплекси з водневими зв'язками.

Дамаські сталеві мечі з Близького Сходу, виготовлені у період від 1700 р. до н. е. до 300 р. до н. е., відомі своєю вражаючою силою, вигадливою структурою поверхні та надзвичайно гострим лезом. Сучасні вчені, використовуючи методи сучасного матеріалознавства та методи

нанотехнологій, розгадали секрети дамаської сталі. Пітер Пауфлер та його колеги з Дрезденського технічного університету дослідили під електронним мікроскопом структуру дамаського меча і виявили у лезі вуглецеві нанотрубки і нановолокна з цементиту (карбиду заліза). Саме наявність нанотрубок у м'яких шарах сталі пояснює особливості дамаської сталі – міцність, гнучкість, гостроту леза. Усі ці факти та багато інших прикладів історичного застосування нанотехнологій описує у своїй книзі Ю. А. Ткаченко [2].

Зрозуміло, що подальше поліпшення якості продукції підприємств будівельних матеріалів можливе за використання нанодобавок та наномодифікаторів, які більш глибоко регулюють механізми структуроутворення [3].

Мета статі – систематизація результатів досліджень щодо застосування наночастинок та нанотехнологій у виробництві різноманітних будівельних матеріалів, зокрема, бетонів та в'язучих, для опису стану питання та виявлення маловивчених ділянок, що стримують упровадження нанотехнологій у сфері бетонного виробництва.

Виклад матеріалу. Ринок розвитку нанотехнологій має такі дані щодо світових інвестицій у цю галузь: близько третини всіх світових інвестицій припадає на США. Інші провідні гравці – Європейський союз (приблизно 15 %) та Японія (20 %). Дослідження у сфері нанотехнологій активно ведуться також у Росії, Україні, Австралії, Канаді, Китаї, Південній Кореї, Ізраїлі, Сінгапурі і Тайвані. Прогнози експертів щодо створення нової галузі економіки через 10...15 років з обігом у 15 млрд доларів і близько 2 млн робочих місць досить оптимістичні. Виходячи з підрахунків, прогнозована вартість нанопродукції в світовому промисловому виробництві має становити понад 1 трлн доларів [4].

Разом із тим, лідером у Європі за кількістю патентів у сфері нанотехнологій стала Німеччина (3 730 патентів за період з 2000 по 2010 р.), друге та третє місця

належать Франції та Великій Британії (998 та 942 патенти відповідно) [5].

Розлогий аналіз програм щодо розвитку наоіндустрії наведено у праці [6]. Автор зазначає, що в Україні у 2009 р. затверджено Концепцію Державної цільової науково-технічної програми «Нанотехно-логії та наноматеріали» на 2010–2014 роки, яка мала на меті створення сучасної наоіндустрії як необхідної умови становлення інноваційного суспільства. Програма передбачала підтримку держави у формуванні інфраструктури для проведення ефективних фундаментальних досліджень у нанотехнологіях, координацію робіт із створення і застосування нанотехнологій та наноматеріалів, а також розроблення нових підходів до підготовки кваліфікованих спеціалістів із питань вирішення наукових, технологічних і виробничих проблем нанотехнологій.

Метою програми було створення наоіндустрії шляхом забезпечення розвитку її промислово-технологічної інфраструктури, використання результатів фундаментальних та прикладних досліджень, а також підготовки висококваліфікованих наукових та інженерних кадрів.

Сучасні науково-дослідницькі роботи [7] зі створення будівельних наноматеріалів спрямовані на отримання високо-технологічних конструкційних матеріалів; функціональних тонких плівок та покриттів; нових багатофункціональних матеріалів та компонентів; нових датчиків та приладів. Усі ці роботи нерозривно пов'язані з вивченням здатності та вмінням керувати процесами структуроутворення для отримання різноманітних матеріалів на рівні елементарних частинок, з яких цей матеріал складається [8].

Нанотехнології в бетонознавстві реалізуються шляхом керування структуроутворенням за двома напрямками: введення первинних нанорозмірних спеціально синтезованих компонентів (первинних наноматеріалів) або безпосередній синтез наномасштабних

об'єктів як в об'ємі матеріалу, так і на межі розподілу фаз [9].

Дослідження, що мають на меті створення та розвиток нанотехнологій, які сприятимуть розвитку технології бетону, можна поділити за такими напрямками [8]:

- виробництво речовин вуглецевих наноматеріалів із заданими структурними та фізичними характеристиками;

- виробництво речовин вуглецевих наноматеріалів із характеристиками, що можуть бути стабільно прогнозовані за мінімальної вартості кінцевого продукту;

- виробництво наноматеріалів, що містять кремнезем, а також високоміцних вуглецевих матеріалів у вигляді волокон;

- дослідження морфологічних та структурних змін у продуктах гідратації цементу, модифікованого вуглецевими наноматеріалами, для цілеспрямованого впливу на формування структури та властивостей цементного каменю і бетону;

- розроблення технології та створення бетонів різної структури з підвищеними показниками міцності та експлуатаційними властивостями;

- створення будівельних матеріалів зі спеціальними властивостями;

- розвиток наукових баз із формування технологічних принципів виробництва бетонів, що мають у своєму складі вуглецеві наноматеріали.

Практичні дослідження щодо використання наночастинок у бетонах свідчать про зростання міцності бетону більше ніж удвічі, морозостійкості – більше ніж на 50 %, зменшення ваги конструкцій, виготовлених із таких бетонів. Розроблено матеріали для відновлення залізобетонних конструкцій, що заповнюють мікропори та мікротріщини, а також полімеризуються, відновлюючи міцність конструкції; можуть вступати в реакцію з корозійними шарами, що утворилися в конструкції, та відновлювати зчеплення бетону з арматурою [10].

Зменшення в'язкості цементного тіста на 48 % та поліпшення фізико-механічних характеристик бетону за рахунок ущільнення структури цементного бетону з

додаванням вуглецевих нанотрубок у складі комплексної добавки описане у праці [11].

Ефективність приготування високо-рухливих високоміцних бетонних сумішей на дрібних пісках без великих витрат цементу шляхом модифікації вітчизняних суперпластифікаторів нанокластерами вуглецю фулероїдного типу підтверджено дослідженнями [12]. Ці дослідження особливо актуальні, зважаючи на те, що основна маса піску, який використовується в нашій країні у виробництві бетонних сумішей, це пісок із модулем крупності 1,2...1,5.

Отримання дрібнозернистого бетону з класом за міцністю В45 можливе у разі додавання до складу нанокремнезему, метакаоліну та білої сажі. Такі складові бетонної суміші забезпечують утворення щільної структури та підвищення гідратаційної активності компонентів, а також довговічності, та поліпшення показників міцності при стиску [13].

Позитивний досвід використання багатошарових нанотрубок отримано під час виготовлення газобетону автоклавного твердіння, пінобетону, а також дослідження структуроутворення та властивостей легких бетонів [14–19]. Результати досліджень мікроструктури пінобетону показують, що додавання вуглецевих нанотрубок стабілізує його структуру та усуває перфорацію стінок пор. При цьому міцність зростає в 1,7 раза, а теплопровідність знижується на 20 % [19].

Доцільність використання нанобетону доведено в Нідерландах під час виготовлення паль для огороження узбережжя каналу. Проект показав, що вартість 1 м³ нанобетону перевищила вартість звичайного бетону класу В65 в 4 рази. Однак у зв'язку зі зменшенням поперечного перерізу конструкції, нанобетону було витрачено лише 35 % від об'єму звичайного бетону.

Таким чином, вартість проекту залишилась незмінною а кількість витраченого матеріалу суттєво знижена, що дозволяє економити ресурси (сировину). Аналогічні показники були зареєстровані в Японії, де на будівництві пішохідного мосту

кількість витраченого нанобетону склала 20 % порівняно з витратами звичайного важкого бетону, а загальна вартість мосту виявилася на 5 % нижчого, ніж вартість мосту зі звичайного бетону [20].

Узагальнюючи вищенаведене, можна зробити такі **висновки**: основна маса досліджень, що проводяться зараз, направлена на розроблення складів наномодифікованих бетонів, що мають поліпшені властивості порівняно зі звичайними бетонами. Мета таких досліджень – виявлення потенційних можливостей нанобетону різного призначення.

Маловивченими залишаються питання, пов'язані з пошуком найбільш оптимального способу виготовлення та галузі застосування (масове чи індивідуальне) нанобетону, а також екологічних ризиків застосування нанобетону. З наукової точки зору подальшого детального вивчення потребують питання структурування бетону, що містить наночастинки, та пошук взаємозв'язку між властивостями, кількістю або іншими характеристиками наночастинок, що вводяться до складу бетону, та властивостями безпосередньо готового штучного матеріалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дерев'янюк В. Н., Кушнерова Л. О., Мороз Л. В., Мороз В. Ю. Технології та використання наносистем у виробництві будівельних матеріалів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди* : зб. наук. пр. 2020. Вип. 38. С. 140–147.
2. Ткаченко Ю. А. Дивовижний світ нанотехнологій. Ефективний курс із фізики для учнів 9 класу : навч. посіб. Суми : Вид-во СумДПУ ім. А. С. Макаренка, 2016. 111 с.
3. Попов А. И., Толчков Ю. Н., Михалева З. А. Перспективы инновационного развития отрасли строительных материалов на основе использования наномодифицирующих добавок. *Вестник Волгоградского государственного университета. Инновационная деятельность*. 2013. Серия 10. № 1 (8). С. 107–111.
4. Аналіз сучасних тенденцій використання нанотехнологій в екологічній та інших сферах діяльності [Електронний ресурс]. URL: <http://eco.com.ua/content/analiz-suchasnikh-tendentsii-vikoristannya-nanotekhnologii-u-ekologichnii-ta-inshikh-sferakh>
5. Саліхова О. Б. Державна політика у сфері нанонауки та нанотехнологій в Україні з урахуванням орієнтирів ЄС [Електронний ресурс]. URL: http://eip.org.ua/docs/EP_14_3_121_uk.pdf
6. Наноіндустрія як найважливіша умова становлення інноваційного суспільства в Україні [Електронний ресурс]. URL: http://ndipzir.org.ua/wp-content/uploads/2017/07/Klimova/3_2.pdf
7. Фаликман В. Р. Нанотехнологии бетон: реальность и перспективы. *Евробетон*. 2010. № 3 (3). С. 6–11.
8. Жданок С. А., Хрусталева Б. М., Батяновский Э. И., Леонович С. И. Нанотехнологии в строительном материаловедении : реальность и перспективы. *Вестник БНТУ*. 2009. № 3. С. 5–23.
9. Марущак У. Д. Концепція наномодифікування цементуючих систем для швидкотверднучих високофункціональних бетонів. [Електронний ресурс]. URL: <http://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/4131/23199.pdf>
10. Карпович О. Н. Разработка и внедрение достижений нанотехнологий – главное и перспективное направление в развитии строительной индустрии и создании инновационных материалов XXI века. *Вісник Донбаської національної академії будівництва та архітектури*. 2013. № 3 (101). С. 22–24.
11. Яковлев Г. И. Модификация цементного бетона комплексными добавками на основе эфиров поликарбонилата, углеродных нанотрубок и микрокремнезема. *Строительные материалы*. 2015. № 2. С. 40–47.
12. Ваучский М. Н. Нанотехнологии в пластификации бетонных смесей. *Вестник строительного комплекса*. № 56. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.vestnik.info/archive/22/article329.html>
13. Прудков Е. Н., Закуражнов М. С. Многокомпонентный наномодифицированный мелкозернистый бетон. *Репозитарий БНТУ* [Електронний ресурс]. URL: <https://docviewer.yandex.ua>
14. Гришина А. Н., Королев Е. В. Эффективность модифицирования цементных композитов наноразмерными гидросиликатами бария. *Строительные материалы*. 2015. № 2. С. 72–76.
15. Мирошников Е. В., Строкова В. В., Череватова А. В., Павленко Н. В. Наноструктурированное перлитовое вяжущее и пенобетон на его основе. *Строительные материалы*. 2010. № 9. С. 105–106.
16. Яковлев Г. И. Применение дисперсий многослойных углеродных нанотрубок при производстве силикатного газобетона автоклавного твердения. *Строительные материалы*. 2013. № 2. С. 25–29.

17. Королев Е. В., Гришина А. Н. Синтез и исследование наноразмерной добавки для повышения устойчивости пен на синтетических пенообразователях для пенобетонов. *Строительные материалы*. 2013. № 2. С. 30–33.
18. Яковлев Г. И. Комплексная добавка на основе углеродных нанотрубок и микрокремнезема для модификации газосиликата автоклавного твердения. *Строительные материалы*. 2014. № 1–2. С. 3–7.
19. Яковлев Г. И. Нанотехнологии в строительстве [Электронный ресурс]. URL: <http://www.econf.rae.ru/pdf/2010/11/2afe4567e1.pdf>
20. Шуйский А. И., Явруян Х. С., Торлина Е. А., Филонов И. А., Фесенко Д. А. Настоящее и будущее применения нанотехнологий в производстве строительных материалов. *Вестник МГСУ*. 2012. № 12. С. 154–160.

REFERENCES

- Derevianko V.N., Kushnierova L.O., Moroz L.V. and Moroz V.Yu. *Tekhnologii ta vykorystannia nanosystem u vyrobnytstvi budivelnnykh materialiv* [Technologies and use of nanosystems in the production of building materials]. *Resursoekonomni materialy, konstrukcii, budivli ta sporudi : zb. nauk. pr.* [Resource-saving materials, structures, buildings and structures : coll. sc. works]. 2020, vol. 38, pp. 140–147. (in Ukrainian).
- Tkachenko Yu.A. *Dyvovyzhnyi svit nanotekhnologii. Efektyvnyi kurs z fizyky dlia uchniv 9 klasu : navchalnyi posibnyk* [The wonderful world of nanotechnology. An effective course in physics for 9th grade students : textbook]. Sumy : SumDPU imeni A. S. Makarenka Publ., 2016, 111 p. (in Ukrainian).
- Popov A.I., Tolchkov Yu.N. and Mykhaleva Z.A. *Perspektyvy innovatsionnoho rozvytyia otrasly stroytelnykh materialov na osnove yspolzovaniya nanomodifytsyruuiushchykh dobavok* [Prospects for the innovative development of the building materials industry based on the use of nano-modifying additives]. *Vestnyk Volhogradskoho hosudarstvennoho unyversyteta. Innovatsionnaia deiatelnost* [Bulletin of the Volgograd State University. Innovative activity]. 2013, series 10, no. 1 (8), pp. 107–111. (in Russian).
- Analiz suchasnykh tendentsii vykorystannia nanotekhnolohyi u ekolohichnii ta inshykh sferakh diialnosti* [Analysis of current trends in the use of nanotechnology in environmental and other fields]. [Elektronnyi resurs]. URL: <http://eco.com.ua/content/analiz-suchasnykh-tendentsii-vikorystannia-nanotekhnologii-u-ekolohichnii-ta-inshykh-sferakh>
- Salikhova O.B. *Derzhavna polityka u sferi nanonauky ta nanotekhnologii v Ukraini z urakhuvanniam oriientyriy YeS* [State policy in the field of nanoscience and nanotechnologies in Ukraine taking into account the EU guidelines]. [Elektronnyi resurs]. URL: http://eip.org.ua/docs/EP_14_3_121_uk.pdf
- Nanoindustriia yak naivazhlyvisha umova stanovlennia innovatsiinoho suspilstva v Ukraini* [Nanoindustry as the most important condition for the formation of an innovative society in Ukraine]. [Elektronnyi resurs]. URL: http://ndipzir.org.ua/wp-content/uploads/2017/07/Klimova/3_2.pdf
- Falykman V.R. *Nanotekhnolohyy beton : realnost y perspektyvy* [Nanotechnology concrete : reality and prospects]. *Evroboton* [Euro concrete]. 2010, no. 3 (3), pp. 6–11. (in Russian).
- Zhdanok S.A., Khrustalev B.M., Batiannovskiy E.I. and Leonovych S.I. *Nanotekhnolohyy v stroytelnom materialovedenyy : realnost y perspektyvy* [Nanotechnology in building materials science : reality and prospects]. *Vestnyk BNTU* [BNTU Bulletin]. 2009, no. 3, pp. 5–23. (in Russian).
- Marushchak U.D. *Kontsepsiia nanomodifikuvannya tsementuiuchykh system dlia shvydkotverdnuchykh vysokofunktsionalnykh betoniv* [The concept of nanomodification of cementing systems for fast-setting high-performance concrete]. [Elektronnyi resurs]. URL: <http://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2017/jun/4131/23199.pdf>
- Karpovich O.N. *Razrabotka i vnedrenie dostizheniy nanotekhnologii – glavnoe i perspektivnoe napravlenie v razvittii stroitelnoy industrii i sozdaniy innovatsionnykh materialov XXI veka* [Development and implementation of nanotechnology achievements is the main and promising direction in the development of the construction industry and the creation of innovative materials of the 21st century]. *VIsnik donbaskoYi natsionalnoYi akademiiYi budivnitstva ta arhitekturi* [Bulletin of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2013, no. 3 (101), pp. 22–24. (in Russian).
- Yakovlev G.I. *Modifikatsiya tsementnogo betona kompleksnyimi dobavkami na osnove efirov polikarboksilata, uglerodnykh nanotrubok i mikrokremsnezema* [Modification of cement concrete with complex additives based on polycarboxylate ethers, carbon nanotubes and microsilica]. *Stroitelnyie materialy* [Construction Materials]. 2015, no. 2, pp. 40–47. (in Russian).
- Vauchskiy M.N. *Nanotekhnologii v plastifikatsii betonnykh smesey* [Nanotechnology in the plasticization of concrete mixes]. *Vestnik stroitel'nogo kompleksa* [Building Complex Bulletin]. No. 56. [Elektronnyi resurs]. URL: <http://www.vestnik.info/archive/22/article329.html>. (in Russian).
- Prudkov E.N. and Zakurazhnov M.S. *Mnogokomponentnyy nanomodifitsirovannyiy melkozernistyiy beton* [Multicomponent nano-modified fine-grained concrete]. *Repozitariy BNTU* [Репозитарий БНТУ]. [Elektronnyi resurs]. URL: <https://docviewer.yandex.ua>. (in Russian).

14. Grishina A.N. and Korolev E.V. *Effektivnost modifitsirovaniya tsementnykh kompozitov nanorazmernymi gidrosilikatami bariya* [Efficiency of modification of cement composites with nanosized barium hydrosilicates]. *Stroitelnyie materialy* [Construction Materials]. 2015, no. 2, pp. 72-76. (in Russian).
15. Miroshnikov E.V., Strokova V.V., Cherevatova A.V. and Pavlenko N.V. *Nanostrukturirovannoe perlitovoe vyazhushee i penobeton na ego osnove* [Nanostructured perlite binder and foam concrete based on it]. *Stroitelnyie materialy* [Construction Materials]. 2010, no. 9, pp. 105–106. (in Russian).
16. Yakovlev G.I. *Primenenie dispersiy mnogosloynnykh uglerodnykh nanotrubok pri proizvodstve silikatnogo gazobetona avtoklavnogo tverdeniya* [Application of dispersions of multilayer carbon nanotubes in the production of autoclaved silicate aerated concrete]. *Stroitelnyie materialy* [Construction Materials]. 2013, no. 2, pp. 25–29. (in Russian).
17. Korolev E.V. and Grishina A.N. *Sintez i issledovanie nanorazmernoy dobavki dlya povyisheniya ustoychivosti pen na sinteticheskikh penoobrazovatelyah dlya penobetonov* [Synthesis and research of a nanosized additive to increase the stability of foams on synthetic foaming agents for foam concrete]. *Stroitelnyie materialy* [Construction Materials]. 2013, no. 2, pp. 30–33. (in Russian).
18. Yakovlev G.I. *Kompleksnaya dobavka na osnove uglerodnykh nanotrubok i mikroremnezema dlya modifikatsii gazosilikata avtoklavnogo tverdeniya* [Complex additive based on carbon nanotubes and microsilica for the modification of autoclave hardened gas silicate]. *Stroitelnyie materialy* [Construction Materials]. 2014, no. 1–2, pp. 3–7. (in Russian).
19. Yakovlev G.I. *Nanotehnologii v stroitelstve* [Nanotechnology in construction]. [Elektronniy resurs]. URL: <http://www.econf.rae.ru/pdf/2010/11/2afe4567e1.pdf> (in Russian).
20. Shuyskiy A.I., Yavruyan H.S., Torlina E.A., Filonov I.A. and Fesenko D.A. *Nastoyashee i budushee primeneniya nanotehnologiy v proizvodstve stroitelnykh materialov* [Present and future applications of nanotechnology in the production of building materials]. *Vestnik MGSU* [Bulletin of MSCU]. 2012, no. 12, pp. 154–160. (in Russian).

Надійшла до редакції: 12.07.20 р.

УДК 539.216.2: 537.52

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.290920.53.669

КІНЕТИКА РОСТУ, ФАЗОВО-СТРУКТУРНИЙ СТАН ТА ТВЕРДІСТЬ МІКРОДУГОВИХ ОКСИДНИХ ПОКРИТТІВ НА ЛИВАРНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВАХ АЛ2, АЛ9, АЛ25

СУББОТИНА В. В.¹, канд. техн. наук, доц.,БІЛОЗЕРОВ В. В.², канд. техн. наук, доц.,СОБОЛЬ О. В.^{3*}, докт. ф.-м. наук, проф.

¹ Кафедра матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (067) 933-20-68, e-mail: subbotina.valeri@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3882-0368

² Кафедра матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (067) 575-29-14, e-mail: belozerov.valerii@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7623-3658

^{3*} Кафедра матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, 61002, Харків, Україна, тел. +38 (099) 772-18-07, e-mail: sool@kpi.kharkov.ua, ORCID ID: 0000-0002-4497-4419

Анотація. Мета дослідження – вивчення впливу умов електролізу при мікродуговому оксидуванні в лужно-силікатному електроліті на закономірності кінетики росту, структурно-фазового стану й твердість МДО-покриттів на ливарних сплавах різного складу. **Методологія.** Для досліджень застосовано методики мікродугового оксидування з різним складом лужно-силікатних електролітів і за різних щільностей струму. Дослідження формованої поверхні проводилося методом растрової електронної мікроскопії, фазово-структурний аналіз – рентгендифракційним методом, дані якого зіставлялися з результатами вимірювання мікротвердості. **Основні результати.** Визначено можливість формування високощільних МДО-покриттів на ливарних сплавах з умістом кремнію 9...13 %. Виявлено закономірності кінетики зростання МДО-покриттів на ливарних сплавах АЛ2, АЛ9 і АЛ25 залежно від щільності струму й складу електроліту. Показано, що фазовий склад МДО-покриттів на ливарних сплавах включає: γ - Al_2O_3 , α - Al_2O_3 і фаза муліт ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$). Початкова стадія росту покриття характеризується переважним формуванням γ - Al_2O_3 і $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ фаз. У разі збільшення тривалості оксидування відбувається формування фази α - Al_2O_3 , вміст якої не перевищує 20 % за найбільшої (120 хв) тривалості оксидування. Твердість покриттів підвищується зі збільшенням вмісту α - Al_2O_3 і досягає величини 17 000 МПа за найбільшого вмісту (18 %). **Наукова новизна.** Установлено, що за тривалості процесу понад 60 хвилин кінетичні залежності зміни товщини покриттів від часу МДО-процесу мають характер близький до лінійного зі швидкістю росту близько 0,5 мкм/хв. Така швидкість більша, ніж удічі нижча, ніж швидкість росту покриттів на деформованих алюмінієвих сплавах (наприклад, Д16 і АМг6) в аналогічних умовах оксидування. При часі формування менше 60 хвилин швидкість росту залежить як від типу сплаву, так і складу електроліту. Найбільша швидкість росту 0,7 мкм/хв досягається на сплаві АЛ25 в електроліті 2 г/л КОН + 12 г/л Na_2SiO_3 . Виявлено зміну періоду ґратки γ - Al_2O_3 фази зі збільшенням тривалості оксидування, від значень менше табличних (0,790 нм) при часі оксидування менше 60 хвилин до величини, що значно перевищує табличне при великому часі оксидування (понад 120 хв). Запропоновано модель, відповідно до якої зменшення періоду ґратки пов'язане із заміщенням іонів Al на Si, а збільшення періоду визначається різною валентністю іонів, замінних, і утворюванням у зв'язку із цим додаткових вакансій. **Практичне застосування.** Проведене дослідження показало можливість формування надтвердого ($HV \approx 17\ 000$ МПа) покриття на ливарному алюмінієвому сплаві, що є умовою забезпечення високої зносостійкості для більшості видів зношування.

Ключові слова: мікродугове оксидування; алюмінієвий сплав; електроліт; щільність струму; товщина покриття; фазовий склад; твердість

КИНЕТИКА РОСТА, ФАЗОВО-СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ И ТВЕРДОСТЬ МИКРОДУГОВЫХ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЛИТЕЙНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ АЛ2, АЛ9, АЛ25

СУББОТИНА В. В.¹, канд. техн. наук, доц.,БЕЛОЗЕРОВ В. В.², канд. техн. наук, доц.,СОБОЛЬ О. В.^{3*}, докт. ф.-м. наук, проф.

¹ Кафедра материаловедения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,

ул. Кирпичева, 2, 61002, Харьков, Украина, тел. +38 (067) 933-20-68, e-mail: subbotina.valeri@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3882-0368

² Кафедра материаловедения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, 61002, Харьков, Украина, тел. +38 (067) 575-2914, e-mail: belozarov.valerii@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7623-3658

^{3*} Кафедра материаловедения, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ул. Кирпичева, 2, 61002, Харьков, Украина, тел. +38 (099) 772-18-07, e-mail: sool@kpi.kharkov.ua, ORCID ID: 0000-0002-4497-4419

Аннотация. *Цель исследования* – изучение влияния условий электролиза при микродуговом окислении в щелочносиликатном электролите на закономерности кинетики роста, структурно-фазового состояния и твердость МДО-покрытий на литейных сплавах разного состава. *Методология.* Для исследований использованы методики микродугового окисления с разным составом щелочносиликатных электролитов и при разных плотностях тока. Исследование формируемой поверхности проводилось методом растровой электронной микроскопии, фазово-структурный анализ – рентгендифракционным методом, данные которого сопоставлялись с результатами измерения микротвердости. *Основные результаты.* Определена возможность формирования высокоплотных МДО-покрытий на литейных сплавах с содержанием кремния 9...13 %. Выявлены закономерности кинетики роста МДО-покрытий на литейных сплавах АЛ2, АЛ9 и АЛ25 в зависимости от плотности тока и состава электролита. Показано, что фазовый состав МДО-покрытий на литейных сплавах включает: γ - Al_2O_3 , α - Al_2O_3 и фаза муллит ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$). Начальная стадия роста покрытия характеризуется преимущественным формированием γ - Al_2O_3 и $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ фаз. При увеличении длительности окисления происходит формирование фазы α - Al_2O_3 , содержание которой не превышает 20 % при наибольшей (120 мин.) длительности окисления. Твердость покрытий повышается с увеличением содержания α - Al_2O_3 и достигает величины 17 000 МПа при наибольшем содержании (18 %). *Научная новизна.* Установлено, что при длительности процесса более 60 минут кинетические зависимости изменения толщины покрытий от времени МДО-процесса имеют характер близкий к линейному со скоростью роста около 0,5 мкм/мин. Такая скорость роста более чем в два раза ниже чем скорость роста покрытий на деформированных алюминиевых сплавах (например, Д16 и АМг6) при аналогичных условиях окисления. При времени формирования меньше 60 минут скорость роста зависит как от типа сплава, так и состава электролита. Наибольшая скорость роста 0,7 мкм/мин. достигается на сплаве АЛ25 в электролите 2 г/л КОН + 12 г/л Na_2SiO_3 . Выявлено изменение периода решетки γ - Al_2O_3 фазы с увеличением длительности окисления, от значений меньше табличных (0,790 нм) при времени окисления менее 60 минут до величины, значительно превышающей табличное при большом времени окисления (более 120 мин). Предложена модель, в соответствии с которой уменьшение периода решетки связано с замещением ионов Al на Si, а увеличение периода определяется разной валентностью замещающих ионов и образованием в связи с этим дополнительных вакансий. *Практическое применение.* Проведенное исследование показало возможность формирования высокотвердого ($HV \approx 17\ 000$ МПа) покрытия на литейном алюминиевом сплаве, что является условием для обеспечения высокой износостойкости при большинстве видов изнашивания.

Ключевые слова: микродуговое окисление; алюминиевый сплав; электролит; плотность тока; толщина покрытия; фазовый состав; твердость

GROWTH KINETICS, PHASE-STRUCTURAL STATE AND HARDNESS OF MICRO-ARC OXIDE COATINGS ON CAST ALUMINUM ALLOYS AL2, AL9, AL25

SUBBOTINA V.V.¹, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
BILOZEROV V.V.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
SOBOL O.V.^{3*}, *Dr. Sc. (Phys.-Math.), Prof.*

¹ Department of Materials Science, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, 2, Kirpichova Str., 61002, Kharkiv, Ukraine, tel. +38 (067) 933-20-68, e-mail: subbotina.valeri@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-3882-0368

² Department of Materials Science, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, 2, Kirpichova Str., 61002, Kharkiv, Ukraine, tel. +38 (067) 575-2914, e-mail: belozarov.valerii@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7623-3658

^{3*} Department of Materials Science, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, 2, Kirpichova Str., 61002, Kharkiv, Ukraine, tel. +38 (099) 772-18-07, e-mail: sool@kpi.kharkov.ua, ORCID ID: 0000-0002-4497-4419

Abstract. Purpose. The aim of the research was to study the effect of electrolysis conditions during microarc oxidation in an alkaline silicate electrolyte on the regularities of the growth kinetics, structural-phase state, and hardness of MAO coatings on casting alloys of different compositions. *Methodology.* To achieve the goal of the research,

microarc oxidation techniques were used with different compositions of alkali silicate electrolytes and at different current densities. The study of the formed surface was carried out by the method of scanning electron microscopy, the phase-structural analysis was carried out by the X-ray diffraction method, the data of which were compared with the results of measuring the microhardness. **Findings.** The possibility of forming high-density MAO coatings on cast alloys with a silicon content of 9...13 % has been determined. The regularities of the kinetics of the growth of MAO coatings on casting alloys AL2, AL9, and AL25 are revealed depending on the current density and the composition of the electrolyte. It is shown that the phase composition of MAO coatings on casting alloys includes: γ -Al₂O₃, α -Al₂O₃ and the mullite phase (3Al₂O₃ • 2SiO₂). The initial stage of coating growth is characterized by the predominant formation of γ -Al₂O₃ and 3Al₂O₃ • 2SiO₂ phases. With an increase in the duration of oxidation, the formation of the α -Al₂O₃ phase occurs, the content of which does not exceed 20 % at the longest (120 min) oxidation duration. The hardness of the coatings increases with an increase in the content of α -Al₂O₃ and reaches 17 000 MPa at the highest content (18 %). **Originality.** It was found that for a process duration of more than 60 minutes, the kinetic dependence of the change in the coating thickness on the time of the MAO process is close to linear with a growth rate of about 0,5 μ m/min. This growth rate is more than two times lower than the growth rate of coatings on deformed aluminum alloys (for example, D16 and AMg6) under similar oxidation conditions. With a formation time of less than 60 minutes, the growth rate depends on both the alloy type and the electrolyte composition. The highest growth rate of 0.7 μ m/min is achieved on the AL25 alloy in electrolysis 2 g/L KOH + 12 g/L Na₂SiO₃. A change in the lattice period of the γ -Al₂O₃ phase with an increase in the oxidation duration was revealed, from values less than the tabulated values (0,790 nm) with an oxidation time of less than 60 minutes to a value significantly higher than the tabulated value with a long oxidation time (more than 120 min). A model is proposed in accordance with which a decrease in the lattice period is associated with the replacement of Al ions by Si, and an increase in the period is determined by the different valences of the replacing ions and the formation of additional vacancies in this connection. **Practical value.** The study has shown the possibility of forming a high-hardness (HV \approx 17 000 MPa) coating on a cast aluminum alloy, which is a condition for ensuring high wear resistance in most types of wear.

Keywords: microarc oxidation; aluminum alloy; electrolyte; current density; coating thickness; phase composition; hardness

Постановка проблеми. Мікродугове оксидування (МДО) – складний багатофакторний процес. Вплив окремих факторів на властивості і якість покриттів досліджується досить широко, при цьому особливу увагу приділяють анодно-катодному режиму МДО-процесу, який забезпечує одержання покриттів із поліпшеними фізико-механічними характеристиками, такими як адгезія, мікротвердість, міцність і зносостійкість [1; 2]. Характеристики МДО-покриттів значною мірою залежать від технологічних режимів, складу і концентрації електролітів та низки інших факторів.

Аналіз публікацій. Наразі технологія МДО найбільш ефективно застосовується для зміцнення поверхонь деталей з алюмінієвих сплавів [3; 4]. Однак, незважаючи на велику кількість публікацій, практично всі з них мають дослідницько-прикладний характер і не пропонують структурно-фазових моделей формування матеріалу оксидного покриття.

Тому в цей час щодо мікроплазмових процесів ще немає цілісної картини, яка описує весь процес МДО, у тому числі й з

погляду структурних змін, що відбуваються [5]. Хоча залежності від режимів для ряду алюмінієвих сплавів описані досить повно [6; 7]. Однак це не стосується високо крем'янистих алюмінієвих сплавів, число праць із мікродугового оксидування яких досить невелике [8], а висновки в них стосовно оптимізації режимів – досить суперечливі [9; 10].

Як основні висновки з отриманих у цих працях результатів необхідно зазначити, що оксидувальна здатність ливарних алюмінієвих сплавів (силумінів) набагато гірша, ніж інших сплавів на алюмінієвій основі [11; 12]. Низька оксидувальна здатність сплавів системи Al – Si, очевидно, пов'язана з більшою кількістю кремнію й характером його розподілення [13]. Так, кремній має низьку електро- і теплопровідність, що не забезпечує швидкого розсіювання теплового імпульсу розряду, а також спричинює низьку рухливість розрядів на оброблюваній поверхні й погіршення її оксидувальної здатності. Після режиму іскріння настає режим мікродугових розрядів, однак кількість мікродуг значно менша в

порівняно, наприклад, з МДО-процесом на деформованих алюмінієвих сплавах (Д16, АК6) [14], що утруднює перебіг процесу в мікродуговому режимі.

Однак збільшення сфер використання ливарних алюмінієвих сплавів у машинобудуванні (що відбувається в наш час завдяки відмінній ливарній здатності, низькому коефіцієнту теплового розширення, високому співвідношенню міцності до маси для таких сплавів) вимагає вирішення основних проблем таких сплавів шляхом підвищення твердості поверхні й збільшення корозійної стійкості. Для цього одним із найбільш перспективних методів постає МДО-технологія. Тому її розвиток для таких сплавів – дуже актуальне питання.

Мета статті – вивчення впливу умов електролізу при мікродуговому оксидуванні в лужно-силікатному електроліті на закономірності кінетики росту, структурно-фазового стану і твердість МДО-покриттів на ливарних сплавах різного складу.

У зв'язку із цим необхідно було виконати такі завдання:

- вивчити вплив типу сплаву і складу лужно-силікатного електроліту на кінетику росту МДО-покриттів на ливарних сплавах;
- установити залежність кінетики росту покриття від щільності струму;
- вивчити вплив умов електролізу на фазово-структурний стан покриттів і період гратки γ - Al_2O_3 фази;
- визначити вплив фазово-структурного стану на твердість покриттів.

Методика дослідження. Дослідження проводилися на алюмінієвих ливарних сплавах АЛ2, АЛ9, АЛ25 різного складу. Хімічний склад сплавів наведено в таблиці 1.

Мікродугове оксидування проводили у ванні об'ємом 100 л. Під час МДО-процесу забезпечували охолодження й барботування електроліту [15]. Корпус ванни використовували як протиелектрод. Застосовували джерело живлення конденсаторного типу потужністю 40 кВт, оксидування проводили в анодно-катодному режимі. Середнє значення напруги становило 380 В. Для виходу процесу на

стадію мікродугових розрядів використовували щільність струму 13...30 А/дм².

Таблиця 1

Хімічний склад ливарних сплавів АЛ2, АЛ9, АЛ25

Легувальні компоненти, %	Тип сплаву		
	АЛ2	АЛ9	АЛ25
Al	Основний	Основний	Основний
Si	10...13	6...8	11...13
Fe	1,0	1,0	0,8
Mg	–	0,2...0,4	0,8...1,3
Cu	0,8	0,2	1,5... 3,0
Ni	–	–	0,8...1,3
Zn	0,3	0,3	0,5
Mn	0,5	0,5	0,6
Sn	–	0,01	–

Найбільш ефективний електроліт для мікроплазмового оксидування алюмінієвих сплавів – лужно-силікатний електроліт, який має високу екологічність, низьку вартість, що дозволяє утворювати основи шпінелей з високою твердістю і хімічною інертністю [15; 16]. Тому для формування МДО-покриттів використовувалися лужно-силікатні електроліти трьох типів, склад яких вибирали відповідно до результатів попередніх досліджень [15; 16]. Для приготування електролітів використовували їдке калі КОН, натрієве рідке скло Na_2SiO_3 та дистильовану воду. Склад електролітів наведено в таблиці 2.

МДО-процес проводили в лужно-силікатному електроліті різного складу на установці конденсаторного типу в анодно-катодному режимі.

Фазовий склад МДО-покриттів визначали за результатами рентгенофазового аналізу. Дослідження проводили на установці ДРОН-3 (Буревісник, Росія) у монохроматизованому $\text{K}\alpha$ -Cu випромінюванні. Дифракційні спектри знімали за схемою Бреґга – Брентано на відбиття. Знімання здійснювали як у безперервному, так і в поточковому режимі із кроком $2\theta = 0,1^\circ$. Мінімальна виявлюваність структурних складових близько 1 об. %. Така точність виявлення

визначена шляхом порівняння реперних ліній фаз із базовими сумішами.

Для проведення кількісного фазового аналізу застосовано метод еталонних сумішей [17]. Для цього побудовано градувальні графіки залежності інтенсивностей ліній порівняння від складу суміші.

Для дослідження рельєфу

використовували растрову електронну мікроскопію на установці РЕМ МА 101

Товщину покриття визначалася на вихровому товщиномірі ВТ-10 НЦ. Похибка у вимірюванні товщини покриття становить не більше 5 % за найменшої товщини покриття (близько 10 мкм). Мікротвердість визначали на приладі ПМТ-3.

Таблиця 2

Склад електролітів і параметри МДО-процесу

№№ з/п	Склад електроліту, г/л		Щільність струму, А/дм ²	Тривалість процесу, хв	рН	ρ, Ом/см
	КОН	Na ₂ SiO ₃				
1	1	6	13...20	30...180	11,60	254
2	2	6	13...20	30...180	12,14	130
3	2	12	13...20	30...180	11,90	150

Результати досліджень. Виходили з перспектив подальшого застосування ливарних матеріалів для виготовлення деталей двигунів, де потрібна висока адгезійна міцність і малі допуски зміни розмірів, тому максимальна товщина

покриттів не перевищувала 150 мкм. Загальний вигляд поверхні та бічного перетину МДО-покриття на ливарних сплавах, які досліджуються, наведено на рисунку 1.

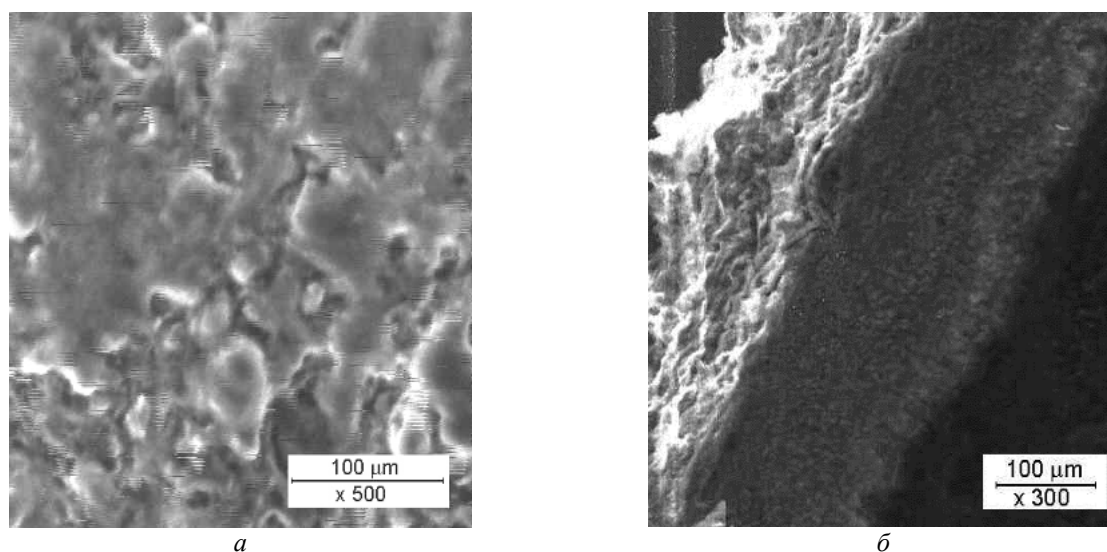


Рис. 1. РЕМ-знімки ливарного сплаву АЛ9 після мікродугового оксидування в електроліті № 2 протягом 2 годин: а – загальний вигляд поверхні; б – бічний перетин

Як видно із наведених на рисунку 1 РЕМ-знімків, на поверхні після МДО-оброблення формуються оплавлені ділянки з характерною неоднорідністю 10...15 мкм по глибині. Це технічний шар, який віддаляється при доведенні деталі із МДО-покриттям. Як видно з РЕМ-знімка бічного

перетину (рис. 1 б), базовий шар покриття щільний з одиночними малими порами розміром до 5 мкм. Як показали наші дослідження така, структура покриттів властива для досліджених у роботі МДО-покриттів на ливарних сплавах. Однак товщина покриттів за однакових режимів

оброблення відрізнялася для різних сплавів і використовуваних електролітів.

У зв'язку із цим були досліджені кінетичні характеристики росту базового шару покриття для трьох типів електролітів на різних типах ливарних сплавів.

Установлено, що залежності товщини покриттів від часу МДО-процесу близькі до лінійних за тривалості процесу понад 60 хв. За меншої тривалості МДО-процесу спостерігається нелінійність залежності товщини покриття від часу МДО-процесу, що можна пояснити впливом домішкового складу сплаву (типу сплаву) на МДО-процес.

Швидкість формування оксидних покриттів на ливарних сплавах за тривалості процесу понад 60 хв близька до 0,5 мкм/хв, що більш ніж удвічі нижча, ніж на деформованих сплавах (Д16, АМг6 і ін. [18]).

На рисунку 2 наведено порівняльні гістограми кінетики нарощування покриттів на ливарних сплавах АЛ2, АЛ9 і АЛ25 в електролітах трьох типів (1 г/л КОН + 6 г/л Na_2SiO_3 , 2 г/л КОН + 6 г/л Na_2SiO_3 і 2 г/л КОН + 12 г/л Na_2SiO_3) за часом процесу 60, 120 і 180 хв.

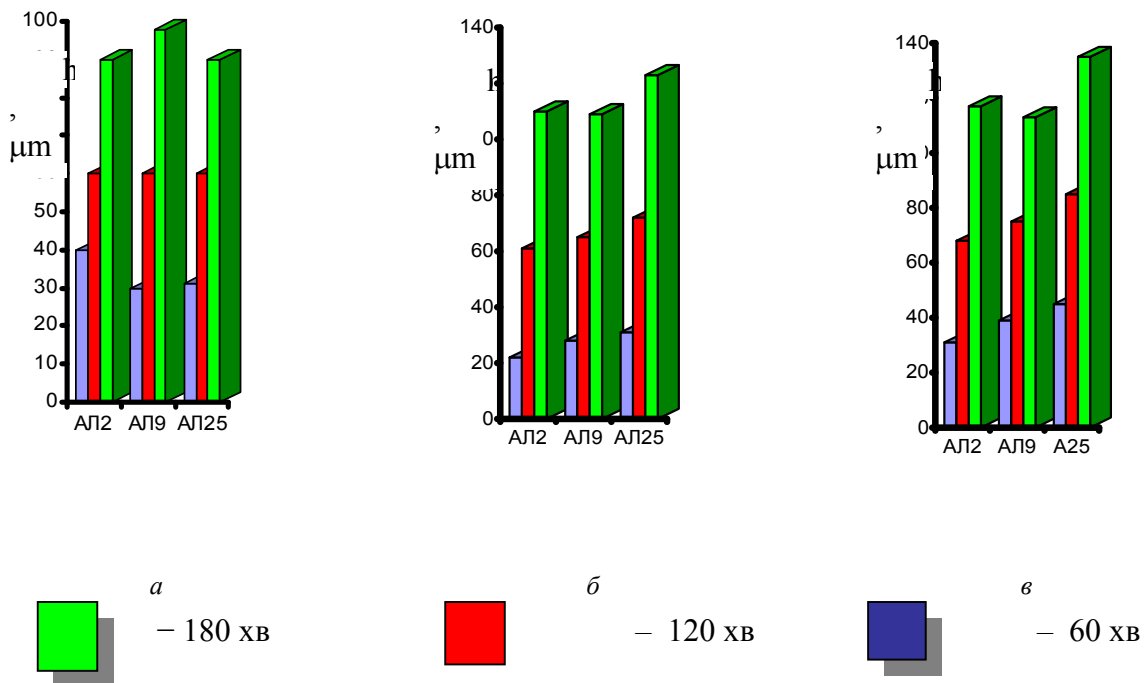


Рис. 2. Кінетика нарощування МДО-покриття на сплавах АЛ2, АЛ9 і АЛ25 залежно від типу електроліту та часу МДО-процесу: а – електроліт 1 г/л КОН + 6 г/л Na_2SiO_3 ; б – електроліт 2 г/л КОН + 6 г/л Na_2SiO_3 ; в – електроліт 2 г/л КОН + 12 г/л Na_2SiO_3

Видно, що для всіх типів сплавів товщина понад 80 мкм досягається тільки за тривалості процесу не менше 120 хв. Найбільша товщина (близько 150 мкм) досягається тільки в електроліті з більшим питомим вмістом рідкого скла (2 г/л КОН + 12 г/л Na_2SiO_3).

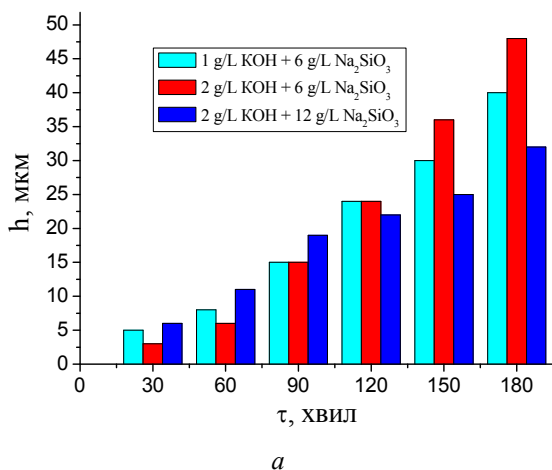
Для сплаву АЛ2 на початковому етапі формування (до 60 хв) найбільша товщина (а, відповідно, і швидкість зростання $v = 0,65$ мкм/хв) спостерігається в

електроліті першого типу (табл. 2), що видно з рисунка 2 а. Для сплавів типу АЛ9 і АЛ25 найбільша швидкість зростання (близько 0,7 мкм/хв) властива МДО-покриттям за їх формування в електроліті з найбільшим вмістом рідкого скла (2 г/л КОН + 12 г/л Na_2SiO_3).

Причиною цього, імовірно, різний вихідний елементний склад цих сплавів: в АЛ2 – найбільший вміст Si, а в сплаві АЛ25 крім великого вмісту кремнію,

присутній до 3 % Си, що значно впливає на кінетику процесу.

Важливим технологічним параметром, що визначає швидкість росту покриття, постає щільність потужності струму [5]. Аналіз впливу цього параметра детально проведений на прикладі формування МДО-покриття на сплаві АЛ9.



На рисунку 3 наведено порівняльні результати дослідження впливу цього параметра на товщину оксидного покриття в електролітах різного складу. Для цього було використано дві величини щільності струму 13 і 20 А/дм².

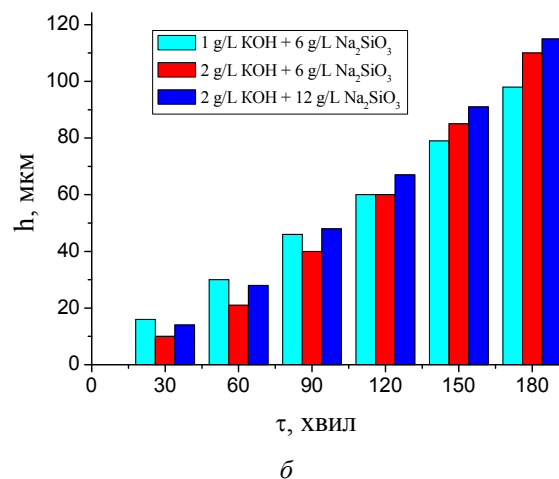


Рис. 3. Товщина оксидного покриття після МДО сплаву АЛ9 за струму формування $j = 13 \text{ A/dm}^2$ (а) і $j = 20 \text{ A/dm}^2$ (б): 1 – електроліт 1 г/л KOH + 6 г/л Na_2SiO_3 ; 2 – електроліт 2 г/л KOH + 6 г/л Na_2SiO_3 ; 3 – електроліт 2 г/л KOH + 12 г/л Na_2SiO_3

Видно, що в разі зменшення j від 20 до 13 A/dm^2 швидкість зростання знижується більше ніж удвічі (рис. 3 а, б). У найменшому ступені вплив щільності струму позначився під час формування протягом 180 хв покриття в електроліті 2 г/л KOH + 6 г/л Na_2SiO_3 . Найбільш істотне зменшення швидкості росту покриття в початковий час формування. Це, ймовірно, пов'язано з посиленням нестійкості мікродугового розряду зі зменшенням щільності струму в сплавах з більшим вмістом Si.

За більших товщин покриттів збільшується товщина діелектричного шару, що супроводжується збільшенням потужності розряду та інтенсифікацією МДО-процесу. На цій стадії меншою мірою позначається вплив щільності струму на швидкість росту покриття. Великою мірою на цій стадії ріст МДО-покриттів визначається високою температурою в області плазмохімічних реакцій [5].

Такий механізм МДО-процесу припускає формування різного фазового

складу на різних стадіях (зі збільшенням товщини) росту МДО-покриттів.

Аналіз фазового складу МДО-покриттів, проведений методом рентгенівської дифрактометрії, показав, що оксидні покриття мають кристалічну будову й основними фазами є $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ і фаза муліт ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Співвідношення між фазами залежить від складу електроліту і тривалості формування оксидного покриття.

Загальним для початкових стадій формування покриттів постає переважний вміст у його складі двох фаз: $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ і муліту ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Типовий рентгендіфракційний спектр для цієї стадії наведено на рисунку 4.

Як видно з таблиці 3, за тривалості оксидування 60 хв фаза $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ у МДО-покриттях на ливарних сплавах практично відсутня. Зі збільшенням тривалості процесу спостерігається збільшення кількості як $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$. Цим і слід пояснити зростання твердості за збільшення тривалості процесу. Максимальний вміст $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ не перевищує 20 % і досягається при тривалому процесі (більш 120 хв) оксидування. Також як

загальну закономірність можна зазначити тенденцію до зниження мікротвердості покриття зі збільшенням вмісту в ньому муліту.

Найбільша твердість 17 000 МПа досягається в покриттях, отриманих в електроліті № 1 (1 г/л КОН + 6 г/л Na_2SiO_3). Збільшення щільності струму від 20 до 30 А/дм² за оксидування сплаву АЛ2 в

електроліті 1-го типу (1 г/л КОН + 6 г/л Na_2SiO_3), де була отримана найвища твердість, не викликає її підвищення через збільшення вмісту при цьому муліту в покритті. Така особливість, напевне, пов'язана з наявністю великого вмісту кремнію, який за високих температур стимулює утворення силіцидної фази – муліту.

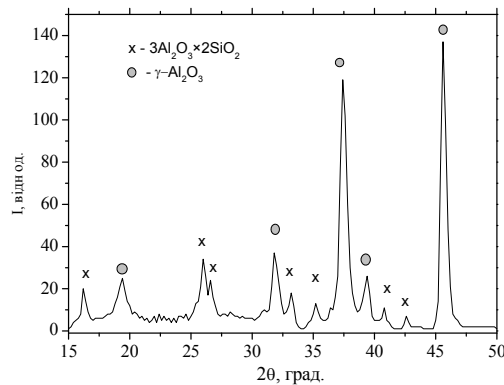


Рис. 4. Ділянка типового рентгендифракційного спектра МДО-покриття на ливарному сплаві АЛ2, отриманого в електроліті 2 г/л КОН + 6 г/л Na_2SiO_3 за відносно невеликого (60 хв) часу оксидування

Слід також зазначити, що в низці випадків (табл. 3) при близькому фазовому складі спостерігається істотна відмінність по твердості. Такий ефект спостерігався й раніше і як одна з причин розглядалася зміна в структурному стані метастабільної $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ [19]. При цьому важливою структурною характеристикою постає період ґратки базової $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ фази. На рисунку 5 наведено залежність періоду ґратки від часу процесу мікродугового оксидування для трьох типів ливарних сплавів.

Видно, що в початковий момент часу період ґратки $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ фази менше, чим табличне значення 0,790 нм, характерне для цієї фази. Це пов'язано з тим, що ливарні алюмінієві сплави містять відносно велику кількість атомів кремнію, тому під час плазово-хімічних реакцій утворення МДО-покриття слід очікувати заміщення в кристалічній ґратці іонів Al на іони Si, які мають значно менший радіус.

Обговорення результатів. Отримані в роботі закономірності свідчать, що в процесі оксидування відбувається легування $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ фази компонентами матеріалу – основи

(ливарні сплави) з утворенням твердого розчину заміщення на основі $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ фази. У цьому випадку зміна періоду ґратки буде визначатися, з одного боку відмінністю іонних радіусів, а з іншого – відмінністю валентності.

Другий фактор (відмінність валентності) проявляється через те, що під час МДО-процесу в сплавах (коли вміст легувальних атомів досить великий) у ґратці сформованої $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ фази відсутній ізовалентний ізоморфізм (тобто, коли атоми, що заміщають один одного, мають однакову валентність). У даному ж випадку реалізується гетеровалентний ізоморфізм, коли замінні атоми мають іншу валентність. При цьому необхідно, щоб ґратка в цілому була нейтральною, тобто, щоб відбувалася компенсація валентності (заряду). Роль компенсаторів заряду можуть виконувати вакансії. Утворення таких додаткових вакансій повинне викликати збільшення періоду ґратки, що й спостерігається у разі збільшення товщини діелектричного покриття й, відповідно, потужності виділюваної енергії в плазмохімічній реакції утворення МДО-покриття.

Таким чином, проведене дослідження показало можливість формування надтвердого ($HV \approx 17\ 000$ МПа) покриття на ливарному алюмінієвому сплаві. Отримана в МДО-покриттях на ливарних алюмінієвих сплавах висока твердість поверхні – необхідна умова забезпечення їх високої

зносоустійкості для більшості видів зношування.

Висновки. Визначено можливість формування високощільних МДО-покриттів на ливарних сплавах зі вмістом кремнію 9...13 %.

Таблиця 3

Характеристика МДО-покриттів на ливарних алюмінієвих сплавах

Сплав	Параметри МДО			Фазовий склад			Микротвердість HV, МПа
	Електроліт (табл. 2)	Щільність j, А/дм ²	Тривалість τ , хв	α -Al ₂ O ₃	γ -Al ₂ O ₃	3Al ₂ O ₃ × ×2SiO ₂	
АЛ9	№ 1	20	60	0	66	34	12 500
			120	13	46	41	14 200
			180	14	34	52	14 700
	№ 2	20	60	2	96	2	9 800
			120	8	39	53	11 000
			180	12	25	63	12 500
	№ 3	20	60	5	92	3	10 300
			120	13	47	40	12 500
			180	15	40	45	13 000
АЛ25	№ 1	20	60	3	25	72	7 950
			120	7	37	56	9 400
			180	17	27	56	10 100
	№ 2	20	60	0	60	40	9 300
			120	0	41	59	10 800
			150	3	39	58	10 200
			180	5	57	38	10 000
	№ 3	20	120	0	40	60	9 600
			180	0	19	81	11 000
АЛ2	№ 1	20	60	0	27	73	9 900
			120	3	25	72	12 000
			180	18	47	35	17 000
	№ 1	30	60	3	25	72	7 950
			120	7	37	56	9 400
			180	17	27	56	9 100
			240	18	16	76	11 900
	№ 2	20	120	0	41	59	6 300
			180	2	13	85	6 650
	№ 3	20	120	0	19	81	11 000

Установлено, що за тривалості процесу понад 60 хв кінетичні залежності зміни товщини покриттів від часу МДО-процесу мають характер близький до лінійного зі швидкістю росту близько 0,5 мкм/хв. Така швидкість більше ніж удічі нижча ніж швидкість росту покриттів на деформованих

алюмінієвих сплавах (наприклад, Д16 і Амгб) за аналогічних умов оксидування. При часі формування менше 60 хв швидкість росту залежить як від типу сплаву, так і складу електроліту. Найбільша швидкість росту 0,7 мкм/хв досягається на сплаві АЛ25 в електроліті 2 г/л КОН + +12 г/л Na₂SiO₃.

Виявлено, що зниження щільності струму під час МДО-процесу від 20 до

13 А/дм² зумовлює зменшення швидкості росту більше ніж удвічі (до 0,22 мкм/хв).

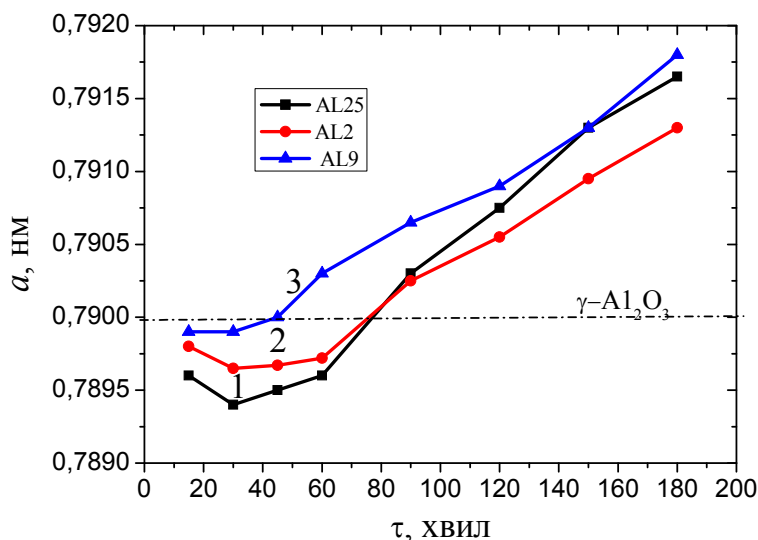


Рис. 5. Залежності періоду ґратки γ - Al_2O_3 фази в МДО-покриттях, отриманих за різного часу окисдування ливарних сплавів АЛ2, АЛ9 і АЛ25

Показано, що фазовий склад МДО-покриттів на ливарних сплавах включає: γ - Al_2O_3 , α - Al_2O_3 і фазу муліт ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Початкова стадія росту покриття характеризується переважним формуванням γ - Al_2O_3 і $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ фаз. У разі збільшення тривалості окисдування відбувається формування фази α - Al_2O_3 , вміст якої не перевищує 20 % за найбільшої (120 хв) тривалості окисдування.

Твердість покриттів підвищується зі збільшенням вмісту α - Al_2O_3 і досягає величини 17 000 МПа за найбільшого вмісту (18 %).

Виявлено зміну періоду ґратки γ - Al_2O_3 фази зі збільшенням тривалості окисдування, від значень менше табличних (0,790 нм) при часі окисдування менше 60 хв до величини, яка значно перевищує табличне за великого часу окисдування (понад 120 хв). Запропоновано модель, відповідно до якої зменшення періоду ґратки пов'язане із заміщенням іонів Al на Si, а збільшення періоду визначається різною валентністю замінних іонів, що заміщають, і утворенням у зв'язку із цим додаткових вакансій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Lesnevskiy L. N., Lyakhovetskiy M. A., Ivanova S. V., Nagovitsyna O. A. Structure and properties of surface layers formed on zirconium alloy by microarc oxidation. *Journal of surface investigation. X-ray, synchrotron and neutron techniques*. 2016. Vol. 10, iss. 3. Pp. 641–647.
2. Shen Y., Sahoo P., Pan Y. A study of micro-arc oxidation coatings on aluminum alloy drill pipe for offshore platform. *Marine technology society journal*. 2017. Vol. 51, № 3. Pp. 16–22. URL : https://www.researchgate.net/profile/Prasanta_Sahoo3/publication/318096567_A_Study_of_Micro-Arc_Oxidation_Coatings_on_Aluminum_Alloy_Drill_Pipe_for_Offshore_Platform/links/5989e84da6fdcc7cf91c4d1b/A-Study-of-Micro-Arc-Oxidation-Coatings-on-Aluminum-Alloy-Drill-Pipe-for-Offshore-Platform.pdf
3. Zhu Q. J., Wang B. B., Zhao X., Zhang B. B. Robust micro arc oxidation coatings on 6061 aluminum alloys via surface thickening and microvoid reducing approach. *Solid state phenomena*. 2018. Vol. 279. Pp. 148–152.
4. Yanga W., Xua D., Chena J., Liua J., Jiang B. Characterization of self-sealing MAO ceramic coatings with green or black color on an Al alloy. *RSC Advances*. 2017. Vol. 7, iss. 3. Pp. 1597–1605. URL : https://www.researchgate.net/publication/312099513_Characterization_of_self-sealing_MAO_ceramic_coatings_with_green_or_black_color_on_an_Al_alloy/fulltext/587d93e808ae4445c06b7d69/Characterization-of-self-sealing-MAO-ceramic-coatings-with-green-or-black-color-on-an-Al-alloy.pdf
5. Clyne T. W., Troughton S. C. A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals. *International materials reviews*. 2018. Vol. 64, iss. 3. Pp. 127–162. URL : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09506608.2018.1466492?scroll=top&needAccess=true>

6. Xue W., Wang C., Tian H., Lai Y. Corrosion behaviors and galvanic studies of microarc oxidation films on Al – Zn – Mg – Cu alloy. *Surface & coatings technology*. 2007. Vol. 201, iss. 21. Pp. 8695–8701.
7. Ovundur M., Muhaffel F., Cimenoglu H. Characterization and tribological properties of hard anodized and micro arc oxidized 5754 quality aluminum alloy. *Tribology in industry*. 2015. Vol. 37, № 1. Pp. 55–59. URL : <http://www.tribology.rs/journals/2015/2015-1/7.pdf>
8. Xue W., Shi X., Hua M., Li Y. Preparation of anti-corrosion films by microarc oxidation on an Al – Si alloy. *Applied surface science*. 2007. Vol. 253, iss. 14. Pp. 6118–6124.
9. He J., Cai Q. Z., Luo H. H., Yu L., Wei B. K. Influence of silicon on growth process of plasma electrolytic oxidation coating on Al – Si alloy. *Journal of alloys and compounds*. 2009. Vol. 471, iss. 1–2. Pp. 395–399.
10. Kim Y. M., Hwang D.Y., Lee C.W., Yoo B. Surface modification of high Si content Al alloy by plasma electrolytic oxidation. *Journal of the Korean institute of metals and materials*. 2010. Vol. 48, iss. 1. Pp. 49–56.
11. Xu F., Xia Y., Li G. The mechanism of PEO process on Al – Si alloys with the bulk primary silicon. *Applied surface science*. 2009. Vol. 255, iss. 23. Pp. 9531–9538.
12. Li K., Li W., Zhang G., Wang M., Tang P. Influence of surface etching pretreatment on PEO process of eutectic Al – Si alloy. *Chinese journal of chemical engineering*. 2015. Vol. 23, iss. 9. Pp. 1572–1578.
13. Zhu B. W., Seifeddine S., Persson P. O. Å., Jarfors A. E. W., Leisner P., Zanella C. A study of formation and growth of the anodised surface layer on cast Al – Si alloys based on different analytical techniques. *Materials & design*. 2016. Vol. 101. Pp. 254–262.
14. Forn A., Picas J. A., Baile M. T., Martin E., García V. G. Microstructure and tribological properties of anodic oxide coating formed on Al – Si alloy produced by semisolid processing. *Surface and coatings technology*. 2007. Vol. 202, iss. 4. Pp. 1139–1143.
15. Суминов И. В., Эпельфельд А. В., Людин В. Б., Борисов А. М., Крит Б. Л. Микродуговое оксидирование (обзор). *Приборы*. 2001. № 9. С. 13–23. URL: <https://www.twirpx.com/file/1023501/>
16. Belozero V., Sobol O., Mahatlova A., Subbotina V., Tabaza T. A., Al-Qawabeha U. F., Al-Qawabah S. M. The influence of the conditions of microplasma processing (microarc oxidation in anode-cathode regime) of aluminum alloys on their phase composition. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2017. Vol. 5, iss. 12–89. Pp. 52–57. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/download/112065/108195>
17. Subbotina V. V., Al-Qawabeha U. F., Sobol' O. V., Belozero V. V., Schneider V. V., Tabaza T. A., Al-Qawabah S. M., Increase of the α -Al₂O₃ phase content in MAO-coating by optimizing the composition of oxidized aluminum alloy. *Functional materials*. 2019. Vol. 26, iss. 4. Pp. 752–758. URL: <http://functmaterials.org.ua/contents/26-4/fm264-752.pdf>
18. Клопотов А. А., Абзаев Ю. А., Потекаев А. И., Волокитин О. Г. Основы рентгеноструктурного анализа в материаловедении. Томск : ТГАСУ, 2012. 275 с. URL: <https://www.twirpx.com/file/1251095/>
19. Subbotina V., Sobol O., Belozero V., Al-Qawabeha U. F., Tabaza T. A., Al-Qawabah S. M., Shnyder V. A study of the electrolyte composition influence on the structure and properties of MAO coatings formed on AMG6 alloy. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2020. Vol. 3, iss. 12 (105). Pp. 6–14. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/download/205474/207197>
20. Subbotina V., Al-Qawabeha U. F., Belozero V., Sobol' O., Subbotin A., Tabaza T. A., Al-Qawabah S. M. Determination of influence of electrolyte composition and impurities on the content of α -Al₂O₃ phase in mao-coatings on aluminum. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2019. Vol. 6, iss. 12 (102). Pp. 6–13. URL : <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/185674/189792>

REFERENCES

1. Lesnevskiy L.N., Lyakhovetskiy M.A., Ivanova S.V. and Nagovitsyna O.A. Structure and properties of surface layers formed on zirconium alloy by microarc oxidation. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2016, vol. 10, iss. 3, pp. 641–647.
2. Shen Y., Sahoo P. and Pan Y. A study of micro-arc oxidation coatings on aluminum alloy drill pipe for offshore platform. *Marine Technology Society Journal*. 2017, vol. 51, no. 3, pp. 16–22. URL: https://www.researchgate.net/profile/Prasanta_Sahoo3/publication/318096567_A_Study_of_Micro-Arc_Oxidation_Coatings_on_Aluminum_Alloy_Drill_Pipe_for_Offshore_Platform/links/5989e84da6fdcc7cf91c4d1b/A-Study-of-Micro-Arc-Oxidation-Coatings-on-Aluminum-Alloy-Drill-Pipe-for-Offshore-Platform.pdf
3. Zhu Q.J., Wang B.B., Zhao X. and Zhang B.B. Robust micro arc oxidation coatings on 6061 aluminum alloys via surface thickening and microvoid reducing approach. *Solid State Phenomena*. 2018, vol. 279, pp. 148–152.
4. Yanga W., Xua D., Chena J., Liua J. and Jiang B. Characterization of self-sealing MAO ceramic coatings with green or black color on an Al alloy. *RSC Advances*. 2017, vol. 7, iss. 3, pp. 1597–1605. URL: https://www.researchgate.net/publication/312099513_Characterization_of_self-sealing_MAO_ceramic_coatings_with_green_or_black_color_on_an_Al_alloy/fulltext/587d93e808ae4445c06b7d69/Characterization-of-self-sealing-MAO-ceramic-coatings-with-green-or-black-color-on-an-Al-alloy.pdf

5. Clyne T.W. and Troughton S.C. A review of recent work on discharge characteristics during plasma electrolytic oxidation of various metals. *International Materials Reviews*. 2018, vol. 64, iss. 3, pp. 127–162. URL : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/09506608.2018.1466492?scroll=top&needAccess=true>
6. Xue W., Wang C., Tian H. and Lai Y. Corrosion behaviors and galvanic studies of microarc oxidation films on Al – Zn – Mg – Cu alloy. *Surface & Coatings Technology*. 2007, vol. 201, iss. 21, pp. 8695–8701.
7. Ovundur M., Muhaffel F. and Cimenoglu H. Characterization and tribological properties of hard anodized and micro arc oxidized 5754 quality aluminum alloy. *Tribology in Industry*. 2015, vol. 37, no. 1, pp. 55–59. URL : <http://www.tribology.rs/journals/2015/2015-1/7.pdf>
8. Xue W., Shi X., Hua M. and Li Y. Preparation of anti-corrosion films by microarc oxidation on an Al – Si alloy. *Applied Surface Science*. 2007, vol. 253, iss. 14, pp. 6118–6124.
9. He J., Cai Q.Z., Luo H.H., Yu L. and Wei B.K. Influence of silicon on growth process of plasma electrolytic oxidation coating on Al – Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2009, vol. 471, iss. 1–2, pp. 395–399.
10. Kim Y.M., Hwang D.Y., Lee C.W. and Yoo B. Surface modification of high Si content Al alloy by plasma electrolytic oxidation. *Journal of the Korean Institute of Metals and Materials*. 2010, vol. 48, iss. 1, pp. 49–56.
11. Xu F., Xia Y. and Li G. The mechanism of PEO process on Al – Si alloys with the bulk primary silicon. *Applied Surface Science*. 2009, vol. 255, iss. 23, pp. 9531–9538.
12. Li K., Li W., Zhang G., Wang M. and Tang P. Influence of surface etching pretreatment on PEO process of eutectic Al – Si alloy. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2015. vol. 23, iss. 9, pp. 1572–1578.
13. Zhu B.W., Seifeddine S., Persson P.O.Å., Jarfors A.E.W., Leisner P. and Zanella C. A study of formation and growth of the anodised surface layer on cast Al – Si alloys based on different analytical techniques. *Materials & design*. 2016, vol. 101, pp. 254–262.
14. Forn A., Picas J.A., Baile M.T., Martin E. and García V.G. Microstructure and tribological properties of anodic oxide coating formed on Al-Si alloy produced by semisolid processing. *Surface and Coatings Technology*. 2007, vol. 202, iss. 4, pp. 1139–1143.
15. Suminov I.V., Epelfeld A.V., Lyudin V.B., Borisov A.M. and Krit B.L. *Mikrodugovoe oksidirovanie (obzor) [Microarc oxidation (overview)]. Pribory [Devices]*. 2001, no. 9, pp. 13–23. URL : <https://www.twirpx.com/file/1023501/> (in Russian).
16. Belozero V., Sobol O., Mahatilova A., Subbotina V., Tabaza T.A., Al-Qawabeha U.F. and Al-Qawabah S.M. The influence of the conditions of microplasma processing (microarc oxidation in anode-cathode regime) of aluminum alloys on their phase composition. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017, vol. 5, iss. 12–89, pp. 52–57. URL : <http://journals.uran.ua/eejet/article/download/112065/108195>
17. Subbotina V.V., Al-Qawabeha U.F., Sobol' O.V., Belozero V.V., Schneider V.V., Tabaza T.A. and Al-Qawabah S.M., Increase of the α -Al₂O₃ phase content in MAO-coating by optimizing the composition of oxidated aluminum alloy. *Functional Materials*. 2019, vol. 26, iss 4, pp. 752–758. URL : <http://functmaterials.org.ua/contents/26-4/fm264-752.pdf> (in Ukrainian).
18. Klopotov A.A., Abzaev Yu.A., Potekaev A.I. and Volokitin O.G. *Osnovy rentgenostrukturnogo analiza v materialovedenii [Fundamentals of X-ray structural analysis in materials science]*. Tomsk : TGASU, 2012, 275 p. URL : <https://www.twirpx.com/file/1251095/> (in Russian).
19. Subbotina V., Sobol O., Belozero V., Al-Qawabeha U.F., Tabaza T.A., Al-Qawabah S.M. and Shnyder V. A study of the electrolyte composition influence on the structure and properties of MAO coatings formed on AMG6 alloy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020, vol. 3, iss. 12 (105), pp. 6–14. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/download/205474/207197>
20. Subbotina V., Al-Qawabeha U.F., Belozero V., Sobol' O., Subbotin A., Tabaza T.A. and Al-Qawabah S.M. Determination of influence of electrolyte composition and impurities on the content of α -Al₂O₃ phase in mao-coatings on aluminum. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019, vol. 6, iss. 12 (102), pp. 6–13. URL : <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/185674/189792>

Надійшла до редакції: 02.09.2020.

УДК 669.1:621.762.24

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.290920.65.670

ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕСІВ ОТРИМАННЯ НАНОПОРОШКІВ МАГНЕТИТУ ТА ЗАЛІЗА ВОДНЕВИМ ВІДНОВЛЕННЯМ ГІДРОКСИДНОЇ СПОЛУКИ

ТІЄН ХІЄП НГУЄН^{1*}, *аспір.*,
ТА ДІНЬ СУАН², *аспір.*,
НГУЄН ТХАНЬ ХУНГ³, *аспір.*,
НГУЄН ДІНЬ ЧІЄН⁴, *маг.*,
ЛЕ МІНЬ ДИК⁵, *маг.*

^{1*} Кафедра функціональних наносистем і високотемпературних матеріалів, Національний дослідний технологічний університет «Московський інститут сталі та сплавів (МІСiC)», Ленінський пр., 4, 119049, Москва, Росія, тел. +7 (968) 868-13-68; Державний технічний університет ім. Ле Куй Дона, 100000, Ханой, В'єтнам, e-mail: htnru7@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-3023-556X

² Державний технічний університет ім. Ле Куй Дона, 100000, Ханой, В'єтнам, тел. +84 (983) 59-92-82, e-mail: dinhxuanta@gmail.com

³ Державний технічний університет ім. Ле Куй Дона, 100000, Ханой, В'єтнам, тел. +84 (983) 82-08-53, e-mail: thanhhunghvktqs@gmail.com

⁴ Державний технічний університет ім. Ле Куй Дона, 100000, Ханой, В'єтнам, тел. +84 (975) 32-23-52, e-mail: nguyendinhchien030687@gmail.com

⁵ Державний технічний університет ім. Ле Куй Дона, 100000, Ханой, В'єтнам, тел. +84 (985) 59-95-16, e-mail: minhduclek52@gmail.com

Анотація. *Мета роботи* – дослідження основних характеристик процесів отримання нанопорошків магнетиту і заліза водневим відновленням гідроксидної сполуки (α -FeOOH). *Матеріали і методика.* Нанопорошок гідроксиду α -FeOOH отриманий хімічним осадженням із водних розчинів нітрату заліза (III) Fe(NO₃)₃ (10 мас. %) і лугу NaOH (10 мас. %) за кімнатної температури, pH = 11, в умовах безперервного перемішування. Процеси отримання нанопорошків Fe₃O₄ і Fe водневим відновленням гідроксиду α -FeOOH проведені в трубчастій печі «SNOL 0,2/1250». Кристалічну структуру і склад порошкових зразків вивчали методом рентгенофазового аналізу. Розміри і морфологію частинок нанопорошків – сканувальним і просвічувальним електронномікроскопічними методами. Питому поверхню зразків вимірювали методом BET за низькотемпературною адсорбцією азоту. Середній розмір частинок порошків визначали за даними вимірювання величини питомої поверхні. *Результат.* Установлено, що оптимальні температури, які відповідають значенням максимальної питомої швидкості для проведення процесів отримання нанопорошків Fe₃O₄ та Fe водневим відновленням, дорівнюють 340 та 500 °C відповідно. Отримані продукти являють собою нанопорошки чистих Fe₃O₄ та Fe при відновленні після двох годин витримки. Показано, що наночастинки Fe₃O₄ складаються з частинок невизначеної форми, які схильні до утворення пластівців, вони мають нанометровий розмір (порядку десятків нм) і перебувають у спеченому стані, кожна з них з'єднана з декількома сусідніми частинками перешийками. Наночастинки Fe, головним чином, мають округлу і сферичну форму; їх розмір складає до 100 нм і вони розподіляються роздільно. *Наукова новизна.* Вперше встановлено оптимальні температури для проведення процесів отримання нанопорошків Fe₃O₄ та Fe водневим відновленням гідроксидної сполуки. *Практична значимість.* Отримані результати досліджень слугуватимуть ля синтезу нанопорошків на основі Fe₃O₄ і Fe, гарантують прискорення процесів, забезпечення необхідних властивостей нанопорошків, і можуть використовуватися в різних галузях науки, техніки, екології тощо.

Ключові слова: нанопорошок; магнетит; залізо; хіміко-металургійний метод; водневе відновлення

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОПОРОШКОВ МАГНЕТИТА И ЖЕЛЕЗА ВОДОРОДНЫМ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ ГИДРОКСИДНОГО СОЕДИНЕНИЯ

ТИЕН ХИЄП НГУЄН^{1*}, *аспір.*,
ТА ДІНЬ СУАН², *аспір.*,
НГУЄН ТХАНЬ ХУНГ³, *аспір.*

НГУЕН ДИНЬ ЧИЕН⁴, *маг.*,
ЛЕ МИНЬ ДЫК⁵, *маг.*

^{1*} Кафедра функциональных наносистем и высокотемпературных материалов, Национальный исследовательский технологический университет «Московский институт стали и сплавов (МИСиС)», Ленинский пр., 4, 119049, Москва, Россия, тел. +7 (968) 868-13-68; Государственный технический университет им. Ле Куй Дона, 100000, Ханой, Вьетнам, e-mail: htnru7@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-3023-556X

² Государственный технический университет им. Ле Куй Дона, 100000, Ханой, Вьетнам, тел. +84 (983) 59-92-82, e-mail: dinhxuanta@gmail.com

³ Государственный технический университет им. Ле Куй Дона, 100000, Ханой, Вьетнам, тел. +84 (983) 82-08-53, e-mail: thanhhungvktqs@gmail.com

⁴ Государственный технический университет им. Ле Куй Дона, 100000, Ханой, Вьетнам, тел. +84 (975) 32-23-52, e-mail: nguyendinhchien030687@gmail.com

⁵ Государственный технический университет им. Ле Куй Дона, 100000, Ханой, Вьетнам, тел. +84 (985) 59-95-16, e-mail: minhduclek52@gmail.com

Аннотация. *Цель работы* – исследование основных характеристик процессов получения нанопорошков магнетита и железа водородным восстановлением гидроксидного соединения (α -FeOOH). *Материалы и методика.* Нанопорошок гидроксида α -FeOOH получен химическим осаждением из водных растворов нитрата железа (III) $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ (мас. доля, 10 %) и щелочи NaOH (мас. доля, 10 %) при комнатной температуре, pH = 11, в условиях непрерывного перемешивания. Процессы получения нанопорошков Fe_3O_4 и Fe водородным восстановлением гидроксида α -FeOOH проведены в трубчатой печи «SNOL 0,2/1250». Кристаллическую структуру и состав порошковых образцов изучали методом рентгенофазового анализа. Размер и морфологию частиц нанопорошков изучали сканирующим и просвечивающим электронно-микроскопическими методами. Удельную поверхность образцов измеряли методом БЭТ по низкотемпературной адсорбции азота. Средний размер частиц порошков определяли по данным измерения величины удельной поверхности. *Результаты.* Установлено, что оптимальные температуры, соответствующие значениям максимальной удельной скорости для проведения процессов получения нанопорошков Fe_3O_4 и Fe водородным восстановлением, равны 340 и 500 °С соответственно. Полученные продукты представляют собой нанопорошки чистых Fe_3O_4 и Fe при восстановлении после двух часов выдержки. Показано, что наночастицы Fe_3O_4 состоят из частиц неопределенной формы, которые склонны к образованию хлопьев, они имеют нанометровый размер (порядка десятков нм) и находятся в спеченном состоянии, каждая из них соединена с несколькими соседними частицами перешейками. Наночастицы Fe главным образом имеют округлую и сферическую форму; их размер составляет до 100 нм и они распределяются раздельно. *Научная новизна.* Впервые установлены оптимальные температуры для проведения процессов получения нанопорошков Fe_3O_4 и Fe водородным восстановлением гидроксидного соединения. *Практическая значимость.* Полученные результаты исследований послужат основой для синтеза нанопорошков на основе Fe_3O_4 и Fe, гарантируют ускорение процессов, обеспечение необходимых свойств нанопорошков и могут использоваться в различных областях науки, техники, экологии и др.

Ключевые слова: нанопорошок; магнетит; железо; химико-металлургический метод; водородное восстановление

MAIN CHARACTERISTICS OF SYNTHESIZING PROCESSES OF MAGNETITE AND IRON NANOPOWDERS BY HYDROGEN REDUCTION FROM HYDROXIDE COMPOUND

TIEN HIEP NGUYEN^{1*}, *Postgrad. Stud.*,
TA DINH XUAN², *Postgrad. Stud.*,
NGUYEN THANH HUNG³, *Postgrad. Stud.*,
NGUYEN DINH CHIEN⁴, *Master of Engineering*,
LE MINH DUC⁵, *Master of Engineering*

^{1*} Department of Functional Nanosystems and High-Temperature Materials, National University of Science and Technology "MISIS", 4, Leninskiy Ave., 119049, Moscow, Russia, tel. +7 (968) 868-13-68; Le Quy Don Technical University, 100000, Hanoi, Vietnam, e-mail: htnru7@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-3023-556X

² Le Quy Don Technical University, 100000, Hanoi, Vietnam, tel. +84 (983) 59-92-82, e-mail: dinhxuanta@gmail.com

³ Le Quy Don Technical University, 100000, Hanoi, Vietnam, tel. +84 (983) 82-08-53, e-mail: thanhhungvktqs@gmail.com

⁴ Le Quy Don Technical University, 100000, Hanoi, Vietnam, tel. +84 (975) 32-23-52, e-mail: nguyendinhchien030687@gmail.com

⁵ Le Quy Don Technical University, 100000, Hanoi, Vietnam, tel. +84 (985) 59-95-16, e-mail: minhduclek52@gmail.com

Abstract. Purpose. Study of the main characteristics of synthesizing processes of magnetite and iron nanopowders by hydrogen reduction from hydroxide compound (α -FeOOH). **Materials and methods.** α -FeOOH hydroxide nanopowder was obtained by chemical precipitation from aqueous solutions of iron (III) nitrate $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ (10 wt. %) and alkali NaOH (10 wt. %) at room temperature, pH = 11, under the condition of continuous stirring. Synthesizing processes of Fe_3O_4 and Fe nanopowders by hydrogen reduction of hydroxide α -FeOOH were carried out in a tubular furnace "SNOL 0.2/1250". The study of the crystal structure as well as the composition of the powder samples was performed by X-ray phase analysis. The size and morphology of nanopowder particles were investigated by scanning and transmission electron microscopes. The specific surface area of the powders was measured by using BET method by low-temperature nitrogen adsorption. The average size of the powders articles was determined *via* the measured value of specific surface area. **Results.** It has been established that the optimal temperatures corresponding to the values of the maximum specific rate for carrying out the synthesizing processes of Fe_3O_4 and Fe nanopowders by hydrogen reduction are 340 and 500 °C, respectively. The resulting products are nanopowders of pure Fe_3O_4 and Fe after being through hydrogen reduction process for 2 hours. It was shown that Fe_3O_4 nanoparticles consist of particles with indefinite shape, which are prone to the formation of flakes. They have a nanometer size (about tens of nm) and are in a sintered state with connections to several neighboring particles by isthmuses. Fe nanoparticles are mainly rounded and spherical, up to one hundred nm in size and distributed separately. **Originality.** For the first time, the optimal temperatures have been established for synthesizing processes of Fe_3O_4 and Fe nanopowders by hydrogen reduction from hydroxide compound. **Practical value.** The research results will serve as a basis for the synthesis of nanopowders based on Fe_3O_4 and Fe, guarantee the acceleration of processes, ensure the necessary properties of nanopowders and can be used for various fields of science, technology, ecology and oth.

Keywords: nanopowder; magnetite; iron; chemical-metallurgy method; hydrogen reduction

Вступ. Наразі матеріали на основі заліза і магнетиту, зокрема, нанопорошки (НП) знайшли широке застосування в різних галузях науки, техніки, екології, в медицині тощо [1–4]. Наприклад, НП Fe часто застосовують як активні магнітні адсорбенти для очищення ґрунтів і стічних вод від забруднень і токсичних сполук [5–8]. Крім того, НП Fe і також володіють відмінними магнітними властивостями і можуть легко керуватися в магнітному полі [9; 10]. А наночастинки (НЧ) Fe_3O_4 , функціоналізовані біомолекулами (антитілами, ферментами, нуклеотидами та ін.) для націлювання або впізнання біологічних систем можуть бути використані як матеріали для адресної доставки лікарських препаратів. Сферою застосування наночастинок магнетиту постає також магнітна гіпертермія з метою знищення пухлинних клітин [3; 10; 11]. Тому синтез НП Fe і Fe_3O_4 відіграє важливу роль, оскільки має широкі галузі їх застосування.

Синтез НП Fe_3O_4 і Fe здійснюється різними способами, більшість з яких характеризується низкою недоліків, як от: знижена продуктивність, високі витрати енергії [3; 12–14]. Хіміко-металургійний

метод, який включає етапи хімічного осадження кисневмісних сполук металів і водневого відновлення отриманих сполук, являє собою високоефективний метод із точки зору економії енергії, можливості утилізації промислових відходів як вихідної сировини і можливості регулювати розмірні характеристики наночастинок у ході отримання [15–18].

Великий недолік хіміко-металургійного методу синтезу НП Fe_3O_4 і Fe полягає у низькій продуктивності у зв'язку з низькою швидкістю процесу водневого відновлення гідроксидної сполуки за умов витримки за низьких температур. У той же час надмірне збільшення температури відновлення не рекомендується, оскільки це зумовлює інтенсивний перебіг процесів агрегації і спікання НЧ та, відповідно, формування частинок розміром поза нанометровим діапазоном [19; 20].

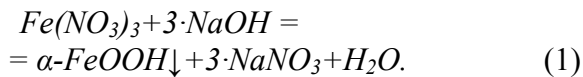
Тому вивчення основних характеристик процесів синтезу НП Fe_3O_4 і Fe хіміко-металургійним методом для встановлення оптимальних тимчасово-температурних параметрів із гарантією необхідних властивостей отриманих продуктів – це важливе науково-практичне завдання.

Метою роботи стало визначення

основних параметрів процесів синтезу НП Fe_3O_4 і Fe водневим відновленням гідроксидної сполуки для встановлення оптимальних режимів проведення процесів, а також вивчення властивостей отриманих продуктів.

Матеріал та методики експерименту.

НП Fe_3O_4 і Fe отримані з НП гідроксиду $\alpha\text{-FeOOH}$ шляхом прямого водневого відновлення. До цього НП $\alpha\text{-FeOOH}$ синтезували методом хімічного осадження з водних розчинів нітрату заліза (III) $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ (мас. частка, 10 %) і лугу NaOH (мас. частка, 10 %) в умовах безперервного перемішування, контролю температури $t = 25\text{ }^\circ\text{C}$ і величини кислотності $\text{pH} = 11$. Реакція осадження гідроксиду описується так:



Контроль pH здійснювали pH -метром марки «Експерт 001», похибка вимірювань становила $\pm 0,03$. За допомогою колби Бунзена і воронки Бюхнера отриманий осад $\alpha\text{-FeOOH}$ промивали до повного відмивання іонів розчиненої солі, яку контролювали по pH розчину над осадом. Потім осад сушили за $40\text{ }^\circ\text{C}$ протягом 48 годин і висушений $\alpha\text{-FeOOH}$ подрібнювали за допомогою лабораторного млина «Fritsch Pulverisette 2».

Отриманий НП $\alpha\text{-FeOOH}$ використовували для подальшого дослідження.

Для вибору температурних умов проведення процесу водневого відновлення, НП $\alpha\text{-FeOOH}$ досліджено термогравіметричним (ТГ) методом на установці SDT Q600 (США) за режиму лінійного нагріву зі швидкістю $10\text{ }^\circ\text{C}/\text{хв}$ в атмосфері водню в інтервалі температур від 25 до $700\text{ }^\circ\text{C}$.

Фазовий склад отриманих зразків досліджували методом рентгенофазового аналізу (РФА) на дифрактометрі «Дифрей-401» (Росія), використовуючи $\text{CuK}\alpha$ -випромінювання. Морфологія і розмірні характеристики НЧ зразків досліджені методом СЕМ на мікроскопі TESCAN VEGA 3B (Чехія) і ПЕМ на мікроскопі LEO 912 AB OMEGA (Німеччина). Величину питомої поверхні (S_{num}) зразків визначали методом БЕТ за низькотемпературною адсорбцією азоту за допомогою аналізатора NOVA 1200e (США). Середній розмір частинок порошків $D_{\text{сер}}$ (м) розраховували за формулою:

$$D_{\text{сер}} = 6/(\rho \cdot S_{\text{num}}), \quad (2)$$

де ρ – щільність матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Результати та їх обговорення.

Результати РФА і СЕМ вихідного зразка НП $\alpha\text{-FeOOH}$ наведені на рисунку 1.

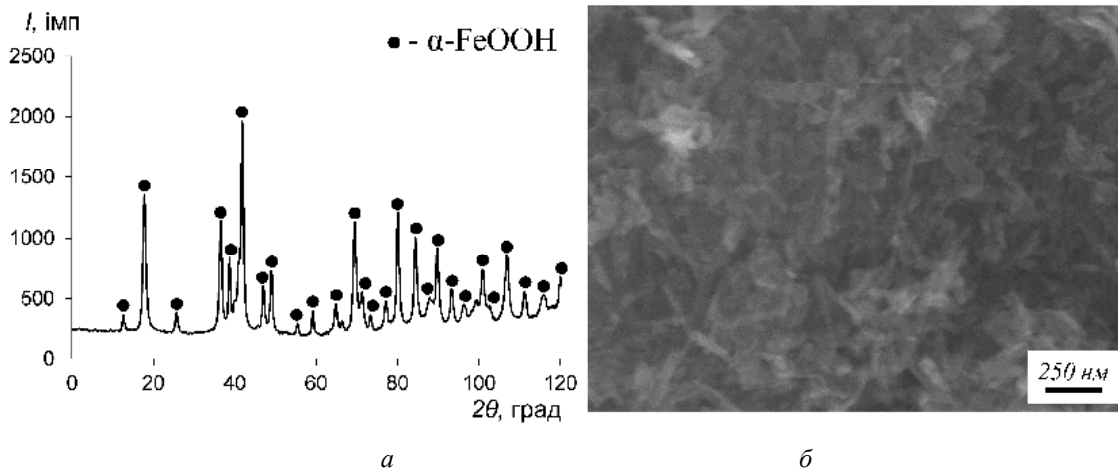


Рис. 1. Рентгенограма (а) і СЕМ-зображення (б) вихідного зразка НП $\alpha\text{-FeOOH}$

Результат РФА (рис. 1 а) показує, що матеріал досліджуваного зразка однофазний і містить тільки фазу $\alpha\text{-FeOOH}$. Аналіз СЕМ-зображення (рис. 1 б) показує, що НЧ

$\alpha\text{-FeOOH}$ в основному мають щільногочасту форму розміром близько десятків нанометрів за діаметром та до 200 нм за довжиною.

На рисунку 2 наведено ТГ криві, отримані в ході водневого відновлення НП α -FeOOH.

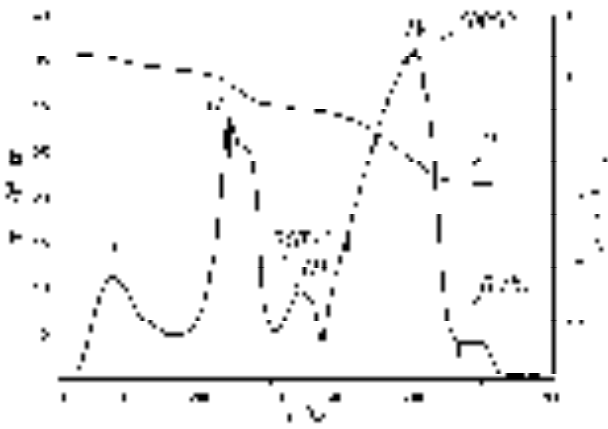
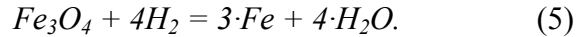
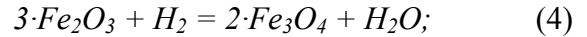
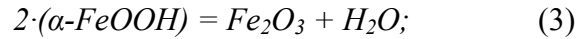


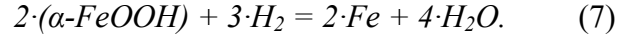
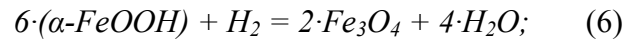
Рис. 2. ТГ криві водневого відновлення НП α -FeOOH: а – зміна маси, б – швидкість зміни маси

На основі аналізу ТГ-даних (рис. 2) показано, що процес водневого відновлення α -FeOOH відбувається в чотири етапи. На першому етапі (I) зразок α -FeOOH втрачає адсорбовану вологу в інтервалі температур від 25 до 180 °С. Другий етап (II) відповідає процесу термічного розкладання α -FeOOH в інтервалі температур 180...300 °С за реакцією (3), максимальна питома швидкість процесу досягнута за температури 240 °С. Третій етап (III) відповідає перебігу відновлення α -Fe₂O₃ до Fe₃O₄ в інтервалі температур 300...375 °С за реакцією (4), питома швидкість процесу досягає максимуму за 340 °С з величиною $0,298 \cdot 10^{-8}$ кг/с.

У четвертому етапі (IV) відбувається відновлення магнетиту Fe₃O₄ до Fe в інтервалі температур 375...550 °С згідно з реакцією (5), максимальна питома швидкість процесу досягається за температури 500 °С з величиною $1,079 \cdot 10^{-8}$ кг/с.



Аналіз ТГ-даних дозволяє вибирати оптимальні температури для проведення процесів отримання НП Fe₃O₄ і Fe водневим відновленням, які відповідають значенням максимальної питомої швидкості в етапах III і IV. Ці температури дорівнюють 340 і 500 °С для отримання НП Fe₃O₄ і Fe відповідно. Процеси водневого відновлення НП α -FeOOH за оптимальних температур (340 і 500 °С) проведені в трубчастій печі «SNOL 0,2/1250», час витримки склав 2 години. Хімічні реакції для отримання НП Fe₃O₄ і Fe такі:



Після відновлення в трубчастій печі отримані НП пасивовані в атмосфері рідкого азоту і використовуються в подальших дослідженнях.

На рисунку 3 показано результати РФА продуктів відновлення α -FeOOH за температури 340 і 500 °С.

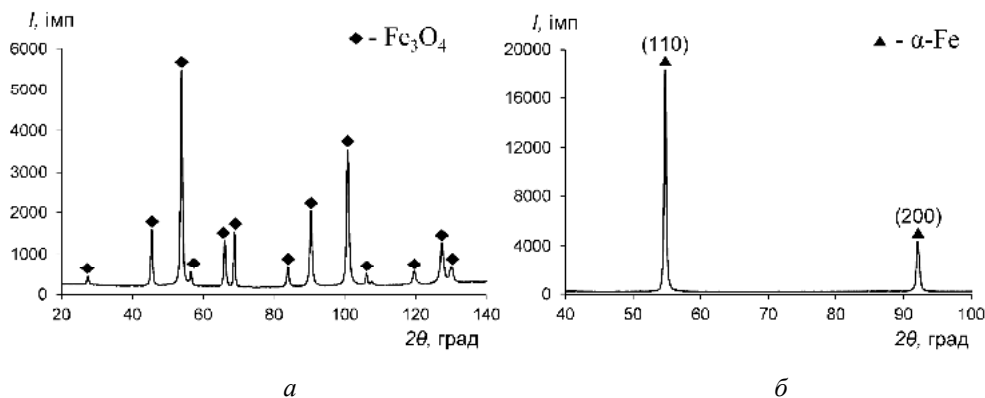


Рис. 3. Рентгенограми продуктів водневого відновлення НП α -FeOOH за $T = 340$ °С (а) і 500 °С (б)

РФА продукту водневого відновлення за температури 340 °С (рис. 3 а) показав, що зразок містить тільки кристалічну фазу Fe₃O₄, інших фаз не виявлено, тобто отриманий продукт являє собою НП чистого Fe₃O₄, відновлення НП α-FeOОН за 340 °С було повним після 2 годин витримки.

РФА продукту водневого відновлення за температури 500 °С після 2 годин витримки

(рис. 3 б) виявив, що матеріал досліджуваного зразка однофазний, і складається тільки з частинок НП α-Fe з ОЦК кристалічною ґраткою.

На рисунку 4 наведено результати СЕМ і ПЕМ-зображень отриманих продуктів відновлення α-FeOОН за температур 340 і 500 °С.

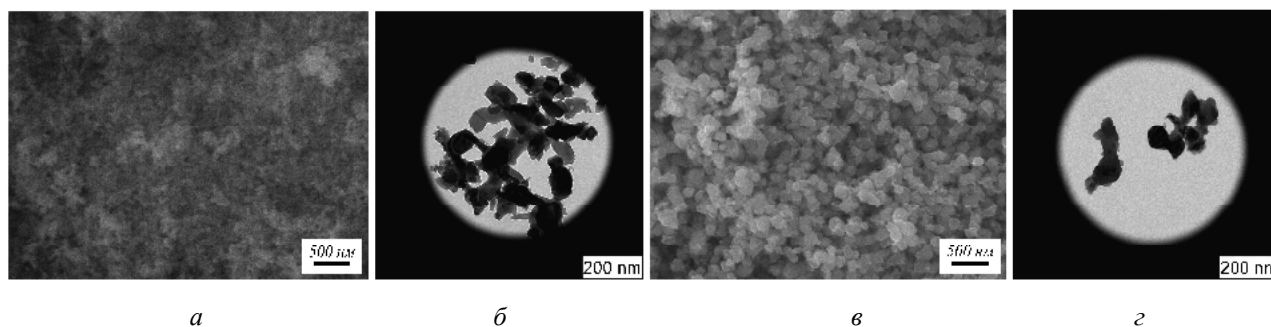


Рис. 4. СЕМ і ПЕМ-зображення НП Fe₃O₄ (а, б) і Fe (в, г)

З рисунка 4 а, б видно, що НЧ Fe₃O₄ складається з частинок невизначеної форми, які схильні до утворення пластівців. НЧ Fe₃O₄ головним чином мають нанометровий розмір (близько десятків нм) і перебувають у спеченому стані, кожна з них з'єднана з декількома сусідніми частинками перешийками.

Аналіз СЕМ і ПЕМ-зображень зразка НП Fe (рис. 4 б г) показує, що НЧ Fe в основному мають округлу і сферичну форму, їх розмір складає близько 100 нм і вони розподіляються роздільно.

Результат вимірювання S_{num} і розрахунку середнього розміру частинок $D_{сер}$ отриманих порошкових зразків наведено в таблиці.

Таблиця

Результат вимірювання S_{num} і $D_{сер}$ частинок порошкових зразків

№ п/п	Зразок	Спосіб отримання	S_{num} , (м ² /г)	$D_{сер}$, (нм)
1	НП α-FeOОН	хімічне осадження	39,5	44
2	НП Fe ₃ O ₄	водневе відновлення за 340 °С	21,7	53
3	НП Fe	водневе відновлення за 500 °С	15,8	48

Результат вимірювання величин питомої поверхні S_{num} підтверджує, що процеси спікання і агрегування утворених НЧ за водневого відновлення викликають зменшення величини питомої поверхні отриманих продуктів (НП Fe₃O₄ і Fe) порівняно з вихідним зразком НП α-FeOОН. Розрахунок середнього розміру частинок порошків $D_{сер}$ за даними S_{num} і формулою (2) показує, що всі отримані НП мають нанометровий розмір (менше 60 нм), результати цього добре узгоджуються з результатом дослідження розміру зразків (НП α-FeOОН, Fe₃O₄ і Fe) методом СЕМ і ПЕМ.

Висновок. Вивчено основні характеристики процесів отримання НП Fe₃O₄ і Fe водневим відновленням гідроксидної сполуки. На підставі аналізу ТГ-даних встановлено оптимальні температури для проведення процесів отримання НП Fe₃O₄ і Fe водневим відновленням, які відповідають значенням максимальної питомої швидкості (340 і 500 °С) відповідно. Отримані продукти являють собою НП чистих Fe₃O₄ і Fe за відновлення після 2 годин витримки.

Досліджено розмір та морфологію вихідного матеріалу (НП α-FeOОН) та отриманих зразків (НП Fe₃O₄ і Fe).

Показано, що НЧ α -FeOОН в основному володіють щільногочастою формою розмірами: $D_{сер}$ близько десятків нанометрів по діаметру та довжиною до 200 нм. Установлено форму, розміри та інші

особливості частинок, з яких складаються НЧ Fe₃O₄ та Fe.

Отримані результати досліджень мають наукове та практичне значення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bhushan B. (Ed.). *Springer Handbook of Nanotechnology*. 4th edition. Berlin : Springer-Verlag Heidelberg, 2017. 1500 p.
2. Внуков А. А., Рослик И. Г., Головачев А. Н., Белая А. В., Черанев Р. М. Влияние технологических параметров электролиза и состава электролита на физические свойства дисперсного железа. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2016. № 4. С. 15–21.
3. Каргин Д. Б., Конюхов Ю. В., Бисекен А. Б., Лилеев А. С., Карпенков Д. Ю. Структура, морфология и магнитные свойства нанопорошков гематита и маггемита, полученных из прокатной окалины. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2020. Т. 63. № 2. С. 146–154. URL: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-2-146-154>
4. Nguyen V. M., Karunakaran G., Nguyen T. H., Kolesnikov E. A., Alymov M. I., Levina V. V., Konyukhov Yu. V. Enhancement of structural and mechanical properties of Fe + 0.5 %C steel powder alloy via incorporation of Ni and Co nanoparticles. *Letters on Materials*. 2020. Vol. 10 (2). Pp. 174–178. URL: <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2020-2-174-178>
5. Конохов Ю. В. Применение нанопорошков железа для очистки сточных вод от ионов свинца, меди и цинка. *Сталь*. 2018. № 2. С. 62–68.
6. Schrick B., Hydutsky B.W., Blough J. L., Mallouk T. E. Delivery vehicles for zerovalent metal nanoparticles in soil and groundwater. *Chemistry of Materials*. 2004. № 16. Pp. 2187–2193. URL: <https://doi.org/10.1021/cm0218108>
7. Crane R. A., Scott T. Nanoscale zero-valent iron: future prospects for an emerging water treatment technology. *Journal of Hazardous Materials*. 2012. № 211. Pp. 112–125. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.11.073>
8. Huber D. L. Synthesis, properties, and applications of iron nanoparticles. *Small*. 2005. № 1. Pp. 482–501. URL: <https://doi.org/10.1002/sml.200500006>
9. Нгуен Т. Х., Конюхов Ю. В., Нгуен В. М., Левина В. В., Карпенков Д. Ю. Магнитные свойства нанопорошков Fe, Co, Ni, полученных химико-металлургическим методом. *XXII Международная конференция по постоянным магнитам*. 2019. С. 104.
10. Каргин Д. Б., Мухамбетов Д. Г., Конюхов Ю. В., Алтынов Е. А., Азнабакиев К. Р. Магнитные свойства нанопорошков железа и его оксидов, полученных из прокатной окалины. *XXII Международная конференция по постоянным магнитам*. 2019. С. 106.
11. Рудаковская П. Г., Белоглазкина Е. К., Мажуга А. Г., Клячко Н. Л., Кабанов А. В., Зык Н. В. Синтез наночастиц магнетит – золото, имеющих структуру типа ядро – оболочка. *Вестник Московского университета. Серия 2: Химия*. 2015. Т. 56. № 3. С. 181–189.
12. Нгуен Т. Х., Нгуен В. М. Влияние поверхностно-активных веществ на дисперсность нанопорошков железа, кобальта и никеля. *Известия ВУЗов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2020. № 1. С. 22–28. URL: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2020-22-28>
13. Конюхов Ю. В., Левина В. В., Дзидзигури Э. Л., Кузнецов Д. В., Хрустов Е. Н. Дисперсность и морфология ультрадисперсных порошков железа, полученных золь – гель методом. *Физика и химия обработки материалов*. 2005. № 4. С. 77–80.
14. Конюхов Ю. В., Нгуен В. М. Кинетические закономерности водородного восстановления нанопорошка железа в различных слоях. *XXXV Всероссийский симпозиум молодых ученых по химической кинетике*. 2018. С. 53–54.
15. Конюхов Ю. В., Нгуен В. М., Рыжонков Д. И. Кинетические закономерности процессов водородного восстановления нанопорошка α -Fe₂O₃ при энерго-механической обработке в электромагнитном поле. *Физика и химия обработки материалов*. 2018. № 1. С. 66–74.
16. Кушнир Ю. А., Внуков А. А., Головачев А. Н., Ковзик А. Н. Оценка коррозионной стойкости химических осадочных покрытий на основе меди и олова для защиты сварочной проволоки. *Металлознавство та термічна обробка металів*. 2018. № 3. С. 47–53. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.250918.47.398>
17. Ryzhonkov D. I., Konyukhov Yu. V., Nguyen V. M. Kinetic Regularities and Mechanisms of Hydrogen Reduction of Nanosized Oxide Materials in Thin Layers. *Nanotechnologies in Russia*. 2017. Vol. 12, № 11–12. Pp. 620–626. URL: <https://doi.org/10.1134/S1995078017060076>
18. Конюхов Ю. В., Левина В. В., Рыжонков Д. И., Пузик И. И. Свойства наноразмерных порошков железа, полученных химико-металлургическим методом с применением поверхностно-активных веществ. *Российские нанотехнологии*. 2008. Т. 3, № 5–6. С. 158–163.
19. Браун М., Доллимор Д., Галвей А. Реакции твердых тел. Москва : Мир, 1983. 360 с.

20. Ръжонков Д. И., Арсентьев П. П., Яковлев В. В. Теория металлургических процессов. Москва : Металлургия, 1989. 392 с.

REFERENCES

1. Bhushan B. (Ed.). Springer Handbook of Nanotechnology: 4th edition. Berlin : Springer-Verlag Heidelberg, 2017, 1500 p.
2. Vnukov A.A., Roslik I.G., Golovachev A.N., Belaya A.V. and Cheranov R.M. *Vliyaniye tehnologicheskikh parametrov `elektroliza i sostava `elektrolita na fizicheskie svoystva dispersnogo zheleza* [Influence of technological parameters of electrolysis and the composition of the electrolyte on the physical properties of the dispersed iron]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2016, no. 4, pp. 15–21. (in Russian).
3. Kargin D.B., Konyukhov Yu.V., Biseken A.B., Lileev A.S. and Karpenkov D.Yu. *Struktura, morfologiya i magnitnye svoystva nanoporoshkov gematita i maghemita, poluchennykh iz prokatnoj okaliny* [Structure, morphology and magnetic properties of hematite and maghemite nanopowders produced from rolling scale]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [Izvestiya. Ferrous Metallurgy]. 2020, vol. 63, no. 2, pp. 146–154. (in Russian). URL: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-2-146-154>
4. Nguyen V.M., Karunakaran G., Nguyen T.H., Kolesnikov E.A., Alymov M.I., Levina V.V. and Konyukhov Yu.V. Enhancement of structural and mechanical properties of Fe + 0.5 %C steel powder alloy via incorporation of Ni and Co nanoparticles. *Letters on Materials*. 2020, vol. 10 (2), pp. 174–178. URL: <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2020-2-174-178>
5. Konyukhov Yu.V. *Primeneniye nanoporoshkov zheleza dlya ochistki stochnykh vod ot ionov svinca, medi i cinka* [Heavy-metal extraction from wastewater by means of iron nanopowder]. *Stal'* [Steel]. 2018, vol. 48, no. 2, pp. 135–141. URL: <https://doi.org/10.3103/S0967091218020080>
6. Schrick B., Hydutsky B.W., Blough J.L. and Mallouk T.E. Delivery vehicles for zerovalent metal nanoparticles in soil and groundwater. *Chemistry of Materials*. 2004, no. 16, pp. 2187–2193. URL: <https://doi.org/10.1021/cm0218108>
7. Crane R.A., Scott T. Nanoscale zero-valent iron: future prospects for an emerging water treatment technology. *Journal of Hazardous Materials*. 2012, no. 211, pp. 112–125. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.11.073>
8. Huber D.L. Synthesis, properties, and applications of iron nanoparticles. *Small*. 2005, no. 1, pp. 482–501. URL: <https://doi.org/10.1002/sml.200500006>
9. Nguyen T.H., Konyukhov Yu.V., Nguyen V.M., Levina V.V. and Karpenkov D.Yu. *Magnitnye svoystva nanoporoshkov Fe, Co, Ni, poluchennykh himiko-metallurgicheskim metodom* [Magnetic properties of Fe, Co, Ni nanopowders produced by chemical-metallurgy method]. *XXII Mezhdunarodnaya konferenciya po postoyannym magnitam* [XXII-th International conference on permanent magnets]. 2019, p. 105. (in Russian).
10. Kargin D.B., Mukhambetov D.G., Konyukhov Y.V., Altynov E.A. and Aznabakiev K.R. *Magnitnye svoystva nanoporoshkov zheleza i ego oksidov, poluchennykh iz prokatnoj okaliny* [Magnetic properties of iron and iron oxide nanopowders produced from rolling mill scale]. *XXII Mezhdunarodnaya konferenciya po postoyannym magnitam* [XXII-th International conference on permanent magnets]. 2019, pp. 107. (in Russian).
11. Rudakovskaya P.G., Beloglazkina E.K., Mazhuga A.G., Klyachko N.L., Kabanov A.V. and Zyk N.V. *Sintez nanochastich magnetit – zoloto, imeyuschih strukturu tipa yadro – obolochka* [Synthesis of magnetite-gold nanoparticles with core-shell structure]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2: Khimiya* [Moscow University Chemistry Bulletin. Series 2 : Chemistry]. 2015, vol. 56, no. 3, pp. 181–189. (in Russian).
12. Nguyen T.H. and Nguyen V.M. *Vliyaniye poverhnostno-aktivnykh veschestv na dispersnost' nanoporoshkov zheleza, kobal'ta i nikel'ya* [The effect of surfactants on the particle size of iron, cobalt and nickel nanopowders]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funktsional'nye pokrytiya* [Universities' Proceedings. Powder Metallurgy and Functional Coatings]. 2020, no. 1, pp. 22–28. (in Russian). URL: <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2020-22-28>
13. Konyukhov Yu.V., Levina V.V., Dzidziguri E.L., Kuznetsov D.V. and Khrustov Ye.N. *Dispersnost' i morfologiya ul'tradispersnykh poroshkov zheleza, poluchennykh zol'-gel' metodom* [Dispersion and morphology of ultradispersed iron powders produced by sol-gel method]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Physics and chemistry of materials treatment], 2005, no. 4, pp. 77–80. (in Russian).
14. Konyukhov Yu.V. and Nguyen V.M. *Kineticheskie zakonomernosti vodorodnogo vosstanovleniya nanoporoshka zheleza v razlichnykh sloyakh* [Kinetic regularities of hydrogen reduction of iron nanopowder in various layers]. *XXXV Vserossiyskiy simpozium molodykh uchenykh po khimicheskoy kinetike* [XXXV Russian symposium of young scientists on chemical kinetics]. 2018, pp. 53–54. (in Russian).
15. Konyukhov Yu.V., Nguyen V.M. and Ryzhonkov D.I. *Kineticheskie zakonomernosti processov vodorodnogo vosstanovleniya nanoporoshka α -Fe₂O₃ pri `energo-mehanicheskoj obrabotke v `elektromagnitnom pole* [Kinetics of reduction of α -Fe₂O₃ nanopowder with hydrogen under power mechanical treatment in an electromagnetic field]. *Fizika i khimiya obrabotki materialov* [Inorganic Materials: Applied Research]. 2019, vol. 10, no. 3, pp. 706–712. URL: <https://doi.org/10.1134/S2075113319030171> (in Russian).

16. Kushnir Yu. A., Vnukov A.A., Golovachev A.N. and Kovzik A.N. *Ocenka korrozionnoj stojkosti himicheski osazhdennykh pokrytij na osnove medi i olova dlya zaschity svarochnoj provoloki* [Estimation of corrosion stability of chemically deposited coatings on the basis of copper and tin for protection of welding wire]. *Metaloznavstvo ta termichna obrobka metaliv* [Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals]. 2018, no. 3, pp. 47–53. (in Ukrainian). URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.250918.47.398> (in Russian).

17. Ryzhonkov D.I., Konyukhov Yu.V. and Nguyen V.M. Kinetic Regularities and Mechanisms of Hydrogen Reduction of Nanosized Oxide Materials in Thin Layers. *Nanotechnologies in Russia*. 2017, vol. 12, no. 11–12, pp. 620–626. URL: <https://doi.org/10.1134/S1995078017060076>

18. Konyukhov Yu.V., Levina V.V., Ryzhonkov D.I. and Puzik I.I. *Svoistva nanorazmernykh poroshkov zheleza, poluchennykh khimiko-metallurgicheskim metodom s primeneniem poverkhnostno-aktivnykh veshchestv* [Properties of nanosized iron powders produced by chemical-metallurgy method using surfactants]. *Rossiiskie nanotekhnologii* [Nanotechnologies in Russia]. 2008, vol. 3, no. 5–6, pp. 158–163. (in Russian).

19. Braun M., Dollimore D. and Galvei A. *Reaktsii tverdykh tel* [Solid reactions]. Moscow : Mir Publ., 1983, 360 p. (in Russian).

20. Ryzhonkov D.I., Arsent'ev P.P. and Yakovlev V.V. *Teoriya metallurgicheskikh protsessov* [Theory of metallurgical processes]. Moscow : Metallurgiya Publ., 1989, 392 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 31.08.2020 р.

УДК 539.3620.194:621.795

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.290920.74.671

ВПЛИВ ЗМІЦНЕНОГО ЕЛЕМЕНТАМИ ПРОНИКНЕННЯ (О, С) ПРИПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ НА ОПІР РУЙНУВАННЮ ТИТАНУ ЗА ВТОМНОГО ТА УДАРНОГО НАВАНТАЖЕНЬ

ТРУШ В. С.^{1*}, канд. техн. наук, с. н. с.,
 ФЕДІРКО В. М.², докт. техн. наук, проф., гол. н. с.,
 ЛУК'ЯНЕНКО О. Г.³, канд. техн. наук, с. н. с.

^{1*} Відділ матеріалознавчих основ інженерії поверхні, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, 79060, Львів, Україна, e-mail: trushvasyl@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2264-3918

² Відділ матеріалознавчих основ інженерії поверхні, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, 79060, Львів, Україна, e-mail: fedirko@ipm.lviv.ua, ORCID ID: 0000-0002-4337-1691

³ Відділ матеріалознавчих основ інженерії поверхні, Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, вул. Наукова, 5, 79060, Львів, Україна, e-mail: AGNSLUkryanenko@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-6642-2300

Анотація. *Мета дослідження* – встановити вплив зміцненого приповерхневого шару елементами проникнення (киснем, вуглецем) на втомну довговічність титану за чистого згину та підвищених температур (до 350 °С) та ударну в'язкість за кімнатної температури. *Методика.* Досліджували зразки промислових титанових сплавів α - (BT5-1 і ПТ-7М), псевдо- α - (OT4-1), ($\alpha+\beta$)- (BT14 і BT19) класів. Після виготовлення зразки відпалювали у вакуумі за режимом: $T = 800$ °С, $\tau = 5$ год., $P = 0,05$ мПа. Тонколистові зразки (~ 1 мм) насичували з кисне- та вуглецевмісного середовищ для формування градієнтного зміцненого приповерхневого шару без фазової плівки. *Результати.* Виявлено, що втомна довговічність в діапазоні температур $T = 20 \dots 150$ °С титану BT1-0 не чутлива до температури випробувань при формуванні «оптимального» рівня зміцнення поверхні ($K = 70$ %, $l = 30$ мкм) після обробки у кисневмісному середовищі. За температур $T = 150 \dots 400$ °С залежність довговічності титану має однаковий спадаючий характер для всіх досліджуваних рівнів ($K = 70$ % та $K = 140$ %) поверхневого зміцнення. Виявлено, що зміцнення ($K = 70$ %, $l = 30$ мкм) поверхневого шару, сформованого у кисне- та вуглецевмісному газових середовищах, підвищує ударну в'язкість на 4...6 % відносно необробленого ($K = 0$ %) стану. *Наукова новизна.* Встановлено параметри зміцненого шару ($K = 70$ %, $l = 30$ мкм), які сприяють підвищенню втомної довговічності на 15...25 % за чистого згину та підвищених температур $T = 150$ °С, а також показано, що такий шар не викликає зниження ударної в'язкості титану BT1-0. *Практична значимість.* Формування зміцненого приповерхневого шару ($K = 70$ %, $l = 30$ мкм) може бути використане на тонколистових виробках із титанового сплаву BT1-0 для підвищення довговічності за циклічного навантаження та чистого згину до $T = 150$ °С або для опірності за ударного навантаження.

Ключові слова: титановий сплав; газове середовище; приповерхневий шар; кисень; вуглець; втомна довговічність; ударна в'язкість

ВЛИЯНИЕ УПРОЧНЕННОГО ЭЛЕМЕНТАМИ ВНЕДРЕНИЯ (О, С) ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ РАЗРУШЕНИЮ ТИТАНА ПРИ УСТАЛОСТНОЙ И УДАРНОЙ НАГРУЗКАХ

ТРУШ В. С.^{1*}, канд. техн. наук, с. н. с.,
 ФЕДИРКО В. Н.², докт. техн. наук, проф., гл. н. с.,
 ЛУК'ЯНЕНКО А. Г.³, канд. техн. наук, с. н. с.

^{1*} Отдел материаловедческих основ инженерии поверхности, Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, ул. Наукова, 5, 79060, Львов, Украина, e-mail: trushvasyl@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2264-3918

² Отдел материаловедческих основ инженерии поверхности, Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, ул. Наукова, 5, 79060, Львов, Украина, e-mail: fedirko@ipm.lviv.ua, ORCID ID: 0000-0002-4337-1691

³ Отдел материаловедческих основ инженерии поверхности, Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины, ул. Наукова, 5, 79060, Львов, Украина, e-mail: agnslukryanenko@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-6642-2300

Аннотация. *Цель исследования* – установить влияние упрочненного приповерхностного слоя элементами проникновения (кислородом, углеродом) на усталостную долговечность титана при чистом изгибе и повышенных температурах (до 350 °С) и ударную вязкость при комнатной температуре. **Методика.** Исследовали образцы промышленных титановых сплавов α - (BT5-1 и ПТ-7М), псевдо- α - (OT4-1), $(\alpha+\beta)$ - (BT14 и BT19) классов. После изготовления образцы отжигали в вакууме при режиме: $T = 800$ °С, $\tau = 5$ ч, $P = 0,05$ МПа. Тонколистовые образцы (~ 1 мм) насыщали из кислород- и углеродсодержащих сред для формирования градиентного упрочненного приповерхностного слоя без фазовой пленки. **Результаты.** Выявлено, что усталостная долговечность в диапазоне температур $T = 20\text{...}150$ °С титана BT1-0 не чувствительна к температуре испытаний при формировании «оптимального» уровня упрочнения поверхности ($K = 70$ %, $l = 30$ мкм) после обработки в кислородсодержащей среде. При температурах $T = 150\text{...}400$ °С зависимость долговечности титана имеет одинаковый убывающий характер для всех исследуемых уровней ($K = 70$ % и $K = 140$ %) поверхностного упрочнения. Выявлено, что упрочнение ($K = 70$ %, $l = 30$ мкм) поверхностного слоя, сформированного в кислород- и углеродсодержащих газовых средах, повышает ударную вязкость на 4...6 % относительно необработанного ($K = 0$ %) состояния. **Научная новизна.** Установлены параметры упрочненного слоя ($K = 70$ %, $l = 30$ мкм), которые способствуют повышению усталостной долговечности на 15...25 % при чистом изгибе и повышенных температурах $T = 150$ °С, а также показано, что такой слой не приводит к снижению ударной вязкости титана BT1-0. **Практическая значимость.** Формирование упрочненного приповерхностного слоя ($K = 70$ %, $l = 30$ мкм) может быть использовано на тонколистовых изделиях из титанового сплава BT1-0 для повышения долговечности при циклической нагрузке и чистом изгибе до $T = 150$ °С или для сопротивляемости при ударной нагрузке.

Ключевые слова: титановый сплав; газовая среда; приповерхностный слой; кислород; углерод; усталостная долговечность; ударная вязкость

INFLUENCE OF THE STRENGTHENED SURFACE LAYER BY ELEMENTS INTERSTITIAL OF (O, C) ON THE FRACTURE RESISTANCE OF TITANIUM DURING FATIGUE AND IMPACT LOADS

TRUSH V.S.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Senior Researcher*,
FEDIRKO V.M.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof., Chief Researcher*,
LUKYANENKO A.G.³, *Cand. Sc. (Tech.), Senior Researcher*

^{1*} Department of Materials Science Fundamentals of Surface Engineering, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, 5, Naukova St., 79060, Lviv, Ukraine, e-mail: trushvasyl@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2264-3918

² Department of Materials Science Fundamentals of Surface Engineering, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, 5, Naukova St., 79060, Lviv, Ukraine, e-mail: fedirko@ipm.lviv.ua, ORCID ID: 0000-0002-4337-1691

³ Department of Materials Science Fundamentals of Surface Engineering, Karpenko Physico-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine, 5, Naukova St., 79060, Lviv, Ukraine, e-mail: AGNSLUkyanenko@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-6642-2300

Abstract. *The purpose* of the study to establish the effect of the strengthened near-surface layer by penetration elements (O, C) on the fatigue life of a clean bend at elevated temperatures (up to 350 °С) and impact strength at room temperature of titanium. **The Methodology.** We studied samples of industrial titanium alloys of α - (VT5-1 and PT-7M), pseudo- α -(OT4-1), $(\alpha + \beta)$ -(VT14 and VT19) classes. After fabrication, the samples were annealed in vacuum according to the mode: $T = 800$ °С, $\tau = 5$ h, $P = 0,05$ МПа. Thin-sheet samples (~ 1 mm) were saturated with oxygen and carbon-containing media to form a gradient hardened near-surface layer without a phase film. **Results.** It was revealed that the fatigue life in the temperature range $T = 20\text{...}150$ °С of VT1-0 titanium is not sensitive to the test temperature during the formation of the «optimal» level of surface hardening ($K = 70$ %, $l = 30$ μm) after treatment in oxygen-containing media. At temperatures $T = 150\text{...}400$ °С, the dependence of the durability of titanium has the same decreasing character for all studied levels ($K = 70$ % and $K = 140$ %) of surface hardening. It is revealed that hardening ($K = 70$ %, $l = 30$ μm) of the surface layer formed in oxygen- and carbon-containing gas media increases the impact toughness by 4..6 % relative to the untreated ($K = 0$ %) state. **Originality.** The parameters of the hardened layer ($K = 70$ %, $l = 30$ μm), which contribute to an increase in fatigue life by 15...25 % at pure bending at elevated temperatures $T = 150$ °С, have been established, and it has also been shown that such a layer does not lead to a decrease in the impact titanium viscosity VT1-0. **Practical value.** The formation of a strengthened near-surface layer ($K = 70$ %, $l = 30$ μm) can be used in non-thin-sheet products made of VT1-0 titanium alloy to increase the durability under a cyclic load up $T = 150$ °С or resistance to shock loading.

Keywords: titanium alloy; gaseous medium; surface layer; oxygen; carbon; fatigue life; impact strength

Вступ. Титан належить до легких металів, які через низьку питому густину та низький модуль пружності мають значні переваги під час використання в автомобільній та авіаційній промисловостях [1–4]. Корозійна інертність у багатьох середовищах зумовлює його широке використання у хімічній промисловості [5–8]. Цей комплекс властивостей робить титан та його сплави незамінними матеріалами для сучасних потреб промисловості.

Проте часто до титанових сплавів, використаних у відповідальних деталях і вузлах, які перебувають у складних умовах експлуатації, висуваються додаткові вимоги. Тому забезпечення тривалої експлуатації титанових виробів в особливо складних умовах без додаткової обробки поверхні неможливе.

Хіміко-термічна обробка – один з ефективних методів керування структурою та характеристиками приповерхневих шарів металів, що поліпшує низьку фізико-механічних властивостей матеріалу [9; 10]. Формування модифікованих зміцнених приповерхневих шарів на титані з використанням елементів проникнення має низьку перевагу. Зокрема, захисний модифікований шар формується з використанням матричного металу й тому міцно зчеплений з ним.

Мета дослідження – встановити вплив зміцненого приповерхневого шару елементами проникнення (киснем, вуглецем) на втомну довговічність титанових сплавів за симетричного чистого згину за підвищених температур (до 350 °C) та ударну в'язкість за кімнатної температури.

Матеріали та методика досліджень. Досліджували тонколисткові зразки (~ 1 мм) промислових титанових сплавів α - (BT1-0, BT5-1, ПТ-7М), $(\alpha+\beta)$ - (BT14, BT19) класів.

Після виготовлення зразки для формування вихідного фазово-структурного стану (зняття залишкових напружень, видалення водню, гомогенізації й стабілізації структури) відпалювали у

вакуумі за режимом: $T = 800$ °C, $\tau = 5$ год, $P = 0,05$ мПа.

Термодифузійне насичення з кисневмісної газової суміші здійснювали на лабораторній установці, яка спроектована та розроблена у ФМІ. Поверхневий газонасичений шар із різним рівнем зміцнення формували термодифузійним насиченням у динамічному розрідженому газовому кисневмісному середовищі. Режимом обробки вибирали за встановленими кореляціями між температурно-часовими й газодинамічними параметрами насичувального середовища й характеристиками зміцнених шарів.

Змінюючи парціальний тиск кисню, тривалість насичення і швидкість натікання кисню в реакційну камеру, одержували зміцнені шари з різним співвідношенням відносного приросту твердості K ($K = ((H^{пов}_{0,49} - H^{серц}_{0,49})/H^{серц}_{0,49}) \cdot 100$ %, де $H^{пов}_{0,49}$ – твердість поверхні металу; $H^{серц}_{0,49}$ – твердість матриці металу).

Швидкість нагрівання становила ≈ 200 °C/год, а швидкість охолодження не регламентувалася (з піччю). Під час охолодження суцільних зразків за температури 270 °C в камеру печі напускали повітря для утворення тонкої оксидної плівки, яка запобігає наводнюванню металу за нормальних атмосферних умов. Зразки перед відпалом ретельно промивали в ацетоні та спирті, а потім висушували.

Для науглецювання титанових сплавів використовували установку для відпалу у вакуумі та контрольованих газових середовищах, що розроблена у ФМІ НАН України. Насичувальним середовищем слугувала газова суміш аргону з пропаном. Об'ємний вміст пропану складав 16,7 %.

Постійну концентрацію насичувальної складової (C_3H_8) забезпечували неперервним напусканням вуглецевмісної газової суміші. Після закінчення насичувальної витримки камеру вакуумували і зразки охолоджували разом із піччю. Після охолодження реакційну камеру розгерметизовували та виймали зразки для подальших досліджень.

Випробування зразків досліджуваних сплавів на втому за умов симетричного чистого згину показано на рисунку 1.

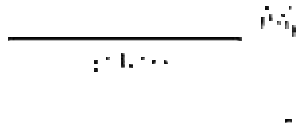


Рис. 1. Схема навантаження зразків під час випробування на втому чистим згином

Дослідження на втому проводили на машині УМДУ-01, розробленій та виготовленій у ФМІ НАН України, принципова схема якої наведена на рисунку 2.

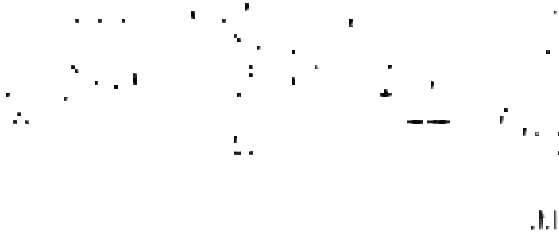


Рис. 2. Принципова схема машини (УМДУ-01) для випробувань матеріалів чистим згином:

- 1 – захват; 2 – зубчастий сектор; 3, 4 – вилка;
- 5 – ланка; 6 – рейка зубчата;
- 7 – ролик; 8 – пружина; 9, 10 – ланки; 11 – кінцевий вимикач; 12 – перекладина; 13 – регулювальний кривошип; 14 – двигун; 15 – мікрометричний механізм зміщення кривошипа; 16 – муфта для створення асиметричного циклу навантаження; 17 – лічильник; 18 – гнучкий вал

Результати випробувань малоцикловим чистим згином наводили в координатах «максимальна амплітуда деформації ϵ_a – логарифм кількості циклів до руйнування».

Машина дозволяє проводити випробування чистим згином у режимі жорсткого навантаження із заданою амплітудою деформації $\pm \epsilon_a$ за частоти навантаження $\nu = 0,5$ Гц на повітрі та в газових середовищах за температури $T = 20 \dots 800$ °C (рис. 2).

Експериментально визначено ударну в'язкість тонколистових зразків (~1 мм). Дослідження проведено на стандартній установці типу маятниковий копер моделі

КМ-0,5, яка призначена для стандартних лабораторних досліджень. Розроблено модифікацію цього копра для досліджень на розтяг при ударі (рис. 3).

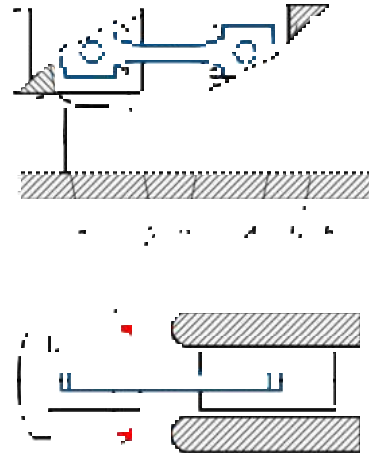


Рис. 3. Принципова схема пристрою для кріплення зразків в установці: 1 – рухомий сухарик, 2 – дослідний зразок, 3 – штифти, 4 – кронштейн, 5 – плита, 6 – головка копра

Модифікація копра полягала у розробленні спеціального пристрою для кріплення зразків. Дослідний зразок 2 кріпиться за допомогою двох штифтів 3 у кронштейні 4, який жорстко з'єднаний з основною плитою копра 5. Друга головка копра закріплена в рухомому сухарі 1. Для установки застосована спеціальна головка П-подібного перерізу. Попадаючи у крайнє нижнє положення, головка копра 6 вдаряється об виступи рухомого сухаря 1, через який передає зусилля ударного розтягу на дослідний зразок (рис. 5).

Результати та їх обговорення. Отримано експериментальні результати щодо впливу температури випробувань на довговічність титанового сплаву ВТ1-0 за симетричного чистого згину у широкому температурному діапазоні $T = 20 \dots 400$ °C з різним рівнем відносного приросту твердості K (глибина зміцненої зони $l = 30$ мкм) сформованого з кисневмісного газового середовища.

Установлено, що за рівня поверхневого зміцнення $K = 70$ % в діапазоні температур $T = 20 \dots 150$ °C втомна довговічність титану ВТ1-0 не чутлива до температури випробувань. За температур $T = 150 \dots 400$ °C

залежність довговічності титану має однаковий спадний характер для всіх досліджуваних рівнів поверхневого зміцнення (рис. 4).

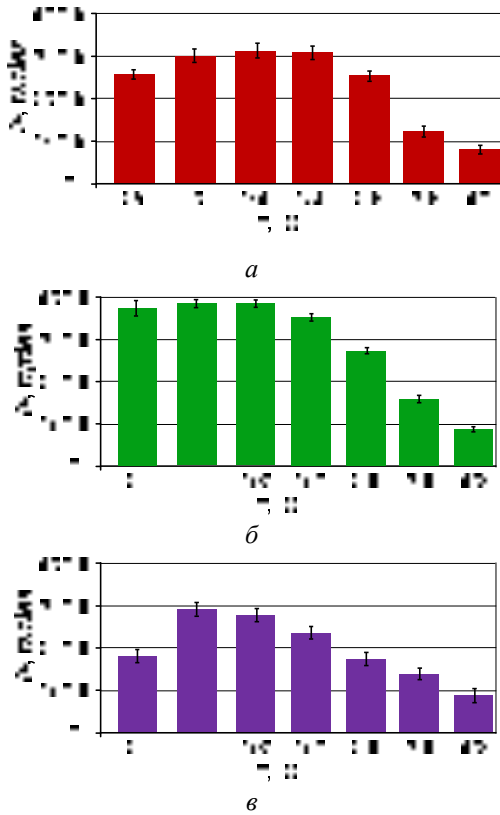
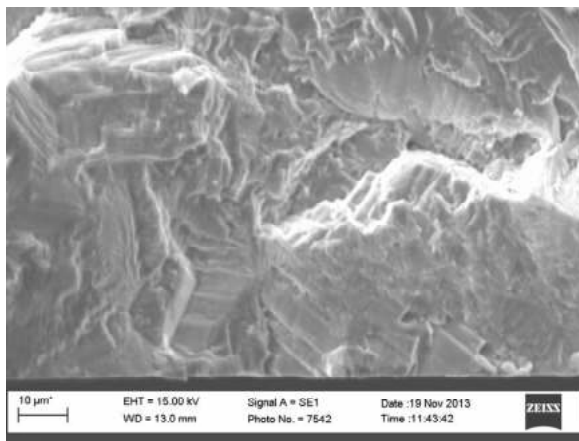
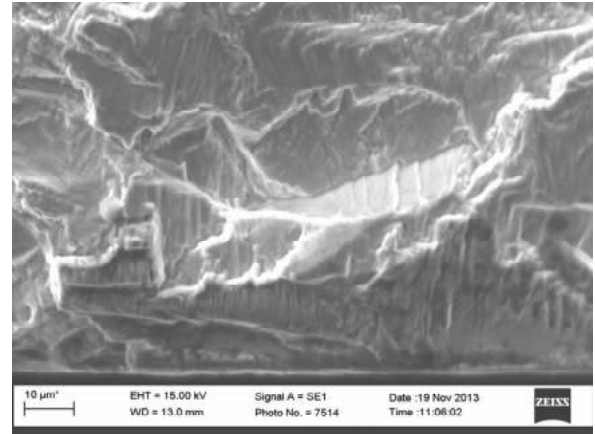


Рис. 4. Довговічність титанового сплаву VT1-0 за чистого згину залежно від температури випробувань з різним рівнем зміцнення K: а – K = 0 % (без обробки), б – K = 70 %, в – K = 140 %

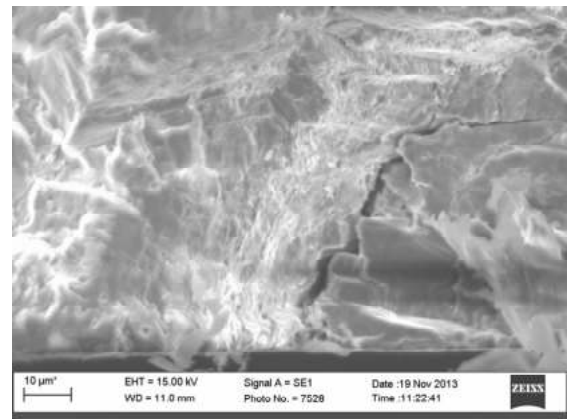
Згідно з результатами фактографічних досліджень, на поверхні зламу за K = 140 % зафіксовано вторинні тріщини, чого не спостерігається за K = 0 % та за K = 70 % (рис. 5).



а



б



в

Рис. 5. Злами приповерхневого шару зразків титанового сплаву VT1-0 після випробувань за чистого згину за кімнатної температури залежно від випробувань з різним рівнем зміцнення K: а – K = 0 % (без обробки), б – K = 70 %, в – K = 140 %

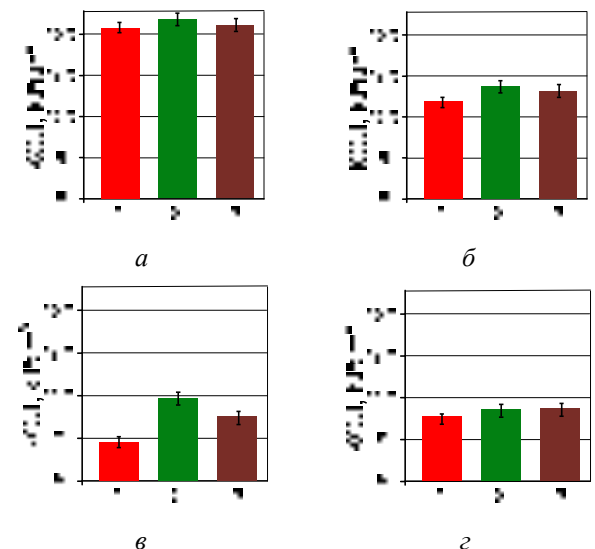


Рис. 6. Ударна в'язкість за умов розтягу титанових сплавів до обробки (1) та після обробки у кисневмісному (2) та вуглецевмісному середовищах (3): а – VT1-0, б – VT5-1, в – VT14, г – VT19

На рисунку 6 відображено результати впливу обробки у кисневмісному та вуглецевмісному середовищах на ударну в'язкість досліджуваних титанових сплавів.

Відповідно до отриманих результатів експериментальних досліджень обробка тонколистового (~ 1 мм) титанового сплаву VT1-0 у кисневмісному та вуглецевмісному газових середовищах на рівень поверхневого зміцнення $K = 70\%$, $K = 90\%$, відповідно не викликає пониження ударної в'язкості за кімнатної температури. Навіть спостерігається незначне підвищення ударної в'язкості на 4...7 % відносно необробленого (перед хіміко-термічною обробкою). Такі підвищення ударної в'язкості можна пояснити позитивним впливом зміцненого поверхневого шару. Адже у приповерхневому шарі формується певний градієнт стискальних напружень, які, власне, і впливають позитивно на ударну в'язкість.

Наукова новизна та практична значимість. У цій статті вперше наведено результати досліджень, які свідчать, що втомна довговічність титану VT1-0 не чутлива до температури випробувань за наявності поверхневого зміцнення $K = 70\%$

в діапазоні температур $T = 20...150\text{ }^{\circ}\text{C}$, за $T = 150...400\text{ }^{\circ}\text{C}$ залежність довговічності титану має спадний характер. Практична значимість отриманих результатів досліджень полягає в тому, що формування зміцненого приповерхневого шару з кисневмісного газового середовища на тонколистових виробах із титанового сплаву VT1-0 зумовлює підвищення довговічності за чистого симетричного згину до $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Отже, можна зазначити, що формування зміцненого приповерхневого шару з кисневмісного та вуглецевмісного газових середовищ дозволяє забезпечувати підвищення втомної довговічності за симетричного чистого згину та ударну в'язкість за випробувань розтягом.

Висновки. Експериментально виявлено, що втомна довговічність титану VT1-0 в діапазоні температур випробувань $T = 20...150\text{ }^{\circ}\text{C}$ не чутлива за рівня поверхневого зміцнення $K = 70\%$, а за температур $T = 150...400\text{ }^{\circ}\text{C}$ залежність довговічності титану має однаковий спадний характер для всіх досліджуваних рівнів поверхневого зміцнення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Moiseyev V.N. Titanium Alloys. Russian aircraft and aerospace applications. London – New York – Singapore: Taylor & Francis Group, 2006. 207 p.
2. Hideki F., Kazuhiro T., Yoshito Ya. Application of titanium and its alloys for automobile parts. *Nippon Steel Technical Report*. 2003. № 88. Pp. 70–75.
3. Sha W., Malinov S. Modelling of Microstructure, Properties and Application Woodhead. Woodhead Publishing, 2009. 588 p.
4. Lutjering G., Williams J. C. Titanium: 2nd edition. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2007. 438 p.
5. Geetha M., Singh A. K., Asokamani R., Gogia A. K. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants : a review. *Progress in Materials Science*. 2009. Vol. 54. Pp. 397–425.
6. Yoshiki O. Bioscience and bioengineering of titanium materials. Elsevier, 2007. 437 p.
7. Xuanyong L., Paul K. Chu, Xuanyong Ch. Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. *Materials Science and Engineering*. 2004. Vol. 47. Pp. 49–121.
8. Shcherbakov A. I., Tomashov N. D., Kazarin V. I., Goncharenko B. A., Mikheev V. S. Corrosion properties of titanium alloys in sulfuric acid. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2009. Vol. 26 (5). Pp. 259–262. URL: doi:10.1007/bf01149686.
9. Fedirko V. N., Luk'yanenko A. G., Trush V. S. Solid-Solution Hardening of the Surface Layer of Titanium Alloys. Part 1. Effect on Mechanical Properties. *Metal Science and Heat Treatment*. November 2014. Vol. 56, iss. 7. Pp. 368–373. URL: doi: 10.1007/s11041-014-9764-3).
10. Fedirko V.M., Luk'yanenko O.H., Trush V.S. Influence of the Diffusion Saturation with Oxygen on the Durability and Long-Term Static Strength of Titanium Alloys. *Materials Science*. November 2014. Vol. 50, iss. 3, pp. 415–420. URL: doi: 10.1007/s11003-014-9735-2

REFERENCES

1. Moiseyev V.N. Titanium Alloys. Russian aircraft and aerospace applications. London – New York – Singapore: Taylor & Francis Group, 2006, 207 p.
2. Hideki F., Kazuhiro T. and Yoshito Ya. Application of titanium and its alloys for automobile parts. Nippon Steel Technical Report. 2003, no. 88, pp. 70–75.
3. Sha W. and Malinov S. Modelling of Microstructure, Properties and Application Woodhead. 2009, Woodhead Publishing, 588 p.
4. Lutjering G. and Williams J.C. Titanium: 2nd edition. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2007, 438 p.
5. Geetha M., Singh A.K., Asokamani R. and Gogia A.K. Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants: a review. Progress in Materials Science. 2009, vol. 54, pp. 397–425.
6. Yoshiki O. Bioscience and bioengineering of titanium materials. Elsevier, 2007, 437 p.
7. Xuanyong L., Paul K. Chu and Xuanyong Ch. Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications. Materials Science and Engineering. 2004, vol. 47, pp. 49–121.
8. Shcherbakov A.I., Tomashov N.D., Kazarin V.I., Goncharenko B.A. and Mikheev V.S. Corrosion properties of titanium alloys in sulfuric acid. Chemical and Petroleum Engineering. 1990, vol. 26 (5), pp. 259–262. URL: doi:10.1007/bf01149686.
9. Fedirko V.N., Luk'yanenko A.G., and Trush V.S. Solid-Solution Hardening of the Surface Layer of Titanium Alloys. Part 1. Effect on Mechanical Properties. Metal Science and Heat Treatment. November 2014, vol. 56, iss. 7, pp. 368–373. URL: doi: 10.1007/s11041-014-9764-3).
10. Fedirko V.M., Luk'yanenko O.H. and Trush V.S. Influence of the Diffusion Saturation with Oxygen on the Durability and Long-Term Static Strength of Titanium Alloys. Materials Science. November 2014, vol. 50, iss. 3, pp. 415–420. URL: doi: 10.1007/s11003-014-9735-2

Надійшла до редакції: 02.08.20.

Металознавство та термічна обробка металів
Науковий та інформаційний журнал
№ 3 (90) 2020 р.

Відповідальний секретар: к. т. н., доц. *Тимошенко О. А.*
Технічний редактор: *Тимошенко О. А.*
Комп'ютерна верстка: *Тимошенко О. А.*
Редактор, коректор: *Маловик В. Д.*
Відповідальність за достовірність інформації, що міститься в друкованих матеріалах,
несуть автори. Редколегія не завжди поділяє авторську точку зору.

Адреса редакції:
Україна, 49600, Дніпро, вул. Чернишевського, 24-а,
кімн. 501 (відповідальний секретар)
+38 (050) 452-43-63
e-mail : mitomdnipro1997@gmail.com

Підп. до друку 01.10.2020 р. Формат 210×297 1/16.
Друк офсетний. Умовн. друк. арк. 5,00. Умовн. фарб.-відб. арк. 5,20. Наклад 50 прим.

Типографія «Atmosfera». Ідентифікатор видавця у системі ISBN: 2267
Адреса: 49000, Дніпро, вул. О. Гончара, 15-Б
тел.: +38 (063) 359-83-09, +38 (067) 892-06-03, +38 (050) 452-10-81
e-mail: 8102@ukr.net

Металловедение и термическая обработка металлов
Научный и информационный журнал
№ 3 (90) 2020 г.

Ответственный секретарь: к. т. н., доц. *Тимошенко Е. А.*
Технический редактор: *Тимошенко Е. А.*
Компьютерная верстка: *Тимошенко Е. А.*
Редактор, корректор: *Маловик В. Д.*
Ответственность за достоверность информации, размещаемой в печатных материалах,
несут авторы. Редколлегия не всегда разделяет авторскую точку зрения.

Адрес редакции:
Украина, 49600, Днипро, ул. Чернышевского, 24-а,
комн. 501 (ответственный секретарь)
+38 (050) 452-43-63
e-mail : mitomdnipro1997@gmail.com

Подп. в печать 01.10.2020 г. Формат 210×297 1/16.
Печать офсетная. Условн. печ. л. 5,00. Условн. крас.-отп. л. 5,20. Тираж 50 экз.

Типография «Atmosfera». Идентификатор издателя в системе ISBN: 2267
Адрес: 49000, Днипро, ул. О. Гончара, 15-Б
тел.: +38 (063) 359-83-09, +38 (067) 892-06-03, +38(050)452-10-81
e-mail: 8102@ukr.net

Metal Science and Heat Treatment of Metals
Scientific and information journal
№ 3 (90) 2020

Executive Secretary: Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof. *Tymoshenko O. A.*
Technical Editor: *Tymoshenko O. A.*
Desktop publishing: *Tymoshenko O. A.*
Editor, Proof-reader: *Malovyk V.D.*
Authors bear the responsibility for the information accuracy contained in the printed materials.
Editors do not always agree with the author's point of view.
The materials are presented in the author's wording

Editotial adress:
24-a, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine
room 501 (Executive Secretary)
+38 (050) 452-43-63
e-mail : mitomdnipro1997@gmail.com

Send to press on the 01th of October, 2020. Format 210×297 1/16.
Offset printing. Conventional quire 5,00. Conventional paint marks 5,20. Number of copies 50.

Publisher "Atmosfera". ISBN: 2267
49000, Dnipro, Oles' Honchar Str., 15-B
tel.: +38 (063) 359-83-09, +38 (067) 892-06-03, +38 (050) 452-10-81
e-mail: 8102@ukr.net