

ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ

№ 1
2024

Видається з 1985 року
4 випуски на рік

Сучасна електрометалургія ◇ Современная электрометаллургия ◇ Electrometallurgy Today

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ, м. Київ:

С.В. Ахонін (головний редактор),

В.О. Березос, Ю.В. Костецький, В.А. Костін,

І.В. Кривцун, Л.Б. Медовар, Г.П. Стовпченко,

А.І. Устїнов, В.О. Шаповалов;

М.М. Гасик, Аалто Університет, Еспоо, Фінляндія,

М.І. Гречанюк, Інститут проблем

матеріалознавства НАНУ, м. Київ,

М. Зініград, Аріельський університет,

Центр матеріалознавства, Ізраїль,

О.М. Івасішин, Інститут металофізики

ім. Г.В. Курдюмова НАНУ, м. Київ,

Ю.Г. Квасницька, ФТМС НАНУ, м. Київ,

П.І. Лобода,

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ,

О.В. Овчинников, ЗНТУ, м. Запоріжжя

Виконавчий директор — О.Т. Зельніченко,

Міжнародна Асоціація «Зварювання», м. Київ

Засновники

Національна академія наук України,

Інститут електрозварювання

ім. Є.О. Патона НАНУ,

Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

Редакція

Д.М. Дяченко (відповід. секретар),

Л.М. Герасименко, Т.Ю. Снегірьова, А.А. Чайка

Адреса

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ,

03150, Україна, Київ,

вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: (38044) 205 23 90

E-mail: journal@paton.kiev.ua

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem>

Журнал входить до переліку затверджених

Міністерством освіти і науки України видань

для публікації праць здобувачів наукових ступенів

за спеціальностями 132, 133

Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020

Рекомендовано до друку

редакційною колегією журналу

Свідоцтво про державну реєстрацію

КВ № 24212-14052 ПР від 03.12.2019

ISSN 2415-8445

DOI: <https://doi.org/10.15407/sem>

Передплата 2024

Передплатний індекс 70693

4 випуски на рік (видається щоквартально)

Друкована версія: 1200 грн. за річний комплект

з урахуванням доставки

рекомендованою бандероллю.

Електронна версія: 1200 грн. за річний комплект.

ЗМІСТ*

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона — сьогодення
та погляд у майбутнє 3

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ПРОЦЕСИ

Овчинников О.В., Ахонін С.В., Березос В.О., Северин А.Ю.,
Галенкова О.Б., Шевченко В.Г. Отримання перспективних
сплавів на основі алюмінідів титану для сучасного
авіамоторобудування 9

ЕЛЕКТРОШЛАКОВА ТЕХНОЛОГІЯ

Протоковілов І.В., Бейнертс Т., Порохонько В.Б., Петров Д.А.
ЕШП титану у вакуумі 17

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Демчишин А.В., Демчишин А.А., Єгоров С.П. Структура
і механічні властивості товстих конденсатів міді, дисперсно-
зміцнених хромом, оксидом цирконію та їх сумішшю 24

ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ СТАЛІ
ТА ФЕРОСПЛАВІВ

Богаченко О.Г., Черняков А.В., Гончаров І.О., Кійко С.Г.,
Логозинський І.М., Левін Б.А., Федьков А.Г., Горбань К.М.

Застосування графітованих гнотових електродів на 50-тонній
дуговій сталеплавильній печі змінного струму типу ДСВ-50 32

ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ МЕТАЛУРГІЇ

Барабаш В.В., Біктагіров Ф.К. Застосування зовнішнього
впливу при виробництві сталевих зливків. Огляд 40

Козін Р.В., Калинюк О.М., Кібкало А.М., Калинюк М.М.,

Пузрін О.Л. Аналізування кремнію на вміст домішок кисню,
нітрогену і гідрогену 49

ІНФОРМАЦІЯ

Створення наукових основ металургії зварювання 57

*Статті з журналу «Сучасна електрометалургія» вибірково перекладаються
на англійську мову та публікуються в «The Paton Welding Journal»:
<https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj>

EDITORIAL BOARD

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute
of NASU, Kyiv:

S.V. Akhonin (Editor in Chief),

V.O. Berezos, Yu. V. Kostetskyi, V.A. Kostin,
I.V. Krivtsun, L.B. Medovar, G.P. Stovpchenko,

A.I. Ustinov, V.O. Shapovalov;

M.M. Gasik, Aalto University, Espoo, Finland,
M.I. Grechanyuk, Institut for Problems of Material
Science of NASU, Kyiv,

M. Zinigrad, Ariel University,
Materials Science Centre, Israel,

O.M. Ivasishyn, G.V. Kurdyumov Institute
for Metal Physics of NASU, Kyiv,

Yu.H. Kvasnytska, Physico-Technological
Institute of Metals and Alloys, Kyiv,

P.I. Loboda, NTUU «Igor Sykorsky
Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv,

O.V. Ovchynnikov, Zaporozhye National Technical
University, Ukraine

Executive Director — O.T. Zelnichenko,
International Association «Welding», Kyiv, Ukraine

Founders

National Academy of Sciences of Ukraine,
E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU,
International Association «Welding» (Publisher)

Editors

D.M. Diachenko (execut. secretary),
L.M. Gerasymenko, T.Yu. Snegiryeve, A.A. Chaika

Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU,
03150, Ukraine, Kyiv,
11 Kasymyr Malevych Str.
Tel./Fax: (38044) 205 23 90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/sem>

The Journal is included in the list of publications
approved by the Ministry of Education and Science
of Ukraine for the publication of works of applicants
for academic degrees in specialties 132, 133
Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020

Recommended for printing editorial board
of the Journal

Certificate of state registration
of KV № 24212-14052PR dated 03.12.2019
ISSN 2415-8445
DOI: <https://doi.org/10.15407/sem>

Subscription 2024

Subscription index 70693
4 issues per year (issued monthly),
back issues available.

\$128, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.

\$96, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).

CONTENTS*

The E.O. Paton Electric Welding Institute — the Present
and a Look Into the Future 3

ELECTRON BEAM PROCESSES

*Ovchinnikov O.V., Akhonin S.V., Beresos V.O., Severin A.Yu.,
Galenkova O.B., Shevchenko V.G.* Producing advanced
alloys based on titanium aluminides for modern aircraft engine
manufacturing 9

ELECTROSLAG TECHNOLOGY

Protokovilov I.V., Beinerts T., Porokhonko V.B., Petrov D.A.
ESR of titanium in vacuum 17

MATERIALS SCIENCE

Demchyshyn A.V., Demchyshyn A.A., Egorov S.P. Structure
and mechanical properties of thick copper condensates,
dispersion-strengthened with chromium, zirconium oxide
and their mixture 24

ELECTROMETALLURGY OF STEEL AND FERROALLOYS

*Bogachenko O.G., Chernyakov A.V., Goncharov I.O.,
Kiiko S.G., Logozinskyi I.M., Levin B.A., Fedkov A.G.,
Gorban K.M.* Application of graphitized cored electrodes
in 50 ton steel melting AC arc furnace of DSV-50 type 32

GENERAL PROBLEMS OF METALLURGY

Barabash V.V., Biktahirov F.K. Application of external influence
in the production of steel ingots. Overview 40
*Kozin R.V., Kalinyuk O.M., Kibkalo A.M., Kalinyuk M.M.,
Puzrin O.L.* Analyzing silicon for the content of oxygen,
nitrogen and hydrogen impurities 49

INFORMATION

Establishing the scientific fundamentals of welding
metallurgy 57

*Articles from «Electrometallurgy Today» are selectively translated into English
and included in to the contents of «The Paton Welding Journal»:
<https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj>

ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є.О. ПАТОНА — СЬОГОДЕННЯ ТА ПОГЛЯД У МАЙБУТНЄ



У січні цього року відзначалась 90-та річниця заснування Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

Самовіддана праця багатьох поколінь патонівців, які вкладали в улюблену справу свої знання, енергію та досвід, стали запорукою того, що сьогодні Інститут електрозварювання імені Євге-

на Оскаровича Патона Національної академії наук України — це потужний науково-технічний комплекс, у структуру якого входять науково-дослідний Інститут, дослідне конструкторсько-технологічне бюро, дослідний завод, низка науково-інженерних, учбовий та атестаційний центри.

Основна тематика робіт Інституту електрозварювання — це дослідження зварювальних і споріднених процесів, розроблення відповідних технологій та створення обладнання для їх практичної реалізації.

Сьогодні сфера досліджень та розробок нашого Інституту охоплює майже всі існуючі способи зварювання: від добре відомих та широко використовуваних способів дугового та контактнo-стикового зварювання до високотехнологічних процесів зварювання із застосуванням електронного променя та лазерного випромінювання; від зварювання та різання під водою до зварювання в космосі; від зварювання та обробки металів вибухом до зварювання живих тканин у медицині. Але працівники Інституту не зупиняються і постійно розширюють сфери своєї діяльності.

На початок цього року Інститут налічує 996 працівників, у т.ч. 522 наукових співробітника, серед них 227 кандидатів і докторів наук.

ІЕЗ успішно співпрацює з науково-дослідними інститутами НАН України, які входять до складу різних відділень — фізико-технічних проблем матеріалознавства, механіки, фізики та астрономії, ядерної фізики і енергетики, хімії, а також з багатьма установами Національної академії медичних наук України. Маємо тісні контакти з закладами вищої освіти України, які готують спеціалістів в галузі зварювання і споріднених технологій.

Інститут електрозварювання має плідну співпрацю з великими промисловими підприємствами України, зокрема, ДП «Антонов», ДП «Конструкторське бюро «Південне» ім. М.К. Янгеля», ДП «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «Прогрес» імені академіка О.Г. Івченка», ДП «НАЕК «Енергоатом», АТ «Укрзалізниця» тощо. Нашими партнерами є гіганти світового виробництва — Boeing, Airbus, Holland (USA), Plasser&Theurer (Austria), ProgressRailService (USA) та інші. Підтримуються широкі міжнародні зв'язки з провідними науковими центрами матеріалознавства і зварювання в США, Європі та Азії, довготривалі стосунки з низкою іноземних установ, які з року в рік зміцнюються через укладання та переукладання угод про виконання спільних проєктів. Серед партнерів — Інститут зварювання та з'єднань Університету м. Аахен (Німеччина), Французький національний центр наукових досліджень (CNRS), Центр полімерних та вуглецевих матеріалів Польської академії наук, м. Забже (Польща) і багато інших. Деякі науковці є дійсними членами AWS (Американського зварювального товариства), виступають експертами Міжнародного інституту зварювання, входять до складу програмного комітету Програми ЄС «Горизонт Європа».

В останні роки в рамках програм Європейського Союзу реалізована низка спільних дослідницьких проєктів, у т.ч. проєкти з питань нарощування наукового потенціалу, проєкти наукової мобільності в межах програми «Дії імені Марії Складовської-Кюрі». Окрім того, Інститут активно співпрацює з іноземними партнерами в рамках різноманітних білатеральних програм.

Особливо важлива співпраця з Міжнародним інститутом та Європейською федерацією зварювання, в яких Інститут є повноправним членом. Ці організації є провідними щодо розробки міжнародних стандартів в галузі зварювання. Науковці мають можливість брати безпосередню участь в розробленні стандартів та інших документів через роботу в комітетах, підкомітетах, робочих групах МІЗ та ЄФЗ. Це сприяє вирішенню таких основних завдань, як узгодження технічної політики України з технічною політикою, яку проводять закордонні партнери, використання міжнародних стандартів для поліпшення якості та конкурентоспроможності продукції України.



МІЗ проводить свої щорічні асамблеї, в яких Інститут представляє офіційна особа з певними повноваженнями, а також проводить міжнародні науково-технічні конференції. Науковці Інституту є постійними учасниками таких конференцій. Так, у Міжнародній конференції минулого року, що проходила в Сінгапурі, 16 наших науковців представили 17 доповідей, більша частина з яких була рекомендована для публікації в престижних наукових виданнях.

Протягом усієї своєї історії Інститут електрозварювання є яскравим прикладом комплексного підходу до розвитку науки і технологій, який було започатковано Євгеном Оскаровичем та розвинуто Борисом Євгеновичем Патоном. Суть такого підходу полягає в тому, що наш Інститут не обмежується проведенням лише фундаментальних досліджень, а націлений на комплексне вирішення реальних проблем економіки держави: від поглибленого теоретичного пошуку та експериментальних досліджень до впровадження отриманих науково-технічних результатів і розробок у промислове виробництво. І сьогодні наші розробки знайшли практичне застосування майже в усіх галузях економіки та в багатьох сферах повсякденного життя.

Прикладом таких розробок можна назвати технологію та мобільне устаткування для автоматичного контактнo-стикового зварювання оплавленням (КСЗО) залізничних рейок у заводських та польових умовах при будівництві та ремонті залізничних колій.

За останні роки було експортовано більше 95 мобільних рейкозварювальних машин для зварювання високоміцних рейок, зокрема, із натягом, на суму понад 32 млн. дол. США. Ці машини були виготовлені за ліцензійною угодою на Каховському заводі електрозварювального обладнання за документацією, розробленою в Інституті.

Результати новітніх досліджень удосконаленої технології КСЗ пульсуючим оплавленням заплановані до впровадження при будівництві та ремонті залізничних колій «Укрзалізниці», що вкрай важливо для вирішення проблем повоєнного відновлення України.

Традиційним напрямом робіт Інституту є розробка технологій зварювання труб — від металевих труб великого діаметру, які використовуються при будівництві магістральних трубопроводів, до неметалевих, зокрема полімерних. Так, інноваційну технологію та обладнання для зварювання поліетиленових труб зовнішнім діаметром до 250 мм при будівництві трубопроводів для водотата газопостачання впроваджено на ТОВ «Свротрубпласт» (м. Київ).

В цілому напрями теоретичних й експериментальних досліджень у галузі полімерного матеріалознавства (створення, дослідження і застосування біополімерів, композиційних матеріалів та наноматеріалів на їхній основі) розвиваються в Інституті дуже інтенсивно.

На особливу увагу заслуговують нові перспективні напрями досліджень з 3D друку виробів з антибактеріальною та протівірусною активністю, полімерних матеріалів і виробів з них зі здатністю до самозаліковування та створення технологій їх хімічного зварювання, впливу за допомогою різноманітних фізичних полів на структуру і властивості полімерних матеріалів та їх зварних з'єднань.

Новітня технологія зварювання закладним елементом високотехнологічних полімерних композитів та листових виробів з них успішно пройшла випробування та використовується в авіакосмічній галузі на ДП «Антонов» та ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля».

Спільно з промисловими компаніями та інститутами НАН України проводяться роботи з дослідження впливу водню та його газових сумішей на поліетиленові труби з метою визначення можливості його транспортування по трубопроводах газотранспортних мереж України та Європи.

Ще одним традиційно важливим напрямом досліджень і розробок нашого Інституту є променеві, а саме електроонно-променеві та лазерні технології. В Інституті розроблено і успішно використовується високопродуктивне обладнання для електронно-променевого зварювання деталей газотурбінних двигунів великої потужності. Наприклад, для підприємства АТ «Мотор-Січ» розроблена технологія електронно-променевого зварювання корпусу камери середнього тиску газової турбіни, виготовленої з титанового сплаву.

Щодо лазерного зварювання, зокрема, у галузі вагонобудування, науковці Інституту розробили установку для ручного напівавтоматичного лазерного зварювання. Вона необхідна для зварювання конструктивних елементів у важкодоступних місцях, де неможливо використовувати автоматичне зварювання або роботизовані комплекси. Цей інструмент успішно використовується на світових вагонобудівних заводах.

Інститут виконує також розробку та виготовлення автоматизованих комплексів для лазерного, плазмового і гібридного зварювання, різання, наплавлення та інших технологічних процесів. Оригінальні багатокординатні маніпулятори, розроблені в ІЕЗ, оснащені високоякісними комплектуючими, завдяки чому мають високі показники точності, надійності та дозволяють вирішувати різноманітні



прикладні задачі. Створені комплекси знайшли своє успішне застосування у приладобудівній, хімічній, енергетичній та інших галузях промисловості.

Інститут успішно продовжує розвиток космічних технологій зварювання. Для реалізації технології 3D друку в умовах космосу створено принципово нову конструкцію електронно-променевої гармати для роботи в автоматичному та довготривалому режимі з суттєво покращеними технічними характеристиками. За допомогою розробленого обладнання планується створювати 3D вироби з алюмінієвих, титанових та інтерметалідних сплавів, які застосовуються в сучасному космічному апаратобудуванні. Комплекс нового покоління електронно-променевого обладнання для зварювання у відкритому космосі був успішно продемонстрований на 30-й Міжнародній виставці оборонної промисловості MSPO-2022 у м. Кельце (Польща).

Продовжує удосконалюватися технологічний процес плазмово-індукційного вирощування монокристалічних тіл обертання з тугоплавких металів. Уперше в світі вирошено експериментальні монокристалічні тиглі з вольфраму. Зокрема, отримано тиглі і зливки діаметром 85 мм з дезорієнтацією субблоків, що не перевищує 5 кутових градусів.

Розроблено обладнання, технологія та матеріали для одношарового антикорозійного електрошлакового наплавлення стрічками. Отримані результати використовуються при виборі матеріалів і технологій антикорозійного наплавлення деталей енергетичного та хімічного обладнання. Також створено технології і матеріали для дугового наплавлення сталевих валків гарячої прокатки різних станів, за допомогою яких можна отримувати на будь-якій складній поверхні наплавлений шар необхідної товщини з мінімальними допусками на механічну обробку.

Із початком широкомасштабного російського військового вторгнення переглянуті та актуалізовані основні напрями наукової діяльності Інституту. І тут у нас є два головні пріоритети. Перший, безумовно, це дослідження і розробки, пов'язані з підвищенням обороноздатності нашої країни.

Розроблені нашими спеціалістами технології зварювання типових з'єднань броньованих сталей високої твердості вітчизняного та закордонного виробництва дозволяють відмовитися від термічного оброблення корпусів легкоброньованої техніки та за рахунок цього суттєво скоротити час на її виготовлення і знизити собівартість виробу.

Розроблено та впроваджено ремонтно-зварювальні технології для відновлення цілісності корпусів БТР та БМП, які зазнали бойових і експлуатаційних пошкоджень. За рахунок наплавлення останніх

шарів шва спеціальними зварювальними матеріалами кулеустійкість зварних з'єднань підвищується до рівня кулеустійкості броньових сталей.

Коротко відмітимо ще декілька прикладів наших новітніх розробок для потреб безпеки і оборони.

Технологія відновлення та зміцнення поверхні штоків віддачі артилерійських установок шляхом нанесення шару захисного покриття електродувим напиленням. Технологія відновлення та зміцнення поверхні штоків гідравлічної системи основних стояків шасі літака шляхом нанесення газотермічного покриття. Технологія відновлення та зміцнення поверхні деталей бронетанкової техніки нанесенням газотермічних покриттів.

На кількох українських підприємствах, зокрема, ДП «Івченко-Прогрес», АТ «Мотор Січ» практично впроваджена технологія відновлення за допомогою мікроплазмового порошкового наплавлення деталей авіаційних газотурбінних двигунів з важкозварюваних нікелевих жароміцних сплавів. На вітчизняних авіаремонтних підприємствах застосовується технологія продовження тривалості експлуатації робочих лопаток авіаційних газотурбінних двигунів у 3–4 рази.

З використанням зварювання вибухом запропонована технологія створення високоміцних багатошарових композиційних матеріалів для застосування в якості броні.

Розроблена також технологія виготовлення біметалевої броні для захисту машин спеціального призначення.

За розробленою в Інституті спеціальною технологією дугового напівавтоматичного наплавлення відновлено партію зношених траків та пальців, які були випробувані в польових умовах та показали стійкість на рівні нових деталей.

Розроблені в Інституті лазерні технології сьогодні успішно використовуються для зварювання та наплавлення малогабаритних соплових блоків рідинних ракетних двигунів, зразки яких пройшли успішну перевірку, згідно спеціалізованої програми випробувань, розробленої у КБ «Південне».

Створена технологія електронно-променевого плавлення титанових сплавів забезпечує отримання з вітчизняної сировини високоякісних зливоків як традиційних промислових титанових сплавів, так і новітніх високоміцних титанових сплавів для авіаційної і ракетної галузей. Для практичної реалізації розроблених технологій на ДП «Науково-виробничий центр «Титан» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона» організовано промислове виробництво зливоків титанових сплавів у складі п'яти електронно-променевих установок власної



конструкції. Продукція підприємства у вигляді зливків титанових сплавів масою до 15 т постачається як вітчизняним заводам (АТ «Мотор Січ» та інші), так і за кордон. У кооперації з підприємствами-партнерами (ДП «Південний машинобудівний завод», «УкрНДІспецсталь», ТОВ «Дніпропрес Сталь» та ін.) зі зливків титанових сплавів, отриманих методом електронно-променевого плавлення, організовано виробництво поковок, прутків та труб, якість яких повністю відповідає вимогам стандартів, що дозволило на теперішній час повністю забезпечити потреби підприємств оборонного комплексу України в напівфабрикатах з високоміцних титанових сплавів.

Для медичної галузі спеціалістами розроблено також нове покоління медичного обладнання, що поєднує зварювання живих тканин з використанням ВЧ струму та одночасного гемостазу і дезінфекції ран конвекційно-інфрачервоним опроміненням.

Другий пріоритетний нині напрям досліджень спрямований на повоєнну відбудову України та майбутню структурну модернізацію вітчизняної економіки на найвищому технологічному рівні. Тут дослідження і розробки спрямовуються на перспективний розвиток вітчизняної промисловості, створення нових високотехнологічних галузей. Серед них: інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах, 3D технології, нові матеріали, технології та вироби медичного призначення, технології ремонту та відновлення інфраструктурних і промислових об'єктів тощо.

Затребуваною виявилася технологія технічної діагностики великогабаритних конструкцій (як-то телевізійні та електричні вежі, мости) з використанням безпілотного літального апарату для аерофотозйомки та побудови тривимірної моделі конструкції методом фотограмметрії. Вона дала змогу провести дистанційне обстеження руйнувань Київської телевежі після ракетного удару 1 березня 2022 р. і отримати дані про дефекти, візуалізувати пошкодження опорних елементів конструкції.

Науковці Інституту реалізували технологію одержання бездефектних і хімічно однорідних зливків перспективного титанового сплаву медичного призначення Ti-6Al-7Nb методом електронно-променевої плавки. Зливки мають дрібнозернисту структуру без жодних проявів зональної ліквіації. Така структура забезпечує якнайкраще поєднання механічних характеристик сплаву — високу міцність і пластичність, що задовольняють вимоги міжнародних стандартів для титанових сплавів медичного призначення і, саме головне, повністю відповідають комплексу механічних характеристик людських кісток.

За останні роки в Інституті створено цілу низку найсучаснішого обладнання для практичної реалізації технологій електронно-променевого, лазерного та плазово-дугового 3D друку металевих виробів для потреб аерокосмічної галузі, медицини, військово-оборонного комплексу та інших галузей промисловості. Наприклад, оперативний 3D друк деталей складної військової техніки дозволяє швидко здійснювати її ремонт у польових умовах.

Не дивлячись на складні умови сьогодення, велика увага приділяється покращенню дослідної інфраструктури Інституту, зокрема, створенню спільних лабораторій.

Одна з них Міжнародна польсько-українська науково-дослідна лабораторія (ADPOLCOM). Її створенню передувало багаторічне плідне співробітництво між Інститутом та Центром полімерних та вуглецевих матеріалів Польської академії наук (м. Забже) на основі міжнародних договорів між двома академіями наук та білатеральних проєктів.

Наукова та науково-технічна діяльність лабораторії зосереджена на фундаментальних та прикладних дослідженнях в сфері створення, комплексного вивчення та з'єднання різноманітних полімерних матеріалів, біоматеріалів, композитів та нанокомпозитів для багатьох галузей людської життєдіяльності — від побутового використання, наприклад, екологічного біодеградабельного пакування, зокрема, харчових продуктів, до матеріалів і виробів медичного призначення, наприклад, полімерних імплантів тощо.

Нині в Інституті підготовлено майданчик для встановлення обладнання для нової дослідно-технологічної дільниці по проведенню науково-дослідних робіт та тестування передових розробок в галузі зварювальних і споріднених технологій. Розроблено технічний проєкт даної дільниці, узгоджено перелік і технічні вимоги до дослідно-технологічного обладнання, яке буде використовуватись на цьому майданчику.

Із самого початку повномасштабної агресії рф співробітники Інституту активно долучились до волонтерської та благодійної діяльності. Організували збір та передачу грошей і необхідних речей (води, медзасобів, засобів гігієни тощо) для потреб Територіальної оборони Києва та Збройних сил України.

Науковці Інституту виготовляють та передають на фронт власну розробку — медичні імобілізаційні пневматичні шини для тимчасової фіксації травмованих частин тіла людини та її транспортування з мінімальною травматичністю. Також Інститут передає військовим зварювальні матеріали для проведення зварювання металоконструкцій у зоні бойових дій, а у медзаклади — апарати для

зварювання живих тканин ПАТОНМЕД та інструменти для операції.

Більше 20 молодих науковців інституту організували у вільний від роботи час виробництво теплових печей (буржуйок) для військовослужбовців, які зараз воюють на сході та півдні України. До збору коштів на матеріали для цих печей, а це на сьогодні більше 300 тис. грн., активно долучились співробітники, волонтери та просто небайдужі українці.

На волонтерських засадах виконується ціла низка науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт для потреб ЗСУ. Нажаль, не про всі роботи, які Інститут виконував та виконує на потреби ЗСУ, можна зараз говорити відкрито. Але вони постійно проводяться і одним з важливих напрямів цих робіт є експертна діяльність. Наприклад, у минулому році науковці ІЕЗ виконали 11 робіт, пов'язаних з експертизою для військових інститутів та підприємств оборонного комплексу.

Відмічаючи внесок співробітників ІЕЗ у перемогу, неможна оминати увагою 19 колег, які з перших днів війни добровільно вступили до лав ЗСУ та ТРО і наразі перебувають на військовій службі. Один з них був поранений і в Інституті був організований збір коштів на його лікування. Один наш молодий колега був нагороджений сталевим хрестом.

Цими днями на адресу колективу нашого Інституту надійшло багато теплих привітань з нагоди ювілею. Зокрема, це привітання від Офісу Президента України, Міністерства освіти і науки України, Президії Національної академії наук України, АТ «Українська оборонна промисловість», Болгар-

ського Союзу Зварювання, Фізико-технологічного інституту металів і сплавів НАН України, Інституту фізичної хімії ім. Л.В. Писаржевського НАН України, Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Інституту мікробіології і вірусології ім. Д.К. Заболотного НАН України, Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Національного університету «Чернігівська політехніка», Інституту термоелектрики НАН України, Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, Українського трубного заводу.

На урочистих зборах колективу з нагоди ювілею нас привітали президент Національної академії наук України академік Анатолій Загородній, голова Західного наукового центру НАН України та МОН України, директор Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка академік Зіновій Назарчук, голова Північно-Східного наукового центру НАН України і МОН України, генеральний директор НТК «Інститут монокристалів» академік Володимир Семиноженко, в.о. директора Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича член-кореспондент Геннадій Баглюк, перший заступник директора Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича академік Сергій Фірстов, директор Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля академік Володимир Туркевич, заступник директора Фізико-технологічного



Під час урочистих зборів, ІЕЗ ім. Є.О. Патона, 18 січня 2024 р.



Поздоровлення від Центрального науково-дослідного Інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України



Поздоровлення від Наукового комітету Національної ради України з питань науки та технологій



Поздоровлення від НТК «Інститут монокристалів»



Поздоровлення від НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

Інституту металів та сплавів доктор технічних наук Микола Тарасевич, голова Наукового комітету Національної ради України з питань науки та технологій Олександра Антонюк, начальник Центрального науково-дослідного Інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України генерал-майор Ігор Чепков, ректор Національного



Вручення відзнаки за професійні здобутки президентом НАН України академіком Анатолієм Загороднім вченому секретарю ІЕЗ Іллі Клочкову

технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» академік Михайло Згуровський, ректор Національного університету «Чернігівська політехніка» доктор технічних наук Олег Новомлинець.

Співробітники Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона заслуговують на повагу суспільства за вірність патонівським традиціям, героїчну працю, яка допомагає зміцнювати обороноздатність України і наближає Перемогу. Патонівці внесуть значний вклад в справу повоєнного відродження та подальшого інноваційного розвитку рідної держави.

Ігор Кривцун, академік НАН України,
директор ІЕЗ ім. Є.О. Патона

ОТРИМАННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ АЛЮМІНІДІВ ТИТАНУ ДЛЯ СУЧАСНОГО АВІАМОТОРОБУДУВАННЯ

О.В. Овчинников¹, С.В. Ахонін², В.О. Березос², А.Ю. Северин², О.Б. Галєнкова³, В.Г. Шевченко⁴

¹АТ «Інститут титану». 69035, м. Запоріжжя, просп. Соборний, 180. E-mail: common@timag.org

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: titan.paton@gmail.com

³ДП «Івченко-Прогрес». 69068, м. Запоріжжя, вул. Іванова, 2.

⁴Національний університет «Запорізька політехніка».

69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64. E-mail: rector@zp.edu.ua

Проведено роботи по відпрацюванню технологічної схеми отримання зливків для витратних електродів зі стабільним хімічним складом і властивостями. Представлено результати досліджень зливка діаметром 195 мм сплаву на основі алюмініду титану системи Ti–28Al–7Nb–2Mo, виготовленого шляхом подвійного електронно-променевого переплаву. Реалізовано подальший переплав зливка в дуговій печі, завдяки чому отримано однорідний та бездефектний зливоч оптиміального складу Ti–28Al–7Nb–2Mo–0,3 (Y, Re, B). Досліджено вплив модифікування на структуру та властивості. Визначено, що введення поверхнево-активних елементів сприяє подібненню структурних складових, а також підвищенню механічних властивостей сплаву. Бібліогр. 17, табл. 2, рис. 9.

Ключові слова: електронно-променева плавка, вакуумно-дугова плавка, зливоч, алюмінід титану, модифікування, структура, механічні властивості

Вступ. Розвиток сучасного авіамоторобудування вимагає використання нових матеріалів з підвищеними властивостями і функціональними характеристиками, що забезпечуються стабільністю хімічного складу та структури і залежать від технології отримання [1]. Технологічні аспекти, що включають в себе відпрацювання параметрів технології, повторюваність отриманих результатів і формоутворення взаємопов'язані між собою. Вплив технології на властивості авіаційних матеріалів потребує регламентації процесів, наприклад, використання вакуумно-дугового переплаву при виробництві титанових сплавів [2, 3].

До числа перспективних матеріалів для авіаційної промисловості, властивості яких залежать від параметрів технологічних процесів, відносяться сплави на основі алюмініду титану. Ці сплави є важливим класом конструкційних матеріалів з унікальним набором фізико-механічних властивостей. Інтерметалідні сплави на основі алюмінідів титану характеризуються низькою щільністю, високою жароміцністю, жаростійкістю, термічною стабільністю. Вони мають високий потенціал для заміни сплавів на основі нікелю, що призначені для експлуатації при температурах до 850 °C [4].

Жароміцні сплави на основі алюмініду титану характеризуються багатокомпонентним хімічним складом. Окремі легуючі елементи цих сплавів

суттєво відрізняються теплофізичними властивостями та щільністю. Тому необхідним є забезпечення рівномірного розподілу компонентів сплаву на номінальному рівні по всьому об'єму зливка, оскільки макросегрегації можуть призводити до виникнення різних мікроструктур і, відповідно, високої анізотропії механічних властивостей.

Промислове освоєння сплавів на основі алюмініду титану передбачає отримання якісних зливків-напівфабрикатів з рівномірним розподілом елементів й однорідною структурою зі стабільними фізико-механічними та експлуатаційними характеристиками.

Механічні властивості багато в чому залежать від кінцевої формоутворюючої технології, для якої розроблений оптимальний хімічний склад.

При розробці складу сплаву необхідно орієнтуватися на особливості технологічного процесу отримання статорних і роторних деталей двигуна, таких як, наприклад, лопатки турбіни. На підприємстві «Мотор Січ» для виробництва фасонних відливок з титанових сплавів використовуються витратні електроди власного виробництва для ливарної вакуумно-дугової печі [5–7].

Для впровадження нових сплавів на основі алюмініду титану для перспективних двигунів необхідне відпрацювання усього технологічного процесу з урахуванням кінцевої формоутворюючої

О.В. Овчинников — <https://orcid.org/0000-0002-5649-1094>, С.В. Ахонін — <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>,

В.О. Березос — <https://orcid.org/0000-0002-5026-7366>, А.Ю. Северин — <https://orcid.org/0000-0003-4768-2363>,

О.Б. Галєнкова — <https://orcid.org/0009-0008-6007-1931>, В.Г. Шевченко — <https://orcid.org/0000-0001-9037-6367>



Рис. 1. Схема технологічного процесу отримання виробів з алюмініду титану

ючої технології лиття і забезпечення хімічного складу та механічних властивостей сплаву.

Маючи на увазі серійний технологічний процес лиття з витратного електрода діаметром більше 200 мм, метою роботи є отримання промислових зливоків для витратних електродів з алюмініду титану зі стабільним хімічним складом та властивостями.

Методика досліджень, устаткування і матеріали. Об’єктом досліджень обрані технологічні процеси лиття, що включали в себе операції отримання витратного електрода, переплав електрода в тигель і розливу металу з тигля в кокіль (рис. 1). В якості виробу обрана лопатка турбіни останнього ступеня, що виготовлена зі сплаву на нікелевій основі ВЖЛ12С-ВІ. З урахуванням раніше проведених досліджень [8, 9] щодо забезпечення службових властивостей обґрунтовано наступний склад сплаву на основі алюмініду титану — Ti–28Al–7Nb–2Mo–0,3 (Y, Re, B).

Для виплавки зливоків з шихти використовували добре відпрацьовані технології [10–12] отримання авіаційних матеріалів способом електронно-променевого переплаву (ЕПП) шихти на установці УЭ-208М [13] (рис. 2).

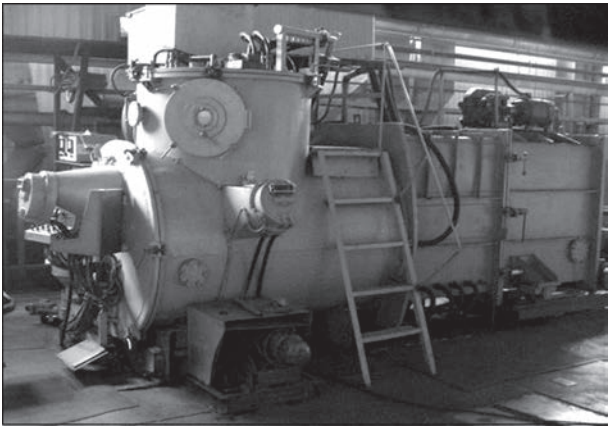


Рис. 2. Зовнішній вигляд електронно-променевої установки УЭ-208М

Для досліджень проведена плавка зливка базового складу Ti–28Al–7Nb–2Mo з використанням способу ЕПП, що давало можливість корегування хімічного складу та дошихтовки.

Стабільність хімічного складу базового сплаву досягали шляхом подвійного переплаву. При першому переплаві до сплаву вводили тугоплавкі легуючі елементи — ніобій і молібден. При другому переплаві до отриманого зливка додавали алюміній з урахуванням втрат на випаровування. Це дало змогу мінімізувати втрати алюмінію і забезпечило гарантоване розчинення тугоплавких легуючих елементів та рівномірний їх розподіл по довжині й поперечному перерізу зливка.

Виплавку зливоків проводили відповідно до розрахованих в рамках побудованих математичних моделей [14], потужностей і конфігурації нагрівання поверхні зливка в кристалізаторі.

Параметри плавки зливка діаметром 195 мм алюмініду титану Ti–28Al–7Nb–2Mo наступні:

загальна потужність ЕП нагріву, кВт	60
потужність в кристалізаторі, кВт	18
швидкість плавки, кг/ч	60



Рис. 3. Шихтова заготовка (а) і процес електронно-променевої плавки (б) зливка алюмініду титану Ti–28Al–7Nb–2Mo

Після завантаження шихти (рис. 3, а) установку вакуумували до залишкового тиску в камері гармат 10^{-2} Па, в камері плавки — 10^{-1} Па. Потім заготовку сплавляли в проміжну ємність до її заповнення і періодично зливали рідкий метал в мідний водоохолоджуваний кристалізатор (рис. 3, б). Першими порціями зливу формували затравку майбутнього зливка до висоти, що дорівнює внутрішньому діаметру кристалізатора, на якій, згідно з математичними розрахунками, плавка переходить у квазістаціонарний режим. На досягнутому технологічному режимі виплавляли зливки необхідної висоти.

Склад шихти для виплавки базового і модифікованого злиwkів: алюміній марки А5 за ГОСТ 11069–2001, заготовка титанова (переплав первинної шихти титану губчастого марки ТГ-100) ДСТУ 3-25-22–94; ніобій (прутки); лігатура (93 % Ti–7 % Mo); лігатури Al–Re, Al–Y, алюмобор. Лігатури отримували шляхом плавки шматочків титану губчастого та алюмінію з відповідними елементами Y, Re та B у вигляді порошоків у вакуумі в мідний кристалізатор з використанням невитратного вольфрамового електрода. Таким способом отримано лігатури із вмістом модифікуючих елементів 5, 10 та 15 % кожного, наприклад, Ti–5 % Y, Al–5 % Y, Ti–10 % Re тощо для можливості забезпечення необхідної концентрації елементів у складі дослідного сплаву.

Для отримання зливка заданого складу з модифікаторами Y, Re, B, визначення коефіцієнтів переходу легувальних елементів і моделювання процесів, що відбуваються при електронно-променевій плавці, сплав базового складу переплавляли в дуговій печі з невитратним електродом з контрольованою атмосферою (рис. 4) [15, 16].

Для визначення хімічного складу базового сплаву з виплавленого зливка відбирали проби у вигляді стружки. Зразки для аналізу відбирали з головної, середньої та донної частин зливка по його довжині. Вміст легувальних елементів визначали методом індуктивно зв'язаної плазми оптичної емісійної спектроскопії (ICP-OES) на ICP-спектроскопі ICAP 6500 DUO. Для визначення вмісту кисню, азоту, водню застосовували газоаналізатор фірми «ELTRA» з використанням зразків циліндричної форми діаметром і довжиною по 3 мм. Сутність визначення газових сумішей полягала у спалюванні вказаних зразків і визначенні об'єму газоподібних хімічних елементів, що виділилися.

Аналіз хімічного складу сплаву виконували на зразках, відібраних вздовж всієї довжини зливка, спектральним безеталонним методом на енерго-



Рис. 4. Дугова піч з невитратним електродом

дисперсійному рентгенофлюорисцентному аналізаторі «Expert 3L».

Травлення зразків для металографічних досліджень виконували в реактиві «Титан» складом $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O} = 1:2:6$.

Оцінку макроструктури темплету проводили неозброєним оком по товщині зливка. Дослідження мікроструктури матеріалу зливка виконували з використанням оптичного мікроскопу «AxioObserver 5» при збільшеннях від 25 до 200.

Проведено визначення механічних властивостей на розтяг згідно ДСТУ ISO 6892-1:2019. Зразки для випробувань вирізали в поперечному напрямку до вісі зливка.

При статистичній обробці експериментальних даних визначали дисперсію та середньоквадратичне відхилення.

Результати досліджень та їх обговорення. В результаті досліджень було отримано зливки діаметром 195 мм Ti28Al7Nb2Mo масою 106 кг (рис. 5, а). Зовнішніх грубих дефектів (поривів і незлитин) зливки не мав, поверхня задовільна з невеликими гофрами.

Для усунення дефектів ливарного походження у вигляді гофр була проведена токарна обробка поверхні злиwkів на глибину 5 мм (рис. 5, б).

Від отриманого зливка без модифікаторів було здійснено відбір проб для аналізу ICP за схемою, наведеною на рис. 6. Дані хімічного аналізу представлені у табл. 1.



Рис. 5. Зовнішній вигляд зливка базового складу до механічної обробки (а) і після (б)

Таблиця 1. Хімічний склад зливка діаметром 195 мм, мас. %

Сплав	Проба, місце відбору	Ti	Al	Nb	Mo	O	N	H
Ti–28Al–7Nb–2Mo (без модифікаторів)	1 (верх)	Основа	26,6	7,6	2,0	0,13	<0,01	<0,005
	2		27,4	7,5	—»—			
	3		27,2	—»—	2,1			
	4		31,0	7,2	1,9			
	5 (низ)		30,5	7,3	2,2			

Відхилення вмісту алюмінію в головній і донній частинах пояснюється нестационарними режимами плавки на початку і в кінці плавки при формуванні затравки та виведенні усадкової раковини відповідно. Вирівнювання вмісту по легуючих елементах і досягнення необхідного хімічного складу в подальшому передбачалось з використанням дугової печі.

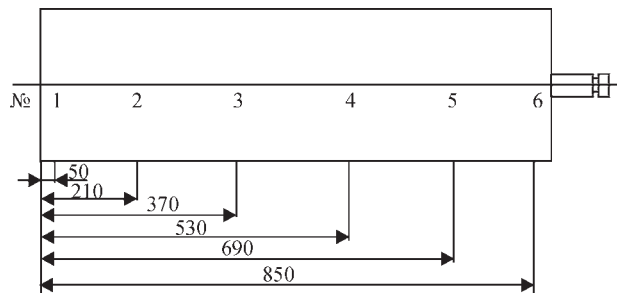


Рис. 6. Схема відбору проб (1–6) від зливка діаметром 195 мм

Для забезпечення оптимального хімічного складу від зливка діаметром 195 мм відрізали частини, що дошихтовували модифікаторами і переплавляли з використанням малосерійної печі, яка наведена на рис. 4. Вакуумно-дуговий переплав електрода виконували в графітовий тигель марки МПГ-7, а розливку металу — в кокіль (рис. 7).

Аналіз хімічного складу сплаву виконували на зразках, відібраних вздовж всієї довжини зливка з верхньої, середньої та нижньої частин (табл. 2).

У зв’язку з тим, що при виплавці титанових сплавів у графітовий тигель вміст вуглецю не перевищує допустимі межі 0,10...0,15 %, то дослідження вмісту вуглецю для експериментальної плавки не проводили.

Результати досліджень хімічного складу металу показали рівномірний розподіл легуючих елементів по довжині виплавлених зливків.



Рис. 7. Зовнішній вигляд графітових тигля (а) і кокілю (б) для вакуумно-дугового переплаву

Від зливоків відрізали поперечні темплети та виставили макрошліфи для контролю структури. Встановлено, що в зливках сформована однорідна і щільна структура. Дефектів у вигляді пор, раковин, тріщин, видимих неозброєним оком, не виявлено.

Макроструктура зливка без модифікаторів характеризується зернами, близькими до рівновісних. Величина зерна відповідає 8–9 балу 10-бальної шкали макроструктур титанових сплавів (рис. 8, а).

Макроструктура зливка з модифікаторами містить більш дрібні зерна, що відповідають 2–3 балу шкали макроструктур (рис. 8, б).

Різниці в бальності зерна в центральній частині зливка та на периферії не виявлено.

При металографічному дослідженні отриманих зливоків встановлено суттєвий вплив модифікаторів на морфологію структури сплаву. Так, мікроструктура сплаву без модифікаторів характеризувалась крупнозеренною будовою, в середині якої розташовані колонії пластин світлого і темного кольору розміром 100...350 мкм, що розорієнтовані в межах одного зерна (рис. 9, а). Сумісний вплив трьох модифікаторів у кількості 0,1% кожен призвів до отримання дрібнозеренної дуплексної ($\alpha_2 + \gamma$)-структури з розмірами колоній пластинок не більше 30 мкм (рис. 9, б).

Основні механічні властивості сплаву Ti–28Al–7Nb–2Mo–0,3 (Y, Re, B) наступні: σ_b , МПа — 800...870; δ , % — 0,8...1,3.

Таблиця 2. Хімічний склад зливка з модифікаторами, мас. %

Сплав	Місце відбору проб	Ti	Al	Nb	Mo	Модифікатори		
						Y	Re	B
Ti–28Al–7Nb–2Mo–0,3 (Y, Re, B)	Верх	Основа	28,3	7,5	2,0	0,13	0,09	0,10
	Середина		28,7	7,6	1,8	0,09	0,12	—»—
	Низ		29,4	7,5	2,1	0,08	0,08	0,12

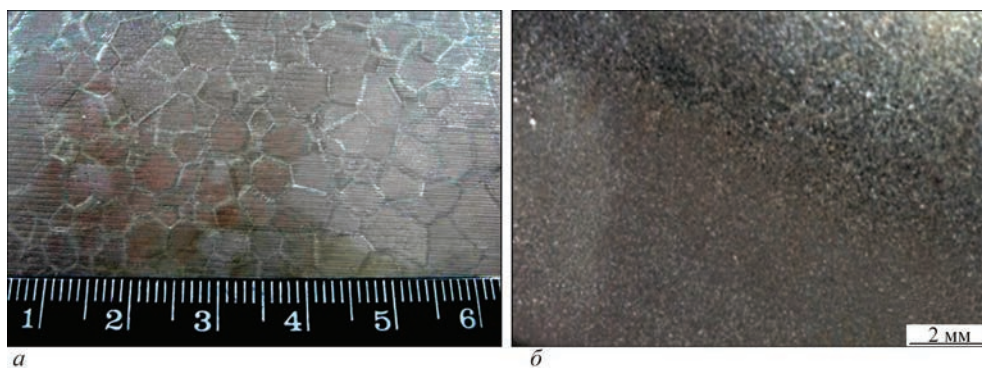


Рис. 8. Макроструктура зливків після травлення: *а* — без модифікаторів; *б* — з модифікаторами

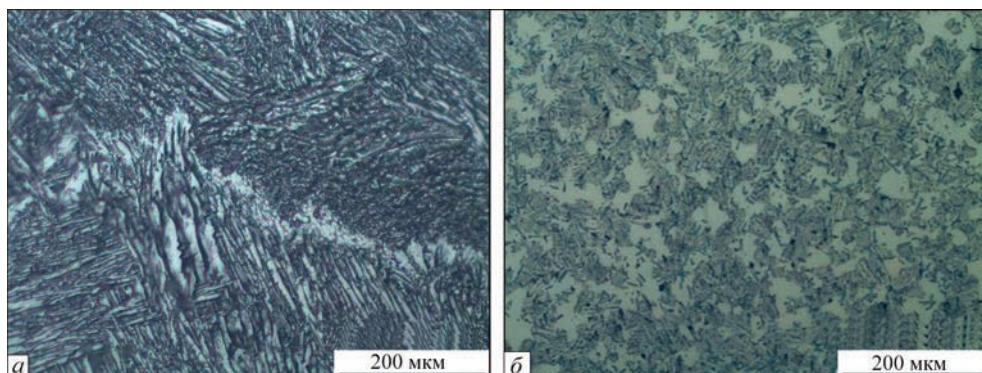


Рис. 9. Мікроструктура зливків після травлення: *а* — без модифікаторів; *б* — з модифікаторами, $\times 200$

Подрібнення зерна литої структури досягалося за рахунок введення модифікаторів Y, Re, B, які сприяють зменшенню розмірів зерна, призводять до зміни морфології фаз, рафінують границі зерен від домішок, затримують розвиток на границі поділу фаз дифузійних процесів і пригнічують процеси росту структурних складових. Це, в свою чергу, дозволило підвищити значення механічних характеристик матеріалу, зокрема міцність та пластичність.

Границя міцності дослідного сплаву складала 800...870 МПа, відносно подовження — 0,8...1,3 % при значеннях границі міцності серійного сплаву ВЖЛ12С-ВІ на рівні ≥ 830 МПа.

Таким чином, показано, що технологічний процес з встановленими режимами дає можливість отримання серійних виробів з алюмініду титану експериментального сплаву замість серійного сплаву на нікелевій основі. Зниження маси однієї лопатки з урахуванням щільності дослідного та серійного сплавів складає 34 % і є суттєвою перевагою експериментального сплаву для роторних деталей, що працюють при високих температурах.

Висновки

1. Запропонована технологічна схема виплавки зливків з алюмініду титану системи Ti–28Al–7Nb–2Mo способом ЕПП із застосуванням визначених технологічних режимів. Використання подвійного переплаву забезпечило рівномірний розподіл тугоплавких

елементів і елементів з високою пружністю пари по довжині та перетину зливка.

2. Реалізовано подальший переплав зливка алюмініду титану в дуговій печі з контрольованою атмосферою, визначено коефіцієнти переходу легувальних елементів, отримано однорідний за хімічним складом та бездефектний зливок складу Ti–28Al–7Nb–2Mo–0,3 (Y, Re, B).

3. В кінцевому виробі суттєво подрібнилася структура литого металу — з 8–9 до 2–3 балу зерна макроструктури. Подрібнення зерна литої структури обумовлено введенням в сплав поверхнево-активних елементів, а саме Y, Re, B. При цьому мікроструктура сплаву без модифікаторів характеризувалась крупнозеренною будовою, в середині якої розташовані колонії пластин розміром 100...350 мкм, що розорієнтовані в межах одного зерна. Сумісний вплив трьох модифікаторів у кількості 0,1 % кожного призвів до отримання дрібнозеренної дуплексної структури з розмірами колоній пластинок не більше 30 мкм.

4. Границя міцності сплаву оптимального складу становила 800...870 МПа, що в 1,7 рази більше порівняно з властивостями сплаву базового складу, і відповідала значенню границі міцності серійного сплаву ВЖЛ12С-ВІ.

5. Розрахункове зниження маси лопатки при використанні дослідного сплаву замість серійного складає 34 %, що є суттєвою перевагою експе-

риментального сплаву для роторних деталей, що працюють при високих температурах, швидкостях обертання та динамічних навантаженнях.

Список літератури

- Clemens H., Mayer S. (2016) Intermetallic titanium aluminides in aerospace applications-processing, microstructure and properties. *Materials at high temperatures*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09603409.2016.1163792>
- Чучурюкин А.Д. (1991) Вакуум при плавке титана. *Металловедение и обработка титановых и жаропрочных сплавов*. Москва, ВИЛС, сс. 159–163.
- Соболевская Т.Д., Гишкина В.И., Коваленко Т.А. (2009) Влияние качества титана губчатого на наличие дефектов в полуфабрикатах и деталях из титановых сплавов. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, **2**, 50–54.
- Appel F., Paul J.D.H., Oehring M. (2011) *Gammatitaniumaluminidealloys: Scienceandtechnology*. Weinheim, Wiley-VCH VerlagGmbH&Co. KGaA.
- Ивченко З.А., Лунёв В.В. (2008) Изготовление фасонных отливок и расходующих электродов из титановых сплавов. *Металловедение и термическая обработка металлов*, **1**, 33–36.
- Ивченко З.А., Лунёв В.В. (2010) Исследование свойств отливок, залитых электродами второго переплава сплава VT5Л собственного производства. *Процессы литья*, **4**, 73–78.
- Ивченко З.А., Лунёв В.В. (2010) Изготовление расходующих титановых электродов методом вакуумно-дуговой плавки из прессованных брикетов титана губчатого. *Теория и практика металлургии*, **3–4**, 21–25.
- Григоренко Г.М., Ахонин С.В., Северин А.Ю. и др. (2014) Влияние легирования бором и лантаном на структуру и свойства сплава на основе интерметаллидного соединения TiAl. *Современная электрометаллургия*, **2**, 15–20.
- Ахонин С.В., Северин А.Ю., Березос В.О. та ін. (2022) Отримання зливоків алюмініду титану Ti–28Al–7Nb–2Mo–2Cr способом електронно-променевої плавки. *Сучасна електрометалургія*, **1**, 11–15. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2022.01.01>
- Ахонин С.В., Северин А.Ю., Березос В.О. та ін. (2020) Одержання великогабаритних зливоків алюмінідів титану способом ЕПП. *Сучасна електрометалургія*, **2**, 18–22. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.02.03>
- Ахонин С.В., Северин А.Ю., Березос В.А. (2015) Разработка технологии введения тугоплавких легирующих элементов в сплавы на основе интерметаллида Ti₂AlNb при электронно-лучевой плавке. *Современная электрометаллургия*, **3**, 12–15.
- Ахонин С.В., Северин А.Ю., Березос В.О. (2022) Математичне моделювання процесів випаровування при ЕПП сплавів на основі алюмініду титану системи легування Ti–Al–Nb–Cr–Mo. *Сучасна електрометалургія*, **2**, 10–16. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2022.02.02>
- Ахонин С.В., Пикулин А.Н., Березос В.А. и др. (2019) Лабораторная электронно-лучевая установка УЭ-208М. *Современная электрометаллургия*, **3**, 15–22. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2019.03.03>
- Ахонин С.В., Гориславец Ю.М., Глухенький О.І. та ін. (2019) Моделювання гідродинамічних і теплових процесів у кристалізаторі при електронно-променевої плавці з проміжною ємністю. *Сучасна електрометалургія*, **4**, 9–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2019.04.02>
- Овчинников А.В., Теслевич С.М., Тизенберг Д.Л., Ефанов В.С. (2019) Технология выплавки слитков кобальтового сплава способом дугового переплава. *Современная электрометаллургия*, **1**, 23–27. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2019.01.03>
- Овчинников О.В., Капустян О.Є. (2020) Технологія виплавки зливоків цирконієвого сплаву способом вакуумно-дугового переплаву з невитратним електродом у гарнісажній печі. *Сучасна електрометалургія*, **4**, 32–38. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.04.06>
- Фирстов С.А., Горная И.Д., Подрезов Ю.Н. и др. (2018) Свойства сплавов на основе алюминидов титана γ-TiAl/α₂-Ti₃Al при комплексном легировании. *Современная электрометаллургия*, **3**, 32–38. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2018.03.05>

References

- Clemens, H., Mayer, S. (2016) Intermetallic titanium aluminides in aerospace applications — processing, microstructure and properties. *Mater. High Temp.*, **33**, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/09603409.2016.1163792>
- Chuchuryukin, A.D. (1991) Vacuum in titanium melting. In: *Physical metallurgy and processing of titanium and heat-resistant alloys*. Moscow, VILS, 159–163 [in Russian].
- Sobolevskaya, T.D., Gishkina, V.I., Kovalenko, T.A. (2009) Influence of sponge titanium quality on presence of defects in semi-finished products and parts from titanium alloys. *Novi Materialy i Tekhnologii v Metalurgii ta Mashynobuduvanni*, **2**, 50–54 [in Russian].
- Appel, F., Paul, J.D.H., Oehring, M. (2011) *Gammatitaniumaluminide alloys: Science and Technology*. Weinheim, Wiley-VCH VerlagGmbH&Co. KGaA.
- Ivchenko, Z.A., Lunyov, V.V. (2008) Manufacture of shaped castings and consumable electrodes from titanium alloys. *Metallovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, **1**, 33–36 [in Russian].
- Ivchenko, Z.A., Lunyov, V.V. (2010) Investigation of properties of castings produced by second remelting electrodes of VT5L alloy of domestic manufacture. *Protsessy Litya*, **4**, 73–78 [in Russian].
- Ivchenko, Z.A., Lunyov, V.V. (2010) Manufacture of consumable titanium electrodes by vacuum-arc melting from sponge titanium extruded briquettes. *Teoriya i Praktika Metallurgii*, **3–4**, 21–25 [in Russian].
- Grigorenko, G.M., Akhonin, S.V., Severin, A.Yu. et al. (2014) Effect of alloying with boron and lanthanum on structure and properties of alloy on base of intermetallic compound TiAl. *Sovrem. Elektrometall.*, **2**, 15–20 [in Russian].
- Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berezos, V.O. et al. (2022) Producing ingots of Ti–28Al–7Nb–2Mo–2Cr titanium aluminide by electron beam melting. *Suchasna Elektrometal.*, **1**, 11–15 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2022.01.01>
- Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berezos, V.O. et al. (2020) Producing large-sized ingots of titanium aluminides by EBM method. *Suchasna Elektrometal.*, **2**, 18–22 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.02.03>
- Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berezos, V.O. (2015) Development of technology of adding the refractory alloying elements into alloys on the base of Ti₂AlNb intermetallic in electron beam melting. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 12–15 [in Russian].
- Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berezos, V.O. (2022) Mathematical modeling of evaporation processes at EBM of alloys based on titanium aluminide of Ti–Al–Nb–Cr–Mo alloying system. *Suchasna Elektrometal.*, **2**, 10–16 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2022.02.02>

13. Akhonin, S.V., Pikulin, A.N., Berezos, V.A. et al. (2019) Laboratory electron beam unit UE-208M. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 15–22 [in Russian]. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2019.03.03>
14. Akhonin, S.V., Gorislavets, Yu.M., Glukhenkiy, A.I. et al. (2019) Modeling hydrodynamic and thermal processes in the mould in cold-hearth electron beam melting. *Suchasna Elektrometal.*, **4**, 9–17 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2019.04.02>
15. Ovchinnikov, A.V., Teslevich, S.M., Tizenberg, D.L., Efano, V.S. (2019) Technology of melting ingots of cobalt alloy by the arc remelting method. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 23–27 [in Russian]. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2019.01.03>
16. Ovchynnykov, O.V., Kapustian, O.E. (2020) Technology for smelting zirconium alloy ingots by vacuum arc remelting with a non-consumable electrode in a skull furnace. *Suchasna Elektrometal.*, **4**, 32–38 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.04.06>
17. Firstov, S.A., Gornaya, I.D., Podrezov, Yu.N. et al. (2018) Properties of alloys on titanium aluminide γ -TiAl/ α_2 -Ti₃Al base at complex alloying. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 32–38 [in Russian]. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2018.03.05>

PRODUCING ADVANCED ALLOYS BASED ON TITANIUM ALUMINIDES FOR MODERN AIRCRAFT ENGINE MANUFACTURING

O.V. Ovchinnikov¹, S.V. Akhonin², V.O. Beresos², A.Yu. Severin², O.B. Galenkova³, V.G. Shevchenko⁴

¹JSC «Titanium Institute». 180 Sobornyy Prosyp., 69035, Zaporizhzhia. E-mail: common@timag.org

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: titan.paton@gmail.com

³SE «Ivchenko-Progress». 2 Ivanova Str., 69068, Zaporizhzhia, Ukraine.

⁴Zaporizhzhia Polytechnic National University.

64 Zhukovskoho str., 69063, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: rector@zp.edu.ua

Work has been performed on optimization of the technological scheme of producing ingots for consumable electrodes with a stable chemical composition and properties. The paper presents the results of studying an ingot of 195 mm diameter from a titanium aluminide-based alloy of Ti–28Al–7Nb–2Mo system, made by double electron beam remelting. Further ingot remelting in the arc furnace was performed, which allowed producing a homogeneous and defectfree ingot of an optimal composition of Ti–28Al–7Nb–2Mo–0.3 (Y, Re, B). The influence of modifying on the structure and properties was studied. It was determined that addition of surfactants promotes refining of the structural components and improvement of the alloy mechanical properties. 17 Ref., 2 Tabl., 9 Fig.

Keywords: electron beam melting, vacuum-arc melting, ingot, titanium aluminide, modifying, structure, mechanical properties

Отримано 22.12.2023

Отримано у переглянутому вигляді 16.01.2024

Прийнято 23.02.2024

НАНОЗВАРЮВАННЯ

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України розроблена технологія отримання методом високошвидкісного електронно-променевого осадження у вакуумі наношаруватих фольг, які складаються з шарів різних металів (Ti/Al, Al/Ni, Al/Si, Ti/Cu та ін.) товщиною 10...100 нм. Використання таких наношаруватих фольг в якості проміжних прошарків забезпечує формування якісних нероз'ємних з'єднань матеріалів, що важко зварюються, таких, як інтерметаліди, метал-



Установка UE-204

матричні композити та різномірні матеріали. В зарубіжній літературі такий процес з'єднання матеріалів через наношаруваті фольги отримав назву «нанозварювання». У випадку зварювання в твердій фазі введення в зону з'єднання такої фольги сприяє встановленню фізичного контакту між поверхнями, що з'єднуються, при менших температурно-силових параметрах, а у випадку формування з'єднання через рідку фазу — зниження температури та часу витримки. В результаті швидкого протікання дифузійних процесів в зоні з'єднання забезпечується зниження впливу процесу зварювання на структуру матеріалу, що з'єднується, а за рахунок малої товщини фольги (20...50 мкм) зона з'єднання стає співрозмірною з розміром зерна. На основі встановлених закономірностей поведінки наношаруватої фольги в зоні

з'єднання запропонована технологія «нанозварювання» матеріалів, яка передбачає вибір оптимальної структури наношаруватої фольги та параметрів процесу з'єднання [1–7].

1. Ustinov A.I., Falchenko Yu.V., Ishchenko A.Ya. et al. (2008) Diffusion welding of γ -TiAl based alloys through using nano-layered foil of Ti/Al system. *Intermetallics*, **16**, 1043–1045.
2. Патон Б.Є., Устінів А.І., Іщенко А.Я. та ін. (2009) *Спосіб дифузійного з'єднання металевих деталей через прошарок*. Україна, Пат. 87053.
3. Устинов А.И., Мельниченко Т.В., Шишкин А.Е. (2011) Деформационное поведение многослойных фольг Al/Cu при нагреве в условиях постоянно действующих внешних нагрузок. *Металлофизика и новейшие технологии*, **33**(10), 1415–1423.
4. Запорожец Т.В., Гусак А.М., Устинов А.И. (2011) Условия распространения фронта реакции СВС в нанослойных фольгах, контактирующих с теплопроводящим материалом. *Автомат. сварка*, **8**, 43–47.
5. Ustinov A., Falchenko Yu., Melnichenko T. et al. (2013) Diffusion welding of aluminium alloy strengthened by Al₂O₃ particles through an Al/Cu multi-layer foil. *J. of Materials Processing Technology*, **213**(4), 543–552.
6. Ustinov A.I., Kuzmenko D.N., Kravchuk M.V., Korol Ya.D. (2015) Initiation of thermal explosion in Ti/Al nanofolios. *Inter. J. of SHS*, **24**(2), 72–77.
7. Ren H.S., Ren X.Y., Xiong H.P. et al. (2019) Nano-diffusion bonding of Ti₂AlNb to Ni-based superalloy. *Materials Characterisation*, **155**, 109813.

ЕШП ТИТАНУ У ВАКУУМІ

І.В. Протоковілов¹, Т. Бейнертс², В.Б. Порохонько¹, Д.А. Петров¹¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: lab38@paton.kiev.ua²Інститут фізики Латвійського університету.

32 Miera Str., Salaspils LV-2169, Latvia. E-mail: toms.beinerts@gmail.com

Наведено результати експериментальних досліджень процесу електрошлакового переплаву титану в камерній печі при різних значеннях тиску в плавильному просторі — від вакууму до надлишкового тиску. Експерименти проводили при виплавці зливків діаметром 85 і 105 мм з титанових сплавів BT1-0 і BT22 з використанням фторидно-хлоридного флюсу АН-Т4. Тиск інертного газу в камері печі змінювали в межах від 20 до 300 кПа. Показано, що в усьому досліджуваному діапазоні тисків електрошлаковий процес проходив стабільно з формуванням зливків з якісною боковою поверхнею і щільною структурою, без пор, шлакових включень та інших внутрішніх дефектів. Наведено експериментальні дані щодо впливу тиску в плавильному просторі на газовий склад і структуру титанових зливків. Показана можливість зменшення вмісту водню у титанових сплавах шляхом ведення електрошлакового процесу в умовах вакууму. Встановлено, що зливки титану BT1-0, виплавлені в умовах вакууму, характеризуються більшим розміром зерен у порівнянні зі зливком, отриманим при надлишковому тиску. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: електрошлаковий переплав, камерна піч, вакуум, титан, газовий склад, зливки, структура

Вступ. Через високу хімічну активність титану, зокрема його взаємодію при температурах вище 400...450 °С з атмосферними газами, електрошлаковий переплав (ЕШП) титанових сплавів має відбуватися виключно в камерних печах в захисній інертній атмосфері [1–3]. Зазвичай при ЕШП титану плавильний простір печі попередньо вакуумують, а потім заповнюють інертним газом (аргоном). Процес плавки проводять при надлишковому тиску аргону (120...140 кПа), що запобігає натіканню повітря в разі утворення нещільностей в вузлах печі. При цьому процес плавки можна здійснювати як в застійній атмосфері аргону, так і в проточній.

Така схема забезпечує надійний захист розплавленого металу і розігрітого до високих температур витратного електрода від взаємодії з зовнішньою атмосферою, а також перешкоджає випаровуванню легуючих компонентів з високою пружністю пари. Проте вона має і певні недоліки у порівнянні з плавкою в умовах вакууму.

Відомо, що водень, який відноситься до категорії шкідливих домішок, оскільки викликає водневу крихкість титанових сплавів, має зворотну розчинність у титані. При збільшенні температури і зменшенні тиску розчинність водню у титані суттєво зменшується. Через це при переплаві титану в вакуумі відбувається його рафінування від водню. Це має місце, наприклад, при вакуумно-дуговому переплаві (ВДП) і електронно-променевій плавці (ЕПП) титанових сплавів [4, 5]. При переплаві титану при надлишковому тиску видалення водню

відбувається значно меншою мірою або взагалі не відбувається.

Крім того, при переплаві титану в умовах надлишкового тиску створюються несприятливі умови для видалення вологи, яка може бути адсорбована матеріалом витратного електрода, залишками солей на внутрішній поверхні камери печі і т. под. Більшою мірою це стосується переплаву електродів, пресованих з губчастого титану або титанової стружки. Це пов'язане з тим, що в процесі зберігання титанової губки, при виготовленні з неї витратних електродів, їх транспортуванні і зберіганні можлива фізична адсорбція розвиненою поверхнею губчастого титану та залишками солей хлору (які не були повністю видалені з губчастого титану) вологи. Слід зазначити, що фізично адсорбовані поверхнею губки атмосферні гази не є розчиненими в титані. Тому при подальшому металургійному переділі в умовах високих температур та вакууму вони видаляються вакуумною системою. У разі переплаву електродів з губчастого титану в умовах надлишкового тиску залишки вологи можуть стати причиною підвищеного вмісту в титані водню та кисню.

Автори робіт [6, 7] вказують на можливість подібнення мікроструктури зливків, виплавлених вакуумним ЕШП. Такий ефект пояснюють більш рівномірним розподілом температури у ванні розплавленого шлаку, вирівнюванням фронту кристалізації та збільшенням локальної швидкості твердіння, викликаними інтенсифікацією гідроди-

І.В. Протоковілов — <https://orcid.org/0000-0002-5926-4049>, Т. Бейнертс — <https://orcid.org/0000-0001-7616-0025>,

В.Б. Порохонько — <https://orcid.org/0000-0002-6490-7221>, Д.А. Петров — <https://orcid.org/0000-0003-2937-9299>

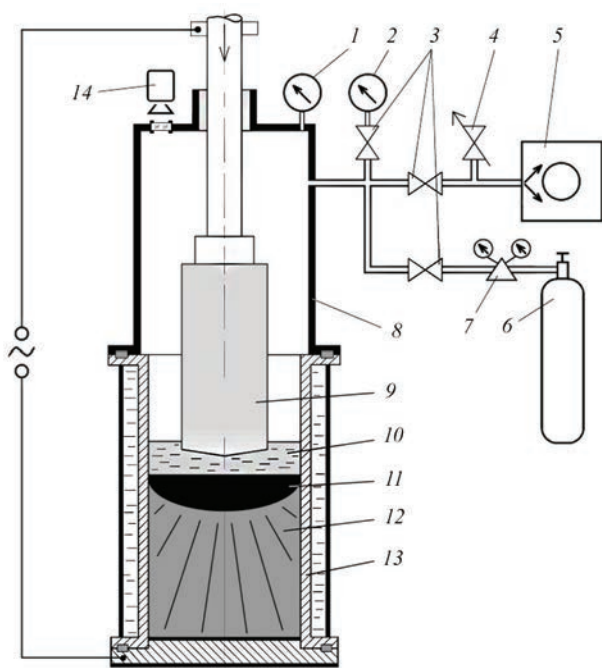


Рис. 1. Схема експериментальної установки для ЕШП у вакуумі: 1 — мановакуумметр; 2 — вакуумметр іонізаційний; 3 — вакуумні вентилі; 4 — натікач; 5 — вакуумний насос; 6 — балон із аргоном; 7 — газовий редуктор із ротаметром; 8 — камера печі; 9 — витратний електрод; 10 — шлакова ванна; 11 — металева ванна; 12 — зливоч; 13 — водоохолоджуваний кристалізатор; 14 — пристрій відеоспостереження

намічних потоків шлаку в результаті випаровування фторидів і виділення CO.

З огляду на вищезазначене, певний інтерес представляє дослідження процесу ЕШП титану в умовах розрядженого тиску (вакууму). ЕШП в вакуумі може поєднати переваги процесів ЕШП і ВДП, зокрема забезпечити високу якість поверхні зливка, щільну однорідну структуру металу, надійний газовий захист і рафінування від водню.

Газовий склад титанових зливок, отриманих ЕШП при різному тиску в плавильному просторі, мас. %

Сплав	Тиск, кПа	[O]	[N]	[H]
BT1-0	25	0,074	0,0060	0,0034
	160	0,070	0,0056	0,0052
BT22	25	0,13	0,015	—>—
	50	0,14	0,027	0,0053
	75	0,09	0,022	0,0065
	100	0,14	0,020	0,0076
	150	—>—	0,025	0,0068
	200	—>—	0,027	0,0064
	250	0,13	0,014	0,0070
	300	—>—	0,015	0,0064

Мета даної роботи полягала у вивченні технологічних особливостей процесу ЕШП титану в умовах вакууму, визначенні його впливу на газовий склад і особливості структуроутворення металу зливоків.

Методика проведення експериментів. Експериментальні дослідження проводили на розробленому в ІЕЗ ім. Е.О. Патона устаткуванні для камерного ЕШП високореакційних матеріалів (рис. 1). Установка оснащена камерою, яка забезпечує повну герметичність плавильного простору, вакуумною системою, системою подачі інертного газу і приладами для моніторингу тиску. Установка дозволяє здійснювати процес переплаву як в умовах надлишкового тиску до 500 кПа, так і в умовах вакууму при виплавці зливоків діаметром від 60 до 260 мм.

Дослідні плавки проводили при переплаві пресованих витратних електродів діаметром 50 і 75 мм під флюсом АН-Т4 у мідних водоохолоджуваних кристалізаторах діаметром 85 і 105 мм. Використовували електроди двох складів: з губчастого ти-



Рис. 2. Зливки титану BT1-0, виплавлені при тиску 25 (а) і 160 кПа (б)

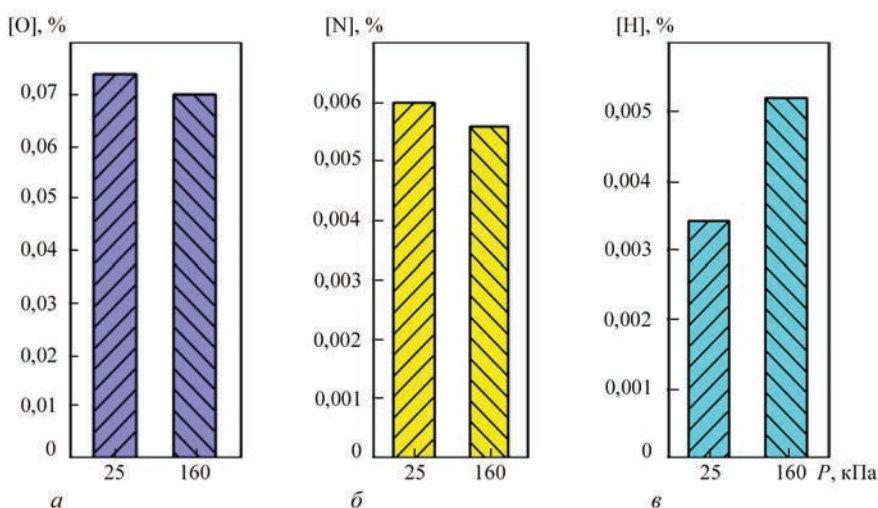


Рис. 3. Вміст кисню (а), азоту (б) і водню (в) в зливках титану BT1-0 в залежності від тиску в плавильному просторі печі ЕШП тану ТГ-110 під титан BT1-0; з губчастого титану ТГ-130 і лігатури К-5-1 (ТУ 48-4-306–88) під сплав BT22 (Ti–5Al–5V–5Mo–1Fe–1Cr). Перед плавкою плавильний простір вакуумували до тиску 2,6 Па ($2 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.), потім заповнювали аргонном. Експерименти проводили при різних значеннях тиску аргону — від вакууму 20 кПа до надлишкового тиску 300 кПа. Припустимі значення тиску обирали з урахуванням результатів роботи [8].

По результатах експериментів оцінювали стабільність електрошлакового процесу, досліджували газовий склад і особливості структуроутворення металу зливок. Газовий склад визначали способом відновлювального плавлення зразків в потоці інертного газу-носія [9]. Для цього виготовляли зразки циліндричної форми діаметром і довжиною по 3 мм (тип МИ-99).

Результати експериментів та їх обговорення. Результати експериментів представлені в таблиці і на рис. 2–7. В усьому досліджуваному діапазоні тисків (від вакууму до надлишкового тиску), електрошлаковий процес проходив стабільно. Це підтверджують результати досліджень, представлених в роботі [8], де були встановлені припустимі діапазони розрідженого тиску при застосуванні флюсу АН-Т4.

Виплавлені зливки мали добру якість формування бокової поверхні. Для порівняння на рис. 2

показано зовнішній вигляд зливок BT1-0, отриманих при тиску 25 і 160 кПа. При плавлі в умовах вакууму бічна поверхня виявилась трохи шорсткішою (рис. 2, а), ніж при надлишковому тиску (рис. 2, б). Це можна пояснити збільшенням гідродинамічної активності шлакової і металевої ванн при плавлі у вакуумі, що, в свою чергу, призводить до періодичної зміни товщини гарнісажної кірки на поверхні зливка. Проте в обох випадках поверхневих дефектів не виявлено.

Результати газового аналізу металу виплавлених зливок надані в таблиці і на рис. 3, 4. Аналіз отриманих даних вказує на відсутність чіткої закономірності щодо впливу тиску на вміст кисню і азоту в металі зливок. В зливках титану BT1-0 спостерігалось незначне (на 5...7 %) збільшення вмісту кисню і азоту в металі, виплавленому в умовах вакууму (25 кПа), у порівнянні з металом, отриманим при надлишковому тиску (160 кПа) (рис. 3, а, б). Проте різниця вмісту елементів знаходиться в межах похибки вимірювань, що не дає підстави стверджувати про певну закономірність.

Відсутність закономірності впливу тиску в досліджуваному діапазоні 25...300 кПа на вміст кисню і азоту також спостерігалась і при виплавлі сплаву BT22. В даному випадку вміст кисню і азоту в експериментах коливався в межах 0,09...0,14 і 0,014...0,027 % відповідно, без тенденцій до

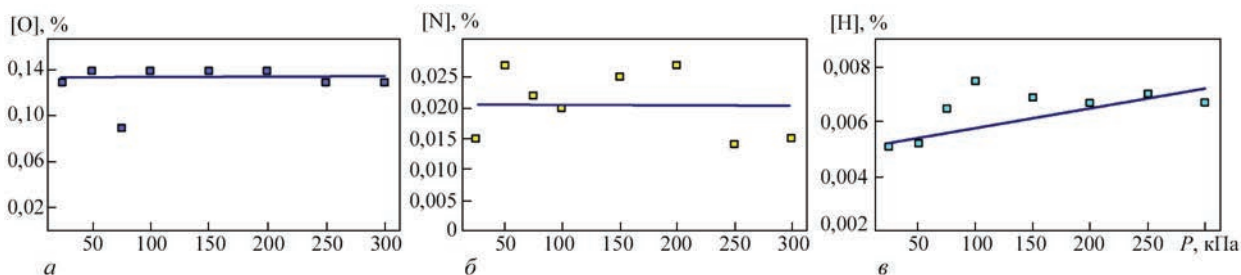


Рис. 4. Вміст кисню (а), азоту (б) і водню (в) в зливках сплаву BT22 в залежності від тиску в плавильному просторі печі ЕШП

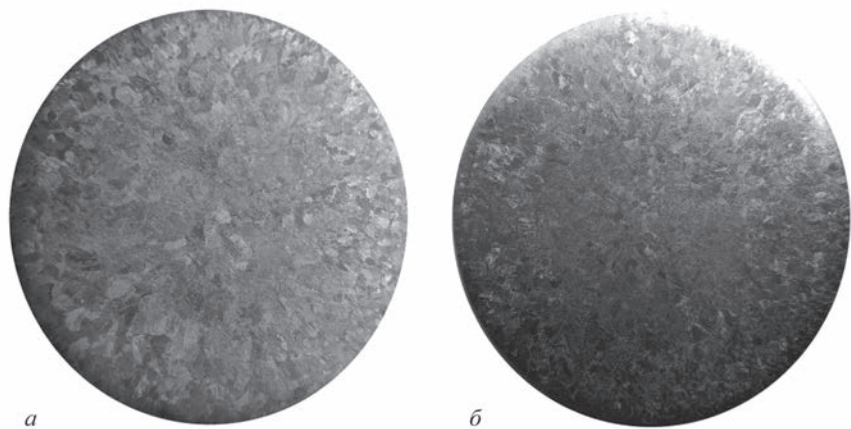


Рис. 5. Макроструктура поперечного перерізу титанових зливок діаметром 80 мм, отриманих ЕШП при тиску інертного газу 25 (а) і 160 кПа (б)

збільшення або зменшення (рис. 4, а, б). Очевидно такі результати пов'язані з різними випадковими чинниками, які вплинули на отримані дані (похибки вимірювань, неможливість підтримувати абсолютно однакові умови для різних плавок та ін.). Це говорить про необхідність подальшого статистичного доповнення отриманих результатів. Таким чином, можна стверджувати, що у дослі-

джуваному діапазоні рівень тиску в плавильному просторі мало впливає на вміст кисню і азоту в титанових зливках.

Щодо вмісту водню, то в даному випадку як і для зливок технічного титану ВТ1-0, так і для зливок титанового сплаву ВТ22 була встановлена певна закономірність. Вона виявляється в зменшенні наявності водню при веденні процесу

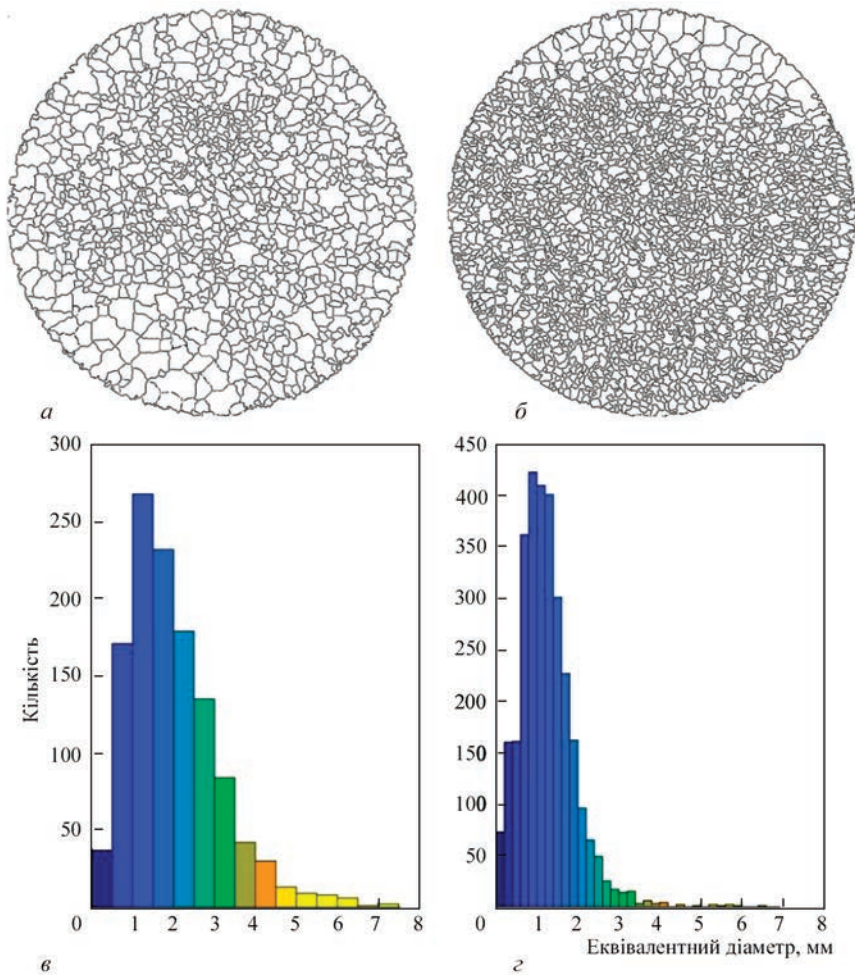


Рис. 6. Зеренна структура (а, б) і розподіл зерен по їх розміру (в, г) в зливках ВТ1-0, отриманих при тиску, кПа: а, в — 25; б, г — 160

ЕШП в умовах вакууму (рис. 3, в, 4, в). При виплавці зливоків ВТ1-0 зменшення тиску в плавильному просторі печі з 160 до 25 кПа призвело до зменшення вмісту водню в металі з 0,0052 до 0,0034 мас. %, тобто на 35 %. Для зливоків сплаву ВТ22 мала місце схожа ситуація. При зменшенні тиску з 100...300 (діапазон надлишкового тиску) до 25 кПа відбувалось закономірне зменшення вмісту водню в металі зливоків з 0,0064...0,0076 до 0,0052 мас. % (в середньому на 25 %).

Таким чином, отримані дані дають підстави стверджувати про можливість зменшення на 20...35 % вмісту водню у титанових сплавах шляхом ведення процесу ЕШП в умовах вакууму (20...25 кПа).

На рис. 5 наведено макроструктури поперечного перерізу зливоків титану ВТ1-0, отриманих ЕШП при тиску інертного газу в плавильному просторі 25 і 160 кПа. В обох випадках структура металу щільна, без пор, неметалевих включень і інших внутрішніх дефектів.

На рис. 6, 7 представлені результати аналізу макроструктури металу, отримані за допомогою програмного забезпечення MIPAR. Середній розмір зерна (еквівалентний діаметр) в зливку, виплавленому при тиску 25 кПа, становив 2,07 мм, а при 160 кПа — 1,26 мм. Тобто зливков, виплавлений при надлишковому тиску мав більш дрібнозернисту структуру, ніж зливков, виплавлений у вакуумі. З одного боку, це збігається з даними, на-

веденими в роботі [10], де зазначається, що зливки ЕШП під тиском мають більш дисперсну структуру у порівнянні зі зливками традиційного ЕШП. З іншого — суперечить даним роботи [6], де відмічено подрібнення структури зливоків ЕШП, виплавлених в умовах вакууму.

Вплив підвищеного тиску на характер структуроутворення можна пояснити відомими факторами: збільшенням ступеня переохолодження і швидкості кристалізації; зменшенням розмірів і більш рівномірним утворенням зародків кристалів; зменшенням енергії міжфазної взаємодії на межі розплав–кристал та ін. [11].

В нашому випадку вплив тиску на формування структури зливоків також можна пояснити через його вплив на режими ЕШП. Так, у роботі [8] було показано, що зменшення тиску в плавильному просторі нижче атмосферного призводить до зниження струму плавки. В свою чергу це спричиняє зменшення тепловиділення в шлаковій ванні (якщо примусово не збільшувати струм плавки за рахунок швидкості подачі електрода), що впливає на характер структуроутворення металу, локальну швидкість твердіння і розмір зерен литого металу.

На рис. 7 наведена мікроструктура зливоків титану ВТ1-0, отриманих при різних значеннях тиску. Дефектів у вигляді мікропористості, тріщин, неметалевих включень не виявлено. Метал характеризується грубою пластинчастою (голчастою) структурою з розорієнтованою внутрішньозерен-

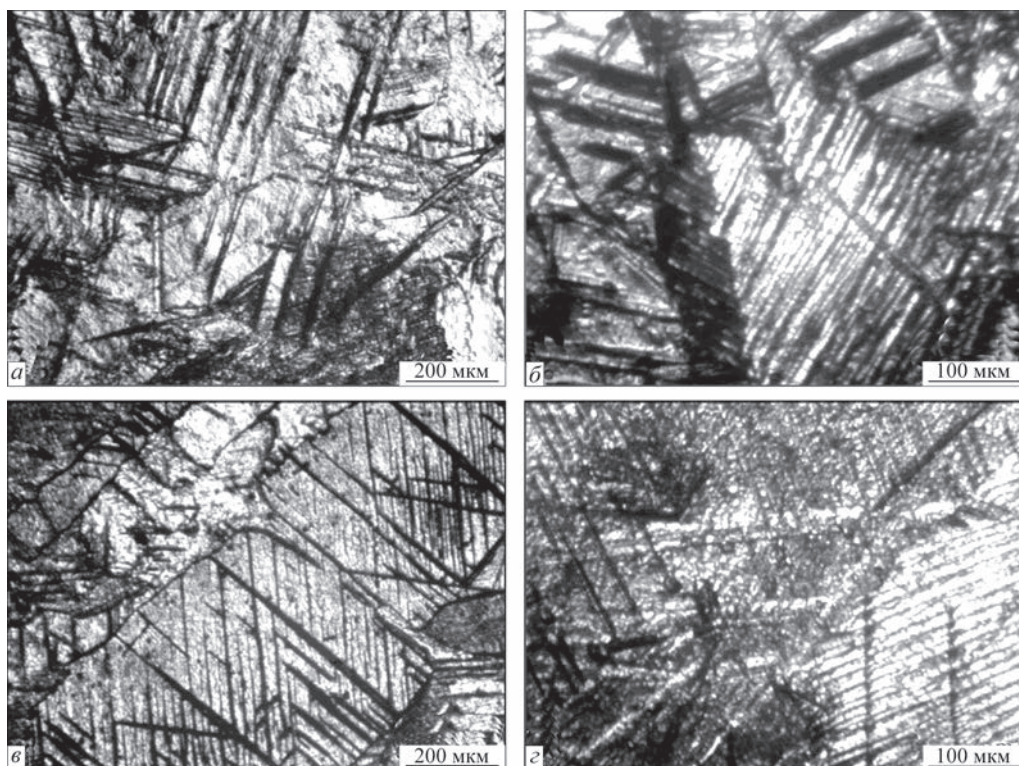


Рис. 7. Мікроструктура титанових зливоків, отриманих ЕШП при тиску інертного газу 25 (а, б) і 160 кПа (в, г)

ною будовою. Товщина α -пластин становить в середньому 8...15 мкм. Така структура є типовою для титану у литому стані і формується внаслідок високого перегріву розплаву і малих швидкостей кристалізації. Принципових відмінностей в мікроструктурі зливків, отриманих в умовах вакууму (25 кПа) і при надлишковому тиску (160 кПа), не виявлено.

Висновки

1. Способом ЕШП в камерній печі отримані зливки титанових сплавів ВТ1-0 і ВТ22 при різних значеннях тиску в робочій зоні — від вакууму до надлишкового тиску. Показано, що в усьому досліджуваному діапазоні тисків 20...300 кПа електрошлаковий процес відбувався стабільно з формуванням зливків з якісною боковою поверхнею і щільною структурою, без пор, шлакових включень і інших внутрішніх дефектів.

2. Отримано експериментальні дані щодо впливу тиску в плавильному просторі печі ЕШП в діапазоні 20...300 кПа на газовий склад титанових зливків. Встановлено можливість зменшення на 20...35 % вмісту водню у титанових сплавах шляхом ведення процесу ЕШП в умовах вакууму (20...25 кПа). При цьому закономірного впливу тиску в плавильному просторі на вміст кисню і азоту в титанових зливках у досліджуваному діапазоні не виявлено.

3. Встановлено, що зливки титану ВТ1-0, виплавлені в умовах вакууму (25 кПа), характеризуються більшим розміром зерен у порівнянні зі зливком, отриманим при надлишковому тиску 160 кПа. При цьому середній еквівалентний діаметр зерен становив 2,07 і 1,26 мм відповідно.

Список літератури

1. Протоковилів І.В., Петров Д.А., Порохонько В.Б., Назарчук А.Т. (2018) Технологические и металлургические особенности выплавки слитков титановых сплавов в электрошлаковых печах камерного типа. *Современная электрометаллургия*, **2**, 45–51. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2018.02.06>
2. Компан Я.Ю., Протоковилів І.В. (2002) Некоторые технологические аспекты магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП) титановых сплавов. *Мат. междунауч.-техн. конф. «Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра» (8–9 октября 2002 г., Киев)*, сс. 256–262.
3. Протоковилів І.В., Порохонько В.Б. (2014). Способы управления кристаллизацией металла при ЭШП. *Современная электрометаллургия*, **3**, 7–15.
4. Аношкин Н.Ф., Глазунов С.Г., Морозов Е.И., Тетюхин В.В. (1978) *Плавка и литье титановых сплавов*. Дوباتкин В.И. (ред.). Москва, Металлургия.
5. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Козлитин Д.А. и др. (1997) *Электронно-лучевая плавка*. Киев, Наукова думка.

6. Yu Liu, Xijie Wang, Guangqiang Li et al. (2020) Cleanliness improvement and microstructure refinement of ingot processed by vacuum electroslag remelting. *J. of Materials Research and Technology*, **9**(2), 1619–1630. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.087>
7. Yu Liu, Xijie, Wang Guangqiang Li et al. (2018) Role of vacuum on cleanliness improvement of steel during electroslag remelting. *Vacuum*, **154**, 351–358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.05.032>
8. Протоковилів І.В., Порохонько В.Б., Петров Д.А. (2020) Исследование технологических особенностей и допустимых давлений процесса ЭШП в вакууме. *Сучасна електрометалургія*, **2**, 3–9. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.02.01>
9. Калинюк М.М. (2014) Організація процесу аналізу титанових сплавів на вміст домішок кисню, азоту, водню та вуглецю. *Метрологія та прилади*, **2**, 50–57.
10. Рашев Ц. (1995) *Высокоазотистые стали. Металлургия под давлением*. София, Издательство Болгарской АН.
11. Батышев А.И. (1990). *Кристаллизация металлов и сплавов под давлением*. 2-е изд. Москва, Металлургия.

References

1. Protokovilov, I.V., Petrov, D.A., Porokhonko, V.B., Nazarchuk, A.T. (2018) Technological and metallurgical peculiarities of melting of titanium alloy ingots in chamber-type electroslag furnaces. *Suchasna Elektrometal.*, **2**, 45–51 [in Russian]. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2018.02.06>.
2. Kompan, Y.Y., Protokovilov, I.V. (2002) Some technological aspects of magnetically-impelled electroslag melting (MEM) of titanium alloys. In: *Proc. of Int. Conf. on Special Metallurgy: Yesterday, Today, Tomorrow (8–9 October 2002, Kyiv)*, 256–262 [in Russian].
3. Protokovilov, I.V., Porokhonko, V.B. (2014) Methods to control metal solidification in ESR. *Sovrem. Elektrometall.*, **3**, 7–15 [in Russian].
4. Anoshkin, N.F., Glazunov, S.G., Morozov, E.I., Tetyukhin, V.V. (1978) *Melting and casting of titanium alloys*. Ed. by V.I. Dobatkin. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
5. Paton, B.E., Trigub, N.P., Kozlitin, D.A. et al. (1997) *Electron beam melting*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
6. Yu, Liu, Xijie, Wang, Guangqiang, Li et al. (2020) Cleanliness improvement and microstructure refinement of ingot processed by vacuum electroslag remelting. *J. of Materials Research and Technology*, **9**(2), 1619–1630. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.087>
7. Yu, Liu, Xijie, Wang, Guangqiang, Li et al. (2018) Role of vacuum on cleanliness improvement of steel during electroslag remelting. *Vacuum*, **154**, 351–358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2018.05.032>
8. Protokovilov, I.V., Petrov, D.A., Porokhonko, V.B. (2020) Investigation of the technological features and admissible pressures of the process of vacuum ESR. *Suchasna Elektrometal.*, **2**, 3–9 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2020.02.01>
9. Kalyniuk, N. (2014) Arrangement of the process for titanium alloys analysis on content of oxygen, nitrogen, hydrogen and carbon impurities. *Metrologiya ta Prylady*, **2**, 50–57 [in Ukrainian].
10. Rashev, Ts. (1995) *High-nitrogen steels. Metallurgy under pressure*. Sofia. Publ. House of the Bulgarian Academy of Sci. [in Russian].
11. Batyshev, A.I. (1990) *Crystallization of metals and alloys under pressure*. 2nd ed. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

ESR OF TITANIUM IN VACUUM

I.V. Protokovilov¹, T. Beinerts², V.B. Porokhonko¹, D.A. Petrov¹¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: lab38@paton.kiev.ua

²Institute of Physics, University of Latvia 32 Miera Str., Salaspils LV-2169, Latvia. E-mail: toms.beinerts@gmail.com

The results of experimental studies of the process of electroslog remelting of titanium in a chamber furnace at different values of pressure in the melting area, from vacuum to excess pressure, are given. Experiments were carried out during the melting of ingots with a diameter of 85 and 105 mm from titanium alloys VT1-0 and VT22 using fluoride-chloride flux AN-T4. The pressure of the inert gas in the furnace chamber was varied from 20 to 300 kPa. It is shown that in the entire studied range of pressures, the electroslog process proceeded stably with the formation of ingots with a high-quality side surface and a dense structure, without pores, slag inclusions and other internal defects. Experimental data on the effect of pressure in the melting area on the gas composition and structure of titanium ingots are given. The possibility of reducing the hydrogen content in titanium alloys by carrying out the electroslog process under vacuum conditions is shown. It was also established that the VT1-0 titanium ingot, melted under vacuum conditions, is characterized by a larger grain size compared to the ingot obtained at excess pressure. 11 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Keywords: electroslog remelting, chamber furnace, vacuum, titanium, gas composition, ingot, structure

Отримано 13.02.2024

Отримано у переглянутому вигляді 19.02.2024

Прийнято 22.02.2024

ПЕРЕДПЛАТА 2024



Журнал «**Автоматичне зварювання**» є міжнародним науково-технічним та виробничим журналом у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень за напрямками: матеріалознавство та металургія зварювання, наплавлення та інших споріднених технологій; технології та матеріали для зварювання конструкційних матеріалів; виробництво зварних металоконструкцій для різних галузей промисловості; відновлювальний ремонт для подовження ресурсу зварних конструкцій і вузлів; проблеми міцності, конструювання та оптимізації зварних конструкцій; технології 3D друку, які базуються на зварювальних процесах; гібридні технології зварювання. В журналі публікується також інформація про нові зварювальні матеріали, джерела живлення та технології; звіти про виставки, конференції та семінари, анонси нових книг та винаходів, новини від відомих компаній та інше.



Журнал «**Сучасна електрометалургія**» є міжнародним науково-теоретичним та виробничим журналом у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень у сферах: металургія чорних і кольорових металів та сплавів; спеціальна електрометалургія (електрошлакова, електронно-променева, плазмова- та вакуумно-дугова технології); нові матеріали; енерго- і ресурсозбереження; матеріалознавство, 3D технології у спеціальній електрометалургії. Публікується також допоміжна інформація з тематики журналу.



Журнал «**Технічна діагностика та неруйнівний контроль**» є міжнародним науково-технічним та виробничим журналом у галузі технічних наук. В журналі публікуються результати досліджень з діагностики матеріалів і конструкцій та методи неруйнівного контролю для оцінки стану матеріалів і конструкцій; теорія, методи і засоби технічної діагностики. Розміщуються матеріали з моніторингу конструкцій та подовження ресурсу та працездатності засобами НК. Публікується супутня інформація з тематики журналу, а також інформація про події та новини в Українському товаристві НК та ТД.

РЕКЛАМА В ЖУРНАЛАХ

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках журналів.

Перша сторінка обкладинки – 200×200 мм.

Друга, третя і четверта сторінки обкладинки – 200×290 мм.

Перша, друга, третя, четверта сторінки внутрішньої обкладинки – 200×290 мм.

Вклейка А4 – 200×290 мм. Розворот А3 – 400×290 мм. А5 – 185×130 мм.

Розміри журналів після обрізу 200×290 мм.

Всі файли в форматі IBM PC, кольорова модель СМΥК, роздільна здатність 300 dpi.

ВАРТІСТЬ РЕКЛАМИ

Ціна договірна. Передбачена система знижок. Вартість публікації статті на правах реклами становить половину вартості рекламної площі. Публікується тільки профільна реклама з тематики журналів. Відносно вартості, знижок та термінів публікації прохання звертатися у видавництво.

ВИДАВНИЦТВО

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

03150, Київ, вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: 38044 205-23-90

E-mail: journal@paton.kiev.ua, patonpublishinghouse@gmail.com

<https://patonpublishinghouse.com>

СТРУКТУРА І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТОВСТИХ КОНДЕНСАТІВ МІДІ, ДИСПЕРСНО-ЗМІЦНЕНИХ ХРОМОМ, ОКСИДОМ ЦИРКОНІЮ ТА ЇХ СУМІШШЮ

А.В. Демчишин¹, А.А. Демчишин^{1,2}, С.П. Єгоров¹

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

03142, м. Київ, вул. Омеляна Прицака, 3. E-mail: ademch@meta.ua

²НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

03056, м. Київ, просп. Берестейський, 37. E-mail: ntuu.kpi@ukr.net

Досліджено структуру і механічні властивості конденсатів міді товщиною 0,8...2,0 мм, дисперсно-зміцнених хромом, оксидом цирконію та їх сумішшю, отриманих одночасним електронно-променевим випаровуванням обраних складових з подальшою конденсацією парової фази на плоскі сталеві підкладки. Показано, що характер структури і рівень міцності композитів залежать від об'ємного вмісту зміцнювальної фази, її дисперсності та сумарної дії обох дисперсоїдів. Бібліогр. 10, рис. 12.

Ключові слова: електронно-променева парофазна технологія, товсті вакуумні конденсати, мідь, системи мідь–хром, мідь–оксид, мідь–хром–оксид цирконію, мікроструктура, твердість, міцність, пластичність

Вступ. Композиційні матеріали на основі міді широко використовуються в різних галузях сучасної промисловості завдяки сприятливому поєднанню в таких композиціях механічних, термічних, теплофізичних і електричних властивостей. Наприклад, контакти електричних апаратів, колектори електродвигунів, електроди для контактного, точкового і шовного зварювання, поверхні деталей з високим опором дугової ерозії та зношенню при терті ковзанням, робочі поверхні потужних лазерних дзеркал, мішені для нейтронного опромінення тощо [1–4]. В якості зміцнюючих фаз в мідних композиціях використовуються як металеві (Cr, Mo, Nb, Be, Zr), так і керамічні (Al_2O_3 , ZrO_2 , Y_2O_3 , ThO_2 , SiC, TiB_2 , AlN) матеріали. Разом з тим, дисперсійно-твердіючі мідні сплави (наприклад, хромові бронзи) мають недоліки, такі як суттєве зниження твердості і міцності при підвищених температурах, що в значній мірі обмежує їх застосування. З другого боку, дисперсно-зміцненні сплави міді, такі як Cu– Al_2O_3 , Cu– ZrO_2 , демонструють більш високі значення механічних властивостей при підвищених температурах, що забезпечує більш широке застосування таких композицій [5], які отримують, як правило, різними методами порошкової металургії.

Ціль запропонованої роботи — дослідження структури і механічних властивостей мідних композицій Cu–Cr і Cu– ZrO_2 , отриманих за допомогою електронно-променевої парофазної технології, а також вивчення спільного впливу двох механізмів зміцнення мідної матриці частинками Cr і ZrO_2 на аналогічні характеристики бінарних систем.

Матеріали і методика експерименту. Композиційні матеріали систем Cu–Cr, Cu– ZrO_2 і BrX0,5– ZrO_2 у вигляді пластин $120 \times 200 \times (0,8 \dots 2,0)$ мм зі змінним вмістом дисперсної фази по їх довжині були отримані шляхом одночасного електронно-променевого випаровування міді або бронзи BrX0,5 і зміцнюючої фази з двох незалежних водоохолоджуваних мідних тиглів з подальшою конденсацією парової суміші на сталеві підкладки. Принципова схема цього методу представлена в роботі [6]. В якості вихідних матеріалів використовували зливки міді діаметром 69 мм і довжиною 160...200 мм, отримані електронно-променевим переплавом міді марки М0, зливки хромової бронзи BrX0,5 та хрому марки ВХ-1 діаметром 49 мм і довжиною 80...90 мм, а також пресовані з технічно чистого порошку $ZrO_2 + 5\% \text{ CaO}$ і спечені штабіки діаметром 49 мм і висотою 60 мм. Температура підкладки становила 750 °С, вибір якої було обумовлено метою отримати оптимальні механічні властивості і структуру металевої матриці. Швидкість конденсації металів становила 5...7 мкм/хв, а для оксиду цирконію — 1,6...2,4 мкм/хв. Величина вакууму складала $(1,33 \cdot 10^{-2}) \dots (0,66 \cdot 10^{-3})$ Па. На підкладки, щоб відділити від них конденсати, попередньо наносили тонкий підшар діоксиду цирконію. Кількість другої фази в композитах визначали хімічним методом.

Металографічне дослідження структури конденсатів проводили за допомогою оптичних мікроскопів МІМ-7 і МІМ-8. Форму і розміри частинок другої фази досліджували на електронному мікроскопі JEM-120. Механічні властивості конденсатів визначали шляхом розтягу плоских зразків з шириною робочої частини 3 мм і довжиною 10 мм. Відносна

А.В. Демчишин — <https://orcid.org/0000-0002-1572-9385>, А.А. Демчишин — <https://orcid.org/0000-0001-7754-0185>

швидкість деформації становила $1,67 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Твердість по Віккерсу вимірювали на приладі ХПО-250 при навантаженні 10 кг протягом 30 с.

Результати досліджень. Система Cu–Cr. При розгляді системи мідь–хром слід відзначити, що згідно діаграмі стану розчинність хрому в твердій міді швидко зменшується із зниженням температури і складає 0,15 та 0,03 об. % при 750 і 20 °С відповідно. Таким чином, при наявності хрому в міді вище вказаних значень в слабо розбавленому твердому розчині мідь–хром він буде у вигляді дисперсних частинок. Вміст хрому в міді у цьому дослідженні змінювався в діапазоні 0...3,0 об. % Cr.

Металографічне дослідження шліфів поперечних перерізів конденсатів Cu–Cr дозволило визначити вплив кількості зміцнюючої добавки хрому на характер мікроструктури двофазного конденсату. На рис. 1 показані структури вакуумних конденсатів мідь–хром із вмістом Cr від 0,3 до 2,7 об. %, отриманих при температурі підкладки 750 °С.

Порівняння наведених структур з мікроструктурою конденсату чистої міді, сформованого при тій самій температурі, свідчить, що введення в мідь вже малої кількості хрому призводить до суттєвого зменшення величини кристалітів матриці. Наприклад, при вмісті хрому 0,3 об. % розмір зерна конденсату Cu–Cr зменшується в 3 рази. Збільшення концентрації зміцнювальної хромової фази спричиняє подальше подрібнення структури і при вмісті хрому 2,7 об. % і більше елементи мікроструктури конденсату стають настільки дисперсними, що для їх виявлення необхідно застосовувати великі збільшення (рис. 1, д, $\times 900$).

Електронно-мікроскопічні дослідження на про-світ спеціально приготовлених фольг конденсатів Cu–Cr дозволили визначити розміри і форму дисперсних частинок хрому в залежності від кількості введеної в мідну матрицю зміцнювальної фази. На базі експериментальних даних можна зробити висновки, що частинки хрому мають округлу форму і їх розмір збільшується зі зростанням концентрації другої фази. Наприклад, якщо при вмісті в міді 0,3 об. % Cr розмір зміцнювальних частинок складає біля 30 нм, то при кількості 2,5 об. % другої фази розмір частинок збільшується в 7 разів і становить 210 нм. На рис. 2 представлені електронно-мікроскопічні знімки структур конденсатів Cu–Cr при різних концентраціях хрому.

Друга фаза значно збільшує твердість міді. Введення хрому в кількості 0,5 об. % підвищує твердість вакуумного конденсату в 1,5 рази. При подальшому збільшенні концентрації хрому до 2,7 об. % твердість зростає пропорційно вмісту зміцнювальної фази (рис. 3). Порівняння твердості конденсату Cu–0,5 % Cr з твердістю хромової бронзи БрХ0,5, отриманої литтям, свідчить про практичний збіг абсолютних значень твердості конденсованої хромової бронзи (603 МПа) з твердістю масивної бронзи після гартування (637 МПа) [7, 8].

Механічні властивості на розтягування конденсатів системи Cu–Cr визначали при кімнатній температурі і 700 °С в повітрі та у вакуумі $5 \cdot 10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$ відповідно. Отримані залежності від вмісту зміцнювальної фази представлені на рис. 4. Характеристики міцності двофазних конденсатів зростають із збільшенням вмісту хрому.

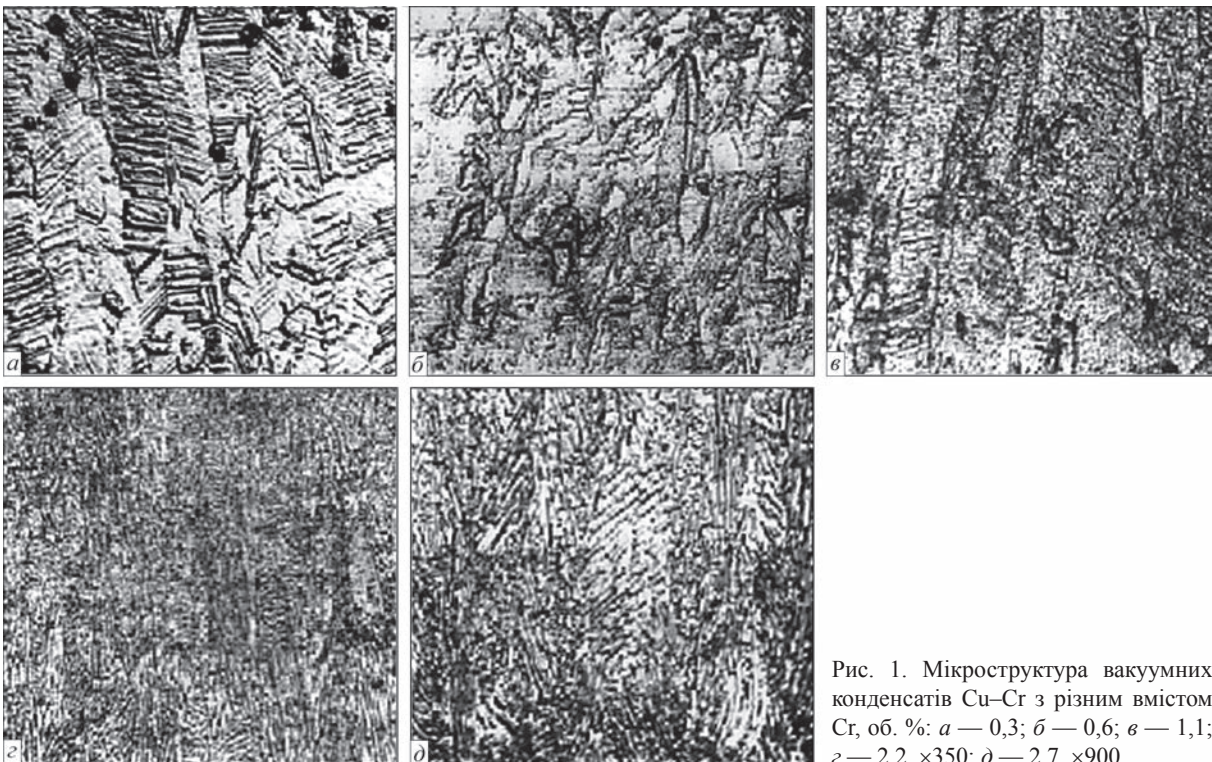


Рис. 1. Мікроструктура вакуумних конденсатів Cu–Cr з різним вмістом Cr, об. %: а — 0,3; б — 0,6; в — 1,1; г — 2,2, $\times 350$; д — 2,7, $\times 900$

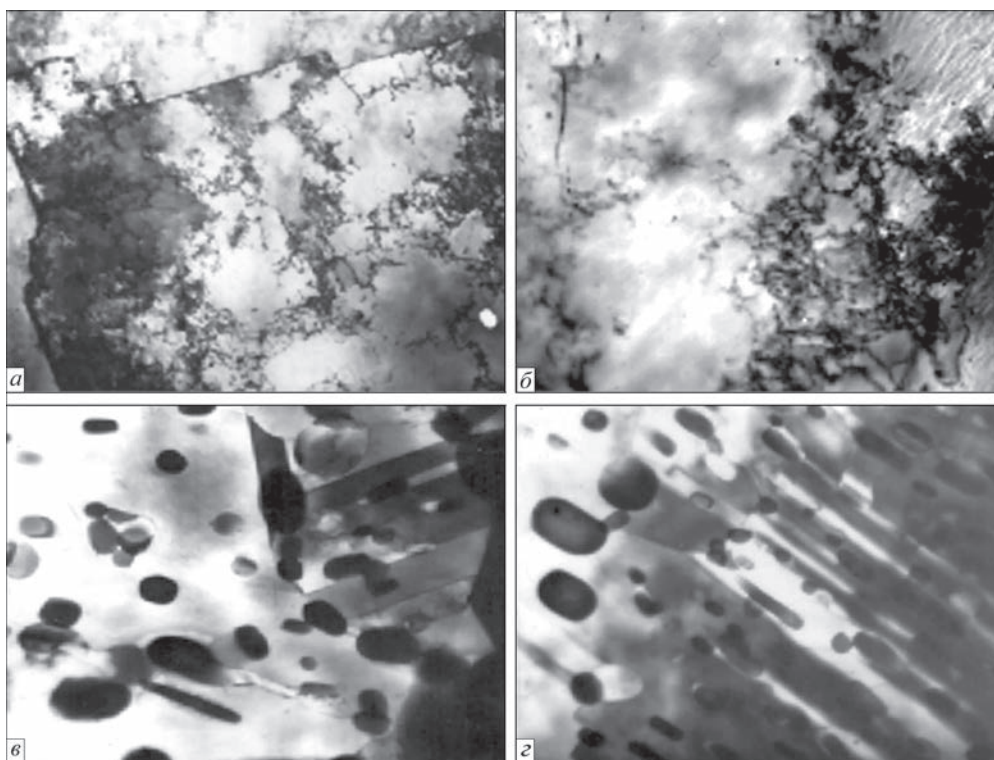


Рис. 2. Структура конденсатів Cu–Cr з різним вмістом Cr, об. %: а — чиста мідь; б — 0,3; в — 2,5; з — 3,4, $\times 40000$

Введення в мідь хрому в кількості 3,2 об. % збільшує межу міцності і текучості в 1,9 та 2,0 рази відповідно. Пластичність двофазних конденсатів дещо зростає при введенні в мідну матрицю невеликих добавок хрому (до 0,6...0,8 об. %). При подальшому збільшенні вмісту зміцнювальної фази відносно подовження швидко зменшується і досягає 21 % при 3,2 об. % хрому.

Порівняння межі міцності, текучості і відносного подовження конденсатів Cu–0,5 % Cr з аналогічними характеристиками хромової бронзи БрХ0,5, отриманої литтям або порошковою металургією, свідчить про практичний збіг абсолютних значень зазначених механічних властивостей конденсованої хромової і масивної бронз в загартованому стані [7, 8].

Випробування на розтягування при 700 °C свідчать про збільшення меж міцності і текучо-

сті з підвищенням вмісту хрому до 0,8 об. %. Подальше збільшення вмісту хрому призводить до зменшення характеристик міцності. Відносно подовження конденсатів Cu–Cr зменшується з 41 до 21 % з підвищенням вмісту зміцнювальної фази до 0,8...1,0 об. %, а далі зростає пропорційно збільшенню вмісту хрому. При 2,5 об. % хрому подовження конденсатів Cu–Cr досягає 36 %.

Відзначене зниження характеристик міцності при одночасному збільшенні пластичності конденсатів із вмістом хрому в діапазоні 0,8...2,5 об. % слід пов'язувати з коагуляцією частинок хрому внаслідок спільної дії температури (700 °C) і деформації. Цей факт свідчить про порівняно низьку термічну стабільність матеріалів Cu–Cr при такій температурі.

Система Cu–ZrO₂. Металографічні дослідження конденсатів Cu–ZrO₂ свідчать, що введення оксиду ZrO₂ в мідь призводить до зменшення величини кристалітів матриці і формування стовпчастої структури (рис. 5), як і у випадку добавки хрому. Вміст оксиду в міді в цьому дослідженні змінювали в діапазоні 0...4,0 об. % ZrO₂. Найбільш різке подрібнення зерна спостерігається в області вмісту другої фази 0,2...0,7 об. %. Наприклад, при вмісті 0,6 об. % оксиду в міді розмір зерна композита зменшується в 3,5 рази в порівнянні з величиною кристалітів чистої конденсованої міді, сформованої при однаковій температурі підкладки (750 °C). Збільшення вмісту оксидної фази спричиняє подальше подрібнення структури композита мідь–оксид, проте швид-

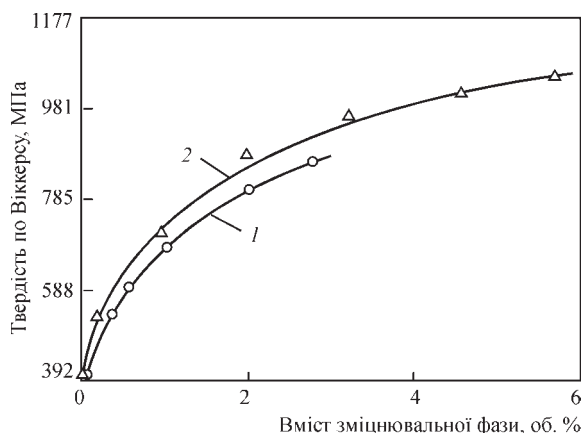


Рис. 3. Залежність твердості конденсатів систем Cu–Cr (1) та Cu–ZrO₂ (2) від вмісту зміцнювальної фази

кість цього процесу значно сповільнюється. При вмісті оксиду 3...4 об. % елементи мікроструктури конденсату стають настільки дисперсними, що для їх виявлення необхідно застосовувати великі збільшення (рис. 5, з, $\times 900$).

Рентгенографічні дослідження двофазних композицій мідь–оксид цирконію показали, що лінії фази діоксиду не виявляються в дослідженому діапазоні концентрацій другої фази, лінії міді не розмиті, параметр решітки матриці не змінюється в залежності від вмісту оксиду і збігається з параметром решітки конденсату чистої міді. Це свідчить про практичну відсутність взаємодії фаз при формуванні конденсатів системи Cu-ZrO_2 . Відсутність на рентгенограмах ліній оксиду можна пояснити слабкою інтенсивністю відбиття від кристалографічних площин цієї тугоплавкої сполуки і наступним їх поглинанням з огляду на малу кількість другої фази в композиції. Електронно-мікроскопічні дослідження на просвіт фольг конденсатів Cu-ZrO_2 показали, що частинки оксиду мають сфероїдальну форму і досить однорідні за розміром (рис. 6). Величина зміцнювальних частинок також збільшується з підвищенням вмісту оксиду, як і у випадку композиції мідь–хром.

Слід відзначити, що при малій кількості фази ZrO_2 (до 0,8 об. %) частинки оксиду мають більші розміри у порівнянні з частинками хрому. Наприклад, при концентрації другої фази 0,3 об. % вели-

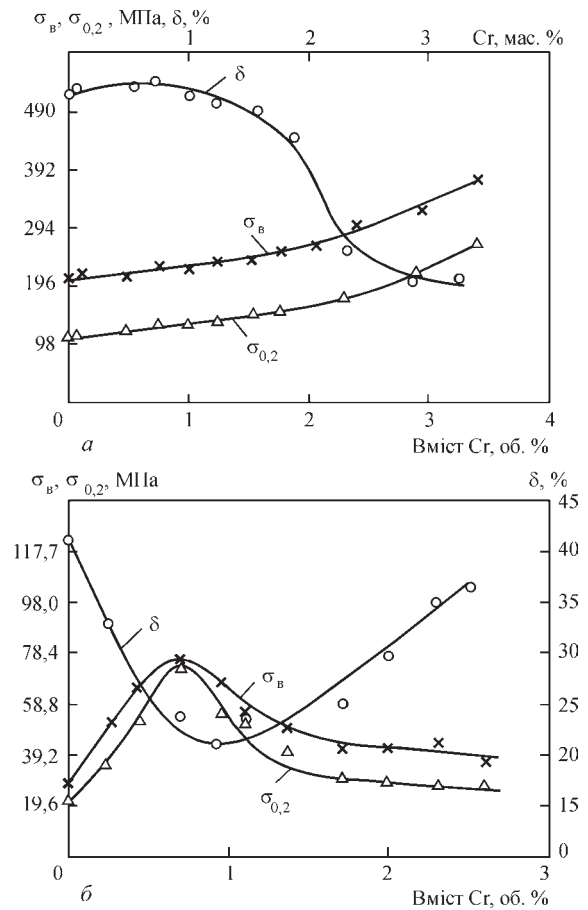


Рис. 4. Залежність механічних властивостей конденсатів Cu-Cr від кількості зміцнювальної фази при температурах випробувань, $^{\circ}\text{C}$: а — 20; б — 700

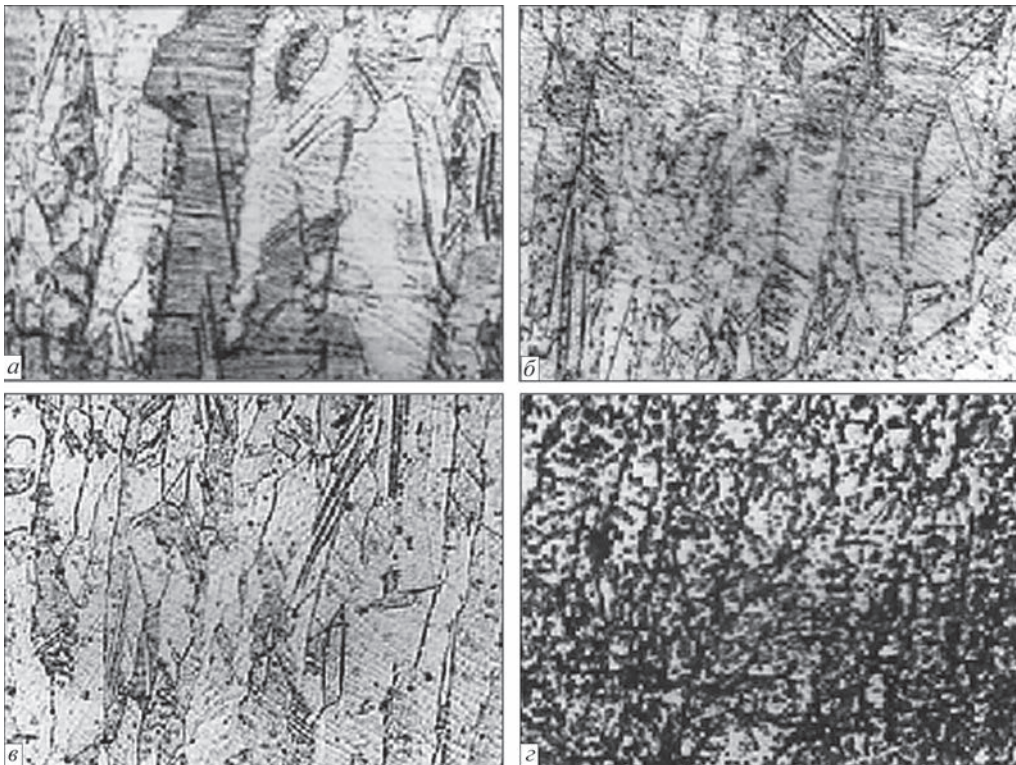


Рис. 5. Мікроструктура вакуумних конденсатів Cu-ZrO_2 з різним вмістом ZrO_2 , об. %: а — 0,2; б — 0,3; в — 0,5, $\times 350$; з — 4,0, $\times 900$

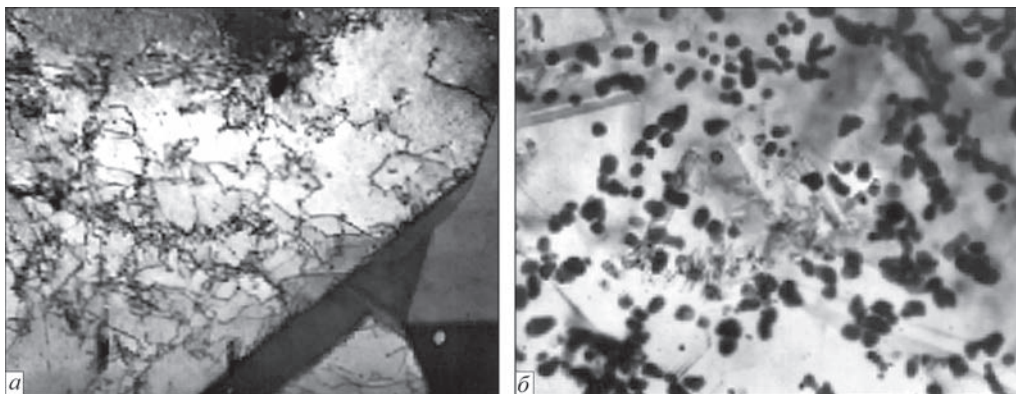


Рис. 6. Мікроструктура конденсатів Cu–ZrO₂ з різним вмістом ZrO₂, об. %: а — 0,3; б — 2,5, ×40000

чина частинок оксиду і хрому складає 60 та 30 нм відповідно. Проте швидкість росту дисперсних частинок із збільшенням кількості другої фази значно нижче в мідьоксидних композиціях у порівнянні з конденсатами Cu–Cr. Внаслідок цього, при вмісті другої фази вище 0,8 об. % розмір частинок хрому починає перевершувати розмір частинок оксиду і при вмісті 3,4 об. % другої фази частинки хрому стають значно крупніше частинок оксиду. Відзначений факт можна пояснити різним ступенем взаємодії другої фази з мідною матрицею і різною дифузійною рухомістю зміцнювальних фаз в міді при формуванні конденсованої композиції при температурі 750 °C і виділенні хромової фази з маточного матеріалу в об'ємі матриці при охолодженні підкладки з 750 °C до кімнатної температури.

Введення частинок діоксиду цирконію в мідь спричиняє збільшення її твердості з 40 для чистої міді до 107 кг/мм² при 5,7 об. % оксиду (рис. 3). Концентраційна залежність твердості мідьоксидних композицій аналогічна залежності твердості від кількості фази для конденсатів системи Cu–Cr, проте абсолютні значення твердості конденсатів мідь–оксид декілька вищі при однаковому об'ємному вмісті зміцнювальної фази. Порівняння твердості конденсату Cu–0,5 об. % ZrO₂ з твердістю зразків аналогічного складу, отриманих порошковою металургією методом внутрішнього окислення з подальшою гарячою екструзією і холодним витягуванням, на 56 % свідчить про практичний збіг абсолютних значень [9, 10].

Механічні властивості конденсатів Cu–ZrO₂ визначали при кімнатній температурі в повітрі і при 700 °C у вакуумі 5·10⁻⁵ мм рт. ст. Отримані залежності надані на рис. 7. Введення частинок оксиду цирконію в мідну матрицю призводить до зростання меж міцності і текучості двофазних конденсатів при одночасному зниженні їх пластичності.

Концентраційна залежність міцності конденсатів Cu–ZrO₂ при кімнатній температурі аналогічна залежності міцностних характеристик від кількості

зміцнювальної фази для конденсатів системи Cu–Cr, проте абсолютні значення меж міцності і текучості мідьоксидної системи дещо вищі. При температурі випробування 700 °C міцнісні характеристики конденсатів Cu–ZrO₂ також збільшуються з ростом вмісту оксиду в досліджуваному діапазоні концентрацій другої фази, а пластичність зменшується.

Порівняння механічних властивостей конденсатів систем Cu–Cr і Cu–ZrO₂ при температурі випробування 700 °C свідчить, що в мідьоксидних композиціях не спостерігається падіння міцнісних характеристик із збільшенням вмісту зміцнювальної фази в діапазоні концентрацій вище 0,8 об. %, як це має місце в системі Cu–Cr, що свідчить про більш високу термічну стабільність мідьоксидних конденсатів. Цей факт дозволяє зробити висновок, що з точки зору надійності роботи в умовах тривалої дії підвищених температур конденсати системи Cu–ZrO₂ мають перевагу перед конденсатами системи Cu–Cr. Відомо також, що дисперсно-зміцнені матеріали з усталеною зміцнювальною фазою мають надзвичайно низькі швидкості повзучості при високих температурах.

Система Cu–0,5Cr–ZrO₂. Металографічні дослідження конденсатів чистої хромової бронзи БрХ0,5, отриманих електронно-променевим випаровуванням з одного тигля, показали, що при її випаровуванні на сталому режимі на підкладці формується конденсат, структура якого аналогічна структурі конденсату, отриманому при одночасному випаровуванні чистих міді і хрому з двох тиглів. Це дозволило одержувати трифазні конденсати системи Cu–0,5Cr–ZrO₂ зі змінним вмістом оксиду.

Введення оксидної фази в хромову бронзу призводить до додаткового подрібнення її структури (рис. 8). При вмісті оксиду 1,0 об. % розмір зерна конденсату бронза–оксид зменшується в 2 рази в порівнянні з величиною кристалітів конденсованої бронзи, сформованої за тієї ж температури підкладки (750 °C). Подальше збільшення концентрації оксиду спричиняє подрібнення структури

композита бронза–оксид, проте швидкість цього процесу дещо сповільнюється.

Електронно-мікроскопічні дослідження на про-світ показали, що одночасна присутність в мідній матриці зміцнювальних частинок хрому і оксиду цирконію не впливають на їх морфологію при різних вмістах оксиду (рис. 9). Як і у випадку двофазних систем на основі міді, в трифазних конденсатах також спостерігається зростання розмірів частинок зміцнювальної фази із збільшенням її вмісту.

Введення частинок оксиду в хромову бронзу спричиняє збільшення її твердості з 60 до 160 кг/мм² при 8 об. % оксиду (рис. 10), що перевищує твердість литої хромової бронзи БрХ0,5 після дисперсійного твердіння і 25%-ної холодної деформації (150 кг/мм²) [7].

Механічні властивості на розтяг трифазних конденсатів визначали при кімнатній температурі в повітрі і при 700 °С у вакуумі $5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. (рис. 11). Як видно з наведених графіків, концентраційні залежності меж міцності, текучості та пластичності дисперсно-зміцненої бронзи характеризуються наявністю мінімуму при вмісті оксиду 0,5 об. %. Температура випробувань і оточуюча атмосфера не впливають на його положення. Одночасне зниження міцності і пластичності бронзи БрХ0,5 при збіль-

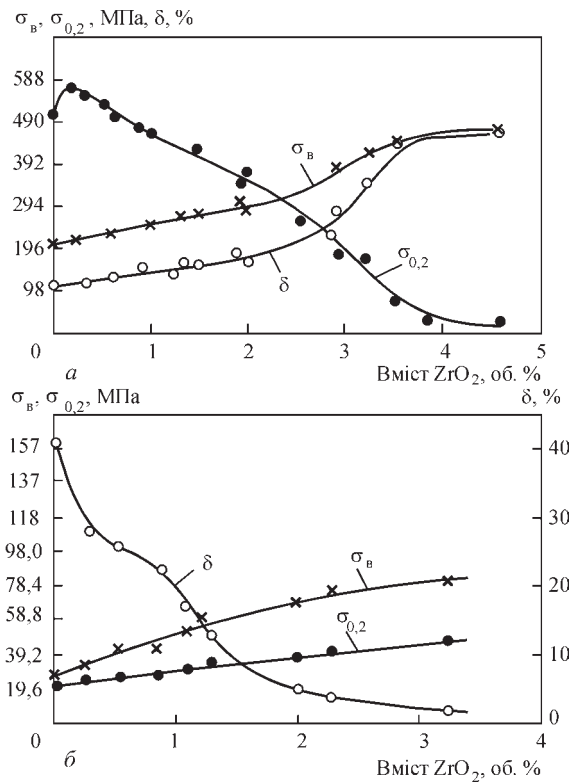


Рис. 7. Залежність механічних властивостей вакуумних конденсатів Cu–ZrO₂ від вмісту зміцнювальної фази при температурах випробувань, °С: а — 20; б — 700

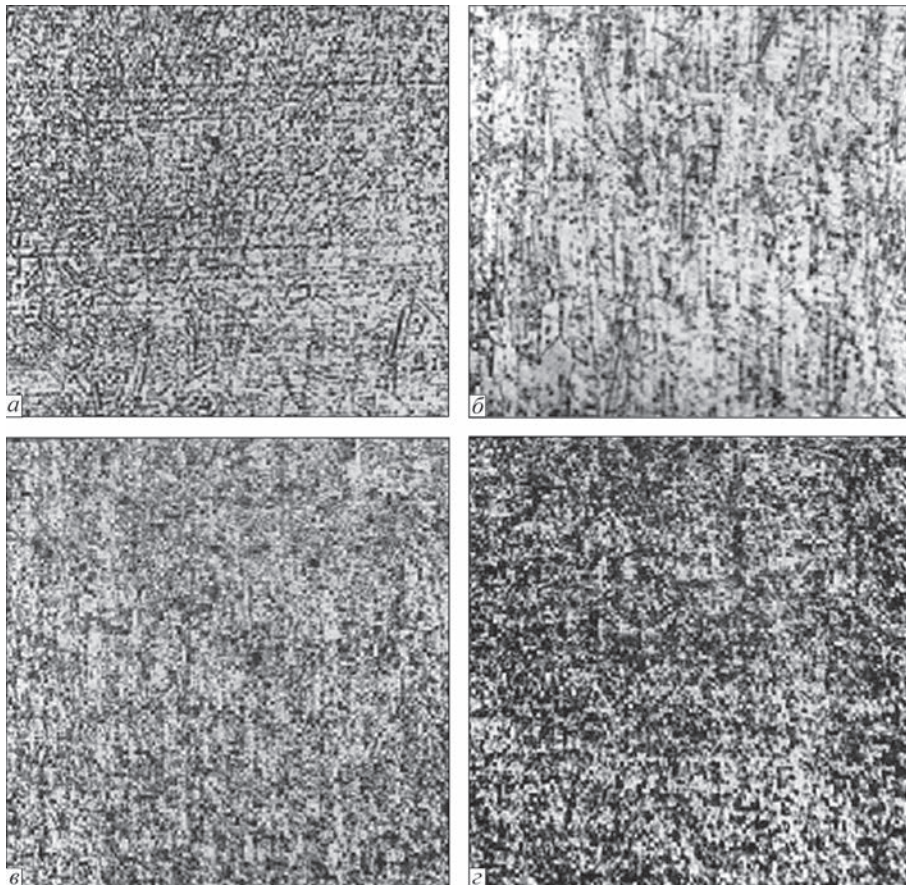


Рис. 8. Мікроструктура вакуумних конденсатів БрХ0,5–ZrO₂ з різним вмістом ZrO₂, об. %: а — 0,7; б — 1,7; в — 3,65, $\times 350$; г — 5,7, $\times 900$

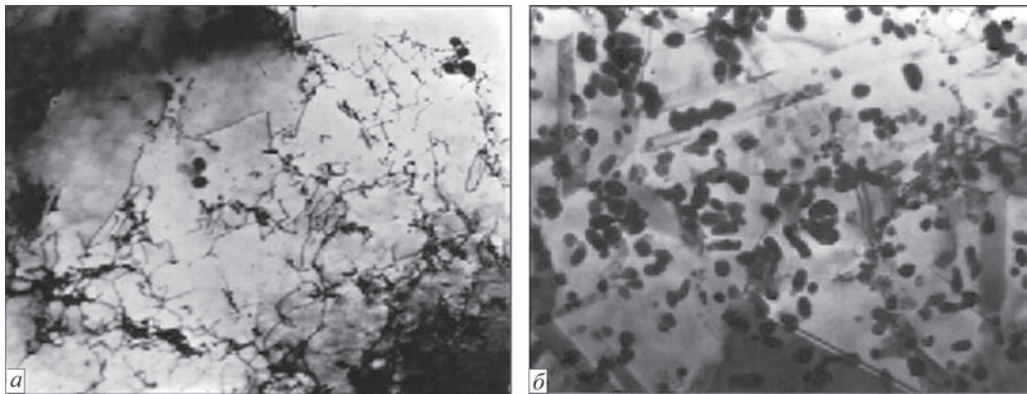


Рис. 9. Структура конденсатів BrX0,5-ZrO_2 з різним вмістом ZrO_2 , об. %: а — 0,3; б — 4,8, $\times 40000$

шені вмісту в ній оксиду від 0 до 0,5 об. % можна пояснити несприятливим розташуванням двох типів дисперсних частинок на границях зерен. Збільшення вмісту оксиду від 0,5 до 1,8...2,0 об. % спричиняє збільшення механічних властивостей конденсатів, але їх абсолютні значення не перевищують таких для конденсатів системи Cu-Cr . Подальше збільшення вмісту оксиду знижує механічні характеристики трифазних конденсатів, що обумовлено найімовірніше крихким руйнуванням зразків.

Обговорення результатів. Введення хрому або оксиду цирконію в кількості від 0 до 0,8 об. % спричиняє подрібнення структури мідної матриці, дещо більш різке у випадку хрому (рис. 12). При більш високих концентраціях другої фази картина змінюється на протилежну, що можна пояснити більшою дисперсністю частинок хрому при малих кількостях цієї фази (до 0,8 об. %) і більшою швидкістю їх коагуляції із збільшенням вмісту хрому. Більш великі частинки менше впливають на структуру. Одночасне введення в металеву матрицю зміцнюючих частинок хрому і оксиду цирконію спричиняє сумарне подрібнення структури композиту.

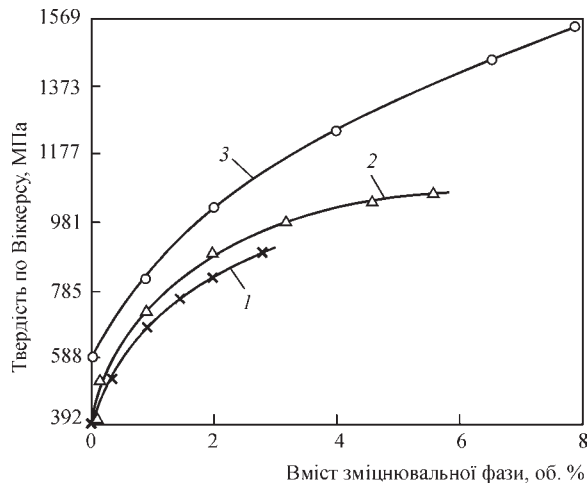


Рис. 10. Залежність твердості досліджених конденсатів міді від вмісту зміцнювальної фази Cu-Cr (1), Cu-ZrO_2 (2), BrX0,5-ZrO_2 (3)

Вимірювання твердості досліджених систем свідчать, що частинки оксиду більш активно збільшують твердість двофазної композиції, ніж частинки хрому (рис. 10). При одночасному введенні в матрицю частинок хрому і оксиду твердість матеріалу збільшується більш інтенсивно в порівнянні з двофазними композиціями, що сприяє кращій його поліруємості.

Дослідження механічних властивостей композитів на розтяг показали, що дисперсно-зміцнені конденсати системи Cu-ZrO_2 мають кращі характеристики міцності в порівнянні з дисперсійно-твердіючими конденсатами системи Cu-Cr , особливо при підвищених температурах випробування (700°C),

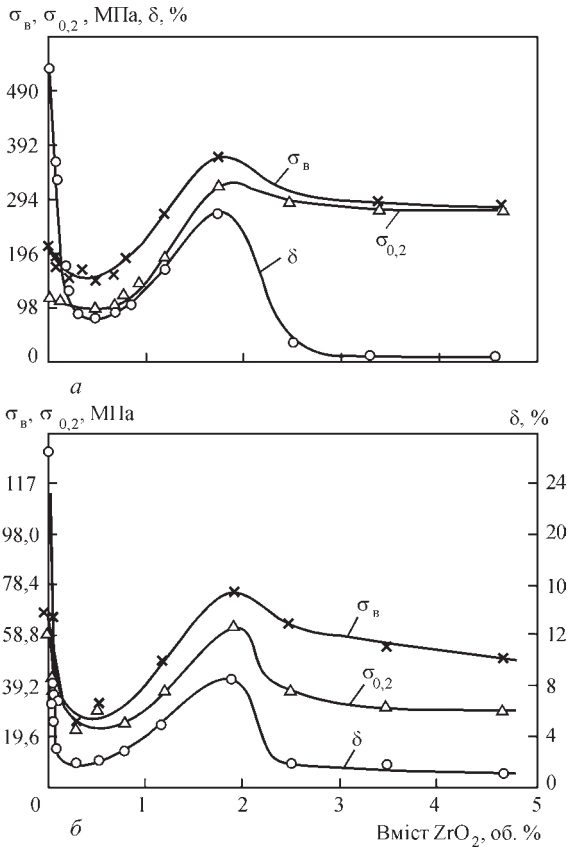


Рис. 11. Залежність механічних властивостей конденсатів BrX0,5-ZrO_2 від вмісту ZrO_2 при температурах випробувань, $^\circ\text{C}$: а — 20; б — 700

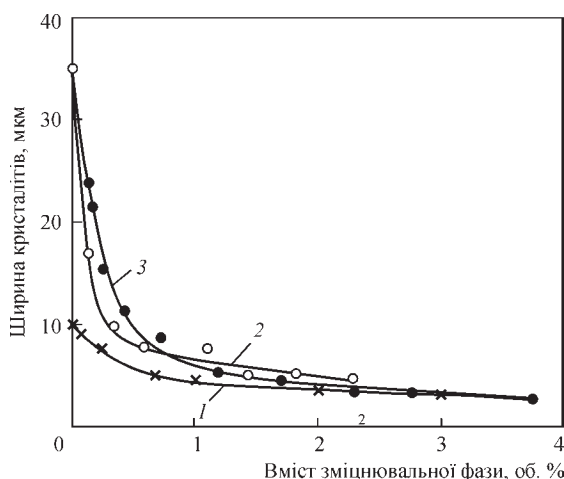


Рис. 12. Залежність ширини кристалітів досліджених конденсатів на основі міді від вмісту зміцнювальних фаз: 1 — Cu–0,5 % Cr–ZrO₂; 2 — Cu–Cr; 3 — Cu–ZrO₂

що складає $0,7T_{пл}$ матриці. Механічні випробування трифазних конденсатів мідь–хром–оксид цирконію не виявило явної переваги зміцнення металеві матриці двома типами частинок в порівнянні з двофазними конденсатами Cu–Cr і Cu–ZrO₂.

Висновки

1. Композиції Cu–Cr, Cu–ZrO₂, Cu–Cr–ZrO₂ були отримані методом електронно-променевого випаровування з наступною конденсацією парової суміші на сталеві підкладки.
2. Дисперсно-зміцнені системи Cu–ZrO₂ мають кращі міцнісні характеристики в порівнянні з дисперсійно-твердіючими Cu–Cr сплавами.
3. Комбінація двох типів одночасного зміцнення мідної матриці когерентними (Cr) і некогерентними (ZrO₂) частинками не показала переваг у порівнянні з двофазними Cu–Cr та Cu–ZrO₂ сплавами.

Список літератури/References

1. Sami Abualnoun Ajeel, Rabiha S. Yaseen, Asaad Kadhim Egal (2019) Characterization of micro-structure and mechanical properties of CuCr alloy produced by stir casting. *Diyala J. of Eng. Sci.*, 12(4), 82–91. DOI: <https://10.26367/DJES/vol.12/NO.4/9>
2. Yuan, Yuan, Zhou, Li, Zhu, Xiao et al. (2017) Microstructure evolution and properties of Cu–Cr alloy during continuous extrusion process. *J. of Alloys and Compounds*, **703**, 454–460. DOI: <https://10.1016/J. JALLCOM.2017.01.355>
3. YuSong, Xu, CuiPing, Jin, Peng, Li, YunHua, Xu. (2014) Microstructure and properties of the dispersion-strengthened Cu–ZrO₂ composite for application of spot-welding electrodes. *J. Advanced Materials Research*, **887–888**, 32–38.
4. Wilms Marcus, B., Rittinghaus Silja-Katharina (2022) Laser additive manufacturing of oxide dispersion-strengthened copper–chromium–niobium alloys. *J. Manufacturing and Materials Processing*, **6**, 102–116. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp6050102>
5. Aghamiri, S.M.S., Oono, N., Ukai, S. et al. (2018) Microstructure and mechanical properties of mechanically alloyed ODS copper alloy for fusion material application. *J. Nuclear Materials and Energy*, **15**, 17–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nme.2018.05.019>
6. Demchyshyn, A.V., Kulak, L.D., Yavor, V.A. (2021) Structure and mechanical properties of thick metallic condensates strengthened by dispersed particles of various type. *Poroshk. Metallurgiya*, **1–2**, 142–160 [in Ukrainian].
7. Smiryagin, A.P., Smiryagina, N.A., Belova, A.V. (1974) *Commercial nonferrous metals and alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
8. Aksenov, D.A., Asfandiyarov, R.N., Raab, G.I. et al. (2021) Influence of the chromium content in low-alloyed Cu–Cr alloys on the structural changes, phase transformations and properties in equal — channel angular pressing. *J. Metals*, **11**, 1795–1808. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11111795>
9. Marwa Elmahdya, Gamal Abouelmagdb, Asaad Abd Elnaeem Mazenb (2017) Microstructure and properties of Cu–ZrO₂ nanocomposites synthesized by in situ processing. *J. Materials Research*, 21(1), 11. DOI: <https://10.1590/1980-5373-mr-2017-0387>
10. Fathya, A., Elkady, O., Abu-Oqail, A. (2017) Microstructure, mechanical and wear properties of Cu–ZrO₂ nanocomposites. *J. Materials Sci. and Technology*, 33(17), 2138–2146. DOI: <https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1353668>

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF THICK COPPER CONDENSATES, DISPERSION-STRENGTHENED WITH CHROMIUM, ZIRCONIUM OXIDE AND THEIR MIXTURE

A.V. Demchyshyn, A.A. Demchyshyn, S.P. Egorov

¹Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine.

3 Omelyan Pritsak Str. 03142, Kyiv, Ukraine. E-mail: ademch@meta.ua

²National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

37 Prospect Beresteiskyi (former Peremohy), 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: ntuu.kpi@ukr.net

The structure and mechanical properties of copper condensates with a thickness of 0.8...2.0 mm, dispersion-strengthened with chromium, zirconium oxide and their mixture, obtained by simultaneous electron beam evaporation of the selected components with subsequent condensation of the vapor phase onto flat steel substrates, were investigated. It is shown that the characteristics of the structure and the level of strength of the composites depend on the volumetric content of the strengthening phase, its dispersion and total action of the dispersoids. 10 Ref., 12 Fig.

Keywords: electron beam vapour phase technology, thick vacuum condensates, copper, copper-chromium, copper-oxide, copper-chromium-zirconium oxide systems, microstructure, hardness, strength, ductility

Отримано 04.12.2023

Отримано у переглянутому вигляді 06.12.2023

Прийнято 05.03.2024

ЗАСТОСУВАННЯ ГРАФІТОВАНИХ ГНотовИХ ЕЛЕКТРОДІВ НА 50-ТОННІЙ ДУГОВІЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНІЙ ПЕЧІ ЗМІННОГО СТРУМУ ТИПУ ДСВ-50

О.Г. Богаченко¹, А.В. Черняков¹, І.О. Гончаров¹,
С.Г. Кійко², І.М. Логозинський², Б.А. Левін², А.Г. Федьков², К.М. Горбань²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: stemet@ukr.net

²ПрАТ «Дніпроспецсталь». 69008, м. Запоріжжя, Південне Шоце, 81. E-mail: info@dss.com.ua

На 50-тонній печі типу ДСВ-50 трифазного змінного струму проведені експериментальні плавки із застосуванням графітованих гнотових електродів. Виплавляли низьколеговані, високоміцні леговані і інструментальні сталі дванадцяти марок. Випробувані гноти чотирьох складів (F_{18} , F_{22} , F_{23} і F_{27}). Плавки проводили в безперервному режимі плавка на плавку. Показано, що застосування гнотових електродів забезпечило: зниження питомої витрати графітованих електродів на 16,1...31,4 %; економію активної електроенергії у середньому на 16,5 %; збільшення продуктивності печі на 18...27 %; зниження вмісту азоту в сталі у середньому на 20 %; зниження вгугару легуючих елементів (Cr, Ni, V, Mo і ін.) на 8,3...14,7 %; зниження загального вгугару шихти на 3,5...9,6 %. Показано, що в порівнянні з техніко-економічними показниками, отриманими на печі ДС-6Н1, збільшення ємності печі з 6 до 50 т не знизило ефективність застосування гнотових електродів на дугових печах змінного струму, тобто гнотові графітовані електроди можна успішно використовувати на дугових печах необмеженої ємності. Бібліогр. 19, табл. 5, рис. 3.

Ключові слова: гнотові електроди, дугові печі, електрична дуга, подовжені дуги, енергозбереження

Вступ. В останні десятиліття світова металургія характеризується постійним зростанням виробництва сталі [1]. Так, у 2012 р. загальне виробництво сталі становило 1,517 млрд т, у 2017 р. — 1,691 млрд т, у 2019 р. досягло вже 1,87 млрд т, у 2021 р. — 1,950 млрд т. При цьому близько третини його загального обсягу — електросталь. Частка вироблення електросталі постійно зростає і наразі становить у Європі близько 42 %, у США вона перевищує 60 %, у Китаї та Азії — близько 20 %. У країнах, де чорна металургія виникла порівняно недавно (Люксембург, Індонезія, Саудівська Аравія), сталь виробляють тільки в дугових електропечах змінного і постійного струму. Важливо також відзначити, що в металургійній промисловості з метою вирішення проблем екологічної безпеки перевага надається електрометалургійним технологіям [2].

Зростання виробництва електросталі відбувається одночасно з безперервним удосконаленням конструкції печей, джерел живлення, підготовки шихти, режимів плавки, позапічної обробки сталі, термообробки тощо [3]. Однією з основних цілей цих розробок є зниження витрат електроенергії і графітованих електродів в процесі плавлення [4].

Графітовані електроди є одним з основних елементів дугових печей. Вони активно впливають на всі процеси в печах. Однією з головних проблем

використання графітованих електродів є зменшення їх витрати в процесі плавлення [5]. Для вирішення цієї проблеми досить успішно використовують електроди із захисними покриттями, які знижують інтенсивність бокового окислення [6]. Іншим засобом зменшення витрати графітованих електродів є використання випарного охолодження [7].

Відомі успішні дослідницькі роботи, в яких властивості електродів покращували шляхом нанесення на їх поверхню функціональних шарів [8]. Однак у промисловості такі електроди не використовувалися через їх високу вартість.

Успішно випробувано порожнисті електроди, які забезпечили стабілізацію дуги, збільшення продуктивності печі та $\cos \phi$, економію електроенергії тощо [9]. Проте порожнина в електроді викликає різке збільшення його втрат (на 20...25 %) порівняно зі звичайними монолітними електродами. З цієї причини порожнисті електроди не знайшли широкого застосування в промисловості.

Досить велика увага приділяється вивченню властивостей дуг і можливостей їх стабілізації з метою ефективного поліпшення техніко-економічних показників експлуатації дугових печей [10].

Досить позитивні результати отримано від використання в електродугових печах постійного струму графітованих, гнотових електродів, розроблених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона [11]. Нині пер-

О.Г. Богаченко — <https://orcid.org/0000-0002-3306-6626>, І.О. Гончаров — <https://orcid.org/0000-0003-2915-0435>,

С.Г. Кійко — <https://orcid.org/0000-0002-1161-5866>

спективним видається продовження робіт із застосування графітованих гнотових електродів в електродугових печах змінного струму.

Мета роботи — визначити технічну й економічну ефективність застосування гнотових електродів на дугових сталеплавильних печах змінного струму і оцінити вплив на неї масштабного фактора (порівняння техніко-економічних показників при роботі на 6- та 50-тонних печах).

Методи дослідження. Програма робіт включала оцінку впливу масштабного фактора, роботу печі у безперервному режимі (плавка на плавку) протягом 8 діб, роботу печі на подовжених дугах, контроль параметрів електричних та технологічних режимів плавки та ін. Для цього було виготовлено 24 електроди діаметром 508 мм з гнотовими вставками складами F_{18} , F_{22} , F_{23} і F_{27}^* . Для коректного порівняння результатів плавки проводили, в основному, на штатних електричних режимах. Проводили також записи осцилограм струму і напруги плавки, частина яких виконана на довгих дугах та знижених струмах. Усього було виплавлено 1968 т вуглецевих, низьколегованих високоміцних і легованих інструментальних сталей.

Основні результати, отримані при застосуванні гнотових електродів на 6-тонній печі типу ДС-6Н1. Впродовж 2018...2021 рр. фахівці ІЕЗ ім. Є.О. Патона і ПрАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» ім. А.М. Кузьміна» вперше у світовій практиці електрометалургії провели кілька серій дослідних плавки (більше 70) із застосуванням графітованих гнотових електродів на 6-тонній трифазній дуговій сталеплавильній печі змінного струму типу ДС-6Н1. Переплавляли відходи абразивного зачищення швидкорізальних сталей і жароміцних сплавів та прокатної обрізі вуглецевих і шарикопідшипникових сталей типу ШХ15. Перші ж плавки на штатних електричних

режимах, прийнятих для стандартних (монолітних) електродів, показали, що дуга гнотового електрода в порівнянні з дугою монолітного електрода суттєво відрізняється своїми геометричними і енергетичними параметрами, а також дуже високою стабільністю (рис. 1). Гнотова дуга завжди розосереджена, просторово стійка, є дуже стабільна в широкому діапазоні довжин і електричних режимів [12–15].

Зазначені фактори обумовлюють значно менші ніж у дуги монолітного електрода показники струму й потужності, віднесені до одиниці поверхні або обсягу дуги. Це наочно видно з даних табл. 1, отриманих на 12-тонній сталеплавильній печі постійного струму при однакових напругах на дугах (220 В) і однаковому струмі (11000 А) для монолітного й гнотового електродів. Досить відзначити, що щільність струму на аноді та катоді дуги гнотового електрода в 5,3 і 16,0 разів менше, ніж у дузі монолітного електрода відповідно.

Дуга гнотового електрода завжди тримається на гноті й займає практично весь перетин електрода як результат взаємної дифузії компонентів у системі «гніт–електрод». Вона не мігрує по торцю електрода й, тим більше, не виходить на його бічну поверхню, забезпечуючи стабільне неконцентроване нагрівання розплаву [15].

Наведені дані обумовлюють принципово нові можливості дуги гнотового електрода, які в результаті забезпечують суттєве поліпшення практично всіх техніко-економічних показників роботи дугової сталеплавильної печі.

У роботах [12, 13] велика увага приділена оцінці впливу складів гнотів на витрату (вигар) електродів. Плавки проводили на штатному електричному режимі. Оцінку виконували по кількості плавки до повної витрати гнотових електродів у порівнянні з монолітними. Контроль витрати

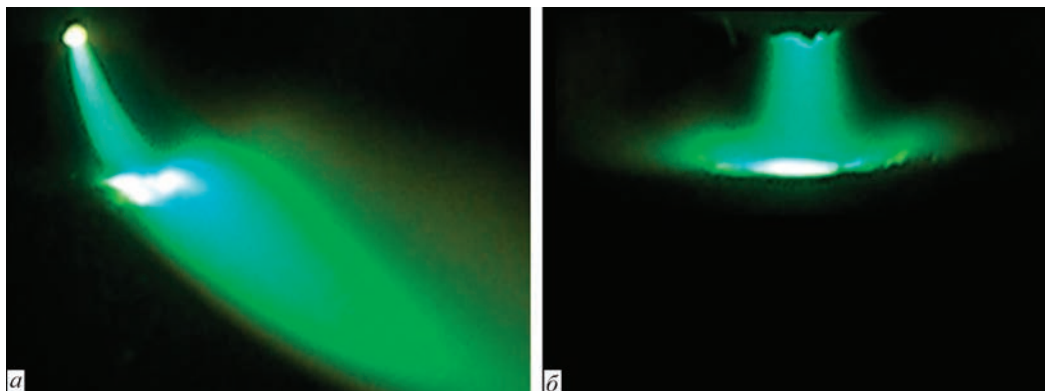


Рис. 1. Загальний вигляд дуги монолітного (а) і гнотового (б) електродів при рівних довжинах дуг ($L_d = 15$ мм): а — $U_d = 62$ В; $I_d = 720$ А; $d_k = 2,5$ мм; $d_a = 6$ мм; б — $U_d = 32$ В; $I_d = 720$ А; $d_k = 9,5$ мм; $d_a = 17$ мм; d_k — діаметр катода; d_a — діаметр анода. Анод — графіт

*У статті не приводяться склади гнотів.

Таблиця 1. Порівняння питомих показників на ділянках дуг монолітного і гнотового електродів при напрузі дуг 220 В та струмі 11000 А

Ділянка	Монолітний електрод	Співвідношення між показниками по п. 2 і 4	Гнотовий електрод
1	2	3	4
Дуга	$V_d = 1/3\pi h(r^2 + rR + R^2) = 458 \text{ см}^3$ $\sum S_1 = 235,6\text{с} + 19,6\text{к} + 75\text{а} = 333,6 \text{ см}^2$ $P_1 = 2420/458 = 5,28 \text{ кВт/см}^3$ $P_2 = 2420/333,6 = 7,25 \text{ кВт/см}^2$	4283:458 = 9,35 1404:333,6 = 4,2 5,28:0,565 = 9,35 7,25:1,724 = 4,2	$V_d = 4283 (3629 \text{ відкр.} + 654 \text{ см}^3 \text{ закр.}) \text{ см}^3$ $\sum S_1 = 675\text{с} + 314\text{к} + 415\text{а} = 1404 \text{ см}^2$ $P_1 = 2420/4283 = 0,565 \text{ кВт/см}^3$ $P_2 = 2420/1404 = 1,724 \text{ кВт/см}^2$
Катод	$S_k = 19,6 \text{ см}^2$ $P_3 = 45 \% P_d = 1089:19,6 = 55,56^* \text{ Вт/см}^{2**}$ $J_k = 11000 \text{ А}:19,6 = 561,2 \text{ А/см}^2$	314:19,6 = 16,0 55,56:1,48 = 37,5 561,2:35 = 16	$S_3 = 2\pi rh = 314 \text{ см}^2$ $P_3 = 19,2 \% P_d = 464,6:314 = 1,48 \text{ кВт/см}^{2*}$ $J_k = 11000:314 \text{ см}^2 = 35 \text{ А/см}^2$
Анод	$S_a = 78,5 \text{ см}^2$ $P_4 = 26 \% P_d/78,5 = 8 \text{ кВт/см}^2$ $J_a = 11000/78,5 = 140 \text{ А/см}^2$	415:78,5 = 5,3 8:1,75 = 4,6 140:26,5 = 5,3	$S_a = 415 \text{ см}^2$ $P_4 = 30 \% P_d/415 = 1,75 \text{ кВт/см}^2$ $J_a = 11000/415 = 26,5 \text{ А/см}^2$
Стовп дуги	$S_2 = 235,5 \text{ см}^2$ $P_c = (100 \% - 45 \% - 26 \%) P_d = 701,8 \text{ кВт}$ $P_5 = 29 \% P_d: 458 \text{ см}^3 = 1,53 \text{ кВт/см}^3$ $P_6 = 29 \% P_d: 235,5 = 2,98 \text{ кВт/см}^2$ $b_m = 701,8:100 = 7,02 \text{ кВт/мм}$	675:235,5 = 2,87 1229,36:701,8 = 1,75 1,53:0,34 = 4,5 2,98:1,8 = 1,66 $b_m \approx b_r$	$S_4 = 675 \text{ см}^2$ $P_c = (100 - 19,2 - 30) P_d = 1229,36 \text{ кВт}$ $P_7 = 50,8 \% P_d: 3629 \text{ см}^3 = 0,34 \text{ кВт/см}^3$ $P_8 = 50,8 \% P_d: 675 = 1,8 \text{ кВт/см}^2$ $b_r = 1229,36:150 = 8,16 \text{ кВт/мм}$

Примітки. *Прийняті усереднені дані.
**Використані лабораторні дані замірів напруги на ділянках дуг монолітного і гнотового електродів при $U_{\text{дм}} = U_{\text{др}}$.
 V_d — об’єм дуги, см^3 ; $\sum S_1$ — сумарна площа поверхні дуги, см^2 ; P_1 — питома потужність дуги, віднесена до обсягу дуги, кВт/см^3 ; P_2 — питома потужність дуги, віднесена до площі поверхні дуги, кВт/см^2 ; S_k та S_a — площі катода і анода відповідно, см^2 ; P_3 — питома потужність катода, Вт/см^2 ; P_4 — питома потужність анода, Вт/см^2 ; J_k — поверхнева щільність струму катоду, А/см^2 ; J_a — поверхнева щільність струму анода, А/см^2 ; S_2 — площа бічної поверхні стовпа дуги, см^2 ; P_c — потужність стовпа дуги, кВт ; P_5 — питома потужність стовпа дуги, віднесена до обсягу дуги, кВт/см^3 ; P_6 — питома потужність стовпа дуги, віднесена до площі поверхні дуги, кВт/см^2 ; b — градієнт напруги, В/мм ; S_3 — площа півсфери катода, см^2 ; S_4 — площа бічної відкритої поверхні стовпа дуги, см^2 ; P_7 — питома потужність стовпа відкритої дуги, віднесена до обсягу дуги, Вт/см^3 ; P_8 — питома потужність стовпа відкритої дуги, віднесена до площі поверхні дуги, кВт/см^2 .

проводили шляхом зважування електродної свічі й виміру довжини працюючого електрода після кожної плавки. Найбільшу кількість плавок забезпечив електрод із гнотом складу F_{16} (26 плавок), далі F_{20} (21 плавка), F_{21} (22 плавки) і F_{18} (22 плавки). Найменший показник мав електрод складу F_{19}

(18 плавок). У той же час енергетичні показники (час виходу електродів на стабільне горіння дуг, $\cos \phi$, коефіцієнти гармонік струму) були краще на гнотах F_{18} , F_{19} , F_{20} у порівнянні з F_{16} [13]. При цьому монолітні електроди забезпечили тільки 14 і 15,5 плавок. Таким чином, стійкість гнотових електродів (зниження вигару) зросла від 14 до 46 %. Як видно, цей показник дуже залежить від складу гнотів. Гнотові електроди забезпечили також економію активної електроенергії на 6...16 %, збільшення продуктивності печі на 12...23 %.

У загальному випадку важливою перевагою дуги гнотового електрода в порівнянні з дугою монолітного є те, що при рівних напругах на дугах або рівних довжинах дуг спадання напруги в прикатодній області гнотового електрода в 2...3 рази менше, ніж у монолітного [13, 14]. Завдяки цьому створюються сприятливі термодинамічні умови для іонізації газів у стовпі дуги гнотового електрода, активно працюють елементи з низькою роботою виходу електронів, знижуються втрати тепла в дузі і температура дуги. Довжина дуги гнотового електрода за інших рівних умов приблизно в 1,5 рази перевищує довжину дуги монолітного елек-



Рис. 2. Фрагмент роботи печі ДСВ-50 з гнотовими електродами діаметром 508 мм

трода. Характерною рисою гнотового електрода є також постійна наявність на його торці півсфери, крайки якої можуть накривати значну частину дуги. Цей фактор піддається регулюванню технологія-металурга залежно від необхідності знизити радіаційне опромінення футеровки стін або знизити вигар електрода [15].

Наведені дані по печі ДС-6Н1 слугували підставою для проведення дослідницьких робіт із застосування гнотових електродів на 50-тонній дуговій печі типу ДСВ-50 (рис. 2).

Обговорення результатів, отриманих на печі ДСВ-50. Енергетика. Встановлено, що час від включення печі до стійкого горіння дуг на гнотових електродах був в межах 10 с. Коефіцієнти гармонік струму зменшилися у середньому від 10,1 у період стабілізації дуг до 2,36 наприкінці плавки (на рідкому металі), $\cos \phi$ збільшився з 0,85...0,86 на початку плавки до 0,9...0,92 на рідкому металі. Усі показники відрізнялися високою стабільністю й дуже залежали від складу гнота та від якості шихти. На одній з дослідних плавок була випробувана робота печі на довгих дугах в режимі розвантаження. Для цього була збільшена напруга

дуги з 225...230 до 240...245 В й знижений струм з 30,5...30 і 31 (по фазах) до 24,5...24 і 23 кА, а через 25 хв до 22...21 і 20 кА. Візуально довжина дуги на розвантаженні збільшилася на 30...40 мм і склала 150...160 мм. Електричні і часові параметри цієї плавки наведені в табл. 2. Режим розвантаження проведений на етапі розплавлення шихти (1 год 18 хв) і частково на рідкому металі (14 хв). Як видно з табл. 2, загальний час роботи печі на подовжених дугах склав 1 год 32 хв або 26,3 % від загального часу плавки (5 год 50 хв). Потужність на режимі розвантаження знизилася орієнтовно на 20 %. Однак плавка відрізнялася високою стабільністю й продуктивністю печі не знизилася. На цьому режимі зменшилася питома витрата електроенергії в порівнянні з монолітними електродами в серійному режимі на 15,3...16,7 %.

Результати дослідних плавок, проведених на гнотових електродах на печі ДСВ-50 й ДС-6Н1 [12] в режимі подовжених дуг, дозволяють зробити наступні висновки й рекомендації:

на дугових печах старої конструкції, де співвідношення одиниці потужності пічного трансформатора і одиниці садки печі становить орієнтовно

Таблиця 2. Показники плавки на гнотових електродах складу F_{18} , проведеної в змішаному режимі (серійному і в режимі розвантаження)

Параметри і періоди плавки	Початок плавки, III ступінь, 371 В (режим серійний)			Розплавлення шихти, колодязі, II ступінь 388 В (режим серійний)		
	1	2	3	1	2	3
Фаза	1	2	3	1	2	3
cos φ	0,88	0,85	0,89	0,92	0,91	0,9
K, %	12,6	14,2	6,3	2,8	4,5	1,2
I, кА	30,0	30,5	31,0	30,5	30,0	31,0
Час розжигу, с	6,0	10,1	8,2	—	—	—
Час плавки, с, хв, год	10 с			38 хв		
	Від включення печі до стабілізації дуг					

Закінчення табл. 2

Параметри і періоди плавки	Розплавлення, II ступінь, колодязі, 388 В (режим розвантаження)			Рідкий метал, II ступінь, 388 В (режим розвантаження)			Рідкий метал, III ступінь, 371 В (режим серійний)		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Фаза	1	2	3	1	2	3	1	2	3
cos φ	0,95	0,94	0,94	0,98	0,99	0,97	0,93	0,94	0,9
K, %	0,9	3,4	1,1	0,3	0,2	0,3	1,8	0,9	4,0
I, кА	21,0	22,0	20,0	22,0	21,0	21,0	30,5	30,5	31,5
Час розжигу, с	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Час плавки, с, хв, год	1 год 18 хв			14 хв			3 год 40 хв		
	Подовжені дуги						—		

Таблиця 3. Плавки на гнотових та монолітних електродах марки ЕГ («Укрграфіт») на серійних режимах

Номер п/п	Номер плавки	Марка сталі	Питома витрата електроенергії, кВт·г/т	Час плавки, год:хв, маса плавки, кг	Продуктивність, кг/год
Плавки на гнотових електродах					
1	В 49834	30ХГСА	646	6:50, 59280	8679,5
2	В 49835	30ХГСА	667	5:55, 59940	10131,8
3	В 49838	30ХГСА	648	5:00, 60260	12052
4	В 49847	30ХГСА	663	5:35, 57310	10265
5	В 50010	30ХГСА	677	5:10, 59680	11565,9
6	В 49850	35ХГСА	681	5:55, 60240	10182,6
			середнє 663,7	—	середнє 10479,5
Плавки на монолітних електродах (вихідних для гнотових)					
7	В 49764	35ХГСА	799	7:45, 56550	7296,8
8	В 48584	30ХГСА	775	6:45, 60320	8936
9	В 48680	30ХГСА	759	9:50, 60320	6136,3
			середнє 777,7	—	середнє 7456
			ефект на гнотових електродах — 14,7 %	—	ефект на гнотових електродах — 27,1 %

0,5 на гнотових електродах, слід використовувати максимально більшу напругу дуг і струм порядку 80...85 % від штатного, застосовуваного в цей час; замінити діючий трансформатор потужністю 25 МВт на новий потужністю 50 МВт і перевести піч в режим надвисокої потужності із застосуванням гнотових електродів діаметром 508 мм.

Обидві рекомендації безумовно вимагають істотних змін у підготовці шихтових матеріалів: подрібнювання, очищення і компактування легковагового лому, застосування великовагової, компактної обрізі й т.п. Вважаємо за доцільне рекомендувати розроблювачам і конструкторам нових дугових печей змінного й постійного струму передбачити можливість використання гнотових електродів, діаметр яких на 10...15 % менший, ніж відповідних монолітних (стандартних) електродів, які застосовуються у цей час.

Порівняння питомої витрати електроенергії й продуктивності печі проводили на серійних режимах при виплавці сталі 30ХГСА. Результати цих досліджень наведено в табл. 3. Із таблиці випливає, що: гнотові електроди забезпечили зниження питомої витрати електроенергії й збільшення продуктивності печі в порівнянні з аналогічними показниками плавок на монолітних електродах-свідках, що використовуються для виготовлення гнотових електродів, на 14,7 і 27,1 % відповідно.

Перехід на подовжені дуги (режим розвантаження) збільшив економію електроенергії до 15,3...16,7 %.

Витрата електродів. Відомо, що вартість графітованих електродів може становити 10...18 %, а в деяких випадках до 30 % від вартості сталі. Виробники електродів разом з електрометалургами постійно працюють над поліпшенням якості електродів — зниженням їх питомого електроопору й забезпеченням рівномірного розподілу цього параметра в обсязі електрода, підвищенням їх щільності, структурної однорідності, механічних характеристик і т.п. Вже освоєне промислове виробництво електродів діаметром 810 мм і довжиною до 3500 мм та електроопором на рівні 5 мк·Ом·м і нижче (електроди марок ЕГСП (УНР)).

У цій роботі на печі ДСВ-50 використовували електроди марки ЕГ (РР за міжнародним стандартом) діаметром 508 мм. Як відзначалося, усього було виготовлено 4 партії електродів (по 6 шт. кожна) із гнотами чотирьох складів F_{18} , F_{22} , F_{23} і F_{27} . Це дозволило використовувати гнотові електроди в режимі «плавка на плавку» впродовж 8 діб. Характерною рисою електродів ЕГ є їхня висока структурна неоднорідність. Ця особливість закладається ще на стадії виробництва графітованих електродів. У процесі роботи структурна неоднорідність електродів обумовлює утворення тріщин, насамперед, у ніпельному з'єднанні поблизу дуги, де через значний перегрів електрода у зов-

нішніх шарах тіла електрода й ніпеля виникають значні напруги. Ця ж неоднорідність є причиною утворення тріщин (вертикальних, під кутом і навіть по поперековому перетину) у тілі електрода. Ці тріщини часто ведуть до відколів частин електрода, маса яких може становити кілька сотень кілограмів, при тому, що маса електрода діаметром 508 мм дорівнює 700 кг. Утворення тріщин і відколів обумовлює більшу нестабільність у роботі електродів і впливає на облік їх витрат. Так, якщо між зважуваннями свічі відколів не було, то гнотові електроди забезпечили питому витрату 6,09 кг/т сталі, що становило в порівнянні з монолітними електродами-свідками (9,41 кг/т) підвищення стійкості на 35,3 %. При відколі масою 300 кг цей показник зменшився до 0,7 %. Усереднені показники по витратах електродів цієї компанії плавок показали, що середня витрата монолітних електродів-свідків склала 8,64 кг/т, а гнотових електродів — 7,17 кг/т.

Таким чином, гнотові електроди забезпечили збільшення стійкості у середньому на 16,78 %.

Металургія. У табл. 1 показано, що дуга гнотового електрода має в порівнянні з дугою монолітного електрода дуже низькі питомі показники струму й потужності. Це особливо чітко видно на катодному й анодному ділянках дуг. Логічно припустити, що й температура гнотової дуги повинна бути суттєво нижчою. Абсолютні значення температури гнотових дуг не є темою даної статті, тут ми розглядаємо лише деякі відомі з літературних джерел дані для попередньої оцінки температури гнотової дуги як явища, що суттєво розширює технологічні можливості дугових печей. У роботі [16] показано, що температура в осьовій зоні потужно-

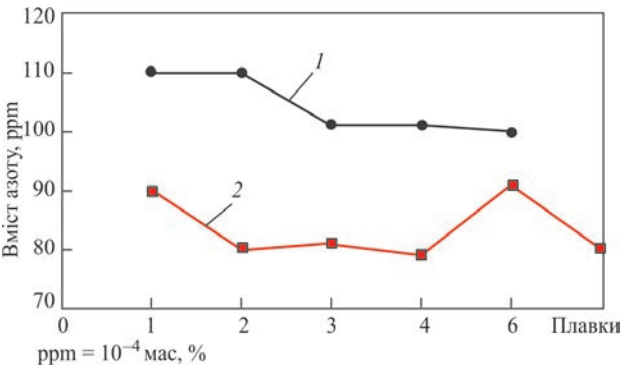


Рис. 3. Вміст азоту в сталі 30ХГСА при виплавленні: на монолітних електродах поточного виробництва (1) і гнотових електродах (2)

струмової дуги (порядку 25000 А) монолітного електрода на печі-ковші змінного струму може досягати 15000...18000 К. При цьому температура в прианодній ділянці досягає 9500 К, а прогин меніска металевий ванни досягає значної величини й може бути рівним орієнтовно половині довжини дуги. Такі дуже жорсткі умови на аноді (металі) обумовлює високий перегрів металу й шлаків. Звідси значний вигар легуючих елементів і шихти вцілому та насичення рідкого металу газами.

У роботі [17] говориться, що температура електричної дуги з порошковим оксидним катодом (дуга, що близька по своїй фізичній суті до гнотової дуги) по осі стовпа стабільно тримається на рівні 12000...13000 К. З наведених даних можна зробити досить обґрунтований висновок, що температура дуги з оксидним порошковим катодом на 15...25 % нижче, ніж у дуги монолітного графітованого електрода. І цю властивість можна використовувати з достатньою впевненістю для гнотового електрода.

Таблиця 4. Баланс легуючих елементів на дослідних плавках низьколегованих конструкційних і інструментальних сталей

Номер плавки, марка сталі	Вага плавки, т	Одиниці вимірювань	Витрата легуючих елементів			
			Cr	Ni	Mo	V
B49830, 20XH3A	59,420	кг	—	–278	—	—
		кг/т	—	–4,7	—	—
		% від загальної кількості елемента на плавку	—	18,7	—	—
50009, 45X9C3	62,680	кг	–717	—	—	—
		кг/т	–11,4	—	—	—
		% від загальної кількості елемента на плавку	14,07	—	—	—
B49848, 4X5MФ1C	62,590	кг	–525	—	—	–56
		кг/т	–8,4	—	—	–0,9
		% від загальної кількості елемента на плавку	19,06	—	—	9,62
B49849, 40XH2M	60,110	кг	–56	–102	–14	—
		кг/т	–0,9	–1,7	–0,2	—
		% від загальної кількості елемента на плавку	11,09	9,02	8,33	—
Загалом на 4-х плавках	244,800	кг	–1298	–380	–14	–56
		середній % від загальної кількості елемента на плавку	14,74	13,86	8,33	9,62

Примітка. Знак «мінус» означає економію елемента в порівнянні із плановою витратою.

Таблиця 5. Загальний вигар шихти по плавках інструментальних і конструкційної сталей

Марка сталі	Одиниці вимірювання	Вигар, кг		
		фактичний	плановий	відхилення
45Х9С3	кг	5608	5641	−33
	кг/т	89,5	90,0	−0,53
4Х5МФ1С	кг	4469	4945	−476
	кг/т	71,4	79,0	−7,6 (9,6 %)
40ХГН2М	кг	4776	4809	−33
	кг/т	79,5	80,0	−0,5
Разом по 3-х плавках	кг	14853	15395	−542
	кг/т	80,13	83,0	−2,87 (3,5 %)

Примітка. Знак «мінус» означає економію зниження вигару елемента в порівнянні із плановою витратою.

Низька температура гнотової дуги позитивно позначилася на трьох технологічних факторах, досліджених у цій роботі — зниженні вмісту азоту в сталі, вигару легуючих елементів і шихти. Добре відомо, що чим вище температура металу, тим вище розчинність азоту в рідкій сталі [18]. Порівняння вмісту азоту в металі при застосуванні монолітних (поточне виробництво) і гнотових електродів проводилося на сталі 30ХГСА (рис. 3).

Видно, що середній вміст азоту при виплавленні сталі на монолітних електродах склав 104 ppm, а на гнотових — 83 ppm. Таким чином, гнотові електроди забезпечили вміст азоту в сталі 30ХГСА при виплавці на печі ДСВ-50 на 20 % менше. Ця обставина відкриває певну можливість виробництва на дугових печах із гнотовими електродами цілого ряду рейкових сталей, у яких регламентований вміст азоту на рівні 90 і 100 ppm (Європейський стандарт EN 13674-1:2003+A1:2007) [19].

Оцінка впливу гнотових електродів на економію легуючих на печі ДСВ-50 проводилася при виплавці низьколегованих конструкційних і інструментальних сталей (табл. 4). З таблиці випливає, що гнотові електроди забезпечили економію легуючих (залежно від марки сталі) від 8,33 до 14,74 %.

Оцінка впливу гнотових електродів на загальний вигар шихти проводилася на інструментальних і конструкційних сталях 45Х9С3, 4Х5МФ1С і 40ХГН2М (табл. 5).

З наведених даних випливає, що при виплавці зазначених сталей із застосуванням гнотових електродів має місце зниження вигару шихти на 3,5...9,6 %.

Економіка. Розрахунки економічного ефекту, проведені за результатами цієї роботи, виконані з

урахуванням цін на матеріали, енергоносії і їх питомі витрати станом на липень 2022 р. Розрахунки показали, що загальна економія при виплавці вказаних сталей на печі ДСВ-50 із застосуванням гнотових електродів складає 400...500 грн/т сталі. При цьому витрати матеріалів і оплата праці по виготовленню гнотових електродів становить 1,5...2,0 % від загального економічного ефекту.

Висновки

1. На печі ДСВ-50 проведена серія експериментальних плавок із застосуванням графітованих гнотових електродів чотирьох складів (F_{18} , F_{22} , F_{23} і F_{27}). Плавки проводили безупинно у режимі плавка на плавку.

2. Ця робота дозволяє зробити дуже важливий висновок, що масштабний фактор (перехід з 6-тонної печі трифазного змінного струму типу ДС6-Н1 на 50-тонну піч типу ДСВ-50) не знижує технічну й економічну ефективність застосування гнотових електродів на дугових сталеплавильних печах. Це дає підставу стверджувати, що застосування гнотових графітованих електродів не обмежується ємністю діючих дугових сталеплавильних печей змінного струму аж до 210 т.

3. Гнотові електроди забезпечили наступні показники: зниження питомої витрати графітованих електродів на 16,1...31,4 %; економію активної електроенергії у середньому на 16,5 %; збільшення продуктивності печі на 18...27 %; зниження вмісту азоту в сталі у середньому на 20 %; зниження вигару легуючих елементів (Cr, Ni, V, Mo) на 8,0...14,5 %; зниження загального вигару шихти на 3,5...9,6 %.

4. Ефективність застосування гнотових графітованих електродів підвищується при роботі на довгих дугах. Питома витрата електроенергії знизилася на 15,3...16,7 % у порівнянні з роботою гнотових електродів на коротких дугах (штатний режим).

Список літератури/References

1. Yanrui, Wu (2000) The Chinese steel industry: Recent developments and prospects. *Resources Policy*, 26(3), 171–178. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-4207\(00\)00026-X](https://doi.org/10.1016/S0301-4207(00)00026-X)

2. Guan, X. (2018) Toward resources and processes sustainability. Pt I. *JOM*, 70, 113–114. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2702-2>

3. Billings, S.A., Boland, F.M., Nicholson, H. (1979) Electric arc furnace modelling and control. *Automatica*, 15(2), 137–148. DOI: [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(79\)90065-7](https://doi.org/10.1016/0005-1098(79)90065-7)

4. Guo, Z.C., Fu, Z.X. (2010) Current situation of energy consumption and measures taken for energy saving in the iron and steel industry in China. *Energy*, 35(11), 4356–4360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.008>

5. Baumert, J.-C., Thibaut, J.-C., Weiler, C. et al. (2006) Continuous monitoring of graphite electrode wear at the electric arc

- furnace. *Rev. Met. Paris*, 103(6), 266–274. DOI: <https://doi.org/10.1051/metal:2006104>
6. Daneshmand, S., Vini, M.H. (2023) Investigation of TiO_2/SiC coating on graphite electrodes for electrical arc furnaces. *J. Mater. Eng. and Performance*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08230-8>
 7. Yachikov, I.M., Portnova, I.V., Bystrov, M.V. (2019) Efficiency of application of evaporative cooling of graphite electrodes to reduce their consumption in arc furnaces. *Mat. Sci. Forum*, **946**, 444–449. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.946.444>
 8. Rafiei, R., Kermanpur, A., Ashrafzadeh, F. (2008) Numerical thermal simulation of graphite electrode in EAF during normal operation. *Ironmaking & Steelmaking*, 35(6), 465–472. DOI: <https://doi.org/10.1179/174328108X318392>
 9. Jones, R.T., Reynolds, Q.G., Curr, T.R., Sager, D. (2011) Some myths about DC arc furnaces. *J. of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 111(10), 665–674. http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532011001000004&lng=en&tlng=en
 10. Pauna, H., Willms, T., Aula, M. et al. (2020) Electric arc length-voltage and conductivity characteristics in a pilot-scale ac electric arc furnace. *Metall. Mater. Transact. B*, **51**, 1646–1655. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-020-01859-z>
 11. Bogachenko, A.G., Mishchenko, D.D., Goncharov, I.O. et al. (2023) Efficiency of using cored graphitized electrodes on electric arc furnaces of direct current. *Advances in Materials Sci.*, 23(1), 82–97. DOI: <https://doi.org/10.2478/adms-2023-0006>
 12. Paton, B.E., Bogachenko, O.G., Kyiko, S.G. et al. (2021) Experience of application of graphitized wick electrodes in industrial steel-making AC furnace. *Suchasna Elektrometall.*, **1**, 48–53 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2021.01.06>
 13. Bogachenko, A.G., Sidorenko, L.A., Goncharov, I.O. et al. (2023) Technical-economic indices of operation of AC steel-making furnace with application of cored electrodes. *The Paton Welding J.*, **4**, 54–59. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.04.07>
 14. Bogachenko, O.G., Mishchenko, D.D., Honcharov, I.O. et al. (2023) Application of graphitized wick electrodes in DC arc steel furnaces. *Suchasna Elektrometall.*, **1**, 53–61 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2023.01.07>
 15. Paton, B.E., Lakomsky, V.I., Galinich, V.I. et al. (2011) Cored electrodes of electric arc furnaces. *Chyornye Metally*, **5**, 13–15 [in Russian].
 16. Krikent, N.V., Krivtsun, I.V., Demchenko, V.F. et al. (2018) *Numerical modeling of high-current arc discharge in DC ladle-furnace installation*. In: Physical processes in welding and processing of materials: Coll. of Articles and Papers. Kyiv, 135–140 [in Russian].
 17. Lakomsky, V.I. (1997) *Oxide cathodes of electric arc*. PWI, Zaporozhie, Research Center of Plasma Technologies, Society Intern [in Russian].
 18. Lakomsky, V.I., Lakomsky, V.V. (2012) *Nitrogen in liquid steels and slags*. Ed. by B.E. Paton. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
 19. Medovar, L.B., Stovpchenko, G.P., Polishko, G.O. et al. (2018) Modern rail steels and solutions ESR (Review). Information 1: Operating conditions and defects observed. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 3–8 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/sem2018.01.01>

APPLICATION OF GRAPHITIZED CORED ELECTRODES IN 50 TON STEEL MELTING AC ARC FURNACE OF DSV-50 TYPE

O.G. Bogachenko¹, A.V. Chernyakov¹, I.O. Goncharov¹,
S.G. Kiiiko², I.M. Logozynskyi², B.A. Levin², A.G. Fedkov², K.M. Gorban²
¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: stemet@ukr.net

²PJSC «Dniprosprotsstal». 81 Pivdenne Highway Str., 69000, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: info@dss.com.ua

Experimental melts were conducted in 50 ton three-phase AC furnace of DSV-50 type, using graphitized cored electrodes. Low-alloy, high-strength alloy and tool steels of twelve grades were produced. Cores of four compositions were tested (F_{18} , F_{22} , F_{23} and F_{27}). Melts were conducted in a continuous «melt on melt» mode. It is shown that application of cored electrodes ensured: lowering of specific consumption of graphitized electrodes by 16.1...31.4 %; active power savings by 16.5 %, on average; increase of furnace productivity by 18...27 %; lowering of nitrogen content in steel by 20 %, on average; lowering of alloying element loss (Cr, Ni, V, Mo, etc.) by 8.3...14.7 %; lowering of total loss of charge by 3.5...9.6 %. It is shown that compared to technical-economic characteristics, obtained for DS-6N1 furnace, increase of furnace capacity from 6 to 50 tons did not lower the effectiveness of cored electrode application in AC arc furnaces, i.e. cored graphitized electrodes can be successfully used in arc furnaces of unlimited capacity. 19 Ref., 5 Tabl., 3 Fig.

Keywords: cored electrodes, arc furnaces, electric arc, elongated arcs, power saving

Отримано 11.07.2023

Отримано у переглянутому вигляді 10.10.2023

Прийнято 05.02.2024



ЗАСТОСУВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО ВПЛИВУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СТАЛЕВИХ ЗЛИВКІВ. ОГЛЯД

В.В. Барабаш, Ф.К. Біктагіров

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: barabash.vv@ukr.net

Проведено аналіз застосування зовнішнього впливу, такого як модифікування металу, накладання вібрації, перемішування металевої ванни і підігрів металу в надливі при отриманні сталевих зливок. Показано позитивний ефект зовнішнього впливу на умови кристалізації та твердіння різних зливок. Зроблено висновок, що дієвим способом впливу на умови формування сталевих зливок може бути поєднання обігріву надлива і перемішування шляхом введення в рідку серцевину зливка пристрою, що приводить в рух рідкий метал. Бібліогр. 40, рис. 6.

Ключові слова: сталевий зливок, якість, зовнішній вплив, модифікація, вібрація, перемішування, підведення тепла, метал, надлив

Вступ. Однією з основних цілей у металургійному виробництві є підвищення якості металопродукції. Повною мірою це стосується і отримання сталевих зливок, з яких виготовляють великогабаритні відповідальні, інколи унікальні, вироби для багатьох провідних галузей промисловості. Численні дослідження процесу переходу металу різного складу з рідкого стану в твердий та особливостей формування сталевих зливок дозволили розробити технологічні прийоми, спрямовані на запобігання утворенню при їх отриманні грубих поверхневих і внутрішніх дефектів. Насамперед це видалення з рідкого металу небажаних шкідливих домішок, оптимізація технології розливання й геометричних параметрів виливниці залежно від маси і призначення зливок, покращення роботи надливкової надставки.

Однак ці заходи та низка інших, які зараз застосовуються в сталеплавильних цехах, не дозволяють кардинально втрутитися в умови кристалізації рідкої серцевини зливка. Це особливо важливо під час виробництва великих зливок, оскільки зі збільшенням маси рідкого металу погіршуються умови його твердіння, що призводить до посилення розвитку дефектів структурного, усадкового та ліквацийного походження. Тому для подальшого підвищення якості сталевих зливок виникає необхідність використання методів, які дозволяють впливати на умови кристалізації металу та формування їх будови.

Аналіз методів зовнішнього впливу. Добре відомо, що переplавні процеси, у тому числі спосіб електрошлакового переplаву, що набув широкого розповсюдження в промисловості, дозволяють отримувати литі заготовки з однорідною щільною структурою. Це досягається за рахунок специфічних умов плавки, рафінування та затвердіння металу у водоохолоджуваних кристалізаторах. В цьому огляді

ми не торкаємося цих переplавних процесів, а розглядаємо можливості впливу на затвердіння металу при основному методі одержання сталевих зливок розливу рідкого металу у виливниці.

Роботи щодо поліпшення умов затвердіння металу у виливницях проводилися раніше та продовжуються і сьогодні. Чималий внесок у вивчення різних прийомів впливу на структуроутворення сталевих зливок, які найчастіше поєднують під терміном зовнішній вплив, зробили українські вчені і фахівці, дослідження яких розкривають багато аспектів теорії та практики розглянутої проблеми.

До методів зовнішнього впливу можна віднести: додавання модифікаторів; вібраційну обробку; перемішування металу; підведення тепла і металу в надлив.

Додавання модифікаторів. Модифікатори — це речовини, що додаються в метал з метою зміни структури і властивостей металу. Вплив модифікаторів на структуроутворення має складний характер, пов'язаний з фізико-хімічними процесами, що відбуваються при зародженні та зростанні нової фази з утворенням поверхні поділу рідке–тверде. Найчастіше за механізмом дії виділяють два основні типи модифікаторів: інокулятори — речовини, що самі або через утворення нерозчинних частинок виступають новими центрами кристалізації та сприяють гетерогенному зародкоутворенню; інгібітори — речовини, що тонким шаром осаджуються на поверхні зародків, уповільнюючи їх лінійну швидкість росту і даючи можливість утворитися більшій кількості зародків.

Найчастіше в якості інокуляторів використовують титан, ванадій, ніобій, які можуть утворювати тугоплавкі карбіди TiC, VC, NbC, а в якості інгібіторів використовують бор [1, 2]. Інокуляторами можуть бути не тільки дрібнодисперсні ре-

В.В. Барабаш — <https://orcid.org/0000-0001-8138-3565>, Ф.К. Біктагіров — <https://orcid.org/0000-0001-7843-4261>

човини, наприклад нітриди і карбіди тугоплавких металів, а й порошки чи дріб з металу того ж чи близького по хімічному складу, що й одержувана лита заготовка, які змінюють литу структуру за рахунок зменшення перегріву металевого розплаву, що кристалізується. Їх зазвичай виділяють як інокулятори-холодильники. Також застосовуються комплексні модифікатори, що поєднують рафінувально-зміцнювальну дію на метал, наприклад Ti–B–Ca, Mg–Zr–Ce, Ti–V–Ca.

При отриманні сталевих зливків модифікатори зазвичай подають у вигляді брикетів або насипом з бункера в процесі розливання або одразу після наповнення форми рідким металом. Надалі введення модифікаторів ускладнюється і необхідне застосування спеціальних пристроїв, що забезпечують їхнє потрапляння в рідку серцевину зливка.

Одним з таких пристроїв для введення реагентів може бути імпульсно-динамічний пристрій (ІДП), випробуваний для рафінування та модифікування металу в ковші (рис. 1).

Конструкція пристрою представляє собою закріплений на металевій трубі контейнер-катридж, заповнений матеріалами, необхідними для обробки сталі. При контакті з рідким металом відбувається імпульсне порційне виштовхування модифікувальних присадок, при якому контейнер-катридж обертається та розчиняється [3].

Виконані дослідження показують, що модифікування є ефективним способом впливу на процес кристалізації, що дозволяє збільшити швидкість затвердіння зливків, покращити їх якість, зменшивши фізичну і хімічну неоднорідності [4–6]. Встановлено, що при модифікуванні сталі у виливниці майже не відбувається виведення шкідливих домішок, але їх розташування стає більш рівномірним і це позитивно впливає на технологічну пластичність та механічні властивості. Так, автори робіт [7, 8] відзначають, що модифікування сталі призводить до глобуляризації неметалевих включень, а це сприяє зниженню крихкості і збільшенню холодостійкості металу. Причому найбільше подрібнення та однорідний розподіл включень було досягнуто у випадку застосування модифікаторів з найбільш дисперсною фракцією.

Вплив на подрібнення структури залежить не тільки від складу і фракції модифікаторів, а й від того, у якій кількості їх вводять у метал. При застосуванні нерозчинних інокуляторів найчастіше відбувається поступове зменшення розміру зерна зі збільшенням кількості модифікаторів (рис. 2) [6]. Але при порівняно великому вмісті їхня дія слабшає і найбільш раціонально вводити такі мо-

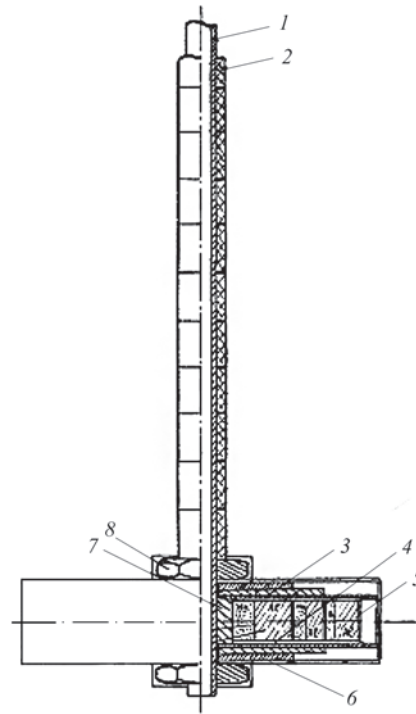


Рис. 1. Схема імпульсно-динамічного пристрою: 1 — стальний стрижень; 2 — футеровочні термостійкі втулки; 3 — спрямовуючі елементи; 4 — горизонтальні стінки; 5 — обичайка; 6 — тепловий екран; 7 — кільцеві елементи з реагентів; 8 — захисний кожух

дифікатори в кількості 0,1...0,5 % від маси металу, що обробляється.

Дія поверхнево-активних модифікаторів має інший характер. До певного їх вмісту спостерігається зменшення розміру зерна, а потім навпаки — збільшення (рис. 2). Тому їх застосовують зазвичай у кількості 0,01...0,1 %.

Технології модифікування досить широко застосовуються у сталеплавильному виробництві головним чином шляхом введення відповідних інгредієнтів у сталерозливний або проміжний ківш при безперервному розливанні. Щодо модифікування безпосередньо при отриманні сталевих зливків, то окрім складності введення добавок після заповнення виливниці, неможливо забезпечити рівномірне розповсюдження модифікаторів в об'ємі металевих ванн. Крім того, додавання таких широко розповсюджених модифікаторів як титан, ніобій, цирко-

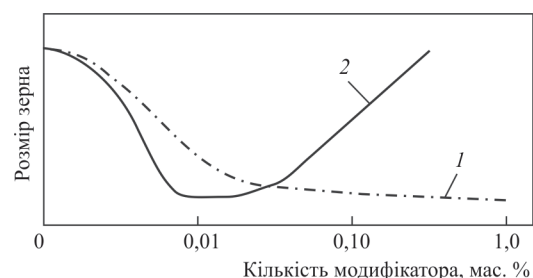


Рис. 2. Вплив вмісту модифікаторів на дисперсність структури: 1 — нерозчинні; 2 — поверхнево-активні

ній може негативно впливати на хімічний склад і властивості складнолегованих сталей та сплавів. Застосування інокуляторів-холодильників вимагає захисту поверхні дробу або порошків від окиснення в процесі зберігання та транспортування. В іншому випадку неминуче забруднення металу оксидними неметалевими включеннями [9]. А дія розчинених в рідкому металі інгібіторів може, у міру формування особливо великого зливка, звестися нанівець внаслідок їх ліквідації. Тому традиційне модифікування як вплив на структуроутворення сталевих зливок безпосередньо при їх розливці не набуло широкого застосування.

До специфічних методів модифікування можна віднести введення в рідку серцевину зливка стрижнів зі спресованих неорганічних матеріалів, зокрема суміші CaO і CaF_2 , які розплавляються в рідкій сталі (метод ІНАМ-inorganic heat absorption material) [10, 11]. Відповідно до виконаних досліджень у разі застосування даного методу при отриманні порівняно невеликих зливок масою від 200 кг до 6,0 т знижується ступінь макросегрегації та вміст неметалевих включень, а також зменшується розвиток усадкової пористості. Це пов'язано з тим, що розплавлення стрижнів знижує температуру рідкої серцевини зливок і підвищує швидкість затвердіння. А рідкі неорганічні речовини, що утворюються, асимілюють неметалеві включення і виносять їх на поверхню розплавленої сталі. Однак зі збільшенням маси зливок для скільки-небудь істотного зниження температури рідкого металу знадобиться велика кількість подібних стрижнів. Крім того, існує небезпека забруднення металу твердими або рідкими частинками неорганічного матеріалу при попаданні в розгалужену область рідко-твердого стану. Тому поки важко судити про перспективність застосування такого модифікування під час виробництва великих сталевих зливок.

Вібраційна обробка. Вплив на рідкий метал вібрацією — це спосіб, який передбачає накладання на розплав вимушених коливань із частотою від 1,5 до 10000 Гц та амплітудою від 0,01 до 5 мм [12].

Основний вплив вібрації на умови кристалізації та подрібнення структури литого металу можна пояснити наступним [13]: механічним руйнуванням фронту кристалізації під впливом коливань і створенням додаткових центрів кристалізації; виникненням підвищеного переохолодження в області впливу та підвищення в ній активності домішок, при цьому створюються умови для збільшення швидкості утворення нових центрів кристалізації; зменшення міжфазового поверхневого натягу та в'язкості розплаву, що спрощує

процес переміщення атомів з рідкої в тверду фазу при формуванні центрів кристалізації; пришвидшенню термокапілярного масопереносу ліквідаційних виділень з простору поміж гілок дендритів.

Вважається, що основним механізмом подрібнення зерен є руйнування кристалів, що ростуть, під дією згинальних напружень, які виникають при коливанні рідкого металу навколо дендритів [14, 15]. Сили, що діють на дендрити, залежать від частоти і амплітуди коливань, фізичних властивостей металу та розмірів дендритів. Наголошується значний вплив на подрібнення первинного зерна процесів кавітації — утворення газових бульбашок у потоці рідини. Виконані розрахунки показують, що для сталі при швидкості потоку 50 см/с тиск, діючий на дендрит діаметром 1 мм і довжиною 10 мм, може бути недостатнім для його поломки. Але у разі руйнування кавітаційних бульбашок виникає тиск на кілька порядків вище порівняно з тиском рідини, що рухається [15].

За даними роботи [16], де автори порівняли зливки зі сталі 35, отримані з вібрацією та без неї, розмір дендритів зливка з дією вібрації зменшився в 5...8 разів у порівнянні зі звичайним зливком. При цьому в першому випадку структура виявилася більш щільною, а усадкова раковина мала в 1,5...2,0 рази меншу глибину. У роботі також представлені результати дослідження двох зливок сталі 55Л, які мали масу 1 і 2 т та були оброблені за допомогою вібрації. Встановлено збільшення ударної в'язкості металу на 20,2 %, межі текучості — на 12,4 %, твердості — на 10 %. Також за експериментальними даними загальна тривалість затвердіння зливок при накладанні вібрації скорочується на 20...25 % [12].

Загалом існує декілька способів накладання коливань, наприклад, через піддон, бокову стінку та вільну поверхню металевої ванни. Найбільш розповсюджений з них, це вібрація піддона. Цей спосіб особливий тим, що він безпосередньо впливає на фронт кристалізації, але він обмежується розмірами зливка, зі збільшенням висоти (відстані від джерела вібрації) його ефективність падає. Враховуючи, що коливання металу істотно слабшає при віддаленні від місця накладання, вібраційний вплив на структуру при кристалізації ефективний при виробництві зливок порівняно невеликого розміру. Тому при отриманні сталевих зливок великого тонуажу цей метод не знайшов застосування.

Перемішування металу. В металургії перемішування рідкого металу є важливою технологічною операцією, яка виконується з метою збільшення швидкості протікання технологічних

процесів, підвищення їх ефективності та поліпшення якості отриманої металопродукції. Метою перемішування при відливанні сталевих зливків є інтенсифікація теплообміну, вирівнювання температури і хімічного складу в об'ємі металу, що твердіє, а також вплив на фронт кристалізації.

Створення інтенсивного турбулентного руху розплаву веде до змішування більш гарячого металу в центрі зливка з більш холодним біля фронту кристалізації [15]. В результаті відбувається усереднення температури, хімічного складу металу та зменшення двофазної зони. Крім того, за рахунок руху металу відбувається винесення включень з дна металеві ванни до меніска. Також метал, що рухається вздовж фронту кристалізації, обламає гілки дендритів, які потім стають новими центрами кристалізації, і це сприяє зменшенню розміру зерна та збільшенню зони рівноосних кристалів.

Перемішування рідкої серцевини зливка широко застосовується при безперервному розливанні, де рух металу відбувається під дією електромагнітних сил шляхом встановлення зовнішніх джерел магнітного поля [17–20].

Накладання магнітного поля може відрізнитися напрямком (повздовжній, поперечний, радіальний), типом (біжуче, пульсуюче) і конкретними технічними параметрами (потужність, частота). Часто використовують багатозональні електромагнітні перемішувачі, які створюють біжуче або обертове магнітне поле.

Завдяки електромагнітному перемішуванню було усунуто такі дефекти безперервнолитих зливків, як: підкіркові бульбашки, хімічна неоднорідність по перерізу зливка, зменшена осьова пухкість та ширина зони стовпчастих дендритів [21–23].

Електромагнітне перемішування, напевно, є найчистішим методом впливу на рідкий метал. Та все ж цей спосіб обмежений глибиною проникнення магнітного поля, що не дає змогу впливати на метал у центральних областях зливків великого діаметра. Крім того, зі збільшенням перерізу зливка значно зростають габарити та вартість обладнання для електромагнітного перемішування. Тому при виробництві зливків, які відливають у виливниці, цей спосіб не знайшов застосування.

У літературі є відомості про використання іншого способу перемішування рідкої серцевини сталевго зливка, а саме — механічне перемішування за допомогою мішалки. Наприклад, такий спосіб підвищення якості великих зливків запропонований в патенті, згідно з яким в середину зливка вводиться пристрій у вигляді валу, що обертається [24]. До нижньої частини валу кріпляться лопатки, які призводять до руху рідкого

металу (рис. 3). Лопатки виготовляють з тієї ж марки сталі, що і зливок, що відливається. У міру затвердіння металу вал підіймається вгору, а лопатки поступово розчиняються у металевій ванні.

Описаний прийом перемішування серцевини сталевго зливка, що твердіє, вимагає створення спеціального, досить громіздкого обладнання для кріплення, переміщення та обертання валу, реалізувати його на практиці досить складно, у тому числі через необхідність використання матеріалів, які могли б тривалий час витримувати високу температуру. Тому механічне перемішування якщо і застосовується, то переважно при отриманні металів і сплавів з низькою температурою плавлення. Однак при застосуванні нових ефективних теплоізолюючих матеріалів не можна повністю виключити можливість використання такого виду перемішування при отриманні сталевих зливків.

Ефективним способом примусового перемішування рідкого металу, що набув широкого поширення в металургії, є продування металеві ванни інертним газом. При цьому, крім раніше згаданих позитивних ефектів, які відбуваються при активному перемішуванні металевго розплаву, газові бульбашки, що спливають, сприяють дегазації металу та видаленню з нього неметалевих включень.

Наприклад, у роботі [25] було експериментально перевірено вплив продувки рідкої фази в кристалізаторі при отриманні безперервного зливка. Для продування використали вогнестійкий пристрій типу багатосоплової фурми. За даними дослідження макроструктури і сірчистих відбитків поперечних і повздовжніх темплетів заготовок з 20 дослідних плавок було встановлено, що продування металу ар-

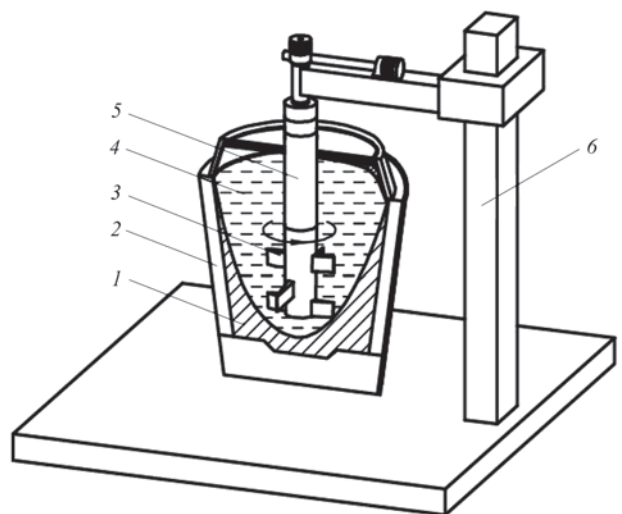


Рис. 3. Вид пристрою для механічного перемішування рідкої серцевини зливка: 1 — затверділий метал; 2 — виливниця; 3 — лопатки; 4 — рідкий метал; 5 — вал; 6 — стійка з механізмами кріплення та обертання валу

гоном в кристалізаторі сприяє розосередженню центральної пористості та осьової ліквідації.

Дослідження показують, що дисперсність дендритної структури збільшилася в 2...4 рази в порівнянні з контрольним зразком, виготовленим без продування. Причому ущільнення дендритів починається на відстані 18 мм від бічної поверхні та зберігається до осьової зони. Крім того, автори прийшли до висновку, що введений аргон відбирає незначну частину тепла розплаву і зменшує температуру в зоні барботажу.

Підведення тепла і металу в надлив. Вище розглянуті методи зовнішнього впливу на формування сталевих зливка передбачають той чи інший безпосередній, можна сказати прямий, вплив на зародження і зростання кристалів у рідкому металі. Підігрів металу в надлив, зокрема з підживленням, тобто з додатковою подачею металу в надлив для компенсації усадки, впливає на умови затвердіння за рахунок зміни теплового стану металевої ванни.

Відомі різні способи підведення додаткового тепла в надлив, які були випробувані для підвищення якості сталевих зливків, що отримуються традиційним розливом металу у виливницю. Всі вони передбачають використання зовнішнього джерела тепла, наприклад, індукційного або електродугового, який нагріває метал у верхній частині зливка. З них на практиці знайшли застосування лише технології, що ґрунтуються на електрошлаковому підігріві, які почали розвиватися в ІЄЗ ім. Є.О. Патона ще у середині минулого століття [26, 27]. Були розроблені і реалізовані в промисловості різні технології електрошлакового обігріву (ЕШО), електрошлакової розливки (ЕШР), електрошлакового обігріву та підживлення (ЕШО(п)).

Численні дослідження зливків масою від 2,5 до 75 т з конструкційних, підшипникових, штампових, валкових, нержавіючих і жароміцних сталей показали, що при способі зовнішнього впливу, що розглядається [28–30], практично повністю виключаються в піднадливковій частині зливка дефекти усадкового походження, особливо у варіанті з підживленням; метал рафінується шлаком від сірки та неметалевих включень, що проявляється у зниженні їх вмісту у верхній частині зливка, у той час, як при традиційному розливанні саме тут вони накопичуються у найбільшій кількості; у великих зливках ЕШО не виділяється характерна для звичайних зливків зона зворотної ліквідації в донній частині. Пояснюється це відсутністю при електрошлаковому обігріві дзеркала металу, так званого дощу падаючих кристалів; за рахунок виключення донного обрізу і зменшення головного

обрізу вихід придатного становить 90...95 % від загальної маси зливка.

Ці фактори, а також стримуючий вплив підведення тепла в надлив на зростання двофазної зони забезпечують вищу якість литого металу зливків ЕШО, ЕШР та ЕШО(п) порівняно з одержуваними традиційним способом.

Позитивна дія електрошлакового обігріву і підживлення була підтверджена на підприємствах «Gebr. Bohler & Co. AG» (Австрія) та «Terni» (Італія), де спосіб, що аналізується, отримав найменування BEST-процес (Bohler electroslag topping) та TREST-процес (Terni refractory electroslag topping), застосовувався для виробництва ковальських та листових зливків масою до 60 т [31–34]. Між собою вони відрізняються тим, що в першому використовують водоохолоджувану надливкову надставку, а в другому — футеровану. Внаслідок цього у розробленої в Австрії технології є можливість у більш широких межах варіювати температурою і складом шлаку і тим активніше впливати на умови кристалізації та рафінування металу.

Згідно з проведеними дослідженнями в зливках, отриманих BEST-процесом із середньовуглецевої Cr–Ni–Mo сталі, спостерігається суттєве зменшення зони зворотної ліквідації в донній частині при зниженні вмісту вуглецю всього на 0,02 % порівняно з ковшовою пробою. Також у донній частині відсутні характерні для звичайних зливків скупчення великих неметалевих включень. Вміст сірки в осьовій зоні до 2/3 висоти зливків зберігається на рівні вихідного в металі, що розливається, близько 0,01 %, а потім знижується до 0,003 %, що є результатом рафінування металу шлаком. Також у верхній частині зливків відзначається зниження вмісту неметалевих включень. Порівняно з аналогічними зливками звичайного виробництва відзначається зменшення осьової пористості і пухкості. У сукупності ці та інші фактори забезпечують кращі показники механічних властивостей металу, що отримується BEST-процесом.

Відповідно до роботи [35] густина металу зливків BEST у верхній їх половині істотно вище, ніж у зливків звичайного виробництва. Також відсутнє різке зниження густини в остовій зоні (рис. 4). Отримані з електрошлаковим підігрівом і підживленням зливки чистіші за вмістом не лише сульфідних неметалевих включень, що пов'язано з рафінуванням металу від сірки, а й оксидних включень (рис. 5).

Різновидом електрошлакового обігріву є розроблений в Японії спосіб ESHT (electroslag hot topping) згідно з яким шлакова ванна у футерованій вогнетривкими матеріалами надливковій

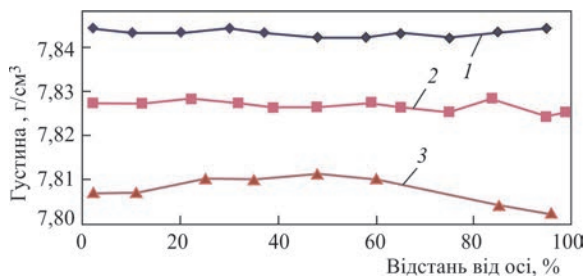


Рис. 4. Зміна густини сталі в ковальському зливку від бокової поверхні до осьової зони: 1 — зливок ЕШП; 2 — зливок BEST; 3 — зливок звичайної виплавки

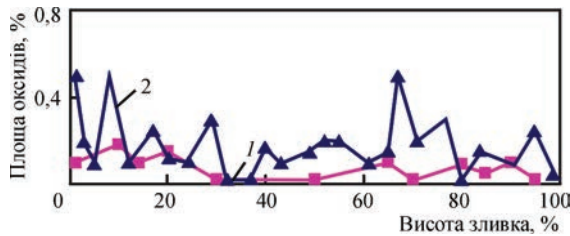


Рис. 5. Ступінь чистоти по оксидним включенням вздовж осі зливка: 1 — зливок ESHT-J; 2 — зливок звичайної виплавки

надставці нагрівається за допомогою трьох графітових електродів, підключених до трифазного джерела струму [36]. З відомостей, що є в літературі, незрозуміло, чи використовується при цьому процесі підживлення шляхом подачі в надлив металу тим чи іншим способом, як це передбачено у розробленій в ІЕЗ ім. Є.О. Патона сучасній установці для виробництва зливків масою до 200 т, де підживлення здійснюється за допомогою безструмового металевого електрода, який вводиться в шлакову ванну між трьома графітовими електродами (рис. 6) [37, 38].

Дані дослідження зливків масою 65...66 т із високохромистої легованої молібденом, кобальтом, ванадієм, азотом і бором роторної сталі, отриманих способом ESHT, показують, що мікроструктура та механічні властивості металу з їх центральних областей перебувають на рівні показників для близького за масою і складом зливка ЕШП [39].

Незважаючи на зазначений позитивний вплив розглянутого способу зовнішнього впливу на якість сталевих зливків, з розвитком за останні 15–20 рр. нових технологій утеплення металу в надлив з використанням екзотермічних сумішей та теплоізолюючих вкладишів, технології електрошлакового обігріву, головним чином через значні витрати на їх реалізацію, якщо й застосовуються, то в обмежених масштабах для вирішення конкретних завдань. Наприклад, при виробництві литих чавунних валків масою близько 50 т або при отриманні поковок роторів для виготовлення суперкритичних парових турбін.

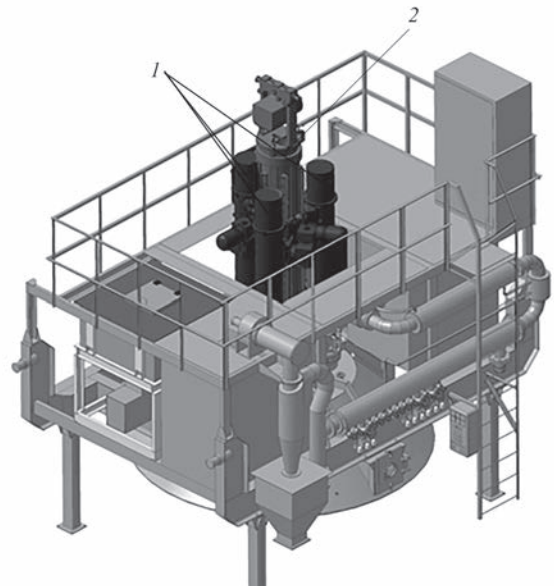


Рис. 6. Електрошлаковий нагрівач установки для виробництва зливків масою до 200 т: 1 — графітові електроди; 2 — механізм подачі безструмового електрода

Крім економічних причин широкому застосуванню електрошлакового обігріву і підживлення для отримання великих зливків масою 100 т і більше перешкоджає те, що дія додатково підведеного тепла слабшає в міру віддалення від поверхні металу, що обігрівається. Тому в зливках з великими геометричними розмірами стримуючого впливу підігріву може бути недостатньо для придушення утворення дефектів у найбільш проблемній зоні на відстані 2/3...3/4 їхньої висоти.

Висновки

1. Аналіз використання розглянутих способів зовнішнього впливу при отриманні сталевих зливків показує, що всі вони тією чи іншою мірою надають позитивний вплив на умови переходу металу з рідкого стану в твердий. Але найбільш дієвими з них, що знайшли застосування на практиці, є перемішування рідкої серцевини зливка, що кристалізується, та підведення додаткового тепла і металу в надлив. Однак для великих зливків застосування перемішування стикається з проблемою утворення на дзеркалі металу затверділої кірки і наявності в надлив шару теплоізолюючої суміші в напівтвердому стані. Це ускладнює, у тому числі через можливе забруднення металу, введення всередину зливка пристрою для перемішування. Що стосується додаткового підведення тепла, то через незначну природну конвекцію в металевій ванні, особливо в надлив, ускладнюється надходження більш гарячого металу з головної частини всередину зливка. Тому позитивна дія цього способу втрачає свою ефективність зі збільшенням геометричних параметрів зливка.

2. В той самий час поєднання цих двох способів зовнішнього впливу доповнюють один одного. При електрошлаковому обігріві дзеркало металу у надливці протягом тривалого часу зберігається в рідкому стані, а шар рідкої шлакової ванни не є перешкодою для подачі через неї пристрою для організації примусового руху металевих розплавів. У цьому випадку перемішування призводить до інтенсифікації масообмінних процесів у металевій ванні та сприяє переміщенню більш гарячого металу з надливу у внутрішні шари зливка.

3. Про необхідність вирішення проблеми теплопереносу для успішного застосування при виробництві великих зливок процесу електрошлакового підживлення зазначає у своїй аналітичній статті відомий фахівець у галузі спецелектрометалургії А. Mitchel [40]. У зв'язку з цим, зроблений висновок про поєднання перемішування рідкої серцевини зливка з додатковим підведенням тепла в надлив якраз і спрямований на вирішення цієї проблеми і такий прийом може бути перспективним для застосування з метою підвищення якості сталевих зливок.

Список літератури

1. Попович В., Кондир А., Плешаков А. та ін. (2009) *Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство. Практикум*. Львів, Світ.
2. Гольдштейн Я.Е., Мизин В.Г. (1986) *Модифицирование и микролегирование чугуна и стали*. Т. 272. Москва, Металлургия.
3. Шаповалов В.О., Біктагіров Ф.К., Могилаченко В.Г. (2023) *Позапічне оброблення сталі: способи, процеси, технології*. Підручник. Київ, Хімджест.
4. Турбар В.П., Гаркаленко Д.М., Таболаєва Л.В. и др. (2009) Влияние модифицирования кальцием на качество колесной стали. *Металл и литье Украины*, 4–5, 55–58.
5. Кондратюк С.Є., Стоянова О.М., Щеглов В.М. та ін. (2015) Модифікування сталі нанорозмірними порошковими інокуляторами. *Металознавство та обробка металів*, 3, 3–7.
6. Щеглов В.М., Кондратюк С.Є., Примак І.Н. (2010) Підвищення ефективності модифікування сталі. *Металознавство та обробка металів*, 2, 51–57.
7. Соколов Н.А., Тузов Г.А., Ковалев Н.И. (1971) Влияние модифицирующих добавок на качество стали для отливки тонкостенных изложниц. *Теория и практика микролегирования и модифицирования сталей: Материалы респ. науч.-техн. конф., Донецк, 7–9 декабря 1971 г.*, с. 57.
8. Титаренко В.А., Шульте Ю.А. (1971) Влияние модифицирования на природу неметаллических включений и свойства стали. *Теория и практика микролегирования и модифицирования сталей: Материалы респ. науч.-техн. конф., Донецк, 7–9 декабря 1971 г.*, с. 72.
9. Патон Б.Е., Медовар Б.И., Сасенко В.Я., Емельяненко Ю.Г. (1981) Управление кристаллизацией слитка путем ввода макрохолодильников при электрошлаковом переплаве. *Литье с применением инокуляторов*. Киев, ИПЛ АН УССР, 13–19.
10. Li C., Zhang Q., Zhu L. et al. (2021) Application of heat absorption method to improve quality of large steel ingot. *ISIJ Inter.*, 61(3), 865–870.
11. Xu Y., Wang J., Shuai S. et al. (2023) Improving microstructure and segregation of steel ingot by inorganic heat absorption method. *Materials Sci. and Technology*, 39(16), 1–12.
12. Могилаченко В.Г. (2019) Візуалізація твердіння виливка під впливом вібрації. *Теорія і практика металургії*, 4, 31–37.
13. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. (1998) *Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов*. Москва, Машиностроение.
14. Эльдарханов А.С. (1996) *Процессы кристаллизации в поле упругих волн*. Москва, Металлургия.
15. Ефимов В.А. (1998) Перспективы развития работ по применению внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся расплав. *Влияние внешних воздействий на жидкий и кристаллизующийся металл*: Сб. науч. тр. Киев, ИПЛ АН УССР, 3–21.
16. Ефимов В.А., Эльдарханов А.С. (1995) *Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов*. Москва, Металлургия.
17. Смирнов А.Н., Пилюшенко В.Л., Минаев А.А. и др. (2002) *Процессы непрерывной разливки*. Донецк, ДонНТУ.
18. Wei C., Hezhou S., Taixu J. et al. (2009) Effect of mold electromagnetic stirring on quality of 0.60 °C steel casting billets. *Special Steel*, 30(5), 34.
19. Zeng J., Chen W., Zhang S. et al. (2015) Development and application of final permanent magnet stirring during continuous casting of high carbon rectangular billet. *ISIJ Inter.*, 55(10), 2142–2149.
20. Zeng J., Chen W., Zhang S. (2016) Experimental study of molten metal flow and numerical simulation of magnetic field during permanent magnet stirring and its application in continuous casting. *Metallurgical Research & Technology*, 113(6), 609–620.
21. Zeng J., Chen W.Q., Yang Y.D. et al. (2018) Effect of permanent magnet stirring on internal quality of steel. *Ironmaking & Steelmaking*, 45(6), 576–583.
22. Xu Y., Wang E., Li Z. et al. (2017) Effects of vertical electromagnetic stirring on grain refinement and macrosegregation control of bearing steel billet in continuous casting. *J. of Iron and Steel Research Inter.*, 24(5), 483–489.
23. Yu H.Q., Zhu M.Y. (2012) Influence of electromagnetic stirring on transport phenomena in round billet continuous casting mould and macrostructure of high carbon steel billet. *Ironmaking & Steelmaking*, 39(8), 574–584.
24. (2012) *Пристрій та спосіб виготовлення великогабаритних однорідних сталевих зливок з використанням самовитратної мішалки*. Китай, Пат. CN 102806322A: B22D 7/12 (2006.01). № 201210295047.6; заявл. 20.08.2012; опубл. 05.12.2012.
25. Хрыкин И.Н., Кан Ю.Е., Шумилин Б.Н. и др. (1980) Продувка металла в кристаллизаторе инертным газом. *Прогрессивные способы получения стальных слитков*. Сб. науч. тр. Киев, ИПЛ АН УССР, 37–43.
26. Тягун-Белоус Г.С., Дудко Д.А. (1958) Электрошлаковый обогрев неплавящимися электродами головной части слитков и фасонных отливок. *Автоматическая сварка*, 10, 36–43.
27. Тягун-Белоус Г.С. (1959) Уменьшение химической неоднородности фасонных отливок при электрошлаковой подпитке. *Автоматическая сварка*, 3, 51–57.
28. Бастратов Н.Ф., Тулин Н.А., Немченко В.П. и др. (1978) *Электрошлаковая разливка стали*. Москва, Металлургия.
29. Биктагіров Ф.К., Воронин А.Е., Крутиков Р.Г. и др. (1984) Исследование электрошлаковой отливки крупных слитков. *Специальная электрометаллургия*, 56, 11–14.

30. Пшеничный Б.А., Воронин А.Е., Крутиков Р.Г. и др. (1985) Качество слитков электрошлаковой отливки. *Сб. Совершенствование процессов непрерывной разливки стали*, Киев, 133–137.
31. König H., Mayer K.-H., Keienburg K.-H. et al. (1990) Influence of Modern Melting Techniques on the Creep Behaviour of Heavy-Section Components of 1% CrMoV Steels. *Steel Res.*, 61(6), 274–278.
32. Tarmann R., Machner P., Kuhnelt G. (1979) Production of B.E.S.T. Ingots Weighing up to 55 Tons and Quality of the Forgings. *Berg-und Huttenmannische Monatshefte*, 124(5), 212–221.
33. Tochowicz S., Klisiewicz Z. (1979) Metallurgical Methods of Improving Steel Quality of Ingots for Large Forgings. *Hutnik (Katowice)*, 46(3), 106–111.
34. Basevi S., Repetto E., Scepi M. (1979) The TREST Process for Manufacturing a Cr–Mo–V HP Rotor Shaft. *Vacuum Metallurgy Conference on Special Melting*, 6 th., 773–784.
35. Kuhnelt G., Machner P. (1976) Das B.E.S.T. – Verfahren, ein neuer Weg zur Herstellung hochwertiger Schmiedeböcke. *BHM*, 121(5), 179–186.
36. Morinaka K., Futamura Y., Kitagawa V. et al. (1988) The manufacture of the large ESHT-J ingot. *Iron Steelmaker*, 15(4), 9–15.
37. (2014) *Установка для электрошлакового нагріву металів*. Україна, Пат. 106537 C22B 9/187. № a201214723; заявл. 21.12.2012; опубл. 10.09.2014.
38. Biktagirov F.K., Shapovalov V.A., Efimov M.V. et al. (2016) Installation for electroslag heating of a crop of large ingots of up to 200 ton mass. *Proc. of Medovar Memorial Sym.*, Kyiv, 7–10 June 2016, 207–210.
39. Nakano M., Kawano K., Mikami M. (2014) Manufactory of trial rotor forging of 9 % Cr steel containing Co and B (X13CrMoCoVNbNB9-2-1) for ultrasupercritical steam turbines. *Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants: Proc. of Seventh Inter. Conf., October 22–25, 2013 Waikoloa, Hawaii, USA*. ASM International, 321–332.
40. Mitchel A. (2005) The prospects for large forgings of segregation-sensitive alloys. *Advances in Electrometallurgy*, 2, 2–6.
- tice of Microalloying and Modification of Steels (Donetsk, 7–9 December 1971), 72 [in Russian].
9. Paton, B.E., Medovar, B.I., Saenko, V.Ya., Emelyanenko, Yu.G. (1981) Control of ingot crystallization by introduction of macrocoolers in electroslag remelting. *Litiyo s Primeneniem Inoculatorov*, Kyiv, PTI MA NASU, 13–19 [in Russian].
10. Li, C., Zhang, Q., Zhu, L. et al. (2021) Application of heat absorption method to improve quality of large steel ingot. *ISIJ Inter.*, 61(3), 865–870.
11. Xu, Y., Wang, J., Shuai, S. et al. (2023) Improving microstructure and segregation of steel ingot by inorganic heat absorption method. *Materials Sci. and Technology*, 39(16), 1–12.
12. Mogylatenko, V.G. (2019) Visualization of ingot solidification under vibration impact. *Teoriya i Praktyka Metalurgii*, 4, 31–37 [in Ukrainian].
13. Efimov, V.A., Eldarkhanov, A.S. (1998) *Modern technologies of casting and crystallization of alloys*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
14. Eldarkhanov, A.S. (1996) *Crystallization processes in the field of elastic waves*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
15. Efimov, V.A. (1998) *Prospects of development of works on application of external impacts on liquid and crystallizing melt*. Kyiv, Collect. of PTI MA NASU, 3–21 [in Russian].
16. Efimov, V.A., Eldarkhanov, A.S. (1995) *Physical methods of impact on solidification processes of alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
17. Smirnov, A.N., Pilyushenko, V.L., Minaev, A.A. et al. (2002) *Processes of continuous casting*. Donetsk, DonNTU [in Russian].
18. Wei, C., Hezhou, S., Taixu, J. et al. (2009) Effect of mold electromagnetic stirring on quality of 0.60 °C steel casting billets. *Special Steel*, 30(5), 34.
19. Zeng, J., Chen, W., Zhang, S. et al. (2015) Development and application of final permanent magnet stirring during continuous casting of high carbon rectangular billet. *ISIJ Inter.*, 55(10), 2142–2149.
20. Zeng, J., Chen, W., Zhang, S. (2016) Experimental study of molten metal flow and numerical simulation of magnetic field during permanent magnet stirring and its application in continuous casting. *Metallurgical Research & Technology*, 113(6), 609–620.
21. Zeng, J., Chen, W.Q., Yang, Y.D. et al. (2018) Effect of permanent magnet stirring on internal quality of steel. *Ironmaking & Steelmaking*, 45(6), 576–583.
22. Xu, Y., Wang, E., Li, Z. et al. (2017) Effects of vertical electromagnetic stirring on grain refinement and macrosegregation control of bearing steel billet in continuous casting. *J. of Iron and Steel Research Inter.*, 24(5), 483–489.
23. Yu, H.Q., Zhu, M.Y. (2012) Influence of electromagnetic stirring on transport phenomena in round billet continuous casting mould and macrostructure of high carbon steel billet. *Ironmaking & Steelmaking*, 39(8), 574–584.
24. (2012) *Device and method of production of large-sized homogeneous steel ingots using self-consumable mixer*. China, Pat. 102806322A: B22D 7/12 (2006.01), No. 201210295047.6; Fill. 20.08.2012; Publ. 05.12.2012.
25. Khrykin, I.N., Kan, Yu.E., Shumilin, B.N. et al. (1980) Inert gas blowing of metal in mould. *Advanced methods of production of steel ingots*. Kyiv, Collect. of PTI MA NASU, 37–43 [in Russian].
26. Tyagun-Belous, G.S., Dudko, D.A. (1958) Nonconsumable electrode electroslag heating of ingot head and shaped castings. *Avtomatich. Svarka*, 10, 36–43 [in Russian].
27. Tyagun-Belous, G.S. (1959) Increase in chemical heterogeneity of shaped castings during electroslag hot topping. *Avtomatich. Svarka*, 3, 51–57 [in Russian].
28. Bastrakov, N.F., Tulin, N.A., Nemchenko, V.P. et al. (1978) *Electroslag casting of steel*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

References

1. Popovych, V., Kondyr, A., Pleshakov, A. et al. (2009) *Technology of structural materials and materials science. Practical Work*. Lviv, Svit [in Ukrainian].
2. Goldshteyn, Ya.E., Mizin, V.G. (1986) *Modification and microalloying of cast iron and steel*. Vol. 272. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
3. Shapovalov, V.O., Biktagirov, F.K., Mogylatenko, V.G. (2023) *Out-of-furnace processing of steel: Methods, processes, technologies: Manual*. Kyiv, Khimdjest [in Ukrainian].
4. Turbar, V.P., Garkalenko, D.M., Tabolaeva, L.V. et al. (2009) Influence of modification by calcium on quality of wheel steel. *Metall i Litiyo Ukrainy*, 4–5, 55–58 [in Russian].
5. Kondratyuk, S.E., Stoyanova, O.M., Shcheglov, V.M. et al. (2015) Modification of steel by nanosized powder inoculators. *Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv*, 3, 3–7 [in Ukrainian].
6. Shcheglov, V.M., Kondratyuk, S.E., Prymak, I.N. (2010) Improvement of efficiency of steel modification. *Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv*, 2, 51–57 [in Ukrainian].
7. Sokolov, N.A., Tuzov, G.A., Kovalev, N.I. (1971) Influence of modifying additives on quality of steel for casting of thin-walled moulds. In: *Proc. of Rep. Sci.-Techn. Conf. on Theory and Practice of Microalloying and Modification of Steels (Donetsk, 7–9 December 1971)*, 57 [in Russian].
8. Titarenko, V.A., Shulte, Yu.A. (1971) Influence of modification on nature of nonmetallic inclusions and properties of steel. In: *Proc. of Rep. Sci.-Techn. Conf. on Theory and Prac-*

29. Biktagirov, F.K., Voronin, A.E., Krutikov, R.G. et al. (1984) Investigation of electrosag casting of large ingots. *Spets. Elektrometallurgiya*, **56**, 11–14 [in Russian].
30. Pshenichny, B.A., Voronin, A.E., Krutikov, R.G. et al. (1985) Quality of ingots of electrosag casting: *Collect. on Improvement of continuous casting of ingots*. Kyiv, 133–137 [in Russian].
31. König, H., Mayer, K.-H., Keienburg, K.-H. et al. (1990) Influence of modern melting techniques on the creep behaviour of heavy-section components of 1 % CrMoV steels. *Steel Res.*, **61**(6), 274–278.
32. Tarmann, R., Machner, P., Kuhnelt, G. (1979) Production of B.E.S.T. ingots weighing up to 55 tons and quality of the forgings. *Berg- und Huttenmannische Monatshefte*, **124**(5), 212–221.
33. Tochowicz, S., Klisiewicz, Z. (1979) Metallurgical methods of improving steel quality of ingots for large forgings. *Hutnik (Katowice)*, **46**(3), 106–111.
34. Basevi, S., Repetto, E., Scepi, M. (1979) The TREST process for manufacturing a Cr–Mo–V HP rotor shaft. In: *Vacuum Metallurgy Conf. on Special Melting*, 6th, 773–784.
35. Kuhnelt, G., Machner, P. (1976) Das B.E.S.T. – Verfahren, ein neuer Weg zur Herstellung hochwertiger Schmiedeblocke. *BHM*, **121**(5), 179–186.
36. Morinaka, K., Futamura, Y., Kitagawa, V. et al. (1988) The manufacture of the large ESHT-J ingot. *Iron Steelmaker*, **15**(4), 9–15.
37. (2014) *Installation for electrosag heating of metals*. Ukraine, Pat. 106537, Int. Cl. C22B 9/187, No. a201214723; Fill. 21.12.2012; Publ. 10.09.2014.
38. Biktagirov, F.K., Shapovalov, V.A., Efimov, M.V. et al. (2016) Installation for electrosag heating of a crop of large ingots of up to 200 ton mass. In: *Proc. of Medovar Memorial Symp.* (Kyiv, 7–10 June 2016), 207–210.
39. Nakano, M., Kawano, K., Mikami, M. (2014) Manufactory of trial rotor forging of 9 % Cr steel containing Co and B (X13CrMoCoVNbNB9-2-1) for ultrasupercritical stream turbines. *Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants*. In: *Proc. of Seventh Inter. Conf. (October 22–25, 2013 Waikoloa, Hawaii, USA)*. ASM Intern., 321–332.
40. Mitchel, A. (2005) The prospects for large forgings of segregation-sensitive alloys. *Advances in Electrometallurgy*, **2**, 2–7.

APPLICATION OF EXTERNAL INFLUENCE IN THE PRODUCTION OF STEEL INGOTS. OVERVIEW

V.V. Barabash, F.K. Biktagirov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: barabash.vv@ukr.net

The article focuses on analyzing the utilization of external influences, such as metal modification, vibration, stirring the metal pool, and hot topping of steel ingots. It demonstrates the positive impact of external influences on the conditions of crystallization and solidification in various ingots. A conclusion was made that an effective approach to influencing the molding of a steel ingot can involve a combination of heating and stirring in the hot top by introducing a device into the core of the ingot, setting the liquid metal in motion. 40 Ref., 6 Fig.

Keywords: steel ingot, quality, external influences, modification, vibration, stirring, heat removal, metal, hot topping

Отримано 27.12.2023

Отримано у переглянутому вигляді 08.01.2024

Прийнято 13.02.2024

Велику Британію та Данію сполучив найдовший у світі електричний кабель

До енергетичних систем Великої Британії та Данії 29 грудня 2023 р. під'єднали 764-кілометровий підводний електричний кабель Viking Link, який вважається найдовшим у світі. Кабель Viking Link — перший, що сполучає Британію з Данією. Його використовуватимуть для постачання дешевшої електроенергії, якої вистачить на 2,5 млн домогосподарств і яку виробляють данські вітрові електростанції.

Кабель прокладений від данської комуни Ваєн у Південній Ютландії, а в Британії виходитиме на берег приблизно за 170 км на північ від Лондона. Переважна частина його розташована на дні Північного моря. Звичайна пропускна спроможність кабелю становить 800 МВт, але за потреби може збільшуватись до 1400 МВт. При цьому кабель може передавати електроенергію між двома країнами залежно від того, в який бік дме вітер. Наприклад, коли вітер дме із заходу, він спочатку потрапить до Великої Британії й тоді енергія може бути спрямована туди, де вітер дме слабше — тобто в Данію.

Роботи над Viking Link розпочалися у 2019 р. й тривали чотири роки, під час яких його прокладали на морському дні за допомогою спеціально побудованого корабля. Це вже шостий кабель, що з'єднує Британію з континентальною Європою.

Британський національний оператор електроенергії сподівається, що ці кабелі допоможуть Британії зменшити на близько 100 млн т викиди вуглецю, а до 2030 р. 90% енергії, імпортованої через її кабелі, буде надходити з джерел з нульовим рівнем викидів вуглекислого газу.

Північноатлантичний альянс у червні 2023 р. відкрив новий центр із захисту підводних трубопроводів і кабелів на тлі побоювань, що Росія може шпигувати за критичною підводною інфраструктурою західних країн.



Підстанція в Лінкольнширі, Велика Британія,
з якою сполучений Viking Link

<https://www.eurointegration.com.ua/news/2024/01/3/7176642/>

АНАЛІЗУВАННЯ КРЕМНІЮ НА ВМІСТ ДОМІШОК ОКСИГЕНУ, НІТРОГЕНУ І ГІДРОГЕНУ

Р.В. Козін, О.М. Калинюк, А.М. Кібкало, М.М. Калинюк, О.Л. Пузрін

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Малевича, 11. E-mail: kozinrv@gmail.com

Представлено літературний огляд нових способів одержання полікристалічного і монокристалічного кремнію електронно-променевим та плазмовим плавленням, розроблених за останні 10–15 років. Наведено огляд літератури з визначення вмісту оксигену, нітрогену, гідрогену в кремнії. Розроблені експресні методики визначення вмісту оксигену в кремнії відновлювальним плавленням у графітовому тиглі в потоці гелію і наведені порівняння цих методик з інфрачервоною спектроскопією. Розроблені методики визначення вмісту гідрогену і нітрогену в кремнії. Бібліогр. 25, табл. 4, рис. 5.

Ключові слова: аналізування, кремній, оксиген, нітроген, гідроген

Вступ. Сонячна енергетика розвивається в двох напрямках [1, 2]: фотоелектроенергетика — перетворення сонячної енергії в електричну за допомогою напівпровідникових елементів; теплоенергетика — отримання теплової енергії за допомогою сонячних колекторів.

Для розвитку сонячної енергетики потрібне створення нових технологій вироблення кремнію, що повинні забезпечити радикальне зменшення його вартості. Полі- та монокристалічний кремній є головним матеріалом для виробництва фотоелектричних перетворювачів (ФЕП). Полікристалічний кремній характеризується високим ступенем деградації електрофізичних властивостей, що обмежує його використання. Майже 80 % сонячних елементів наземного і космічного призначення виготовляють на основі монокристалічного кремнію. Для зменшення вартості сонячних батарей монокристалічний кремній необхідно замінити на полікристалічний. ФЕП на основі аморфного кремнію мають коефіцієнт корисної дії (ККД) менше 10 %, полікристалічного — до 20 %, монокристалічного — до 25 %. Майже 90 % чистого кремнію одержують шляхом його очищення за силановою технологією [1–5].

Існують два методи вирощування монокристалів кремнію — Чохральського та безтигельного зонного плавлення (БЗП) [1, 2].

На головний параметр — тривалість життя нерівноважних носіїв зарядів (ННЗ) в активних шарах сонячних батарей, впливають структурні дефекти та домішкові елементи. На час життя ННЗ у монокристалах кремнію, вирощених методом Чохральського для сонячної енергетики, великий вплив мають газові домішки, особливо оксиген. Останній є важливим параметром якості кремнію, який впливає на час життя ННЗ та на деградацію сонячних елементів. Вміст оксигену в моно-

кристалах кремнію залежить від умов вирощування. У разі підвищення вмісту оксигену тривалість життя ННЗ зменшується [1, 6, 7].

Легування кремнію нітрогеном використовують при безтигельному зонному плавленні з метою подавлення зростання мікродфектів. Атоми нітрогену при концентраціях, менших за $1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ($\sim 0,0003$ мас. %), знаходяться в міжвузлових положеннях і не виявляють електричну активність. Нітроген має низьку розчинність у вузлах ґратки та за іонної імплантації не забезпечує концентрацію носіїв (електронів) вище $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (0,0030 мас. %) [8]. В роботі [9] були досліджені монокристали кремнію, вирощені методом Чохральського в потоці аргону, нітрогену та суміші цих газів. Вміст нітрогену в монокристалах кремнію знаходиться нижче межі чутливості методу вторинної іонної мас-спектрометрії (ВІМС), який дорівнює $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ($\sim 0,0002$ мас. %). Методом електронного парамагнітного резонансу (ЕПМР) було встановлено, що в зразках монокристалів, вирощених в атмосфері аргону, вміст нітрогену становить приблизно $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ($\sim 0,00003$ мас. %), у суміші аргону та нітрогену — $7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ($\sim 0,00020$ мас. %), в атмосфері нітрогену — $4,6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ($\sim 0,0020$ мас. %). Нітроген може суттєво змінити характер розподілу питомого електричного опору (ПЕО) в монокристалах кремнію [9].

У роботі [10] визначено вміст гідрогену в кристалічному кремнії, виробленому різними методами, і встановлена можливість одержання монокристалів кремнію з підвищеними значеннями часу життя ННЗ. Рівень насичення гідрогеном вищий в монокристалах, ніж у полікристалічному кремнії. Дослідження методом інфрачервоної (ІЧ) спектроскопії не виявили утворення гідридів. Гідроген у кремнії знаходиться переважно в атомарному стані між вузлами. Але за наявності потенційних ям, які ство-

Р.В. Козін — <https://orcid.org/0000-0002-8501-0827>, А.М. Кібкало — <https://orcid.org/0009-0007-8657-8389>,

М.М. Калинюк — <https://orcid.org/0000-0001-6931-5973>, О.Л. Пузрін — <https://orcid.org/0000-0003-0625-2113>

рюються дислокаціями, водень може локалізуватися у них. У зливках кремнію, які виготовляють у контакті з воднем, зазвичай є велика кількість водню — приблизно 10^{19} см^{-3} ($\sim 0,0030$ мас. %). Основна кількість водню концентрується поблизу дефектів кристалічної ґратки (зокрема, поблизу дислокацій) та домішкових центрів. Не було виявлено впливу водню і на фізичні властивості кремнію. Вміст водню визначали на аналізаторі RH1 фірми LECO, але ніякої інформації про методу аналізування не надано.

У роботах [4, 5] наведено експериментальний та теоретичний матеріал з досліджень властивостей оксигену, нітрогену і водню в кремнії, розглянуті джерела проникнення оксигену в полі- та монокристалічний кремній, різні гіпотези про природу і вплив легуючих та фонових домішок на кінетику електрично активних оксигенових комплексів.

Потреба в екологічно чистих джерелах електроенергії дала поштовх для створення нових технологій вироблення кремнію. За останні 10–15 років були розроблені нові способи плавлення і рафінування полі- та монокристалічного кремнію, які дозволяють забезпечити виробництво дешевого кремнію сонячної якості й можуть підвищити ККД сонячних батарей майже до 40 % [1, 3, 6, 7, 11, 12].

Розроблення нових та удосконалення існуючих способів вироблення кремнію сонячної якості іде за такими основними напрямками [1–3]: удосконалення існуючих способів; пряме вироблення кремнію, виключаючи газову фазу очищення (хлорсиланове перероблення та водневе відновлення); рафінування дешевого кристалічного кремнію.

В Інституті електросварювання ім. Є.О. Патона НАНУ (ІЕЗ) удосконалені існуючі та розроблені й запропоновані для впровадження нові технології плавлення і рафінування полі- та монокристалічного кремнію: технології плавлення та рафінування кремнію способом електронно-променевого переплавлення (ЕПП); індукційне плавлення та рафінування кремнію у секційному кристалізаторі з можливістю оброблення розплаву кремнію газовими реагентами H_2O , O_2 або розплавами системи CaO-SiO_2 ; рафінування монокристалів кремнію способом електронно-променевого безтигельного зонного плавлення (ЕПБЗП) (вироблення монокристалів кремнію з низьким вмістом домішок і високим рівнем однорідності фізичних властивостей). Останнім способом вдалося знизити вміст оксигену в кремнії на два порядки — з $3 \cdot 10^{17}$ до $5 \cdot 10^{15} \text{ ат/см}^3$ (приблизно з 0,0010 до 0,0002 мас. %); плазмовий піроліз моносилану (піролітичне розкладання силанів у водні та осадження кремнію в киплячому шарі на тверду поверхню у вигляді мілкодисперсного порошку).

З метою зниження вартості сонячних елементів при їхньому виготовленні були використані відходи напівпровідникового кремнію. Дослідження прямого рафінування кремнію показали їхню принципову перспективність [1, 3, 6, 7, 11, 12].

Кремній має велику спорідненість до оксигену. У металургії його використовують для розкислювання сталей у вигляді комплексних розкислювачів (FeSi , SiMn тощо) [5].

У роботі [13] наведено діаграми стану систем Si-O , Si-N , Si-H . З них видно, що: кисень у твердому кремнії міститься у вигляді твердого розчину та SiO_2 ; нітроген практично не розчиняється в кремнії, але створює нітрид Si_3N_4 , який застосовують у металургії в якості вогнетриву [5]; поведінка водню в об'ємі кристалічного кремнію недостатньо вивчена [5, 10].

Основні методи визначення вмісту оксигену, нітрогену, водню в кремнії. *Метод інфрачервоної спектроскопії* — основний метод визначення концентрації розчиненого (оптично активного) оксигену в полі- і монокристалічному кремнії. Оптично активними є ті атоми оксигену у кремнії, які містяться між вузлами кристалічної ґратки, тобто оксиген є домішкою проникнення. Автори робіт [14–16] вважають, що всі атоми оксигену є оптично активними (розчиненими в матриці), але вони ігнорують можливість (наявність) оксигену у вигляді SiO_2 . Межа визначення вмісту оксигену в зразках полікристалічного кремнію становить приблизно $8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ($\sim 0,00027$ мас. %) [14]. Автори роботи [17] намагались методом ІЧ спектроскопії визначити наявність та кількість оксидних фаз у кремнії. Одержані результати порівнювали з результатами аналізування кремнію на вміст оксигену методом відновлювального плавлення зразка. В роботі [18] методами електронної мікроскопії на просвіт визначали оксидні фази в кремнії. У роботах [17, 18] зразки, леговані оксигеном, обробляли в різних газових атмосферах (аргон, нітроген) за різних температур. Кількість оксидних включень збільшувалась за рахунок зменшення розчиненого оксигену, який розміщується в міжвузельних проміжках. Оксидні включення складаються з суміші аморфного кремнію та SiO_2 . Необхідні спеціальні дослідження для вирішення питання про можливість застосування методу ІЧ спектроскопії для визначення в кремнії вмісту оксигену, зв'язаного в оксидні включення, форм, розмірів та стехіометрії цих включень.

Основними виробниками ІЧ спектрометрів є Thermo Fisher Scientific, Shimadzu, Perkin Elmer, Philips, Bruker. У роботах [2, 14–16] наведено приклади застосування методу ІЧ спектроскопії для визначення вмісту оксигену у полі- і монокристалічному кремнії.

Метод активації — визначення концентрації оксигену в кремнії з використанням іонів He^3 , нейтронів, прискорених протонів [4, 5, 19, 20].

Цими двома методами визначають лише оптично активний оксиген, що міститься між вузлами кристалічної ґратки кремнію.

Метод відновлювального плавлення — визначення вмістів оксигену, нітрогену і гідрогену в кремнії [5, 10, 19].

Класичним методом визначення вмісту оксигену в металах є відновлювальне плавлення зразка, що аналізують, в графітовому тиглі. Останній розміщено між двома мідними електродами. Через тигель проходить змінний електричний струм величиною до 1100 А за напруги 10...20 В. Температуру тигля встановлюють, змінюючи величину струму (потужності). У роботах [19, 21–23] описано принципи роботи таких приладів і наведено бібліографію застосування цього методу для аналізу різних металевих і неметалевих матеріалів, у тому числі й кремнію, на вміст у них оксигену, нітрогену, гідрогену.

У роботі [22] зразок нітриду кремнію (Si_3N_4) аналізували на приладі TC436 фірми «LECO» у Ni або Ni–Sn ваннах за температури 2900 °С. У роботах [21, 23] представлено рекомендації щодо визначення вмісту оксигену у кремнії на приладах RO316, TN114 та O836 Si фірми «LECO». Визначали сумарний (поверхневий, оптично активний, зв'язаний в SiO_2) вміст оксигену в кремнії. У роботах [21, 23] наведені методики роздільного визначення вмісту поверхневого оксигену (сполуки, адсорбовані на поверхні аналітичного зразка) і об'ємного (оксиген у твердому розчині й у виді SiO_2) та рекомендації з підготування зразка до аналізування. Вміст поверхневого оксигену можна порівняти з об'ємним [21, 23].

Ураховуючи викладене вище, було поставлено завдання розробити методики визначення вмісту оксигену в кремнії, усунувши вплив поверхневого оксигену: оптично активного оксигену, що міститься у міжвузольних проміжках кристалічної ґратки, тобто у вигляді домішки проникнення; зв'язаного в SiO_2 , що міститься у матриці у вигляді неметалевих включень, і вмістів гідрогену та нітрогену в кремнії.

Методики визначення оксигену, нітрогену, гідрогену в кремнії розробляли в ІЕЗ на аналізаторах TC436 (оксиген, нітроген), RO316 (оксиген), TN114 (нітроген), RH3, RH402 (гідроген) фірми «LECO».

В роботах [19, 21–23] надана інформація про роботу аналізаторів з визначення вмісту оксигену, нітрогену, гідрогену в металах. На приладі TC436 є можливість проводити нагрівання (охолодження) металу, що аналізують, за заданою програмою з різною швидкістю підвищення (зниження) температури (°С/с). Можливе попереднє нагрівання металу в тиглі до аналізування для видалення газових домішок, адсорбованих його поверхнею.

Основну увагу було звернено на досягнення мінімальної холостої поправки — аналізування порожнього тигля або тигля з розплавленою металеву ванною, а саме на: використання оригінальних хімічних реагентів і графітових тиглів, які рекомендує фірма-виробник аналізаторів; використання газоподібних гелію й азоту високої чистоти (не менше 99,995 об. %) з додатковим очищенням; проведення регулярного і ретельного очищення газових трактів та клапанів аналізаторів; попереднє підготування графітових тиглів (дегазація за температури приблизно 2500 °С та зберігання в ексикаторі в атмосфері осушених повітря або аргону); проведення щоденних перевірок на щільність газових трактів.

Таблиця 1. Вміст оксигену (адсорбованого, розчиненого у матриці та зв'язаного у SiO_2), нітрогену, гідрогену в кремнії, мас. %, $\times 10^{-4}$

Кремній	Зразок	RO316		TN114		RH3	
		n^*	оксиген	n^*	нітроген	n^*	гідроген
Полікристалічний	Окислений	39	35,0 ± 5,0	25	2,0 ± 1,0	11	1,4 ± 0,3
	Не окислений	23	22,1 ± 8,0	7	1,9 ± 0,2	7	0,9 ± 0,2
	Легований As	12	32,0 ± 7,0	10	2,0 ± 1,0	—»—	2,8 ± 0,4
	Легований Sb	5	78,0 ± 8,0	5	—»—	5	2,6 ± 0,3
Монокристалічний	1	—»—	13,0 ± 5,0	5	1,0 ± 0,8	6	0,4 ± 0,2
Умови аналізування: температура, °C маса зразка, г тигель графітовий	1800...2000 0,1...0,3 Високотемпературний № 782–720 Стандартний № 776–247 Подвійний № 775–433/431					1500...1650 0,2...0,3 № 796–520	
матеріал ванни, г	Ni — 1,0; Sn — 1,0; Ni — 1,0 + Sn — 0,2; Cu — 1,5					Ni — 1,5 + Sn — 2,0 Ni — 1,5 + Sn — 0,5	
час аналізування, с	40...120					60	
n^* — кількість паралельних визначень.							

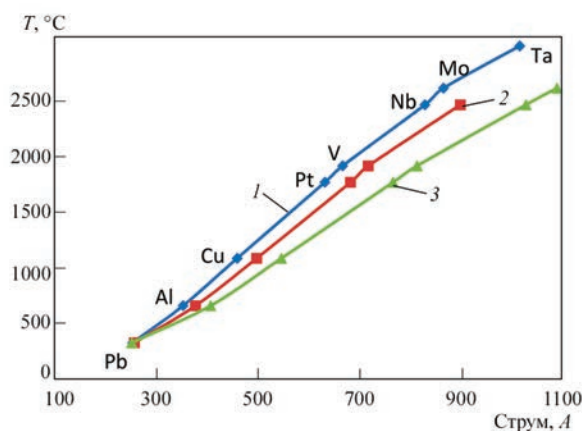


Рис. 1. Калібрування аналізатора TC436 за температурами плавлення металів, °C: Pb — 327, Al — 660, Cu — 1083, Pt — 1770, V — 1917, Nb — 2467, Mo — 2617, Ta — 2996 [25]; 1 — тигель LECO 782-720; 2 — тигель LECO 775-433/431; 3 — тигель LECO 776-247

За рахунок цих дій холості поправки були на таких рівнях: для TC436, RO316, TN114 (окисен, нітроген) — 0,00003...0,00005 мас. %; для RH3, RH402 (гідроген) — 0,000002...0,000003 мас. %.

На аналізаторах RO316, TN114, RH3 були проведені експерименти: вивчено взаємодію графітового тигля з кремнієм і з рідкими металевими ваннами (нікель, мідь, олово); визначено технологічні особливості підготування ванн і зразків кремнію, їхнє завантаження у тигель або шлюз печі; вивчено можливість застосування графітового порошку; обрано оптимальну конструкцію тигля; визначено сумарний вміст оксигену в кремнії (поверхневий, оптично активний і зв'язаний в SiO_2); перевірена можливість аналізування кремнію на вміст гідрогену та нітрогену.

У табл. 1 наведено результати аналізування кремнію на вміст оксигену, нітрогену, гідрогену, отримані на цих приладах. Значний розкид результатів пояснюється усередненням усіх експериментальних даних за різних умов аналізування. Вміст нітрогену в зразках кремнію, який визнача-

ли одночасно з оксигеном, в 4...7 разів вищий за холосту поправку. Вміст гідрогену в зразках кремнію майже в 100 разів вищий за холосту поправку.

На приладах TC436, RH402 визначені основні параметри аналізування (температура, час, застосування графітового порошку, маса аналітичних зразків, активне підготування зразків у тиглі до початку процесу) [24].

Інформація стосовно температур дегазації й аналізування, правильності отриманих результатів мають першорядне значення. Були проведені калібрування аналізаторів TC436, RO316, TN114, RH3, RH402 за стандартними зразками (еталонами) з відомими вмістами оксигену і нітрогену [21, 23] та температурами плавлення чистих металів (Pb, Al, Cu, Pt, V, Nb, Mo, Ta) [25], які у процесі плавлення або не взаємодіють, або слабо реагують з графітовим тиглем (рис. 1).

На аналізаторах TC436, RO316, TN114 було вивчено взаємодію кремнію з подвійним графітовим тиглем за різних умов аналізування (рис. 2). Найкращі результати отримано при використанні варіанту (рис. 2, д) як за визначення вмісту оптично активного (розчиненого) оксигену, так і зв'язаного в SiO_2 . Варіанти (рис. 2, б–г) не можуть бути використані для проведення аналізування, тому що відбувається розтріскування тиглів (рис. 2, б, г), інтенсивне випаровування кремнію, проникнення його через стінки внутрішнього тигля до зовнішнього й конденсації великої кількості пару кремнію у внутрішньому об'ємі печі (рис. 2, в). Варіант (рис. 2, а) наведено як приклад аналізування сталі. Застосування графітового порошку (рис. 2, д) дозволило: ефективно очищати аналітичний зразок кремнію від адсорбованих на його поверхні домішок оксигену і нітрогену (O_2 , CO_2 , H_2O , N_2); запобігти інтенсивному випаровуванню кремнію за температури аналізування 1900...2200 °C; зберегти зовнішній тигель для наступних аналізувань (~50 визначень); використовувати декілька

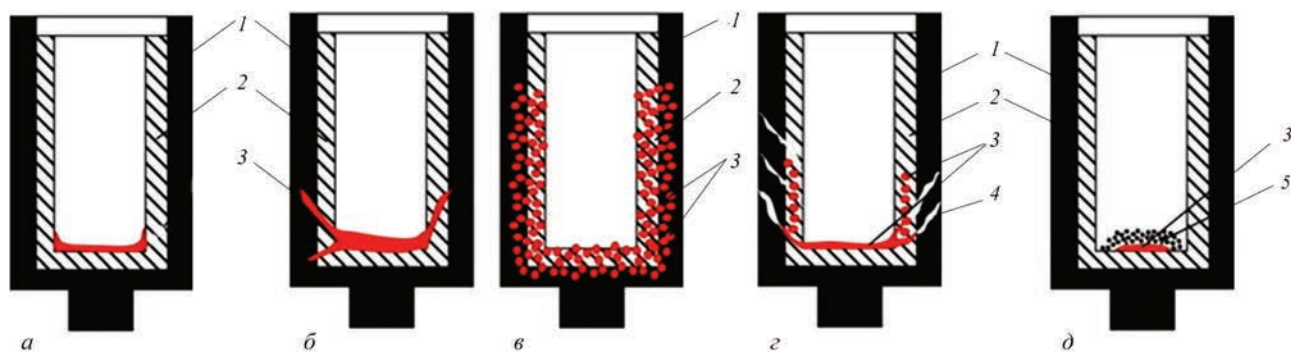


Рис. 2. Схема взаємодії кремнію з подвійним графітовим тиглем за різних умов аналізування: а — сталі без ванни; б — Si у нікелевій ванні ($T_{\text{ан}} \sim 1900$ °C); в — Si без ванни та графітового порошку ($T_{\text{ан}} > T_{\text{пл}} \text{ Si}$); г — Si без ванни та графітового порошку ($T_{\text{ан}} \approx T_{\text{пл}} \text{ Si}$); д — Si без ванни з графітовим порошком ($T_{\text{ан}} \geq T_{\text{пл}} \text{ Si}$); 1 — зовнішній тигель; 2 — внутрішній тигель; 3 — кремній; 4 — тріщини в тиглі; 5 — графітовий порошок

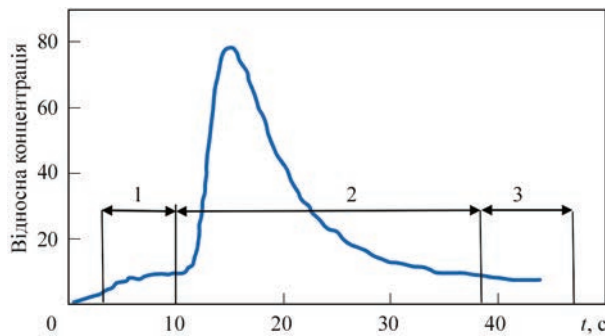


Рис. 3. Характерна крива екстрації оксигену з кремнію: аналізатор ТС436; нікелева ванна (~1,0 г); $T_{ан} = 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$; 1–3 — див. у тексті

раз внутрішній тигель після його очищення від залишків кремнію і графіту та додаткової дегазації.

На рис. 3 представлено характерну криву екстрації оксигену з кремнію за його аналізування в нікелевій ванні (прилад ТС436) за температури 2000 °С. Область 1 — це вміст поверхневого і частково розчиненого (оптично активного) оксигену в кремнії; область 2 — вміст оксигену, розчиненого і зв’язаного в SiO_2 ; область 3 — хвіст, який тягнеться до закінчення аналізування через інтенсивне випаровування кремнію, нікелю, олова та взаємодію металевих випарувань з внутрішніми порожнинами печі. Використання рідкометалевих ванн для аналізу кремнію на вміст оксигену не дозволяє вирішити поставлене завдання через утворення великої кількості металевого пилу, неможливість окремо визначити концентрації оптично активного та зв’язаного в SiO_2 . З точки зору технології аналізування кремнію на вміст оксигену та нітрогену оптимальним представляється використання подвійних тиглів (775-433 і 775-431) та графітового порошку (рис. 2).

Для проведення основних експериментів було відібрано 9 проб монокристалічного кремнію. Хімічний склад цих проб визначали методом оптичної емісійної спектроскопії з індуктивно пов’язаною плазмою на приладі ICP-OES ICAP 6500 DUO фірми «Thermo Fisher». Проби 1–7 леговано арсеном (As 0,00327 мас. %), 8, 9 — антимоном (Sb 0,01171 мас. %) (табл. 2).

На аналітичному зразку 7 (табл. 3) були визначені найкращі умови аналізування: дегазація подвійного тигля за $T = 2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ з графітовим по-

Таблиця 3. Аналізування монокристалічного кремнію на вміст розчиненого та зв’язаного в SiO_2 оксигену

Зразок	Вміст оксигену, мас. %, $\times 10^{-4}$	n^*	Температура аналізу, $^{\circ}\text{C}$
Стандарт ДСЗУ (CRM) 083.24-2008, оксиген — (9 ± 1) мас. %, $\times 10^{-4}$	9 ± 1	10	2000
Стандарт LECO 501-550, оксиген — (22 ± 2) мас. %, $\times 10^{-4}$	22 ± 2	11	—»—
Стандарт LECO 502-197, оксиген — (14 ± 2) мас. %, $\times 10^{-4}$	14 ± 2	9	—»—
1	$5,2 \pm 0,5$	5	1420
	$11,7 \pm 1,2$	4	2000
2	$3,5 \pm 0,4$	7	1420
	$10,3 \pm 1,2$	4	2000
3	$7,7 \pm 1,4$	7	1420
	$17,2 \pm 3,1$	5	2000
4	$4,9 \pm 0,5$	4	1420
	$12,3 \pm 0,2$	6	2000
5	$10,2 \pm 0,7$	—»—	1420
	$24,4 \pm 2,2$	8	2000
6	$9,5 \pm 0,6$	5	1420
	$27,4 \pm 8,3$	7	2000
7	$11,1 \pm 3,4$	15	1420
	$39,9 \pm 11,6$	20	1900...2200
8	$3,3 \pm 0,4$	5	1420
	$10,4 \pm 1,7$	4	2000
9	$3,6 \pm 0,7$	—»—	1420
	$8,7 \pm 0,7$	—»—	2000

* — кількість паралельних визначень.

рошком у внутрішньому тиглі; попереднє активне підготування аналітичного зразка кремнію в тиглі перед аналізуванням ($T \approx 800\text{ }^{\circ}\text{C}$; ~15 с) [24]; визначення вмісту розчиненого (оптично активного) оксигену в кремнії ($T_{ан} \approx 1420\text{ }^{\circ}\text{C}$); визначення вмісту оксигену, зв’язаного в SiO_2 ($T_{ан} \approx 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$); маса аналітичного зразка кремнію 0,2...0,3 г.

У табл. 3 наведено результати аналізування кремнію на вміст оксигену. Контроль правильності отриманих результатів на вміст оксигену розчиненого (оптично активного) і зв’язаного в SiO_2 провели, аналізуючи стандартні зразки.

Таблиця 2. Хімічний склад монокристалічного кремнію, мас. %, $\times 10^{-4}$

Зразок	Ag, Be, Cd, Co, Ga, Hf, Hg, In, Li, Mn, Nb, Pd, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Tl, V, W	B, Ba, Cu, Mo, Ni, Zn, Cr, Na	Sb	As	Al	Bi	Ca	Fe	K	Mg	P	S	Ti	Zr
1–7	< 0,1	0,1	<0,1	32,7	0,4	0,2	0,3	0,8	0,2	0,2	0,5	1,0	0,3	0,2
8, 9			117,1	0,2	0,3	0,1	1,0	1,0	0,1	0,1	<0,1	0,7	<0,1	0,1

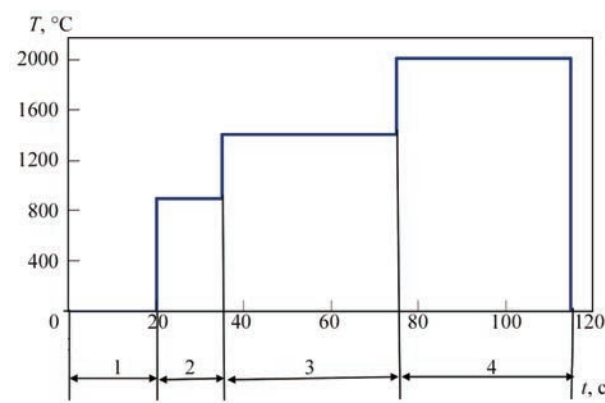


Рис. 4. Циклограма аналізування кремнію на вміст оксигену: 1 — продування зразка в тиглі без нагрівання (≈ 20 с); 2 — активне підготування аналітичного зразка (≈ 800 °С, 15 с); 3 — визначення вмісту розчиненого (оптично активного) оксигену (≈ 1420 °С, 40 с); 4 — визначення вмісту оксигену, зв’язаного в оксид кремнію (≈ 2000 °С, 40 с)

Розроблено методику послідовного визначення вмісту оксигену в кремнії. В аналітичному зразку кремнію спочатку визначали вміст розчиненого оксигену, а потім — зв’язаного в SiO_2 . На рис. 4 наведено циклограму такого аналізування, а на рис. 5 — криву екстракції оксигену з кремнію.

У табл. 4 наведено результати порівняння вмісту розчиненого оксигену в кремнії, визначеного різними методами. Зразок 5 проаналізовано трьома методами: відновлювального плавлення, лазерної екстракції та ІЧ спектроскопії. Спостерігається хороша порівнянність результатів. Зразки 8 і 9 не можна було проаналізувати на ІЧ спектрометрі. Значення питомого електроопору (ПЕО) у зразках 8, 9 складають приблизно $0,01$ Ом·см. У зразках кремнію з ПЕО, меншим за $0,04$ Ом·см, неможливо виміряти кількість оксигену методом ІЧ спектроскопії [14, 16].

Розроблений метод визначення вмісту оксигену у кремнії має певні переваги порівняно з ІЧ спектроскопією.

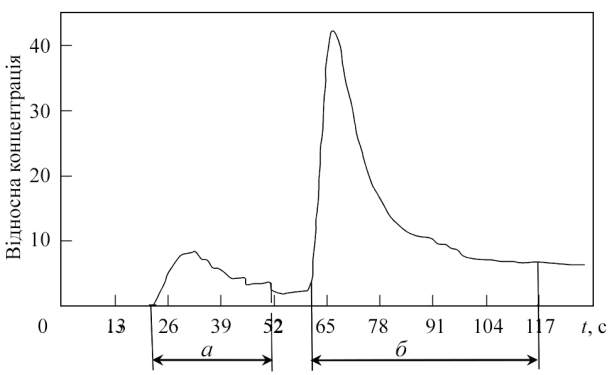


Рис. 5. Аналізування кремнію (зразок 9, табл. 3) на вміст оксигену: 1 — оптично активного (розчиненого в матриці), $T_{\text{ан}} \approx 1420$ °С, оксиген — $0,00043$ мас. %; 2 — зв’язаного в оксид кремнію, $T_{\text{ан}} \approx 2000$ °С, оксиген — $0,00088$ мас. %

Пробопідготування. Для ІЧ спектроскопії необхідно виготовити плоскопаралельний полірований зразок розміром приблизно 30×30 мм або діаметром $25 \dots 50$ мм, товщиною $2,0 \pm 0,04$ мм. На виготовлення такого зразка потрібно приблизно $1,5 \dots 2,0$ год. Зливки кремнію необхідно різати [14, 16].

Для методу відновлювального плавлення можна використовувати шматочки кремнію будь-якої форми масою $0,2 \dots 0,3$ г, відібрані (відбиті зубилом, молотком) із будь-якої частини зливка, не розрізаючи його. Час на аналізування разом з травленням, промиванням і сушінням зразка — до 15 хв. Якщо відбирати зразки не з поверхні (їх не треба обробляти), тоді час аналізування скорочується до ~ 5 хв.

Обмеження застосування. ІЧ спектрометрію не можна застосовувати для визначення вмісту: оксигену в зразках кремнію з питомим електроопором, меншим від $0,04$ Ом·см; оксигену, зв’язаного в SiO_2 ; оксигену, адсорбованого поверхнею зразка; гідрогену та нітрогену в кремнії.

Методом відновлювального плавлення можна визначати: вміст оксигену, адсорбованого поверх-

Таблиця 4. Вміст розчиненого оксигену в кремнії, мас. %, $\times 10^{-4}$

Зразок	Відновлювальне плавлення	Лазерна екстракція	ІЧ спектроскопія			
			ASTM F121-70T		SEMJ MF 1188-1107	
			Shimadzu FT IR-840S	Biorad QS-312	Shimadzu FT IR-840S	Biorad QS-312
5	10,2 $\pm$ 0,7	8,1 $\pm$ 0,8	9,3	9,5	11,7	13,3
1	5,2 $\pm$ 0,5	Не визначали	3,6	3,6	5,4	4,8
2	3,5 $\pm$ 0,4		6,6	5,5	5,3	4,8
3	7,7 $\pm$ 1,4		4,8	7,9	5,8	7,0
4	4,9 $\pm$ 0,5		5,4	6,2	5,7	6,1
6	9,5 $\pm$ 0,6		11,6	10,6	10,7	10,0
7	11,1 $\pm$ 3,4		10,5	10,7	12,1	9,9
8	3,3 $\pm$ 0,4	Не визначали				
9	3,6 $\pm$ 0,7					

* — середні з 3...5 паралельних визначень.

нею зразка; вміст кисню, розчиненого (оптично активного) у матриці зразка; вміст кисню, зв'язаного в SiO_2 ; послідовно (кисню розчиненого в матриці + зв'язаного в SiO_2) з одного зразка; вміст гідрогену та нітрогену в кремнії.

Час аналізування. ІЧ спектроскопія — ~ 30 хв.

Метод відновлювального плавлення: визначення вмісту оптично активного кисню — ~ 40 с; визначення вмісту кисню, зв'язаного в SiO_2 — ~ 40 с; послідовне визначення вмісту кисню, розчиненого (оптично активного) та зв'язаного в SiO_2 — ~ 120 с; визначення вмісту нітрогену — ~ 40 с; визначення вмісту гідрогену — ~ 60 с.

Поширеність методів. ІЧ спектроскопія є загальноприйнятим методом для визначення вмісту кисню в кремнії, на який є стандарти фірм-виробників полі- та монокристалічного кремнію.

Метод відновлювального плавлення є загальноприйнятим методом контролю вмістів кисню, нітрогену, гідрогену в металах. Існує багато методик для визначення вмісту цих газів у металах і еталонів з відомими концентраціями цих газів. Цей метод можна рекомендувати як експресний для визначення вмісту кисню в кремнії з наступним, якщо необхідно, контролем на ІЧ спектроскопії.

Висновки

1. Розроблено метод визначення вмісту кисню в полі- та монокристалічному кремнії з використанням відновлювального плавлення зразка, що аналізують, у графітовому тиглі.

2. Цей метод забезпечує: активне підготування аналітичних зразків кремнію в тиглі, щоб ліквідувати вплив на результат забруднень на поверхні аналітичного зразка; визначення вмісту кисню, розчиненого в матриці зразка (оптично активного); визначення вмісту кисню, зв'язаного в оксид SiO_2 ; послідовне визначення в одному аналітичному зразку вмісту кисню, розчиненого в матриці та зв'язаного в SiO_2 .

3. Розроблено методику визначення вмісту гідрогену та нітрогену в кремнії.

Список літератури

- Шаповалов В.А., Шейко И.В., Никитенко Ю.А. и др. (2012) Проблемы получения чистого кремния для солнечной энергетики. *Современная электрометаллургия*, **3**, 48–53.
- Наумов А.В. (2006) Производство фотоэлектрических преобразователей и рынок ремниевых сырья в 2006–2010 гг. *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, **4**, 3–8.
- Березос В.А., Ерохин А.Г. (2009) Рафинирование кремния способом электронно-лучевой плавки. *Современная электрометаллургия*, **3**, 29–31.
- Бабич В.М., Блецкан М.І., Венгер Є.Ф. (1997) *Кисень в монокристалах кремнію*. Київ, Інтерпрес ЛТД.
- Гасик М.І., Гасик М.М. (2011) *Електротермія кремнія*. Дніпропетровськ, НМАУ.
- Шаповалов В.А., Шейко И.В., Никитенко Ю.А. и др. (2012) Индукционная плавка и рафинирование кремния в секционном кристаллизаторе. *Современная электрометаллургия*, **4**, 25–28.
- Червоный И.Ф., Швеце Е.Я., Егоров С.Г. (2006) Плавление кремния при вертикальной индукционной бестигельной зонной плавке. *Современная электрометаллургия*, **3**, 27–29.
- Тетельбаум Д.И., Зорин Е.И., Лисенкова Н.В. (2004) Аномальная растворимость азота в кремнии, сильно легированном бором. *Физика и техника полупроводников*, **38**(7), 808–810.
- Критская Т.В., Шварцман Л.Я. (2012) Эффект влияния азота на свойства кристаллического кремния полупроводниковой чистоты. *Металлург*, **3**, 23–28.
- Жавжаров Е.Л., Критская Т.В., Матюшин В.М., Чашин Ю.М. (2013) Некоторые особенности поведения водорода в кристаллическом кремнии. *Металлургия, Наукові праці Запорізької державної інженерної академії*, **30**(2), 137–145.
- Аснис А.Е., Лесной А.Б., Пискун Н.В. (2011) Рафинирование монокристаллов кремния при выращивании их способом электронно-лучевой бестигельной зонной плавки. *Современная электрометаллургия*, **3**, 17–20.
- Петров С.В. (2013) Плазменный процесс получения солнечного кремния. *Современная электрометаллургия*, **3**, 37–44.
- Лякишев Н.П., Банных О.А., Рыхлин Л.Л. (1996) *Диаграммы состояния двойных металлических систем*. Т. 1. Москва, Машиностроение.
- (2007) SEMI MF 1188-1107: *Test method for interstitial oxygen content of silicon by infrared absorption with short baseline*.
- Ковалев И.Д., Котерва Г.В., Гусев А.В. и др. (2008) Определение примесей кислорода и углерода в поликристаллическом кремнии методом ИК-спектроскопии. *Журнал аналитической химии*, **63**, 274–278.
- (2007) ASTM F 121-70 T: *Method of test for interstitial atomic oxygen content by infrared absorption*.
- Gryse O.De, Vanmeerbeek P., Vanhellemont J., Clauws P. (2006) Infrared analysis of the precipitated oxide phase in silicon and germanium. *J. Physica*, **B 376–377**, 113–116.
- Gryse O.De, Clauws P., Van Landrut J. et al. (2002) Oxide phase determination in silicon using infrared spectroscopy and transmission electron microscopy techniques. *J. Appl. Physics*, **91**(4), 2493–2498.
- Вассерман А.М., Кунин Л.Л., Суrowой Ю.Н. (1976) *Определение газов в металлах*. Москва, Наука.
- Фирсов В.И., Шулепников М.Н. (1988) Современное состояние нейтронно-активационного метода анализа полупроводникового кремния. *Журнал аналитической химии*, **43**(5), 773–785.
- (1991) *Application bulletin*. LECO Corp., Form № 203-601-219, Oxygen in Solid Silicon, Jan.
- Kaiser G., Schubert H. (1993) The determination of oxygen in Si_3N_4 powder. *J. European Ceramic Society*, **11b**, 253–262.
- (2018) *O836 Si, Oxygen in Silicon*. Form № 209-215-008, LECO Corp., 1–18.
- Калинюк О.М., Козін Р.В., Калинюк М.М. та ін. (2023) Активне і пасивне підготування аналітичних зразків металів для визначення в них концентрацій кисню, нітро-

- гену, гідрогену. *Сучасна електromеталургія*, **4**, 54–60. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2023.04.07>
25. Hultgren R., Orr R.I., Anderson P.D., Kelley K.K. (1963) *Selected values of thermodynamic properties of metals and alloys*. John Wiley and Sons, Inc. NY, London.
- ### References
1. Shapovalov, V.A., Sheiko I.V., Nikitenko Yu.A. et al. (2012) Problems in production of puresilicon for solar power engineering. *Advances in Electrometallurgy*, **3**, 211–218.
 2. Naumov, A.V. (2006) Manufacture of photoelectric converters and market of silicon raw materials in 2006–2010. *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, **4**, 3–8 [in Russian].
 3. Berezos, V.A., Erokhin, A.G. (2009) Refining silicon by electron beam melting. *Advances in Electrometallurgy*, **3**, 174–177.
 4. Babych, V.M., Bletskan, N.I., Venger, E.F. (1997) *Oxygen in silicon monocrystals*. Interpress [in Russian].
 5. Gasyk, M.I., Gasyk, M.M. (2011) *Electrothermics of silicon*, Dnipro, NMAU [in Russian].
 6. Shapovalov, V.A., Sheiko, I.V., Nikitenko, Yu.A. et al. (2012) Induction melting and refining of silicon in a sectional solidification mould. *Advances in Electrometallurgy*, **4**, 259–263.
 7. Chervony, I.F., Shvets, E.Ya., Egorov, S.G. (2006) Melting of silicon in vertical induction crucible-free zonal melting. *Advances in Electrometallurgy*, **3**, 24–26.
 8. Tetelbaum, D.I., Zorin, E.I., Lysenkova, N.V. (2004) Anomalous solubility of nitrogen in silicon, highly-alloyed by boron. *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*, **38**(7), 808–810 [in Russian].
 9. Kritskaya, T.V., Shvartsman, L.Y. (2012) Nitrogen effect on properties of crystalline silicon of semiconductor purity. *Metallurg*, **3**, 23–28 [in Russian].
 10. Zhavzharov, E.L., Kritskaya, T.V., Matyushin, V.M., Chashchinov, Yu.M. (2013) Certain particularities of hydrogen behavior in crystalline silicon. *Metallurgiya, Naukovi Pratsi ZDIA*, **30**(2), 137–145 [in Russian].
 11. Asnis, E.A., Lesnoi, A.B., Piskun, N.V. (2011) Refining of silicon single crystals in growth by electron beam crucibleless zonal melting. *Advances in Electrometallurgy*, **3**, 147–151.
 12. Petrov, S.V. (2013) Plasma process of production of “solar grade” silicon. *Advances in Electrometallurgy*, **3**, 210–219.
 13. Lyakishev, N.P., Bannykh, O.A., Rykhlin, L.L. (1996) State diagrams of the binary metallic systems, Vol. 1. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
 14. (2007) SEMI MF 1188-1107: *Test method for interstitial oxygen content of silicon by infrared absorption with short baseline*.
 15. Kovalev, I.D., Koterva, G.V., Gusev, A.V. et al. (2008) Determination of oxygen and carbon impurities in polycrystalline silicon by IR-spectrometry. *Zhurnal Analiticheskoi Khimii*, **63**(3), 274–278 [in Russian].
 16. (2007) ASTM F 121-70T: *Method of test for interstitial atomic oxygen by infrared absorption*.
 17. Gryse, O.De, Vanmeerbeek, P., Vanhellemont, J., Clauws, P. (2006) Infrared analysis of the precipitated oxide phase in silicon and germanium. *J. Physica*, **B376–377**, 113–116.
 18. Gryse, O.De, Clauws, P., Van Landrut J. et al. (2002) Oxide phase determination in silicon using infrared spectroscopy and transmission electron. Microscopy techniques, *J. Appl. Physics*, **91**(4), 2493–2498.
 19. Vasserman, A.M., Kunin, L.L., Surovoj, Y.N. (1976) Determination of gases in metals. Moscow, Nauka [in Russian].
 20. Firsov, V.I., Shulepnicov, M.N. (1988) Modern condition of neutron-activation method analysis of semiconductor silicon, *Zhurnal Analiticheskoi Khimii*, **43**(5), 77–785 [in Russian].
 21. (1991) *Application bulletin*, LECO Corp., form № 203-601-219, Oxygen in solid silicon, January.
 22. Kaiser, G., Schubert, H. (1993) The determination of oxygen in Si₃N₄ powder. *J. European Ceramic Soc.*, **11** b, 253–262.
 23. (2018) *O836 Si, Oxygen in silicon*, Form № 209-215-008, LECO Corp., 1–18.
 24. Kalinyuk, M.M., Kozin, R.V., Kalyniuk, M.M. et al. (2023) Active and passive preparation of analytical samples of metals for determination of oxygen, nitrogen, hydrogen concentrations in them. *Suchasna Elektrometal.*, **4**, 54–60 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2023.04.07>
 25. Hultgren, R., Orr, R.I., Anderson, P.D., Kelley, K.K. (1963) *Selected values of thermodynamic properties of metals and alloys*. John Wiley and Sons, Inc., NY, London.

ANALYZING SILICON FOR THE CONTENT OF OXYGEN, NITROGEN AND HYDROGEN IMPURITIES

R.V. Kozin, O.M. Kalinyuk, A.M. Kibkalo, M.M. Kalinyuk, O.L. Puzrin
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: kozinrv@gmail.com

Literature review of the new methods of producing polycrystalline and monocrystalline silicon by electron beam and plasma melting developed during the last 10–15 years is presented. A review of publications on determination of oxygen, nitrogen, and hydrogen contents in silicon is given. Express procedures for determination of oxygen content in silicon by reducing melting in a graphite crucible in a flow of helium have been developed, and comparison of these procedures with infrared spectrometry is given. Procedures for determination of hydrogen and nitrogen content in silicon have been developed. 25 Ref., 4 Tabl., 5 Fig.

Keywords: *analysis, silicon, oxygen, nitrogen, hydrogen*

Отримано 04.12.2023

Отримано у переглянутому вигляді 18.12.2023

Прийнято 19.02.2024

СТВОРЕННЯ НАУКОВИХ ОСНОВ МЕТАЛУРГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

У першій половині XX століття зварювання у виробництві металоконструкцій витісняє традиційні перевірені способи з'єднань — болтові, клепані та ін. Проте якість зварних з'єднань викликає недовіру будівельників споруд, що піддаються динамічним навантаженням. У 1935 р. американське зварювальне товариство визначило проблеми, що підлягають вирішенню: фізичні (механічні) властивості сполук; металургійні основи зварювання; фізичні та хімічні процеси при зварюванні. Аналогічні завдання поставили вчені Німеччини, Великобританії та інших країн.

У 1929 р. Є.О. Патон зацікавився будівництвом зварного мосту та за кілька років спроектував раціональні зварні конструкції, досліджував їхню працездатність та розробив методи розрахунку. З 1935 р. ще одним завданням стало забезпечення міцності зварних з'єднань і експлуатаційної надійності зварних просторових конструкцій. Є.О. Патон організував в ІЕЗ технологічний відділ під керівництвом Дятлова В.І., досвідченого металурга, який розпочав вивчення металургійних особливостей процесів зварювання. На першому етапі було визначено вплив режиму зварювання на склад та якість металу шва. В.І. Дятловим та І.І. Фрум'їним були створені покриття електродів для високоякісного ручного дугового зварювання змінним струмом нержавіючих сталей, засновані на двоокису титану (рис. 1).

У 1935 р. фірма «Linde» запатентувала спосіб високопродуктивного та високоякісного зварювання під флюсом (Л.Т. Джонсон, Г.Е. Кеннеді та М.А. Роттермунд). Створенням автоматичного зварювання під шаром флюсу зайнялися у низці НДІ та вищих навчальних закладах СРСР. Є.О. Патон поставив таке завдання перед технологічним (В.І. Дятлов) та конструкторським (П.П. Буштетт) відділами ІЕЗ.



Рис. 1. Атомно-водневе зварювання в ІЕЗ

У 1937 р. у Бельгії через канал Альберта збудували кілька зварних мостів. Їх широко розрекламували як визначне досягнення техніки. А зимовим ранком 1938 р. зварні з'єднання тріснули і прольоти мостів впали (рис. 2). Незабаром зруйнувалися й зварні мости у Німеччині.

Фахівці низки країн, поряд з емпіричним підходом до проблеми якості металу швів, намагалися розрахувати процеси взаємодії кисню та азоту повітря з компонентами зварювальних матеріалів та елементами сплавів, що зварюються. Але підхід із позицій загальних закономірностей металургії сталеплавильного виробництва не забезпечував адекватних результатів. В.І. Дятлов почав розглядати зварювальні процеси як металургійні, але такі, що протікають за секунди у зварювальній ванні малого обсягу при великих градієнтах температур. Враховуючи цю особливість, для розрахунку взаємодії компонентів флюсу, електродів та складу зварюваного металу в системі газ–рідина, він застосував теорію правила фаз зі статистичної термодинаміки та кристалографії американського фізика академіка Дж. У. Гіббса (монографія з фізичної хімії Josiah Willard Gibbs «On the Equilibrium of Heterogeneous Substances»). При цьому В.І. Дятлов припускав те, що температура зварювальної ванни та питома теплоємність металу в ній є функцією теплофізичних властивостей компонентів сплаву.

В ІЕЗ було досліджено мікроструктуру та хімічний склад металу шва. Встановлено, що виділення газу зі шлакового розплаву підвищує ефективність захисту розплавленого металу від контакту з атмосферою, а умови кристалізації зварювальної



Рис. 2. Руйнування зварного моста через канал Альберта (1938)



Рис. 3. Доповідь В.І. Дятлова у КПІ (1936 р.)

ванні дуже впливають на кінцевий вміст газів у металі. Сформувалися знання про термодинаміку процесів плавлення електродного та основного металів, взаємодію металу з газами та шлаками, кінетику реакцій окислення та відновлення, про основні стадії кристалізації.

У 1936 р. В.І. Дятлов почав викладати курс «Металургійні засади зварювання» на зварювальному факультеті Київського політехнічного інституту. Його доповіді були цікаві як початківцям, так і досвідченим спеціалістам (рис. 3).

До кінця 1939 р. в ІЕЗ був розроблений плавний флюс (АН-1) для автоматичного зварювання конструкційних сталей плавким електродом (сталевим кремнемарганцевим дротом). Випробування на міцність (у тому числі й за періодичних динамічних навантажень) довели можливість застосування цієї технології в машинобудуванні та будівництві відповідальних сталевих конструкцій та Є.О. Патон розпочав проєктування зварного мосту через Дніпро. У червні 1940 р. учасникам першої Всесоюдної конференції з автоматичного зварювання було продемонстровано зварювання листів конструкційної сталі товщиною понад 10 мм зі швидкістю 30 м/год. Якість з'єднання автоматичним зварюванням відповідало всім вимогам. Стандартне випробування зразка показало максимальний кут загину (рис. 4).



Рис. 4. Є.О. Патон демонструє випробуваний зразок (1940 р.)

Флюс АН-1 був виплавлений на Костянтинівському скляному заводі (Донбас) і відправлений на 20 провідних машинобудівних заводів країни. Після вторгнення Німеччини в СРСР ІЕЗ та Харківський танковий завод було евакуйовано до Нижнього Тагілу, де співробітник інституту В.І. Дятлов та інженер харківського заводу Б.О. Іванов розробили спосіб автоматичного зварювання броньових сталей (Спосіб дугового автоматичного зварювання під шаром флюсу. Авторське свідоцтво СРСР № 64057, заявлено 29.05.42). Продуктивність зварювання збільшилася у 10 разів.

Наприкінці 1944 р. броньові конструкції зварювали під флюсом АН-1 на 52 заводах країни. Цю небачену раніше техніку називали «Автомат Патона». Керівництво оцінило заслуги Євгена Оскаровича наданням йому звання Героя Соціалістичної Праці.

Коли запас флюсу АН-1 (в евакуації) закінчувався В.І. Дятлов розробив новий склад флюсу з урахуванням місцевих уральських мінералів. Однак налагодити масове виробництво флюсу АН-2 не було можливості. Тоді В.І. Дятлов дослідив доменний шлак і запропонував доповнити шлак Ашинської домни феромарганцем. Шлак АШМА був універсальним, придатним і для конструкційних сталей, і використовувався до 1947 року.

«Зварювання псує метал!» — з цією оцінкою металургів та інших опонентів змушені були погоджуватися і прихильники застосування зварювання.

В ІЕЗ при розробці автоматичного зварювання під флюсом броньових сталей великої товщини серед безлічі проблем, які довелося подолати, основною була проблема тріщин. У лютому 1942 р. В.І. Дятлов та Б.А. Іванов знайшли рішення. У стик між кромками помістили низьковуглецеву присадку (дріт, прутки). Таким чином, у металі шва та в зоні сплавлення зменшився вміст легуючих елементів. Водночас у США при будівництві цільнозварних океанських вантажних суден (проєкт «Liberty») і танкерів зі звичайної конструкційної сталі виникали тріщини, а деякі з суден взагалі розкололися. Не забували й про мости, що впали в Бельгії та Німеччині.

Завдання поліпшення технологій електро- і газового зварювання залишалося єдиним до тих пір, поки не звернули увагу на властивості основного матеріалу, що зварюється. Ще у 1940 р. Дж. Дірден і Г.О. Нейл запропонували використати вуглецевий еквівалент для кількісної оцінки зварюваності сталей. Формула являла собою суму часток кожного компонента сталі. По суті це був перший

крок на шляху створення вимог до металургів, які виплавляли сталь для зварних виробів.

З низки припущень про причини виникнення холодних тріщин найбільше визнання набула воднева гіпотеза. У 1944 р. Г. Хопкін (США) повідомив, що атомарний водень, дифундуючи зі шва в зону термічного впливу, з'єднується в молекули, об'єм яких значно перевищує об'єм атома водню, що призводить до розриву металу. Тому, проблему забезпечення міцності шва рівної міцності основного металу вивчали та вирішували десятки вчених і інженерів. Розгорнулися дослідження та дискусії, у провідних журналах світу публікували гіпотези і результати досліджень. Щоб не залежати від редакції всесоюзного журналу «Автогенна справа», Є.О. Патон випускає збірки праць, а в 1948 р. з'являється власний журнал «Автоматичне зварювання».

У 1945 р. Є.О. Патон розгорнув цілеспрямовані фундаментальні дослідження актуальних проблем зварювання. Результати досліджень показали, що при зварюванні сталей утворенню тріщин сприяє підвищений вміст вуглецю (Д.М. Рабкін, І.І. Фрумін), збільшення концентрації елементів, що викликають утворення евтектичних прошарків, спочатку збільшує схильність металу шва до гарячих тріщин, а потім зменшує її (Б.І. Медовар), а утворенню пор сприяють водень і азот (І.В. Кірдо, В.В. Підгаєцький, І.І. Фрумін).

Результати досліджень сплавів заліза виявилися застосовними і до алюмінієвих сплавів. Д.М. Рабкін встановив, що термін служби обладнання для одержання азотної кислоти з алюмінію високої чистоти, звареної «чистими» дротами СвА97 і СвА99, у 4...5 разів більший у порівнянні з обладнанням, виготовленим з технічного алюмінію АД00, АД000. Ця особливість була врахована у ракетобудуванні. Заготовки паливних баків з високоміцних легованих алюмінієвих сплавів плакували шаром чистого алюмінію товщиною до 1 мм.

Однією із задач було визначення вимог до металу для зварних виробів, впливу способів виробництва сталей та їх хімічного складу на зварюваність. Є.О. Патон звернув увагу на негативний вплив на якість зварювання сульфідних включень. В результаті досліджень встановили, що чутливість сталі до зварювального нагрівання залежить від її хімічного складу, способу розкислення при плавлі та розмірів зерна під час прокатування або кування. За цих операцій майбутні дефекти витягувалися у вигляді рядків і злипалися. А при зварювальному нагріванні в зоні термічного впливу вони розшаровувалися, через що й утворювалися тріщини. В ІЕЗ вирішили, що при виплавці сталі

необхідно вводити кремній та алюміній, які «заберуть» кисень та оксиди, а прокатувати необхідно за оптимальної температури. Так були визначені науково обґрунтовані вимоги до металургів — необхідність кращого розкислення сталі та покращення її структури. Удосконалення технологій великої металургії дозволяло гарантувати службові властивості зварних конструкцій.

Додаткові дослідження та виробничі випробування сталей відбувалися на Жданівському заводі ім. Ілліча (м. Маріуполь). Була розроблена сталь із вмістом марганцю до 1,8 % та кремнію близько 0,40 % з межею плинності 320 МПа та тимчасовим опором розриву 500 МПа (марка 09Г2). Сталь мала гарну зварюваність. Незабаром в ІЕЗ ім. Є.О. Патона було створено мостову сталь підвищеної холодостійкості — М16С.

Під час Другої світової війни у СРСР кораблі не будували. Багато обладнання суднобудівних заводів було перевезено на інші оборонні заводи. Вже в 1944 р. почали відновлювати верфі в Ленінграді, Миколаєві, Києві, Херсоні.

Співробітниками ІЕЗ та Жданівського заводу ім. Ілліча були розроблені спеціальні корабельні броньові сталі, що добре зварюються і володіють стабільністю у вологій морській атмосфері. У 1948 р. Є.О. Патон створив спеціальну лабораторію, яку очолив О.М. Макара (рис. 5). Незабаром вона переросла у відділ зварювання високоміцних середньолегованих сталей у судно-, танко-, авіа- та ракетобудуванні.

21 грудня 1948 р. на заводі № 444 у Миколаєві було закладено крейсер проєкту 68 біс. У проєкті броньовані плити були повністю включені в силову схему корпусу та систему несучих корабельних конструкцій. Проте невдовзі у зварних з'єднаннях з'явилися тріщини. Виявилося, що склад і технологія виготовлення сталі на ленінградському заводі не відповідають вимогам, які розробили зварники. Нову низьколеговану сталь, що зварюється (межа



Рис. 5. Є.О. Патона разом із керівником відділу середньолегованих сталей А.М. Макарою



Рис. 6. Прогонні будови мосту через Дніпро у Києві в період будівництва



Рис. 7. Міст через річку Смотрич у м. Кам'янець-Подільський

плинності 40 кгс/мм²), виплавили і прокатили в Маріуполі і крейсер був закладений вдруге.

Через 10 років у Миколаєві збудовано крейсер нового проєкту з авіаційною зброєю «Тбілісі». Ще через 2 роки — кораблі «Мінськ» та «Новоросійськ». 25 листопада 1988 р. на стапелі «0» Чорноморського суднобудівного заводу закладено важкий атомний авіаносний крейсер (проєкт 1143.7, шифр «Кречет»), який мав стати першим повноцінним атомним авіаносцем. Заводи у Миколаєві були полігоном у випробуванні передових технологій ІЕЗ ім. Є.О. Патона, успішно конкурували у створенні військових судів із найпотужнішою корпорацією США «Northrop Grumman Newport News».

У 1953 р. зі сталі М16С був побудований суцільнозварний автодорожній міст через Дніпро у Києві (рис. 6). З холодостійкої високоміцної сталі 14Х2ГМР класу С70/60 збудовано автодорожній міст через річку Смотрич у Кам'янці-Подільському (рис. 7).

В ІЕЗ було створено високопродуктивне обладнання та технології автоматичного зварювання корабельних конструкцій. Роботи ІЕЗ дозволили ор-

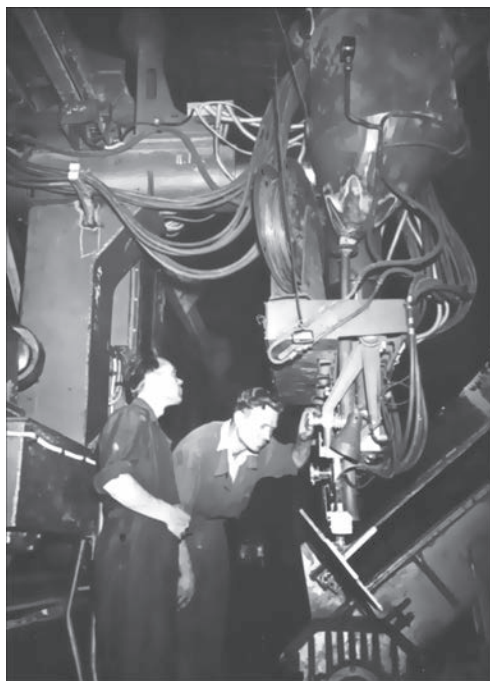


Рис. 8. Устаткування для автоматичного зварювання корабельних конструкцій



Рис. 9. Крейсер серії 68 біс

ганізувати виробництво суден на потокових лініях, застосувати конвеєрне складання і швидкісний блоковий монтаж з високим ступенем механізації та автоматизації технологічних операцій (рис. 8). За 10 років на 4-х заводах СРСР було побудовано 23 крейсери проєкту 68 біс. Патонівська сталь довела свою високу якість і більше ні в процесі будівництва, ні при експлуатації кораблів дефектів не відзначалося (рис. 9).

Досвід виробництва та багаторічна експлуатація відповідальних зварних конструкцій довели, що під час виробництва сталі необхідно враховувати вимоги зварників. На державному рівні було затверджено відповідні технічні умови та стандарти. Так особливості металургії зварювання почали удосконалювати металургію виробництва сталі та чавуну.

Д-р іст. наук О. Корнієнко