

ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ

№ 4
2021

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, В.А. Костін, І.В. Кривцун,

Л.Б. Медовар, Г.П. Стовпченко, А.І. Устінов,

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,

П.І. Лобода, НТУУ

«КПІ ім. Ігоря Сікорського», м. Київ,

О.В. Овчинников, ЗНТУ, м. Запоріжжя,

С.Я. Шипицин, ФТІМС НАНУ, 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

Адреса

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ,

03150, Україна, Київ,

вул. Казимира Малевича, 11

Тел./факс: (38044) 200 82 77, 205 22 07

E-mail: journal@paton.kiev.ua

www.patonpublishinghouse.com

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 2022

Передплатний індекс 70693

4 випуски на рік (видається щоквартально)

Друкована версія: 960 грн. за річний комплект

з урахуванням доставки

рекомендованою бандероллю.

Електронна версія: 960 грн. за річний комплект

ЗМІСТ

Відкриття меморіальної дошки-горельєфу академіку Б.Є. Патону 3

Історія розвитку технологій зварювання
на АТ «СМНВО – Інжиніринг» 5

ЕЛЕКТРОШЛАКОВА ТЕХНОЛОГІЯ

*Біктагіров Ф.К., Веретільник О.В., Шаповалов В.О., Гнатушенко О.В.,
Ігнатов А.П., Барабаш В.В.* Порівняльні показники різних способів
переробки стружки високолегованих сталей і сплавів 11

Нетяга А.В., Кусков Ю.М., Проскурін В.М., Жданов В.А., Лентюгов І.П.
Формування шару високохромистого чавуну при електрошлаковому
наплавленні в струмопідвідному кристалізаторі квадратного
перерізу 16

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВІ ПРОЦЕСИ

*Ахонін С.В., Северин А.Ю., Березос В.О., Пікулін О.М.,
Крижановський В.А., Єрохін О.Г.* Дослідження якості деформованих
напівфабрикатів титанового сплаву ВТ9, отриманого способом
електронно-променевої плавки 20

Березос В.О. Виробництво зливків високоміцних конструкційних
сплавів на основі титану способом електронно-променевої плавки 25

ПЛАЗМОВО-ДУГОВА ТЕХНОЛОГІЯ

Бурнашев В.Р., Никитенко Ю.О., Барабаш В.В., Шаповалов В.О.
Перепплав відходів титану та титанових сплавів в умовах плазмово-
дугової плавки 32

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Лисенко Н.О., Педаш О.О., Клочихін В.В., Касай П.О. Вплив тривалих
витримок на структуру і властивості зразків зі сплаву IN625,
виготовлених методом селективного лазерного плавлення 38

Гречанюк М.І., Гречанюк В.Г., Гречанюк І.М., Чорновол В.О. Структура і
корозійні властивості композиційних матеріалів на основі міді
та вольфраму, отриманих способом високошвидкісного випаро-
вування-конденсації 45

*Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Селін Р.В., Вржижевський Е.Л.,
Петриченко І.К., Антонюк С.Л.* Вплив термічної обробки на структуру
та властивості зварних з'єднань високоміцних титанових сплавів
на основі β-фази 51

ІНФОРМАЦІЯ

Ахоніну С.В. — 60! 59

XX Міжнародний промисловий форум 61

EDITORIAL BOARD

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

S.V. Akhonin (Editor in Chief),

V.O. Berezos, 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,

P.I. Loboda, NTUU «Igor Sykorsky

Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv,

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

S.Ya. Shpytsyn, Physico-Technological
Institute of Metals and Alloys, Kyiv

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. Snegiryeva

Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU,
03150, Ukraine, Kyiv,
11 Kasymyr Malevych Str.
Tel./Fax: (38044) 200 82 77, 205 22 07
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com

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 2022

Subscription index 70693

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

\$72, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.

\$60, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).

CONTENTS

Opening of a memorial plaque-high relief to academician B.E. Paton 3

History of development of welding technologies

at JSC «Sumy Machine-Building Science-and-Production

Association–Engineering» 5

ELECTROSLAG TECHNOLOGY

Biktagirov F.K., Veretilnyk O.V., Shapovalov V.O., Hnatushenko O.V.,

Ignatov A.P., Barabash V.V. Comparative indices of different methods of
processing shavings of high-alloyed steels and alloys 11

Netyaga A.V., Kuskov Yu.M., Proskudin V.M., Zhdanov V.A.,

Lentyugov I.P. Formation of a layer of high-chromium cast iron in current-
conducting mould of a square cross-section at electros slag surfacing 16

ELECTRON BEAM PROCESSES

Akhonin S.V., Severin A.Yu., Berezos V.O., Pikulin O.M.,

Kryzhanovskiy V.A., Yerokhin O.G. Investigations of the quality of wrought
semi-finished products of VT9 titanium alloy produced by electron beam
melting 20

Berezos V.O. Production of ingots from high-strength structural

titanium-base alloys by electron beam melting 25

PLASMA-ARC TECHNOLOGY

Burnashev V.R., Nykytenko Yu.O., Barabash V.V., Shapovalov V.O.

Remelting wastes of titanium and titanium alloys under the conditions of
plasma-arc melting 32

MATERIALS SCIENCE

Lysenko N.O., Pedash O.O., Klochykhin V.V., Kasai P.O. Influence of
long-term soaking on the structure and properties of IN625 alloy samples
made by selective laser melting 38

Grechanyuk M.I., Grechanyuk V.G., Grechanyuk I.M., Chornovol V.O.

Structure and corrosion properties of copper- and tungsten-based composite
materials, produced by high-rate evaporation-condensation 45

Akhonin S.V., Bilous V.Yu., Selin R.V., Vrzhyzhevskiy E.L., Petrychenko I.K.,

Antonyuk S.L. Influence of heat treatment on the structure and properties
of welded joints of high-strength titanium alloys based on β -phase 51

INFORMATION

Akhonin S.V. is 60! 59

Industrial forum – 2021 61

ВІДКРИТТЯ МЕМОРІАЛЬНОЇ ДОШКИ-ГОРЕЛЬЄФУ АКАДЕМІКУ Б.Є. ПАТОНУ

11 листопада 2021 р. в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України відбулося урочисте відкриття меморіальної дошки-горельєфу директору інституту, президенту Національної академії наук України академіку Б.Є. Патону. На мітингу з нагоди цієї події були присутні співробітники ІЕЗ, Національної академії наук України, підприємств Києва, представники преси. Відкрив мітинг директор ІЕЗ академік НАН України І.В. Кривцун.

У своїй промові І.В. Кривцун зазначив, що Борис Євгенович Патон – видатний український вчений в області зварювання, металургії та технології матеріалів, матеріалознавства, видатний громадський діяч і талановитий організатор науки. Разом зі своїм батьком Євгеном Оскаровичем Патоном він створив всесвітньо відому патонівську наукову школу. Світовий авторитет Б.Є. Патону принесли різнобічна та надзвичайно плідна наукова та інженерна діяльність, прагнення направити фундаментальні наукові дослідження на вирішення проблем суспільства.

Він глибоко розумів роль науки у суспільстві, її цілі та задачі, вдало поєднував активну наукову

і суспільно-політичну діяльність. Під його керівництвом українська наука набула нового потужного імпульсу у своєму розвитку. Після розпаду Радянського Союзу і утворення незалежної України за умов гострої економічної кризи Борис Євгенович зміг зберегти академію, її основні наукові школи, принципи академічного самоуправління, здійснити перебудову структури академії відповідно до нових умов, спрямувати фундаментальні та прикладні дослідження на розв'язання нагальних задач будівництва молодії держави.

Борис Євгенович був не тільки видатним вченим і організатором науки, а й прекрасним педагогом, вчителем з великої літери. Він виховав цілу плеяду вчених в галузі зварювання, металургії, матеріалознавства. Борис Євгенович завжди був демократичним, доброзичливим, відкритим до спілкування, готовим допомогти у вирішенні не тільки наукових, а й нагальних соціальних, життєвих проблем співробітників інституту і академії.





Борис Євгенович Патон був справжнім лідером, творчою особистістю, глибоко порядною та доброю людиною, яка мала фантастичну енергію і працездатність, глибокі знання в багатьох галузях. У нього була широка натура, гострий аналітичний розум, чудове почуття гумору. Світла пам'ять про цю видатну людину, талановитого вченого, організатора науки і громадського діяча назавжди залишиться в наших серцях.

Президент академії наук України, академік А.Г. Загородній відзначив, що відкриття пам'ятного горельєфу Б.Є. Патону є важливою подією. Він був видатним вченим та інженером, видатним організатором української науки. Б.Є. Патон мав в житті дві найважливіші справи – НАН України та ІЕЗ, про яких дбав, як про рідних дітей. За часи його керівництва українська наука плідно

розвивалася, відкривалися нові інститути, виникали нові наукові напрямки досліджень. Є наука фундаментальна та прикладна, але Б.Є. Патон є яскравим прикладом того, як можна, розвиваючи цілеспрямовані фундаментальні дослідження, поєднувати ці напрями. За часів його керівництва ІЕЗ здобув світову славу передового центру науки. Відкритий сьогодні горельєф продовжить життя Б.Є. Патона в наших серцях.

Теплими словами про Бориса Євгеновича поділились також заступники директора ІЕЗ академік Л.М. Лобанов, чл.-кор. В.О. Шаповалов, завідувач відділу ІЕЗ академік К.А. Ющенко, директор Інституту проблем реєстрації інформації академік В.В. Петров та голова Комісії НАН України з питань увічнення пам'яті академіка Бориса Євгеновича Патона академік А.Г. Наумовець.

На завершення мітингу І.В. Кривцун подякував всіх присутніх та наголосив, що пам'ять про Б.Є. Патона навіки залишиться в наших серцях і кращою запорукою цьому буде плідна праця в сучасній науці за прикладом видатного вченого.

Автор дошки-горельєфу – відомий скульптор, член спілки художників України В.Г. Корень. Бронзова дошка-горельєф виконана у класичному академічному стилі традиційного портретного жанру. Інсталяція у вигляді зварювального спалаху символізує зародження нових ідей, яких у Б.Є. Патона було чимало. Горельєф створено за рахунок добровільних внесків співробітників ІЕЗ ім. Є.О. Патона.

Редакція журналу



ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ЗВАРЮВАННЯ НА АТ «СМНВО – ІНЖИНІРИНГ»

Історія розвитку Акціонерного товариства «Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання – Інжиніринг» почалася з 28 листопада (за новим стилем) 1896 р. Указом Його Імператорської Величності про затвердження умов діяльності Бельгійського акціонерного товариства «Сумські машинобудівні майстерні». Його засновниками були, окрім закордонних акціонерів, сумські промисловці: П.І. Харитоненко, М.О. Суханов, Л. Кенінг, А. Гебіндер та ін.

У перші роки становлення підприємства для забезпечення виробничого процесу були задіяні європейські фахівці високої кваліфікації, насамперед, із Кайзерівської Німеччини.

З 1912 р. підприємство змінює назву на Анонімне товариство «Сумські машинобудівні заводи», а з початком Першої світової війни, коли багато іноземних фахівців прийняли російське підданство, виробничий колектив почав поповнюватися вітчизняними фахівцями.

Після закінчення Громадянської війни заводу було передано найбільш передові європейські технології в машинобудуванні і вже у 1926 р. завод випускав 4,2 % усієї продукції машинобудування Радянської України. На честь 10-річчя Червоної армії завод був перейменований на Сумський машинобудівний завод ім. М.В. Фрунзе.

У 1929 р. відбулася знаменна подія – вперше на промисловому підприємстві Радянського Союзу була запалена зварювальна дуга, що відкрила еру електродугового зварювання в радянській промисловості. Як і будь-яка інноваційна технологія, електродугове зварювання зіткнулося з багатьма проблемами під час її впровадження. Відсутність стандартів у підготовці фахівців, недосконале обладнання, відсутність якісних зварювальних матеріалів та відпрацьованих параметрів зварювання створювали великі труднощі на шляху впровадження нової технології. Всі вони з часом були подолані і на підприємстві розпочала роботу зварювальна ділянка з лабораторіями, що дозволило освоїти випуск нового складного обладнання.

З 1930 р. була організована електродна майстерня, де виготовляли електроди методом занурення. З цього часу у зварювальному виробництві використовувалися електроди лише власного виробництва.

З 1935 р. починається співпраця з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона, що ознаменувало нову епоху у розвитку зварювального виробництва підприємства. Так, вже у 1936 р. була освоєна технологія зварювання хромонікелевих сталей для виготовлення обладнання, що працює в кислотовмісних та інших корозійних середови-



Під час підписання в ІЕЗ Меморандуму про співробітництво (рукоштовання директора ІЕЗ академіка Б.Є. Патона з генеральним директором СМВО В.М. Лук'яненком).



В.М. Лук'яненко в ІЕЗ ім. Є.О. Патона (зліва направо: Б.Є. Патон, В.М. Лук'яненко, К.А. Ющенко).

щах. А також були відпрацьовані практичні основи автоматичного зварювання під флюсом, що дозволило різко підвищити якість зварних швів, забезпечити високі економічні показники зварювального процесу та значно покращити умови праці електрозварників.

Після закінчення Другої світової війни співпраця з Інститутом електрозварювання виходить на новий технологічний рівень. З'являється нове обладнання та зварювальні матеріали, освоюється технологія автоматичного зварювання високолегованих сталей на установці для зварювання поздовжніх швів ємнісного обладнання та спеціалізованому стенді для зварювання кільцевих швів ємнісного обладнання діаметром до 3000 мм.

У 1950-х роках у складі котельно-зварювального цеху створюється електродна майстерня, де електроди виробляються вже не зануренням, а методом опресування на виготовленому своїми силами обладнанні. Однак зростаючим обсягам виробництва ця майстерня вже не задовольняла. Тож у об'єднанні на базі центральної зварювальної лабораторії будується новий електродний цех площею 4 тис. м². Для його оснащення купується найсучасніше на той момент обладнання швейцарської фірми «Манса-Судаж».

Одночасно фірма «Манса-Судаж» поставила лабораторний комплекс обладнання. Фактично це електродний цех у мініатюрі для виготовлення та випробування дослідних партій електродів перед виробництвом великих партій. Все це дозволило створити сучасне виробництво різних типів елек-

тродів високої якості, широкої номенклатури з повним циклом сертифікатних випробувань.

У цей же час завод спільно з Інститутом електрозварювання одним із перших розпочинає успішне впровадження технології напівавтоматичного зварювання під шаром флюсу.

З 1950-х р. стрімко розвивається космічна галузь. Активними учасниками процесу стали сумські машинобудівники, яким доручили виготовляти обладнання для космодромів Байконур та Плесецьк. Ферми, стріли, різні системи газів, повітря, вакуумування, заправники паливом, барокамери – це та багато іншого було зроблено та змонтовано на цих об'єктах із застосуванням зварювальних електродів сумського підприємства «СУМИ-ЕЛЕКТРОД».

З 1960-х р. освоюється технологія автоматичного зварювання алюмінію під шаром флюсу. Особливий внесок у розвиток цієї технології внесли співробітники відділу Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона, керованого д.т.н. Д.М. Рабкіним. У той же час у співпраці з відділом д.т.н. А.М. Макари було освоєно надійну стабільно повторювану технологію зварювання роторів центрифуг з високоміцної сталі 30ХГСА.

У міру розширення та розвитку заводу розвивалося і зварювальне виробництво, що стало одним із центрів розвитку інноваційної потужності підприємства. У кожному новому цеху були спеціалізовані зварювальні ділянки, що оснащувалися найбільш передовою на ті часи технікою, а фахівці науково-виробничого центру зварювання спільно зі співробітниками Інституту електрозварюван-

ня відпрацьовували нові інноваційні технології зварювання перед запуском їх в основне виробництво. Ця співпраця дала швидку віддачу у вигляді впровадження інноваційних технологій зварювання хімічного обладнання з високолегованих сталей та сплавів. Так, було освоєно виготовлення колонного масообмінного обладнання з різними видами контактних елементів: ковпачковими, клапанними, сітчастими, жалюзійними, комбінованими та вихровими тарілками. Було освоєно технологію автоматичного зварювання колонного обладнання під флюсом. Освоюються технології зварювання теплообмінного обладнання із високолегованих сталей із забезпеченням корозійної стійкості зварних з'єднань до агресивних середовищ, що працюють у широкому діапазоні екстремальних температур (від -253°C до 1000°C) та знакозмінних навантажень.

Спільно з фахівцями Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона М.І. Каховським, В.Г. Фартушним, К.А. Ющенком було вирішено питання досягнення необхідного рівня технологічної міцності аустенітних швів та зони термічного впливу, а також досягнуто необхідних значень холодостійкості, теплостійкості та жароміцності з'єднань. Для нових конструкційних матеріалів розроблялися технології зварювання, засоби механізації та автоматизації зварювального процесу. Так, було впроваджено імпульсно-дугове зварювання з електромагнітним перемішуванням зварювальної ван-

ни, що у поєднанні з іншими технологічними рішеннями дозволило механізувати зварювання виробів з аустенітних сталей типу ЭИ-943 та нікелевих сплавів типу хастелой. Завдяки впровадженню технологічних рішень вдалося збільшити термін служби обладнання, що виготовляється, в 2...3 рази.

У цей час освоюється технологія зварювання титану та його сплавів. Зіткнувшись із труднощами, пов'язаними з високою активністю титану до кисню, фахівці підприємства вирішили всі виробничі завдання, забезпечивши на десятиліття конкурентні переваги підприємства та країни як у військовій промисловості, так і в народному господарстві. Досягнутий рівень технологій був настільки високий, що навіть у 2000-х р. американські фахівці були захоплені досягненнями підприємства тих часів.

З 1963 р. було освоєно технологію автоматичного електрошлакового зварювання (ЕШЗ) поздовжніх та кільцевих стиків товстостінного обладнання. Спільно з Інститутом електрозварювання вирішено технологічні питання ЕШЗ високоміцних сталей, які пов'язані зі схильністю зварних з'єднань до утворення холодних тріщин та забезпечення необхідних механічних властивостей. Пізніше було освоєно технології ЕШЗ рам газоперекачувальних агрегатів (ГПА), товстостінних пелюсткових днищ та розроблено технологію електрошлакового лиття патрубків ГПА безпосередньо на корпусі нагнітачів.

До 1970 р. підприємство стало світовим лідером за рівнем та обсягом застосування зварювання в технологічних процесах виготовлення промислового обладнання.

У ці роки світова політична обстановка вимагала багаторазового збільшення виробництва гелію. Поставлене завдання було виконано фахівцями підприємства. Було спроектовано та побудовано Оренбурзький гелієвий завод, комплектну технологічну лінію з переробки газу для отримання гелієвого концентрату та тонкого очищення гелію продуктивністю 3 млрд м^3 гелію на рік. Для



цього спільно з Інститутом електрозварювання та ЦНДІ «Прометей» було розроблено технологію механізованого зварювання під флюсом товсто-стінного колонного обладнання зі сталей АК-25 та АК-27, що працюють в умовах екстремально низьких температур, високого тиску та знакозмінних навантажень, а також супутніх технологій, таких, як плакування трубних решіток стрічковим електродом та енергією вибуху, елетрогідроімпульсного розвальцювання труб, об'ємної термообробки великогабаритних вузлів та багато інших. Надалі сумчани поставили Оренбурзькому заводу ще п'ять установок із виробництва гелію.

Після запровадження санкцій США на постачання ГПА та комплектуючих до них завдяки зусиллям Генерального директора В.М. Лук'яненка Сумське науково-виробниче об'єднання ім. М.В. Фрунзе стало базовим підприємством для освоєння виробництва вітчизняних ГПА та отримало необхідні ресурси та фінансування.

Були освоєні технології багатоелектродного електрошлакового приварювання мундштуком, що плавиться, квадратних патрубків до циліндричного корпусу нагнітача, технологія електрошлакового зварювання кільцевих і поздовжніх швів корпусів нагнітача. Під керівництвом академіка Б.І. Медовара було розроблено технологію електрошлакового переплаву для виробництва сталей особливої чистоти із заданими хімічними та технологічними характеристиками. Спільно з Інститутом електрозварювання були розроблені передові технології зварювання робочих коліс



ГПА зі сталі 13ХГМРБ із застосуванням напівавтоматичного зварювання замість дорогої технології вакуумного паяння.

1965–1975 рр. у розвитку заводу можна охарактеризувати як період найбільш інтенсивного зростання номенклатури та обсягів випуску хімічного обладнання та подальшого технічного оснащення виробництва. У ці роки вирішувалося поставлене урядом завдання з хімізації народного господарства країни, для чого потрібно було різко збільшити темпи розвитку галузі хімічного машинобудування.

Розвиток та створення нових хімічних виробництв та обладнання для них вимагало застосування нових матеріалів, насамперед складнолегованих сталей та спеціальних сплавів. Перед заводом постають одна за одною проблеми створення апаратури з корозійностійких та висо-



комісних сталей, хастелою, двошарових сталей. Спільно з фахівцями науково-дослідних інститутів Києва, Москви, Ленінграда, Волгограда створюються та успішно впроваджуються нові технології зварювання цих матеріалів. ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД» освоєло випуск таких електродів, як ОЗЛ-17У, ЗИФ-10, ЦЛ-11, АНВ-13, АНВ-17, НЖ-13, ЭА-400/10У, ОЗЛ-6, ЗИФ-5, ЗИФ -11.

Відповідно розвитку номенклатури продукції, що випускається заводом, розширювався і спектр зварювальних електродів. Для виготовлення обладнання, що є великогабаритними цільнозварними апаратами, були розроблені електроди марки ЗИФ-8, що забезпечують працездатність зварних швів при $t = -196^\circ\text{C}$. Фахівцями підприємства були забезпечені потреби нафтогазової промисловості півночі у пересувних заправниках. Так, було розроблено та освоєно технології автоматичного зварювання під флюсом низьколегованими зварювальними матеріалами сталі АБ1-Ш товщиною 60 мм, що працює під тиском понад 32 МПа.

Після включення до складу об'єднання заводу атомного та енергетичного насособудування було освоєно технологію зварювання уліток головного циркуляційного насосу першого контуру АЕС та іншого станційного обладнання, що потребує особливого підходу до забезпечення якості зварних з'єднань. Перші насоси для атомних електростанцій на підприємстві були створені ще у 1959 р. Масове їх виробництво стартувало з початку 1980-х р. і потребувало використання зварюваль-

них електродів найвищої якості та найрізноманітнішої номенклатури: для зварювання вуглецевих, теплостійких, високолегованих жароміцних і жаростійких, різнорідних сталей.

З 1988 по 1993 рр. ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД» випускало зварювальні електроди для енергетичного та атомного машинобудування під контролем Держатоменергонагляду СРСР.

У рамках проекту із запуску у 2011 р. ракети «Союз-СТ» у Французькій Гвіані завод ім. М.В. Фрунзе створював обладнання для стартової системи: стріли, ферми, сектори та інші супутні механізми. Тут також були використані зварювальні електроди ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД», проте варто зазначити, що обладнання для Гвіанського центру було виготовлено за більш жорсткими стандартами якості, що потребувало підвищення якості зварювальних електродів.

За цей час підприємство опанувало кілька поколінь обладнання для автоматичного зварювання – від наднадійного зварювального трактора ТС-17 розробки Інституту електрозварювання до зварювальних роботів.

Сумське науково-виробниче об'єднання перше у СРСР освоїло у виробництві одразу 27 одиниць зварювальних колон для автоматичного зварювання виробництва «Дойма» (Німеччина) та зварювальної колони виробництва «Бреда» (Італія) для об'ємного зварювання. Освоєно устаткування для автоматичного зварювання під флюсом товсто-стінного обладнання розщепленою дугою.

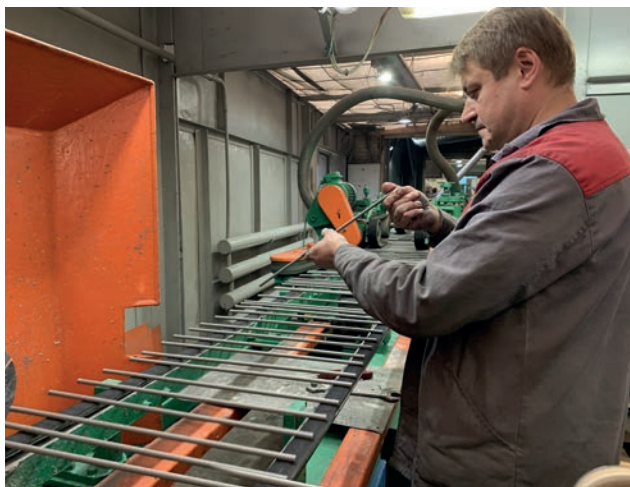
Найбільшу гордість викликає реалізація технології автоматичного зварювання під час виготовлення наступних виробничих замовлень:

- штамповано-зварні корпуси шарової арматури діаметром 300...1400 мм;
- ємнісне обладнання для газової промисловості товщиною до 260 мм і діаметром до 3500 мм;
- корпуси ГПА товщиною до 120 мм і діаметром до 1400 мм;
- зварні улітки ГЦН зі сталі 06Х12Н3Д товщиною до 200 мм;
- наплавлення та приварювання патрубків до корпусів ГПА;
- центрифуги зі сталей 12Х18Н10Т, 0Х17М13М3Т та ін.;
- пересувні автогазозаправні станції;
- зварювання труб в трубні решітки камерного типу через отвір;
- обладнання для заводів з виплавлення алюмінію.

– пенали і транспортно-пакувальні контейнери для зберігання відпрацьованого ядерного палива.

З 2019 р. підприємство перейменовано в АТ «СМНВО – Інжиніринг». Колектив підприємства докладає всіх можливих зусиль для відновлення





виробництва після наслідків рейдерського захоплення. Ядро фахівців, що залишилося, зберегло обладнання і технології, на ґрунті яких стало можливим повернення фахівців і відродження виробничих потужностей підприємства.

В області автоматичного зварювання заплановано впровадження робототехнічного зварювального комплексу з можливістю отримання зварних швів із заданими механічними властивостями і відображенням структури зварного шва в реальному часі. Даний проект планується реалізувати спільно з фахівцями відділу автоматизованих систем управління технологічними процесами Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона.

В області систем управління продовжується впровадження системи автоматичного обліку витрат SAP ERP. У планах – запровадити автоматичний контроль і облік витрат зварювального виробництва із застосуванням сучасного зварювального обладнання. Триває активна співпраця з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона в рамках раніше укладеного Меморандуму.

У молодого покоління фахівців в області зварювання є чітке розуміння того, що конкурентна боротьба виграється інноваційним потенціалом підприємства і робиться все можливе для реалізації цього потенціалу.

Зварювальне виробництво АТ «СМНВО – Інжиніринг» атестовано на відповідність більшості міжнародних стандартів в галузі забезпечення якості. Так, триває успішна співпраця з Американським товариством інженерів-механіків (ASME), Американським інститутом нафти (API), Міжнародним інститутом зварювання (IIW). Внутрішня нормативна документація зварювального виробництва підприємства гармонізована з більшістю міжнародних стандартів, таких як ISO 3834, ASME IX; API 6D; AWS D 1.1 та ін. Координатори в галузі зварювання атестовані відповідно до вимог більшості міжнародних стандартів, що діють на території України, ЄС, США та Митного Союзу.



Сьогодні якість продукції ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД» підтверджено сертифікатами Канадського бюро зварювання (CWV Group), TÜV Rheinland, Bureau Veritas, Регістром судноплавства України, Російським морським регістром судноплавства. Також компанія має дозвіл на поставку зварювальних матеріалів для ДП «НАЕК Енергоатом».

Серед наших клієнтів багато теплостанцій ДТЕК, підприємства ДП «НАЕК Енергоатом», Укроборонпрому, а також машинобудівні та виробничі компанії, серед яких Турбоатом, НКМЗ, ЗТМК, Арселор Міттал, Нібулон. Зараз продукція компанії поставляється в більш ніж 20 країн світу і застосовується для найвідповідальніших конструкцій. ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД» успішно конкурує з кращими світовими брендами за якістю продукції.

Широке застосування отримують електроди власної розробки SF 7016 (аналог LB-52U) і SF 7018 (аналог FOX EV 50), призначені для зварювання поворотних і неповоротних стиків труб магістральних і промислових трубопроводів.

Номенклатура продукції ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД» налічує близько 200 марок, серед яких електроди для зварювання вуглецевих сталей, низьколегованих і теплостійких сталей, високолегованих корозійностійких жаростійких і жароміцних сталей, нікелевих сплавів, електроди для зварювання чавуну, міді. Також ТОВ «СУМИ-ЕЛЕКТРОД» випускає електроди для наплавлення поверхневих шарів зі спеціальними властивостями.

Підприємство має багаторічний досвід поставок різних марок електродів по всьому світу і готове прийняти та виконати будь-яке замовлення на виготовлення зварювальних електродів за індивідуальними вимогами.

Отроков В.В., Погрібний П.М.,
Понамарьов І.В., Яковенко Є.М.

ПОРІВНЯЛЬНІ ПОКАЗНИКИ РІЗНИХ СПОСОБІВ ПЕРЕРОБКИ СТРУЖКИ ВИСОКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ І СПЛАВІВ

**Ф.К. Біктагіров, О.В. Веретільник, В.О. Шаповалов,
О.В. Гнатушенко, А.П. Ігнатов, В.В. Барабаш**

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Виконано експерименти з переробки в індукційній та електрошлаковій печах компактованої і некомпактованої стружки нержавіючої сталі Х18Н10Т і жароміцних сплавів 07Х12НМБФ (ЭП609) і ХН70ВМТЮФ (ЭИ617). Показано, що найкращою є технологія спільного переплаву в електрошлаковій тигельній печі витратного електрода з кускових відходів і стружки. В цьому випадку при плавці в печі ємністю 120 кг при кількості стружки, що подається на плавку, 45...55 % від загальної маси плавки питомі витрати електроенергії становлять 0,55...0,65 кВт·год/кг, продуктивність — 130...160 кг/год, а втрати на вигар — не більше 1...2 %. При електрошлаковій тигельній плавці є можливість активно проводити металургійні операції, такі як рафінування, модифікування, легування і розкислення, що дозволяє отримувати метал високої якості. Бібліогр. 12, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: стружка; переробка; індукційна плавка; електрошлакова плавка; електроенергія; продуктивність; якість

На багатьох підприємствах у процесі виготовлення різних виробів при механічній обробці чорнових заготовок утворюється велика кількість металевієї стружки. Найчастіше стружка здається (продається) як низькосортні металеві відходи і надходить на спеціалізовані підприємства, що мають відповідне обладнання для переробки подібної сировини. У загальній масі стружки різних видів окрему групу складає стружка легованих і високолегованих сталей та сплавів, таких як інструментальна, штампова, нержавіюча, жароміцна та ін. При переплаві такої стружки важливо максимально зберегти цінні легуючі елементи і отримати метал, придатний для повторного використання.

У якості плавильного устаткування для виплавки легованих сталей зазвичай використовуються дугові сталеплавильні (ДСП) та індукційні

печі. Через підвищене вигорання металу в ДСП, навіть в печах, що працюють на постійному струмі, найбільш придатними для переробки подібної стружки є індукційні печі, а також установки електрошлакового переплаву. Перспективність використання останніх для плавки некомпактованої шихти відзначається багатьма дослідниками [1–4].

З метою оцінки можливостей різних видів переплаву стружки високолегованих жароміцних сплавів і нержавіючої сталі були проведені дослідження і експерименти за технологічними варіантами, опис яких наведено в табл. 1 і на рис. 1.

Індукційну тигельну плавку (ІТП) здійснювали в печі ємністю 30 кг, а електрошлакову (ЕШП) — в кристалізаторі діаметром 170 мм з отриманням зливків масою 35...60 кг та тигельній печі (ЕШТП), в якій маса металу, що переплавлявся, становила від

Таблиця 1. Способи переробки стружки

Плавка	Марка металу	Початковий матеріал	Маса плавки, кг	Вид плавки
1	07Х12НМБФ (ЭП609)	Компактований електрод	35...42	ЕШП
2	ХН70ВМТЮФ (ЭИ617)	—»—	38...40	—»—
3	07Х12НМБФ (ЭП609)	Компактовані брикети	29...31	ІТП
4	ХН70ВМТЮФ (ЭИ617)	Стружка	—»—	—»—
5	ХН70ВМТЮФ (ЭИ617)	Зливки ІТП зі стружки	—»—	—»—
6	ХН70ВМТЮФ (ЭИ617)	—»—	59...60	ЕШТП
7	ХН70ВМТЮФ (ЭИ617)	Зливки ІТП зі стружки з додаванням стружки	60...120	—»—
8	Х18Н10Т	Компактований електрод	35...62	ЕШП
9	Х18Н10Т	Електрод із кускового брухту	60...90	ЕШТП
10	Х18Н10Т	Електрод із кускового брухту з додаванням стружки	70...120	—»—

Ф.К. Біктагіров — <https://orcid.org/0000-0001-7843-4261>, О.В. Гнатушенко — <https://orcid.org/0000-0002-0328-0875>,
О.В. Веретільник — <https://orcid.org/0000-0002-1056-0277>, В.В. Барабаш — <https://orcid.org/0000-0001-8138-3565>,
А.П. Ігнатов — <https://orcid.org/0000-0001-8138-3565>, В.О. Шаповалов — <https://orcid.org/0000-0003-1339-3088>

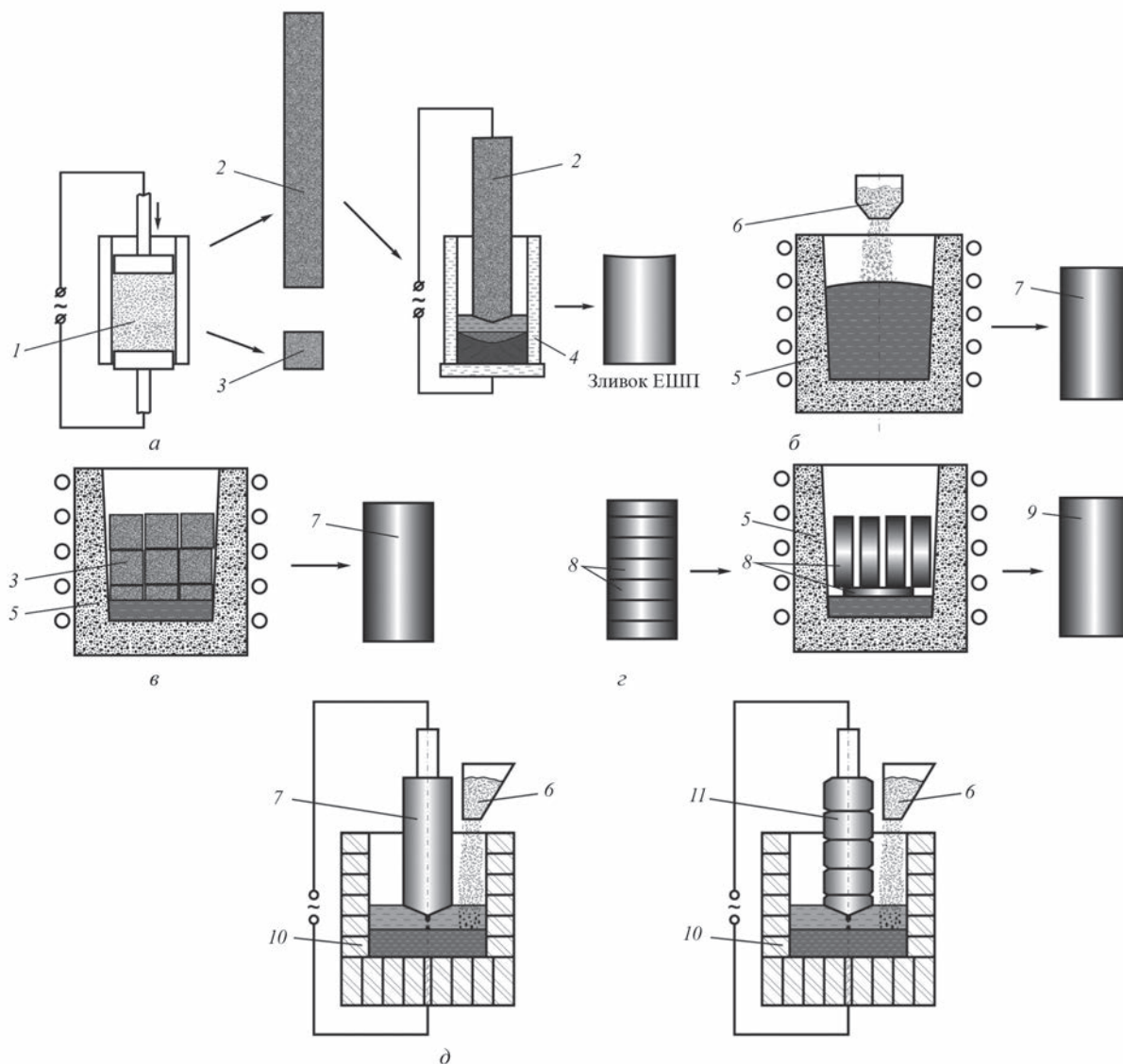


Рис. 1. Технологічні схеми переробки стружки: *а* — компактування стружки під дією струму (електрод, брикет), ЕШП компактованого електрода; *б* — ІТП стружки; *в* — ІТП брикетів; *г* — ІТП зливка, отриманого при ІТП стружки (подвійний переплав); *д* — ЕШТП витратного електрода з додаванням стружки; 1 — компактування стружки під дією струму; 2 — електрод для ЕШП, отриманий внаслідок компактування стружки; 3 — брикети зі стружки; 4 — кристалізатор; 5 — індукційна тигельна піч; 6 — стружка; 7 — зливоч ІТП зі стружки; 8 — розрізаний зливоч ІТП; 9 — зливоч ІТП подвійного переплаву; 10 — електрошлакова тигельна піч; 11 — витратний електрод із кускового брухту

60 до 120 кг. При ЕШП використовували суміш шлаків АНФ-6 і АН-295, а при ЕШТП — шлак АН-295.

Низький вміст вуглецю в усіх марках стружки унеможливив застосування для здійснення електрошлакового процесу невитратного графітованого електрода. Застосування невитратних металевих електродів, крім додаткових витрат на їх експлуатацію та витрат тепла на охолодження, практично неминуче пов'язане з небажаним розчиненням в тій чи іншій мірі матеріалу наконечника в шлаку і попаданням його в метал, що переплавляється [5, 6]. Окремим видом здійснення електрошлакового процесу з невитратним електродом по суті є і плавка в струмопідвідному кристалізаторі (СПК) [7]. Однак з огляду на виділення джоулевого тепла на периферії

шлакової ванни і порівняно невисоких температур в центрі така плавка більше підходить для переробки стружки металів, що мають низьку температуру плавлення. У літературі окрім прикладів плавки в СПК стружки міді є відомості щодо переробки лише стружки швидкорізальної сталі (температура плавлення близько 1300 °С) у кристалізаторі діаметром лише 60 мм і при вкрай низькій швидкості плавлення, що становила 11...13 кг/год [8, 9].

З огляду на особливості та обмеження застосування невитратних електродів в експериментах, що проводилися, для електрошлакової плавки стружки високолегованих сталей і сплавів використовували витратні електроди. Отримували такі електроди або компактуванням стружки (табл. 1,

плавки 1, 2, 8), або шляхом плавки стружки в індукційній печі з отриманням зливка (плавка 6), або зварюванням кускових відходів (плавки 9, 10). Ураховуючи те, що для холодного брикетування стружки, яка використовувалася в дослідженнях, необхідні дуже великі зусилля пресування, компактування здійснювали під струмом, як описано в роботах [10, 11]. Діаметр компактованих електродів становив 100 мм, а довжина — до 1000 мм. Щільність таких електродів становила 55...65 % від щільності литого металу. Зливки масою 30 кг, отриманий з металу ІТП, мав діаметр 120...130 мм і для більшості плавки, виконаних способом ЕШТП, використовувалися електроди, отримані зварюванням двох таких заготовок. У випадку необхідності збільшення маси компактованого електрода, що підлягав переплаву, його також отримували зварюванням з двох частин при загальній довжині до 1800 мм. При ЕШТП кількість стружки, що переплавлялась, становила від 45 до 55 % від загальної маси плавки. Стружку подавали на плавку після наведення шлакової ванни за технологією «твердого» старту.

Узагальнені показники питомих витрат електроенергії, продуктивності та оцінки якості металу, що одержали, для різних варіантів плавки наведені в табл. 2. Стосовно електрошлакової плавки, враховувалися витрати електроенергії при виготовленні витратного електрода компактуванням стружки або відливанням зливка з металу, виплавленого в індукційній печі. Питомі витрати електроенергії при компактуванні стружки сплавів

Таблиця 2. Показники різних видів переробки стружки високолегованих сталей і сплавів

Плавка	Питомі витрати електроенергії, q , кВт·год/кг	Продуктивність плавки P , кг/год	Якість металу
1	2,4...2,8	55...60	Добра
2	2,5...2,8	—»—	—»—
3	1,7...2,1	—»—	Незадовільна
4	0,75...0,80	45...50	—»—
5	1,35...1,50	55...65	Задовільна
6	1,5...1,6	100...110	Добра
7	1,40...1,45	130...140	—»—
8	2,1...2,3	60...65	—»—
9	0,70...0,75	110...120	—»—
10	0,55...0,65	130...160	—»—

ЭП609 і ЭИ617 становили від 1,1 до 1,4 кВт·год/кг, а стружки сталі X18N10T — від 0,7 до 0,9 кВт·год/кг. При індукційній плавці брикетів також урахувалися витрати електроенергії на їх виготовлення, а при подвійній індукційній плавці (табл. 2, плавка 5) наведені дані сумарних витрат електроенергії цих двох плавки.

Як і слід було очікувати, з огляду на значні енерговитрати на процес брикетування стружки під струмом і електрошлаковий переплав у кристалізаторі, що охолоджується, найбільші питомі витрати електроенергії були при плавках 1, 2 і 8, а найменші — при плавці небрикетованої стружки в індукційній печі і електрошлаковій тигельній плавці з використанням електрода з кускового брухту (плавки 4 та 10). Однак зливки, отримані з металу ІТП, як правило, мали внутрішні дефекти у вигляді поруватості. Тільки після повторного їх



Рис. 2. Зовнішній вигляд електродів із кускового брухту для ЕШТП



Рис. 3. Плавка електрода із кускового брухту в електрошлаковій тигельній печі

переплаву в індукційній печі вони могли бути придатні для подальшого використання. Проте, якість металу при такому варіанті плавки поступалася якості металу, що був виплавлений в електрошлаковій тигельній печі з аналогічних зливків, отриманих ІТП.

При спільній ЕШТП витратного електрода і стружки досягається максимальна продуктивність процесу (плавки 7, 10), яка на 30...40 % вище в порівнянні з плавкою тільки витратного електрода (плавки 6, 9). Більш того, стружка, що подається на плавку, зменшує теплове навантаження на стінки тигля, завдяки чому в кілька разів підвищується стійкість його вогнетривкої футеровки.

Проведені експерименти щодо різних видів переробки стружки показали, що найкращою є технологія електрошлакової плавки в тигельній печі витратного електрода, сформованого з кускових відходів та одночасним додаванням стружки в процесі плавки. На рис. 2 у якості прикладу показано електроди, отримані зварюванням різних відпрацьованих деталей зі сталі X18H10T, а на рис. 3 — процес електрошлакової плавки з використанням такого електрода.

При відсутності кускового брухту витратний електрод доцільно отримувати з металу, виплавленого в ЕШТП. Тоді при співвідношенні маси витратного електрода до маси стружки, що переплавляється, як 1:1, питомі витрати електроенергії на переробку стружки подвоюються і з урахуванням умов експериментів, що проводились,

будуть складати близько 1,1...1,3 кВт·год/кг. Для порівняння в роботі [12] наводяться дані щодо переробки стружки сплаву ЭИ617 способом ЕШТП, але з використанням невитратного електрода. Витрати електроенергії, згідно з наведеними в цій роботі даними, при такому варіанті плавки складають 1,4...1,8 кВт·год/кг, а продуктивність — 120...140 кг/год. Дані показники близькі до тих, що мають місце в наших дослідженнях із використанням литого витратного електрода, отриманого зі стружки, але при цьому повністю виключається забруднення металу матеріалом невитратного електрода. Також, у випадку ЕШТП із витратним електродом при збільшенні кількості стружки, що переплавляється, до 60...70 % від загальної маси плавки, що можливо за рахунок використання технології «рідкого» старту, питомі витрати електроенергії будуть ще нижчі у порівнянні з експериментами, які мали місце в дослідженнях, що проводились.

Окрім техніко-економічних переваг при електрошлаковій тигельній плавці стружки практично відсутні втрати на вигар (не більше 2 %) і є можливість проведення активних металургійних заходів, таких як рафінування і легування, що дозволяє отримувати метал високої якості. При невеликій кількості легованої стружки (десятки або сотні тонн на рік) доцільно переробляти її безпосередньо на підприємстві, де вона утворюється. Для цього найбільш придатними є електрошлакові печі порівняно малої встановленої потужності (300...500 кВА) продуктивністю 1...3 т на добу.

Виконаний аналіз свідчить, що технологія електрошлакової тигельної плавки дозволяє з високою ефективністю переробляти стружку високолегованих сталей і сплавів з отриманням якісного металу.

Висновки

1. При переробці стружки високолегованих сталей і сплавів із використанням електрошлакових технологій найменші витрати електроенергії та максимальна продуктивність досягаються при спільній електрошлаковій тигельній плавці небрикетованої стружки і витратного електрода.

2. Кількість стружки, що переплавляється при ЕШТП із витратним електродом, становить не менше 50 % від загальної маси плавки і може бути збільшена за рахунок удосконалення технологічного процесу.

3. Рафінування, легування і модифікування металу в умовах електрошлакової тигельної плавки дозволяє отримувати зі стружки та відходів високолегованих сталей і сплавів заготовки високої якості при незначних (1...2 %) втратах на вигар легуючих елементів.

Список літератури

1. Волков А.Е., Гохман Г.З., Шалимов Ал.Г. (1984) Плавление и рафинирование металла в перегретом шлаке некомпактных материалов. *Сталь*, 7, 30–33.
2. Волков А.Е., Шалимов Ал.Г. (1989) Производство легированной стали методом электрошлакового переплава стружки. *Там же*, 12, 27–29.
3. Биктагиров Ф.К. (2003) Применение электрошлакового процесса с нерасходуемыми электродами для плавки, рафинирования и обработки металлов. Сообщение 2. *Современная электрометаллургия*, 1, 5–9.
4. Кочкин С.В. (2015) Разработка технологии переработки металлической стружки методом электрошлакового переплава. *Современные научные исследования и инновации*, 6, Ч. 1. <http://web.snauka.ru/issues/2015/06/53989>.
5. Лютый И.Ю., Латаш Ю.В. (1982) *Электрошлаковая выплавка и рафинирование металлов*. Киев, Наукова думка.
6. Лютый И.Ю., Латаш Ю.В., Волкотруб Н.П. и др. (1978) К вопросу использования охлаждаемых металлических электродов при электрошлаковом процессе. *Специальная электрометаллургия*, 30, 28–33.
7. Кусков Ю.М. (2001) Электрошлаковый переплав отходов различных производств с использованием нерасходуемого водоохлаждаемого электрода. *Электрометаллургия*, 2, 24–28.
8. Кусков Ю.М., Безкоровайный В.И., Ус В.И., Медовар Л.Б. (1992) Безэлектродная технология электрошлакового переплава медных отходов. *Пробл. спец. электрометаллургии*, 3, 29–32.
9. Кусков Ю.М., Рябцев И.А., Кузьменко О.Г., Лентюгов И.П. (2020) *Электрошлаковые технологии наплавки и рециклинга металлических и металлодержащих отходов*. Киев, Интерсервис.
10. Шаповалов В.А., Биктагиров Ф.К., Бурнашев В.Р. и др. (2011) Электротермическое компактирование металлических материалов. *Современная электрометаллургия*, 4, 42–45.
11. Шаповалов В.А., Биктагиров Ф.К., Бурнашев В.Р. и др. (2011) Электротермическое компактирование металлических материалов: возможности и перспективы. *Заготовительные производства в машиностроении*, 5, 5–10.
12. Жеребцов С. Н. (2012) Применение технологии электрошлакового переплава стружки высоколегированных сталей и сплавов для получения мерной заготовки. *Электрометаллургия*, 4, 32–34.

References

1. Volkov, A.E., Gokhman, G.Z., Shalimov, Al.G. (1984) Melting and refining of metal in a superheated slag of non-compact materials. *Stal*, 7, 30–33 [in Russian].
2. Volkov, A.E., Shalimov, Al.G. (1989) Production of alloy steel by the method of electroslag remelting of chips. *Ibid.*, 12, 27–29 [in Russian].
3. Biktairov, F.K. (2003) Application of the electroslag process with non-consumable electrodes for melting, refining and processing of metals. Message 2. *Sovrem. Elektrometall.*, 1, 5–9 [in Russian].
4. Kochkin, S.V. (2015) Development of a technology for processing metal shavings by the method of electroslag remelting. *Sovremennye Nauchnye Issledovaniya i Innovatsii*, 6, Pt 1 [in Russian]. <http://web.snauka.ru/issues/2015/06/53989>
5. Lyutyi, I.Yu., Latash, Yu.V. (1982) *Electroslag melting and refining of metals*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Liutyi, I.Yu., Latash, Yu.V., Volkotrub, N.P. et al. (1978) On the use of cooled metal electrodes in the electroslag process. *Spets. Elektrometall.*, 30, 28–33 [in Russian].
7. Kuskov, Yu.M. (2001) Electroslag remelting of waste from various productions using a nonconsumable water-cooled electrode. *Elektrometallurgiya*, 2, 24–28 [in Russian].
8. Kuskov, Yu.M., Bezkorovajny, V.I., Us, V.I., Medovar, L.B. (1992) Electrodeless technology of electroslag remelting of copper waste. *Problemy Spets. Elektrometall.*, 3, 29–32 [in Russian].
9. Kuskov, Yu.M., Ryabtsev, I.A., Kuzmenko, O.G., Lentuygov, I.P. (2020) *Electroslag technologies of surfacing and recycling of metal and metal-containing waste*. Kiev, Interservis [in Russian].
10. Shapovalov, V.A., Biktairov, F.K., Burnashev, V.R. et al. (2011) Electrothermal compacting of metallic materials. *Advances in Electrometallurgy*, 4, 251–254.
11. Shapovalov, V.A., Biktairov, F.K., Burnashev, V.R. et al. (2011) Electrothermal compacting of metallic materials: Opportunities and prospects. *Zagotovitelnye Proizvodstva v Mashinostroenii*, 5, 5–10 [in Russian].
12. Zherebtsov, S.N (2012) Application of electroslag remelting technology of high-alloy steel and alloy shavings for producing cut-to-length sections. *Elektrometallurgiya*, 4, 32–34 [in Russian].

COMPARATIVE INDICES OF DIFFERENT METHODS OF PROCESSING SHAVINGS OF HIGH-ALLOYED STEELS AND ALLOYS

F.K. Biktairov, O.V. Veretilnyk, V.O. Shapovalov, O.V. Hnatushenko, A.P. Ignatov, V.V. Barabash
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

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

Experiments were performed on processing briquetted and non-briquetted shavings of Kh18N10T stainless steel and 07Kh12NMBF (EP609) and KhN70VMTYuF (EI617) heat-resistant alloys in induction furnaces and electroslag furnaces. It is shown that the most preferable is the technology of simultaneous remelting of a consumable electrode from lump wastes and shavings in an electroslag crucible furnace. In this case, at melting in 120 kg furnace at the amount of shavings fed for melting, equal to 45...55 % of the total melt mass, the specific power consumption is equal to 0.55...0.65 kW/h/kg, productivity is 130...160 kg/h, and burnout losses are not more than 1...2 %. At electroslag crucible melting it is possible to actively conduct such metallurgical operations as refining, modification, alloying and deoxidation that allows producing high quality metal. Ref. 12, Tabl. 2, Fig. 3.

Key words: shavings; processing; induction melting; electroslag melting; electric power; productivity; quality

Надійшла до редакції 09.09.2021

ФОРМУВАННЯ ШАРУ ВИСОКОХРОМИСТОГО ЧАВУНУ ПРИ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ В СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ КВАДРАТНОГО ПЕРЕРІЗУ

А.В. Нетяга, Ю.М. Кусков, В.М. Проскудін, В.А. Жданов, І.П. Лентюгов

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Виконано технологічну оцінку експлуатації при електрошлаковому наплавленні (переплаві) струмопідвідного кристалізатора круглого перерізу. Запропоновано конструкцію кристалізатора з формуючою секцією квадратного перерізу 200×200 мм. Виконані дослідні наплавки в новому кристалізаторі з використанням електродів, що витрачаються, з високохромистого чавуну квадратного перерізу 120×120 мм. Отримано якісні біметалічні заготовки зі сталі Ст3 + високохромистий чавун із співвідношенням шарів 12 і 25 відповідно. Заготовки плаваються використовувати в якості армуючих елементів для захисту деталей обладнання гірничої техніки, що швидко зношуються. Бібліогр. 12, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: електрошлакове наплавлення; переплав; струмопідвідний кристалізатор; квадратний переріз; високохромистий чавун

Розроблений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона струмопідвідний кристалізатор (ТПК) круглого перерізу [1] вже тривалий час використовується для електрошлакових наплавки (ЕШН) та переплаву (ЕШП) [2, 3]. Особливо великий досвід його застосування був отриманий при ЕШН валків різних прокатних станів [4, 5].

За ці роки були внесені деякі зміни в конструкцію кристалізатора, що покращили його довговічність, відпрацьовані технології початкового старту і подальшого ведення наплавлення у разі переміщення кристалізатора, вивчені теплові процеси в шлаковій і металевій ваннах при плавленні як електродів великого перерізу, так і у вигляді дискретної та рідкої присадок [6, 7].

Однак у ряді випадків необхідно формувати наплавлені шари не круглого, а іншого перерізу, зокрема квадратного. Такі завдання, наприклад, виникають при отриманні армуючих елементів різної товщини для футерування деталей з підвищеним зношуванням робочих поверхонь.

До такого типу деталей належать робочі плити шоккових дробарок, стінки ковшів кар'єрних екскаваторів та навантажувачів, біла, молотки тощо.

При цьому у зв'язку з втратою робочими поверхнями великих мас металу необхідно виконувати наплавні операції, які, по суті, являють собою два технологічних процесу, об'єднаних в одну технологію. Це насамперед наплавка, що забезпечує мінімальне проплавлення основного металу, і подальше нарощування зносостійкого шару способом ЕШП.

Метою даної роботи є оцінка можливостей застосування ТПК з формуючою секцією не круглого перерізу та ознайомлення з результатами виконання практичних наплавок високохромистого чавуну в кристалізаторі квадратного перерізу стосовно деталей гірничого обладнання.

Перші дослід з розширення можливостей ТПК за рахунок виготовлення його формуючої секції не круглого перерізу були виконані на початку 90-х років минулого століття [8]. Їхньою метою було отримання в майбутньому біметалічних листів. Наплавлення дискретною присадкою здійснювалося по периметру плоских поверхонь заготовки перерізом 700×450×160 мм. Але таким чином не вдалося забезпечити стабільне обертання шлакової ванни по периметру ТПК і особливо по його кутах, що призвело до нерівномірності теплового поля на поверхнях заготовки, що наплавляються. В результаті глибина проплавлення основного металу коливалася від 0 (несплавлення) до 15 мм.

Тоді ж було висловлено деякі міркування щодо вирішення цього завдання.

Надалі для такого типу кристалізаторів був виконаний комплекс фізичних досліджень з метою оцінки гідродинамічних потоків, що виникають у шлаковій ванні [9, 10], що підтвердили складність досягнення оптимальних умов ведення електрошлакового процесу та якісного формування як самого наплавленого металу, так і зони його сплавлення з основним металом. Проте, отримані експериментальні дані дозволили перейти до уточнення умов, що забезпечують отримання як стабільного електрошлакового процесу, так і

Ю.М. Кусков — <http://orcid.org/0000-0002-8091-2274>



Рис. 1. Струмопідвідний кристалізатор з розмірами формуючої секції 200×200 мм

досягнення якісного наплавлення. Було прийнято рішення зменшити розміри кристалізатора та виконати його квадратного перерізу 200×200 мм (рис. 1).

Вибір таких розмірів ТПК та технології наплавлення було зроблено виходячи з оцінки досвіду торцевого наплавлення ТПК круглого перерізу. При ЕШН дробом в кристалізаторі діаметром 180 мм при неоптимальному співвідношенні масової швидкості подачі присадки і електричної потужності, що вводиться в шлакову ванну, металева ванна набуває специфічної форми типу «сомbrero» з піднесенням в центрі наплавленого шару (зливка) [11]. Це підвищення пов'язане з нижчою температурою шлаку в цій зоні, незважаючи на обертання шлакової ванни. При цьому в наплавленому металі можуть спостерігатися не розплавлені або не до кінця розплавлені частинки дробу.

Очевидно, навіть за оптимізації режиму наплавлення «критичний» розмір (діаметр) ТПК не повинен перевищувати 200...250 мм. Однак у разі використання при наплавленні як наплавного матеріалу електрода, що витрачається, наплавлений



Рис. 2. Процес ЕШН електродом з високохромистого чавуну в ТПК перерізом 200×200 мм

метал, мабуть, матиме однорідну макроструктуру по всьому його перерізу внаслідок надходження перегрітого металу в центральну зону кристалізатора. Тому подальші дослідження виконували з використанням електродів, що витрачаються.

Для виконання дослідних наплавів було обрано два флюси: АНФ-29 та АН-26. Перший вже пройшов велику лабораторну і промислову перевірку, а другий — переважно з точки зору відносно малого вмісту в ньому гостродефіцитного CaF_2 і, з іншого боку, як більш екологічного порівняно з флюсами на основі фториду кальцію. Він був випробуваний при ЕШН в ТПК круглого перерізу діаметром 180 мм і показав хороші зварювально-технологічні властивості, але при вищій

Електричні параметри ЕШН на різних флюсах у ТПК круглого та квадратного перерізу

Марка флюсу	ТПК круглого перерізу			ТПК квадратного перерізу		
	I , кА	U , В	P , кВА	I , кА	U , В	P , кВА
АНФ-29	2,7	53,5	144,5	2,3	46,6	107,2
АН-26	3,2	—»—	171,2	1,0	44,5	44,5



Рис. 3. Наплавлені шари, сформовані при ЕШП в ТПК квадратного перерізу з використанням флюсів АНФ-29 (а) та АН-26 (б)



Рис. 4. Біметалічна заготовка зі сталі Ст 3 + високохромистий чавун, отримана ЕШН в ТПК перерізом 200×200 мм (а) та її поперечний переріз (б)

електричній потужності, що вводиться в шлакову ванну [12].

У таблиці представлені показники електричної потужності, що вводиться в шлакову ванну при виконанні ЕШН в ТПК круглого і квадратного перерізу на максимальній ступені джерела живлення ТШП-10 і видаленні поверхні заготовки від нижнього торця струмопідведення секції приблизно на 33...35 мм.

Як видно з таблиці, при напавленні в ТПК квадратного перерізу через знижену електропровідність флюсу АН-26 навіть на максимальній ступені джерела живлення (ТШП-10) не вдається підвищити струм напавлення і потужність, що вводиться. Більше того, електрошлаковий процес з часом загасає. У зв'язку з цим складно забезпечити повне розтікання напавленого металу по поверхні заготовки, що напавляється.

Тому дослідні напавлення виконували з твердим стартом на флюсі АНФ-29 електродами, що ви-

трачаються, теж квадратного перерізу 120×120 мм (рис. 2). При напавленні забезпечували стабільне обертання шлакової ванни по всьому периметру кристалізатора з хорошим формуванням високохромистого напавленого чавуну. Для порівняння на рис. 3 показано сформований напавлений шар з використанням флюсів АНФ-29 та АН-26.

В результаті проведених досліджень відпрацьовано технологію отримання якісних біметалічних заготовок зі сталі Ст-3 + високохромистий чавун із співвідношенням шарів 12 і 25 мм відповідно і рівномірним пропавленням основного металу (рис. 4).

Таким чином, перевірені нові технології електрошлакового напавлення і переплаву в ТПК, показана можливість отримання якісних біметалічних армуючих елементів квадратного перерізу, зокрема для деталей гірського обладнання, що зношуються.

Висновки

1. На підставі досвіду використання при торцевому напавленні ТПК круглого перерізу запропоновано новий переріз його формуючої секції у вигляді квадрата та її оптимальні розміри, а також технологію ЕШН (ЕШП) електродом, що витрачається, теж квадратного перерізу.

2. Враховуючи те, що при ЕШН в ТПК перерізом 200×200 мм можливо отримати стабільний електрошлаковий процес і постійне обертання шлакової ванни по всьому перерізу кристалізатора, слід продовжити дослідження в напрямку збільшення розмірів формуючої секції до 250×250 мм,

що дасть можливість зміцнити зношені поверхні більшої площі.

Список літератури

1. Ксендзык Г.В. (1975) Токоподводящий кристаллизатор, обеспечивающий вращение шлаковой ванны. *Специальная электрометаллургия*, **27**, 32–40.
2. Кусков Ю.М. (2001) Электрошлаковые технологии изготовления и восстановления прокатных валков. *Сталь*, **8**, 70–75.
3. Kuskov Yu.M. (2003) A new approach to electroslag welding. *Welding J.*, **4**, 42–45.
4. Шабанов В.Б., Свиридов О.В., Белобров Ю.Н. и др. (1999) Создание комплекса ЭШН жидким присадочным металлом рабочих валков горячей прокатки для непрерывных широкополосных станов. *Автоматическая сварка*, **9**, 51–54.
5. Сарычев И.С., Скороходов В.Н., Чернов П.П. и др. (2001) Восстановление чугунных рабочих валков электрошлаковой наплавкой. *Производство проката*, **1**, 28–30.
6. Кусков Ю.М., Куприн И.Н., Сарычев И.С. (2006) Тепловые процессы при электрошлаковой наплавке в токоподводящем кристаллизаторе прокатных валков. *Сварочное производство*, **10**, 29–32.
7. Шевченко В.Е. (2001) *Электрошлаковая технология в производстве современных прокатных валков*: дис. ... канд. техн. наук. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона.
8. Кусков Ю.М. (1996) Опыт электрошлаковой наплавки плоских заготовок в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, **7**, 54–55.
9. Кусков Ю.М., Цыкуленко К.А. (2009) Разработка конструкции токоподводящего кристаллизатора для электрошлаковой наплавки плоских заготовок. *Сталь*, **1**, 41–46.
10. Цыкуленко К.А., Вислобоков О.М. (2008) Физическое моделирование гидродинамики шлаковой ванны в слябовом токоподводящем кристаллизаторе. Ч. 2. Наплавка. *Современная электрометаллургия*, **3**, 18–21.
11. Кусков Ю.М., Соловьев В.Г., Жданов В.А. (2017) Торцевая электрошлаковая наплавка электродом большого сечения в токоподводящем кристаллизаторе. *Автоматическая сварка*, **11**, 40–45.

12. Кусков Ю.М. (2018) Влияние состава флюса на процесс электрошлаковой наплавки с раздельной подачей присадочного материала. *Там же*, **1**, 44–49.

References

1. Ksyondzyk, G.V. (1975) Current-conducting mould providing the rotation of slag pool. *Spest. Elektrometallurgiya*, **27**, 32–40 [in Russian].
2. Kuskov, Yu.M. (2001) Electroslag technologies for producing and restoration of forming rolls. *Stal*, **8**, 70–75 [in Russian].
3. Kuskov, Yu.M. (2003) A new approach to electroslag welding. *Welding J.*, **4**, 42–45.
4. Shabanov, V.B., Sviridov, O.V., Belobrov, Yu.N. et al. (1999) Creation of complex ESS by liquid filler metal of working rolls for continuous wide-strip hot rolling mills. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 51–54 [in Russian].
5. Sarychev, I.S., Skorokhodov, V.N., Chernov, P.P. et al. (2001) Restoration of cast iron working rolls by electroslag surfacing. *Proizvodstvo Prokata*, **1**, 28–30 [in Russian].
6. Kuskov, Yu.M., Kuprin, I.N., Sarychev, I.S. (2006) Thermal processes in electroslag surfacing forming rolls in current-conducting mould. *Svarochn. Proizvodstvo*, **10**, 29–32 [in Russian].
7. Shevchenko, V.E. (2001) *Electroslag technology in production of modern forming rolls*: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree. Kiev, PWI [in Russian].
8. Kuskov, Yu.M. (1996) Experience of electroslag surfacing of flat blanks in current-conducting mould. *Avtomatich. Svarka*, **7**, 54–55 [in Russian].
9. Kuskov, Yu.M., Tsykulenko, K.A. (2009) Development of design of current-conducting mould for electroslag surfacing of flat blanks. *Stal*, **1**, 41–46 [in Russian].
10. Tsykulenko, K.A., Vislobokov, O.M. (2008) Physical modeling of slag pool hydrodynamics in slab current-leading mould. Pt 2. Cladding. *Advances in Electrometallurgy*, **3**, 17–20.
11. Kuskov, Yu.M., Soloviov, V.G., Zhdanov, V.A. (2017) Electroslag surfacing of end faces with large-section electrode in current-supplying mould. *The Paton Welding J.*, **11**, 29–32.
12. Kuskov, Yu.M. (2018) Influence of flux composition on the process of electroslag surfacing of end faces with discrete feeding of filler material. *Ibid.*, **1**, 33–37.

FORMATION OF A LAYER OF HIGH-CHROMIUM CAST IRON IN CURRENT-CONDUCTING MOULD OF A SQUARE CROSS-SECTION AT ELECTROSLAG SURFACING

A.V. Netyaga, Yu.M. Kuskov, V.M. Proskudin, V.A. Zhdanov, I.P. Lantyugov
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

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

Technological assessment of operation of current-conducting mould of a round cross-section at electroslag surfacing (remelting) was performed. Mould design with forming portion of 200×200 mm square cross-section was proposed. Test melts were conducted in the new mould using consumable electrodes from high-chromium cast iron of 120×120 mm square cross-section. High-quality bimetal blanks from St 3 steel + high-chromium cast iron were produced with layer ratio of 12 and 25, respectively. It is planned to use the blanks as reinforcing elements to protect rapidly-wearing mining equipment parts. Ref. 12, Tabl. 1, Fig. 4.

Key words: electroslag surfacing; remelting; current-conducting mould; square cross-section; high-chromium cast iron

Надійшла до редакції 20.12.2021

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ДЕФОРМОВАНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ВТ9, ОТРИМАНОГО СПОСОБОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ

С.В. Ахонін¹, А.Ю. Северин¹, В.О. Березос¹, О.М. Пікулін¹, В.А. Крижановський², О.Г. Єрохін³

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ТОВ «НВО Хвиля».

49094, м. Дніпро, Набережна Перемоги, 44/1. E-mail: npovolna@ukr.net

³ДП «НВЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України».

03028, м. Київ, вул. Ракетна, 26. E-mail: titan.paton@gmail.com

Проведено комплексні роботи по дослідженню якості деформованих напівфабрикатів, отриманих зі зливка титанового сплаву ВТ9. За технологією електронно-променевого переплаву отримані зливки діаметром 600 мм і довжиною 1,5 м, з яких виготовляли напівфабрикати у вигляді гарячепресованих прутків діаметром 315 мм. Представлено результати досліджень структури і механічних властивостей напівфабрикатів у вигляді гарячепресованих прутків. Показано, що метал отриманих зливок і деформованих напівфабрикатів після відповідної термічної обробки відповідає вимогам стандартів. Бібліогр. 10, табл. 4, рис. 3.

Ключові слова: електронно-променева плавка; високоміцний титановий сплав; зливки; хімічний склад; структура; деформація; механічні властивості

Жароміцний титановий сплав ВТ9 системи легування Ti–Al–Mo–Zr–Si було розроблено в середині минулого століття і він знайшов широке використання при серійному виробництві деталей газотурбінних двигунів (ГТД), які тривалий час працюють при температурі до 450 °С [1]. Сплав ВТ9 є двофазним ($\alpha+\beta$)-сплавом. Високий вміст алюмінію і легування кремнієм забезпечують йому більш високі жароміцні властивості в порівнянні з найбільш розповсюдженим титановим сплавом ВТ6. Титановий сплав ВТ9 є сплавом, що деформується, і відноситься до матеріалів з високою жароміцністю та стійкістю до корозії. Сплав ВТ9 зміцнюють за допомогою термічної обробки — гартування і старіння. Оптимальне поєднання механічних властивостей забезпечує подвійний відпал. З нього виготовляють диски, лопатки та інші деталі компресорів ГТД [2, 3].

До експлуатаційних характеристик деталей відповідального призначення пред'являються високі вимоги, які постійно підвищуються і стають більш жорсткими. Це значною мірою відноситься і до якості вихідних матеріалів [4]. Тому з метою широкого застосування титанових сплавів в різних конструкціях необхідно не тільки створювати нові матеріали на основі титану з більш високими експлуатаційними характеристиками, але і в подальшому вдосконалювати виробництво

напівфабрикатів з цих сплавів. Слід зазначити, що будь-які недосконалості хімічної та структурної однорідності в титанових сплавах призводять до зниження міцності і довговічності виробів. Отримання титанових сплавів пов'язано з труднощами, зумовленими високою чутливістю титану до домішок втілення, особливо до кисню, азоту, водню, вуглецю, а також взаємодією з багатьма хімічними елементами, в результаті чого утворюються тверді розчини або хімічні сполуки. Крім того, одним з основних структурних недосконалостей титанових сплавів є наявність тугоплавких неметалевих включень. Висока активність титану призводить до протікання фізико-хімічних процесів взаємодії з газами навіть в твердому стані. Тому неметалеві включення, зокрема нітриди і оксиди, можуть утворюватися як в процесі виплавки зливок, так і на різних етапах технологічного переділу в готову продукцію. Неметалеві включення в готовий виріб можуть бути внесені з шихтових матеріалів в процесі плавки, а також сформовані при термодетонаційній обробці металу. Титан активно взаємодіє не тільки з газами, але і з іншими елементами, в тому числі з легуючими компонентами сплавів, тому локальне збагачення окремих об'ємів зливок легуючими елементами може призводити до утворення інтерметалідних включень, наприклад, Ti_3Al , $TiAl$, $TiCr_2$ та інших [5].

С.В. Ахонін — <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>, А.Ю. Северин — <https://orcid.org/0000-0003-4768-2363>,

В.О. Березос — <https://orcid.org/0000-0002-5026-7366>, О.М. Пікулін — <https://orcid.org/0000-0001-6327-3448>,

В.А. Крижановський — <https://orcid.org/0000-0002-0917-8687>, О.Г. Єрохін — <https://orcid.org/0000-0003-2105-5783>

В даний час не всі способи виробництва зливків титанових сплавів дозволяють отримати якісний метал, а при порушенні технологічного процесу виробництва сплавів титану в зливках виявляються дефекти, які знижують якість металу. Електронно-променева плавка (ЕПП) є найбільш ефективним способом вакуумної металургії для отримання сплавів, в тому числі тугоплавких і хімічно активних, з наднизьким вмістом газів, летких домішок і неметалевих включень. При ЕПП можливо в широких межах регулювання швидкості плавки, завдяки незалежному джерелу нагріву, що, в свою чергу, дозволяє регулювати тривалість перебування металу в рідкому стані. ЕПП є технологією, що дозволяє практично повністю забезпечити видалення тугоплавких включень високої і низької щільності. Таким чином, ЕПП дозволяє підвищити якість зливків з титанових сплавів [6].

Більшість титанових сплавів містять в складі високу кількість легуючих елементів, що дещо ускладнює їх виробництво способом електронно-променевої плавки. При виплавці зливків високоміцних титанових сплавів способом ЕПП виникає проблема забезпечення заданого хімічного складу зливка, так як плавка в вакуумі сприяє виборчому випаровуванню легуючих елементів з високою пружністю пари [7]. В даному випадку до таких елементів відноситься алюміній. А концентрація в зливку елементів з пружністю пари нижче пружності пари титану, в даному випадку Mo, Zr і Si, може навіть кілька підвищуватися. На основі раніше проведених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України фундаментальних досліджень процесів випаровування компонентів сплавів з розплаву у вакуумі [6] проводилися розрахунки прогнозованого хімічного складу зливків, за результатами яких здійснювалося коригування складових шихтової заготовки. Легуючий компонент з високою пружністю пари, а саме алюміній, шихтувався з урахуванням компенсації втрат на випаровування. Шихтову заготовку для виплавки зливків формували в невитратний короб. Для проведення плавки використовувалася електронно-променева установка УЕ5810 [6].

Були проведені роботи по виплавці зливка з титанового сплаву ВТ9 і отримано зливки круглого перетину діаметром 600 мм та довжиною 1500 мм



Рис. 1. Зливки сплаву ВТ9, отриманий способом ЕПП

(рис. 1). Зливки отримували за технологією ЕПП з проміжною ємністю і порційною подачею рідкого металу в водоохолоджуваній кристалізатор.

Бокова поверхня виплавлених зливків після охолодження в вакуумі до температури нижче 300 °С чиста, підвищена концентрація домішкових елементів на поверхні у вигляді окисленого або альфованого шару відсутня. Глибина поверхневих дефектів типу «гофр» становила 2...3 мм, дефекти у вигляді розривів, тріщин або несплавлень відсутні.

Для оцінки якості металу отриманих зливків проводили дослідження хімічного складу зразків, відібраних по довжині зливка з верхньої, середньої та нижньої частин. Результати аналізу хімічного складу металу отриманих зливків показали, що розподіл легуючих елементів по довжині зливків рівномірний, а їх вміст відповідає марочному складу (табл. 1).

Для дослідження наявності або відсутності в титанових зливках внутрішніх дефектів у вигляді неметалевих включень, а також пор використувався метод ультразвукової дефектоскопії. Дослідження проводили з використанням дефектоскопа ультразвукового УД4-76 ехоімпульсним способом при контактному варіанті контролю. При дослідженні зливків спостерігалися множинні відображення малої амплітуди, що типово для литого металу і є результатом відображення сигналу від границь зерен (дендритів). В зливку не було виявлено ні усадкових раковин, ні пористості, а також одиничних відображень, які можна було б інтерпретувати як великі неметалеві включення.

З метою визначення впливу технології електронно-променевої плавки на якість напівфабри-

Таблиця 1. Розподіл легуючих елементів по довжині зливка титанового сплаву ВТ9, мас. %

Марка сплаву	Частина зливка	Al	Mo	Fe	Zr	Si	O	N
ВТ9	Верхня	6,06	3,63	0,21	1,69	0,32	0,11	0,012
	Середня	6,13	3,68	0,14	1,64	—»—		
	Нижня	6,64	3,21	0,22	1,67	0,31		
ОСТ1 90013–81 для сплаву ВТ-9		5,8...7,0	2,8...3,8	≤0,25	1,0...2,0	0,20...0,35	<0,15	<0,05

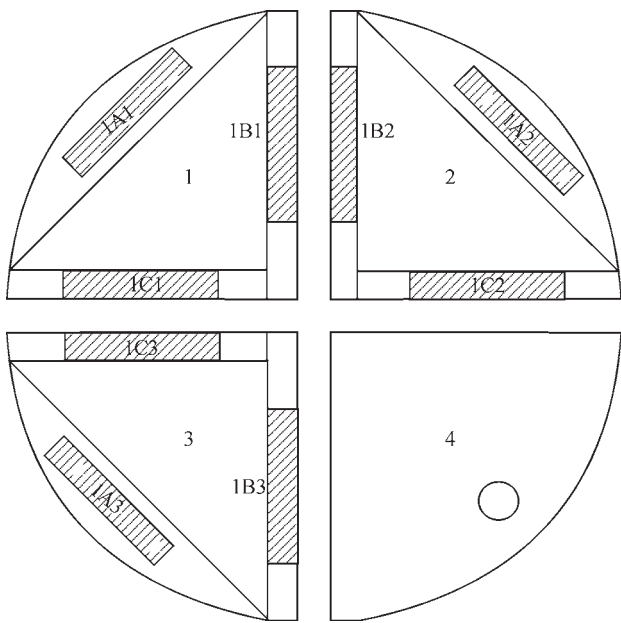


Рис. 2. Схема різання темплету на зразки для подальших механічних випробувань

катів з жароміцних титанових сплавів було проведено роботи по виготовленню гарячепресованих прутків діаметром 300 мм з раніше отриманого зливка діаметром 600 мм сплаву ВТ9 (див. рис. 1).

Кування проводили за технологічною схемою, яка складалась з трьох етапів.

Перший етап — нагрів зливка діаметром 600 мм до температури 1180 °С; витримка заготовки на протязі 8-ми годин; кування на плоских бійках в квадрат 450×450 мм.

Другий етап — підігрів заготовки розмірами 450×450 мм до температури 1100 °С; кування в круглий пруток діаметром 360 мм та розрізання його на три частини.

Третій етап — підігрів заготовки діаметром 360 мм до температури 1100 °С; кування заготовок через квадрат в готовий розмір діаметром 315 мм; рихтування.

Температура кінця кування була не нижче 850 °С. Отримано три деформованих прутки і з

кожного відрізано теплет завтовшки 15 мм для подальших досліджень.

З метою вивчення якості отриманих напівфабрикатів з титанового сплаву ВТ9 були проведені комплексні дослідження, які включали в себе наступні роботи: отримання темплетів з деформованих напівфабрикатів; термічна обробка темплетів; підготовка поверхні темплетів; хімічне травлення темплетів; контроль макроструктури металу; порізка на зразки; визначення температури поліморфного перетворення ($T_{\text{пп}}$), механічних властивостей при 20 °С, рівня тривалої міцності при 500 °С; контроль мікроструктури.

Термічну обробку отриманих поковок та вирізаних з них темплетів виконували за наступним режимом:

нагрів до температури 950 °С, витримка 60 хв, охолодження на повітрі;

нагрів до температури 550 °С, витримка 360 хв, охолодження на повітрі.

Після механічної обробки та травлення поверхні темплетів було досліджено їх макроструктуру та встановлено, що в макроструктурі металу отриманих прутків відсутні тріщини, розшарування, пористості, а металевих і неметалевих включень не виявлено.

Для подальших досліджень з трьох темплетів способом електроіскрового різання по наведеній нижче схемі (рис. 2) було виготовлено зразки для визначення механічних характеристик та температури поліморфного перетворення титанового сплаву ВТ9.

Експериментально визначена температура поліморфного перетворення ($T_{\text{пп}}$) для даних зразків титанового сплаву ВТ9 складала 950 °С.

Механічні властивості визначали при температурах 20 та 500 °С після проведення вищевведеної термічної обробки. Випробування на відповідність вимогам стандартів включали в себе випробування на розтяг, ударну в'язкість, твердість і тривалу міцність (табл. 2, 3).

Таблиця 2. Механічні властивості зразків деформованого напівфабрикату титанового сплаву ВТ9

Номер темплету	Номер зразка	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	Твердість, НВ
1	1C1	1129	3,2	9,0	23	341
	1C2	1116	4,8	17,0	25	
	1C3	1120	4,0	12,0	20	
2	2C1	1142	4,8	14,5	23	331
	2C2	1139	—»—	12,6	28	
	2C3	1127	3,2	11,8	—»—	
3	3C1	1089	4,0	13,4	35	321
	3C2	1078	—»—	18,5	—»—	
	3C3	1101	6,0	20,6	30	
ОСТ1.90107–73		932...1177	>6	>14	>29	269...363

Таблиця 3. Тривала міцність зразків з деформованих напівфабрикатів титанового сплаву ВТ9 при температурі 500 °С

Номер темплету	Номер зразка	σ, МПа	τ, год	Примітка
1	1А1	60	132	без руйнування
	1А2		—»—	—»—
	1А3		96	з руйнуванням
2	2А1	—»—	126	без руйнування
	2А2		137	—»—
	2А3		113	—»—
3	3А1	—»—	96	з руйнуванням
	3А2		126	без руйнування
	3А3		137	—»—
ОСТ1.90107–73		—»—	≥100	—

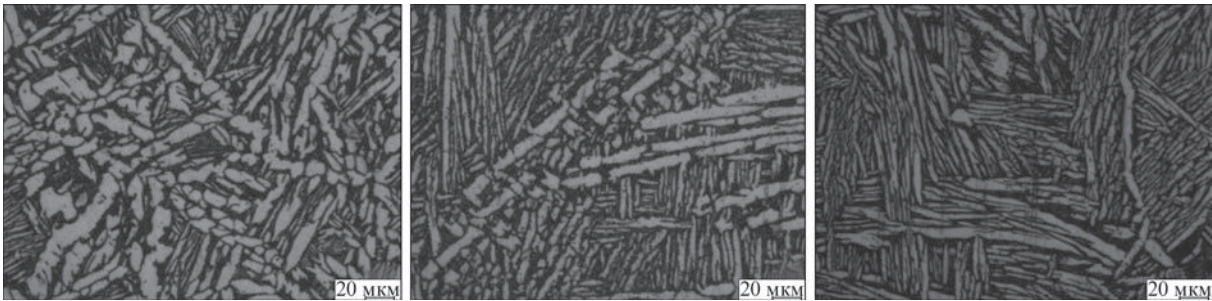


Рис. 3. Мікроструктура прутків діаметром 315 мм, отриманих деформаційною обробкою зливка діаметром 600 мм з титанового сплаву ВТ9: а — 1; б — 2; в — 3

Таблиця 4. Механічні властивості зразків деформованого напівфабрикату титанового сплаву ВТ9 після додаткової термообробки

Номер темплету	Номер зразка	σ _в , МПа	δ, %	ψ, %	KCU, Дж/см ²	Твердість, НВ
1	1	1068	11	29	29	321
	2	1092	10	14	30	311
2	1	1092	7	16	29	321
	2	1067	10	42	30	—»—
3	1	1078	11	29	33	—»—
	2	1118	14	32	32	—»—
ОСТ1.90107–73		932...1177	>6	>14	>29	269...363

Ці дані дозволяють зробити висновок, що більшість механічних властивостей напівфабрикатів із сплаву ВТ9, отриманого способом ЕПП, відповідають вимогам стандартів, але пластичні властивості виявилися нижчими ніж стандартні. Це може бути пов'язано з тим, що температура деформації знаходилась в області існування β-фази і в металі сформувалася повністю пластинчаста структура з досить великим розміром пластин. Відомо, що від типу структури та розміру кристалітів дуже сильно залежать показники пластичності матеріалу. Зниження поперечного звуження при пластинчастій структурі, в порівнянні з глобулярною, може досягати 70...80 мас. %, а відносне подовження може зменшуватися на 40...50 % [8, 9]. Також досить низькою була температура відпау на нижній межі поліморфного перетворення.

Більшість зразків титанового сплаву ВТ9 пройшли випробування на тривалу міцність при температурі 500 °С та σ = 60 МПа без руйнування, середній час випробувань склав 122 год.

Аналіз мікроструктури отриманих напівфабрикатів титанового сплаву ВТ9 у вигляді гарячедеформованих прутків діаметром 315 мм показав, що мікроструктура всіх зразків відповідає 4а...6а типу 9-типової шкали мікроструктур інструкції № 1054–76 (рис. 3) [10].

Для підвищення характеристик пластичності проведена додаткова термічна обробка зразків з титанового сплаву ВТ9. Температуру першого нагріву підвищили до 980 °С, а час витримки в печі зразків — до 120 хв. Проведені механічні іспити зразків після додаткової термічної обробки (табл. 4) показали повну відповідність механічних характеристик

напівфабрикатів з титанового сплаву ВТ9, отриманого способом ЕПП, вимогам стандартів.

Висновки

1. Показано, що зливки титанового сплаву ВТ9, отримані за технологією електронно-променевої плавки з проміжною ємністю, характеризуються високою однорідністю як за хімічним складом, так і за структурою, відсутністю дефектів у вигляді пор та неметалевих включень.

2. Запропоновано технологічну схему термомоформацийної обробки зливок діаметром 600 мм з титанового сплаву ВТ9, яка забезпечує отримання прутків діаметром 315 мм з однорідною структурою.

3. Встановлено режими термічної обробки прутків діаметром 315 мм з титанового сплаву ВТ9, що забезпечують повну відповідність механічних характеристик напівфабрикатів вимогам стандартів.

Список літератури

1. Павлова Т.В., Кашапов О.С., Ночовная Н.А. (2012) Титановые сплавы для газотурбинных двигателей. *Все материалы. Энциклопедический справочник*.
2. Хореев А.И., Хореев М.А. (2005) Титановые сплавы, их применение и перспективы развития. *Материаловедение*, 7, 25–34.
3. Александров В.К., Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А. и др. (1979) *Полуфабрикаты из титановых сплавов*. Москва, Металлургия.
4. Антонюк С.Л., Моляр А.Г., Калинюк А.Н., и др. (2003) Титановые сплавы для авиационной промышленности Украины. *Современная электрометаллургия*, 1, 10–14.
5. Бабенко Е.П., Долженкова Е.В. (2014) Исследование причин разрушения крупногабаритного изделия из сплава ВТ23. *Металлургическая и горнорудная промышленность*, 3, 82–85.
6. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В. (2006) *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка.
7. Ахонин С.В., Северин А.Ю., Березос В.А. и др. (2016) Особенности выплавки слитков титанового сплава ВТ19

в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью. *Современная электрометаллургия*, 2, 23–27.

8. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*: Справочник. Москва, ВИС-МАТИ.
9. Елагина Л.А., Гордиенко А.И., Ивашко В.В. и др. (1978) Влияние структуры на механические свойства сплавов ВТ9 и ВТ18. *Технология легких сплавов*, 12, 33–38.
10. (1974) Инструкция № 1054–76. *Металлографический анализ титановых сплавов*. ВИАМ.

References

1. Pavlova, T.V., Kashapov, O.S., Nochovnaya, N.A. (2012) Titanium alloys for gas turbine engines. *All materials. Encyclopedic reference book* [in Russian].
2. Khoreev, A.I., Khoreev, M.A. (2005) Titanium alloys, their application and prospects of development. *Materialovedenie*, 7, 25–34 [in Russian].
3. Aleksandrov, V.K., Anoshkin, N.F., Bochvar, G.A. et al. (1979) *Semiproducts from titanium alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
4. Antonyuk, S.L., Molyar, A.G., Kalinyuk, A.N., Zamkov, V.N. (2003) Titanium alloys for aircraft industry of Ukraine. *Advances in Electrometallurgy*, 1, 9–12.
5. Babenko, E.P., Dolzhenkova, E.V. (2014) Examination of destruction causes of large-sized product from VT23 alloy. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost*, 3, 82–85 [in Russian].
6. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk G.V. (2006) *Electron beam melting of titanium*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
7. Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berezos, V.A. et al. (2016) Peculiarities of melting of titanium alloy VT19 ingots in electron beam cold hearth installation. *Sovrem. Elektrometall.*, 2, 23–27 [in Russian].
8. Iliin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties*: Refer. Book. Moscow, VILS-MATI [in Russian].
9. Elagina, L.A., Gordienko, A.I., Ivashko, V.V. et al. (1978) Influence of structure on mechanical properties of VT9 and VT18 alloys. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, 13, 33–38 [in Russian].
10. (1974) Instruction No. 1054–76: *Metallographic analysis of titanium alloys*. Moscow, VIAM [in Russian].

INVESTIGATIONS OF THE QUALITY OF WROUGHT SEMI-FINISHED PRODUCTS OF VT9 TITANIUM ALLOY PRODUCED BY ELECTRON BEAM MELTING

S.V. Akhonin¹, A.Yu. Severin¹, V.O. Berezos¹, O.M. Pikulin¹, V.A. Kryzhanovskiy², O.G. Yerokhin³

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

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

²«NVO Khvyliya» Company.

44/1 Naberezhnaja Peremohi, 49094, Dnipro, Ukraine. E-mail: npovolna@ukr.net

³SC «SPC «Titan» of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine».

26, Raketna Str., 03028, Kyiv, Ukraine. E-mail: titan.paton@gmail.com

Complex works were performed to study the quality of wrought semi-finished products, manufactured from an ingot of VT9 titanium alloy. Electron beam remelting technology was used to produce ingots of 600 mm diameter and 1.5 m length, from which semi-finished products were manufactured in the form of hot-pressed rods of 315 mm diameter. Results of investigations of structure and mechanical properties of semi-finished products in the form of hot-pressed rods are given. It is shown that the metal of the produced ingots and wrought semi-finished products meets the requirements of the standards after the respective heat treatment. Ref. 10, Tabl. 4, Fig. 3.

Key words: electron beam melting; high-strength titanium alloy; ingot; chemical composition; structure; deformation; mechanical properties

Надійшла до редакції 06.10.2021

ВИРОБНИЦТВО ЗЛИВКІВ ВИСОКОМІЦНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ ТИТАНУ СПОСОБОМ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ

В.О. Березос

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Методами математичного моделювання досліджено тепловий стан зливків сплавів титану при електронно-променевій плавці з урахуванням гідродинамічних течій та процеси випаровування хімічних елементів під час електронно-променевої плавки високоміцних конструкційних сплавів титану. На основі проведених розрахунків в рамках математичних моделей визначено технологічні режими та розроблено технологію електронно-променевої плавки зливків високоміцних сплавів титану, що забезпечує високу якість одержуваного металу. Проведено роботи з одержання напівфабрикатів та показано високу якість титанових сплавів, одержаних за розробленою технологією електронно-променевої плавки. Бібліогр. 10, табл. 5, рис. 6.

Ключові слова: електронно-променева плавка; проміжна ємність; зливки; високоміцний титановий сплав; математична модель; кристалізація; випаровування; легуючі компоненти; хімічний склад; структура; деформаційна обробка; термічна обробка; механічні властивості

Завдяки високій питомій міцності сплави на основі титану знайшли широке застосування в авіа- і ракетобудуванні, виробництві військової техніки, хімічному та енергетичному машинобудуванні, при виготовленні морської техніки [1–3].

Для подальшого розширення застосування сплавів на основі титану необхідно підвищувати їх механічні характеристики та знижувати вартість виробництва, що може бути досягнуто створенням і застосуванням нових високоефективних технологій, в першу чергу виплавки.

Донині практично всі напівфабрикати з високоміцних сплавів титану виготовляються способом вакуумно-дугової плавки (ВДП) та поставляються в Україну із-за кордону. Хоча технологія ВДП титану є традиційним і найбільш поширеним в промисловості способом отримання зливків титану і сплавів на його основі, в останні роки все більше застосування в металургії титану знаходить технологія електронно-променевої плавки (ЕПП) з проміжною ємністю [4, 5].

ЕПП дозволяє значно підвищити якість зливків з титанових сплавів за рахунок того, що процес здійснюється при більш високому, ніж ВДП, вакуумі і під час плавки не відбувається помітного насичення металу газовими домішками. При ЕПП розплавлений титан тривалий час знаходиться в рідкому стані, що сприяє його дегазації (видалення водню) і вирівнюванню хімічного складу. Однак при цьому існує проблема отримання зливків заданого хімічного складу, так як плавка у відносно глибокому вакуумі сприяє виборчому випаровуванню легуючих елементів з високою пружністю

пари. Тому при одержанні зливків сплавів титану способом ЕПП має велике значення забезпечення однорідності шихтової заготовки та постійності технологічних параметрів в процесі плавки.

Роботи зі створення та впровадження технології ЕПП зливків титану в Україні проводилися в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Так, були проведені роботи зі створення нових технологій та обладнання ЕПП, розроблено математичні моделі переносу тепла та процесів випаровування легуючих елементів при одержанні зливків титанових сплавів під час ЕПП [6–8]. Однак проведені роботи, з огляду на складність розрахунків, та обмежені можливості обчислювальної техніки мали певні недоліки. Так, при вивченні процесів випаровування під час ЕПП розглядалося випаровування лише одного елемента з високою пружністю пари, а саме алюмінію [6]. Водночас багато високоміцних титанових сплавів мають складну систему легування і окрім алюмінію мають ще й хром, який також інтенсивно випаровується під час ЕПП. Рішення задач тепло- та масообміну проводилося окремо від гідродинамічної задачі, що невпинно призводило до викривлення одержаних результатів, або, з метою спрощення розрахунків, вважалася осьова симетрія теплових, концентраційних і гідродинамічних полів в зливку, в результаті чого тривимірна модель зводилася до рішення двовимірної [7]. При виплавці зливка під час ЕПП з проміжною ємністю відсутня осьова симетрія подачі рідкого розплаву в прохідний кристалізатор і перебіг теплофізичних процесів має виражений тривимірний характер. Тому докладне врахування розрахунковим шляхом таких теплофізичних процесів можливе тільки за допомогою рішення сполучених тривимірних теплової і гідродинамічної задач.

Слід зауважити, що Україна є однією з п'яти країн світу, які мають повний цикл виробництва титану —

В.О. Березос — <https://orcid.org/0000-0002-5026-7366>

© В.О. Березос, 2021

від видобутку титановмістких руд, їх збагачення і виробництва губчастого титану до виплавки зливків титану і виробництва титанових напівфабрикатів. Проте це стосується одержання або зливків технічно чистого титану (BT1-0, Grade 2), або малолегованих сплавів титану (BT5, BT6). Тому створення нової перспективної технології та впровадження її для виробництва вітчизняних напівфабрикатів високоміцних сплавів на основі титану способом ЕПП дозволить відмовитись від імпорту вартісних іноземних напівфабрикатів та забезпечить розширення їх застосування підприємствами України.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України з метою розробки технології одержання якісних зливків високоміцних сплавів титану для проведення експериментів та досліджень були використані промислові високоміцні титанові сплави — BT14, BT22, BT23, BT19.

ЕПП дозволяє розділити процеси плавки і кристалізації і, таким чином, в широких межах змінювати нагрів металу в кристалізаторі при незмінній технологічній продуктивності плавки. В умовах сталої технологічної схеми виробництва зливків особливого значення набуває дослідження процесу тепломасопереносу і супутніх їм явищ, що визначають будову і в поєднанні з хімічним складом властивості зливків і деформованих виробів. Разом з тим, вплив процесів тепломасопереносу на структуроутворення зливка, формування структурної та хімічної неоднорідності при одержанні високоміцних сплавів титану способом ЕПП вивчені недостатньо.

При виплавці зливків титанових сплавів способом ЕПП виникає проблема забезпечення заданого хімічного складу металу. Це викликано тим, що плавка в електронно-променевій установці здійснюється при більш високому вакуумі, ніж ВДП, і легуючі елементи з пружністю пари, що перевищує пружність пари титану, випаровуються інтенсивніше. В першу чергу ця проблема стосується алюмінію, тому що у нього одне з найвищих значень пружності пари і цей елемент присутній практично у всіх титанових сплавах.

Характерною особливістю процесу ЕПП з проміжною ємністю є наявність трьох зон плавки — торець витратної заготовки, проміжна ємність і кристалізатор. Були проведені роботи по створенню математичної моделі [9], яка встановлює залежність концентрації елементів в отриманому способом ЕПП з проміжною ємністю зливку сплаву титану від швидкості плавки, концентрації легуючих елементів у витратній заготовці і температури розплаву. Математична модель процесів випаровування при ЕПП будується на основі рівнянь матеріального балансу алюмінію, титану та інших легуючих елементів для кожної стадії плавлення, при цьому зв'язки між стадіями замінюють масопотоками.

Порівняння даних математичного моделювання з натурними експериментами показало, що побудована математична модель описує процес випаровування легуючих елементів з титанових сплавів при ЕПП з досить високим ступенем точності. Так, для зливків сплаву BT19, відносна похибка розрахункових результатів від експериментальних даних при ЕПП склала, відн. %: 4 для алюмінію та хрому; 2 для ванадію; 1,5 для молібдену і 1 для цирконію.

Структуроутворення зливка визначається не тільки марочним складом сплаву, але й теплофізичними умовами його кристалізації і вмістом у ньому домішок. Теплофізичні процеси в кристалізаторі вирішальним чином впливають на структуру зливків, тому необхідно проводити дослідження можливостей поліпшення структури зливків шляхом підвищення швидкостей охолодження при їх кристалізації.

Теплофізичні процеси, що протікають при формуванні зливка в прохідному кристалізаторі під час ЕПП з проміжною ємністю, мають явно виражений тривимірний характер, що зумовлено відсутністю осової симетрії при подачі в нього розплаву. При локальній периферійній подачі розплаву в кристалізатор відбувається складний за структурою рух металу, який супроводжується тепломасопереносом як вздовж течії, так і в інших напрямках за рахунок турбулентних пульсацій розплаву. Докладне врахування розрахунковим шляхом таких теплофізичних процесів можливе тільки за допомогою сумісного рішення тривимірних теплової і гідродинамічної задач.

Для моделювання фізичних процесів, що відбуваються при неперервному литті титану, була сформульована математична модель [10], яка включає в себе закони збереження маси, імпульсу та енергії.

В рамках побудованої математичної моделі дослідження були спрямовані на визначення теплового стану зливка та положення фронту кристалізації при неперервній подачі рідкого титану з проміжною ємністю в кристалізатор в залежності від температури металу на вході та швидкості витягування зливка для ламінарного режиму гідродинамічної течії в рідкій ванні.

В цілому розрахунки показали, що форма рідкої ванни є несиметричною. Хоча фронт кристалізації наближається до плоского, в області входу струменя рідкого металу спостерігається промивання твердої фази біля стінки кристалізатора (рис. 1). Товщина гарнісажу в цій зоні складає 2...3 мм, що в 2...3 рази менше товщини гарнісажу в інших зонах кристалізатора. При русі зливка вниз такий тонкий гарнісаж може руйнуватися та формувати на поверхні зливка добре відомі характерні дефекти типу «заплутування металу».

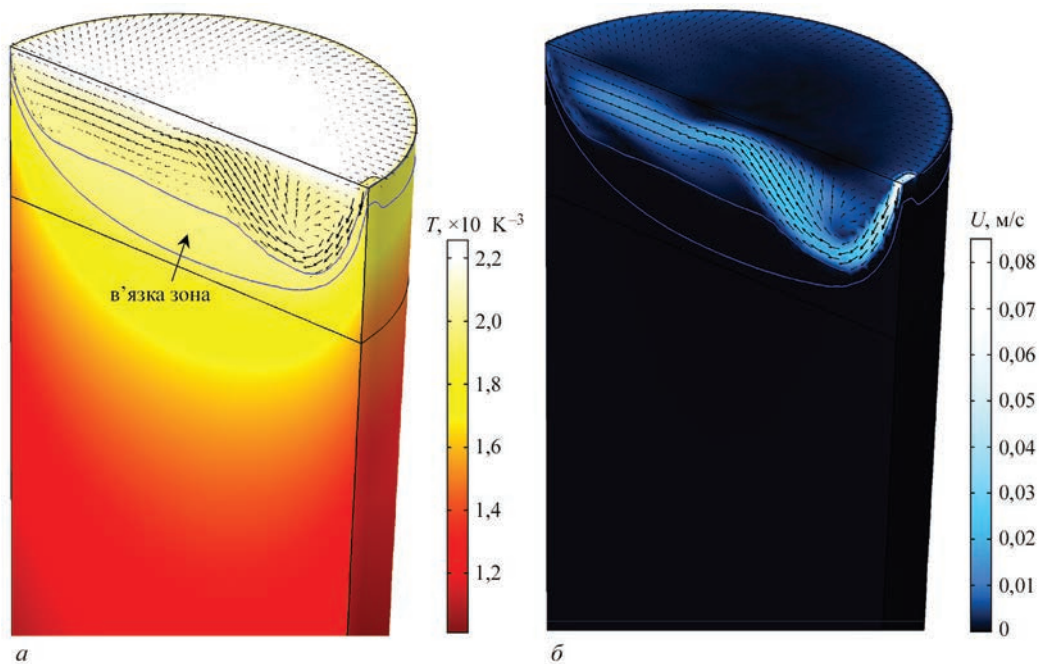


Рис. 1. Розподіл температури (а) та швидкості (б) у зливку під час ЕПП

При одержанні зливків способом ЕПП одним із важливих технологічних параметрів є продуктивність процесу. Тому подальші розрахунки були спрямовані на дослідження впливу швидкості подачі рідкого металу з проміжної ємності в кристалізатор на форму та глибину рідкої ванни. За допомогою проведених в рамках математичної моделі розрахунків побудовано залежність глибини рідкої ванни від продуктивності процесу при ЕПП зливка титану (рис. 2).

Порівняння даних математичного моделювання з результатами експерименту показало, що модель в цілому реально відображає фізичне явище формування рідкої ванни в зливках. Розраховані глибини рідких ванн збігаються з експериментально встановленими в межах 5...12 %.

Розрахунки в рамках побудованих математичних моделей при різних режимах ведення процесу виплавки зливків титану діаметрами 110, 400 та 600 мм та аналіз отриманих даних дозволили визначити оптимальні технологічні режими ЕПП, які забезпечують баланс між формуванням задовільної структури одержуваних зливків та втратами легуючих елементів на випаровування, що позитивно позначається на якості одержуваних зливків.

Технологічні параметри ЕПП високоміцних сплавів титану

Діаметри зливків, мм	100	400	600
Швидкість плавки, кг/год	30	250	300
Швидкість витягування зливка, мм/хв	12	7	4
Потужність в кристалізаторі, кВт	20	120	205
Потужність в проміжній ємності, кВт	120	240	300

Відпрацювання визначених режимів та розробка технології одержання способом ЕПП зливків

складнолегованих сплавів титану проводили при виплавці партії зливків сплавів ВТ14, ВТ22, ВТ23, ВТ19. Отримали зливки круглого перетину діаметрами 110, 400 та 600 мм.

Для оцінки якості металу отриманих зливків проводили дослідження хімічного складу зразків, відібраних по довжині зливка. Результати аналізу хімічного складу металу отриманих зливків (табл. 1) показали, що розподіл легуючих елементів по довжині зливків рівномірний і відповідає марочному складу.

Структура металу зливків (рис. 3) щільна, однорідна, з відсутністю зон, що по різному травляться по перетину зливка. Істотної різниці в структурі центральної зони зливка і периферійної не спостерігається. Характерною для зливків ВДП сегрегації легуючих елементів в жодному із одержаних зливків не виявлено. Кристалічна будова металу зливків однакова по усьому перетину і характеризується кристалами за формою близькими до рівновісних. Ділянки стовбчастої структури відсутні у всіх випадках.

Проведені за допомогою ультразвукового контролю дослідження показали, що у виплавлен-

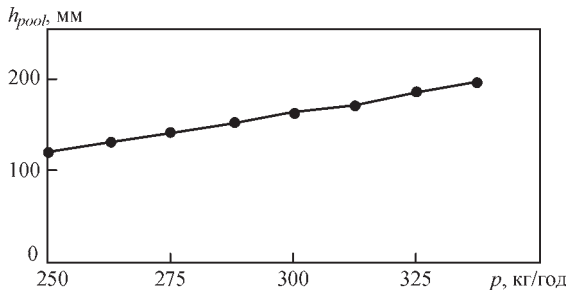


Рис. 2. Залежність глибини рідкої ванни (h_{pool}) від продуктивності (p) при ЕПП зливка титану діаметром 400 мм

Таблиця 1. Розподіл легуючих елементів по довжині зливків титанових сплавів, мас. %

Марка сплаву	Частина зливка	Al	Mo	V	Fe	Zr	Cr	O	N
BT22	Верх	5,1	4,2	4,9	0,90	0,01	1,3	0,11	0,012
	Середина	5,2	4,5	4,7	1,0	—»—	1,4	—	—
	Низ	5,0	4,1	5,0	—»—	—»—	—»—	0,12	0,012
ГОСТ 19807–91		4,4...5,7	4,0...5,5	4,0...5,5	0,5...1,5	<0,3	0,5...1,5	<0,15	<0,05
BT23	Верх	4,5	2,0	4,7	0,5	0,01	0,9	0,10	0,010
	Середина	4,7	2,1	5,0	0,6	—»—	—»—	—	—
	Низ	4,3	1,9	4,7	0,5	—»—	—»—	0,12	0,011
ОСТ 1-90013-81		4,0...6,3	1,5...2,5	4,0...5,0	0,4...0,1	<0,3	0,8...1,4	<0,15	<0,05
BT19	Верх	3,2	5,3	3,8	—	0,8	4,0	0,08	0,006
	Середина	3,4	5,2	3,6	—	0,9	4,2	—	—
	Низ	3,5	—»—	3,3	—	—»—	4,4	0,10	0,005
Вимоги		2,5...3,5	5,0...6,0	3,0...4,0	—	0,5...1,5	4,0...5,0	<0,15	<0,015
BT14	Верх	5,1	3,1	1,5	0,16	0,08	—	0,10	0,02
	Середина	5,2	3,3	—»—	0,19	0,10	—	—	—
	Низ	5,4	—»—	1,6	0,17	0,07	—	0,09	0,02
ГОСТ 19807–91		3,5...6,3	2,5...3,8	0,9...1,9	<0,25	<0,3	—	<0,15	<0,05

них способом ЕПП зливках відсутні нещільності, неметалеві включення з розміром більше 1 мм, а також щільні скупчення більш дрібних включень.

Таким чином, проведені роботи показали, що визначені технологічні режими ЕПП дозволяють одержати якісні бездефектні зливки промислових та вітчизняних високоміцних сплавів титану.

Структура напівфабрикатів або виробів формується в процесі термодформаційної обробки в ході протікання процесів рекристалізації або фазових перетворень і спричиняє істотний вплив на технологічні та експлуатаційні властивості.

Міцність високоміцних титанових сплавів визначається не тільки ступенем легування, а й параметрами обробки тиском, подальшої термічної або термомеханічної обробки. Однак з підвищенням міцності сплаву, як правило, знижується його пластичність, що є істотним недоліком матеріалу при виготовленні з нього конструкцій, що працюють на вібрацію, повторну статику, вигин, ударні навантаження. Тому останнім часом все більша увага приділяється оптимізації параметрів деформування зливків при виготовленні з них напівфабрикатів і режимам термічної обробки.

В даній роботі проведені комплексні дослідження з виготовлення напівфабрикатів із зливків промислових високоміцних сплавів титану, отриманих способом ЕПП.

Зі зливків діаметром 400 мм високоміцного титанового сплаву BT22 було виготовлено напівфабрикати у вигляді прутків діаметром 60 мм.

Спочатку із зливка діаметром 400 мм титанового сплаву BT22 на кувальному пресі були отримані ковани заготовки діаметром 180 мм. Нагрівання вихідних заготовок здійснювали в печі, оснащеній газовими пальниками, до температури 1020 °С.

Перед початком кування нагрівали кувальний бойк до температури 250...300 °С. Кування на початковій стадії обробки зливків проводили до ступеня деформації заготовки 20...30 %. Температура кінця кування була не нижче 800 °С. В кінці першого етапу кування отриману заготовку перерубували на дві рівні частини, після чого клали в піч з наступним нагріванням до температури 980 °С.

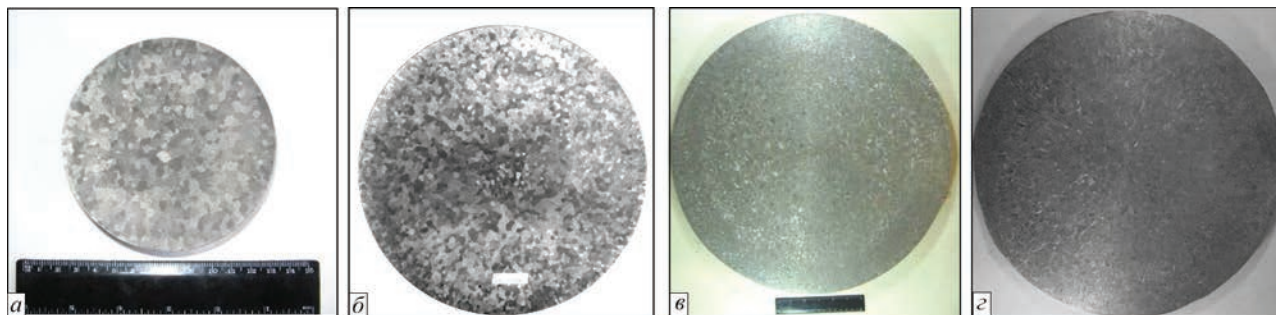


Рис. 3. Макроструктури зливків сплавів титану, одержаних способом ЕПП діаметрами, мм: а — 110 (BT19); б — 400 (BT22); в — 400 (BT23); з — 600 (BT14)

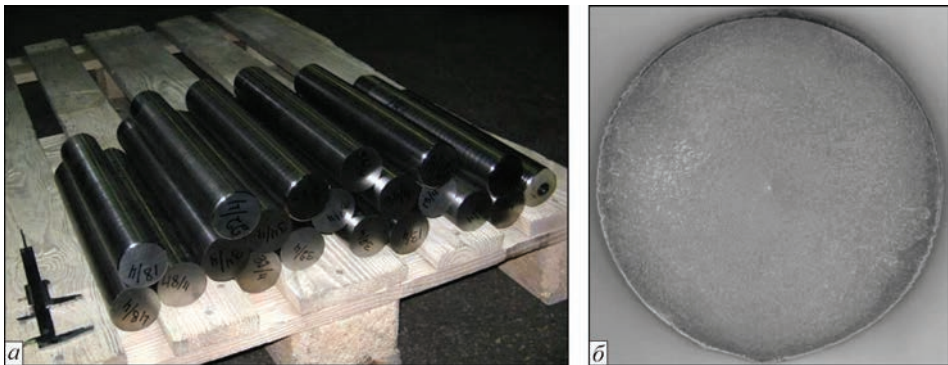


Рис. 4. Пресовані прутки діаметром 60 мм (а) та макроструктура пресованого прутка діаметром 60 мм (б) з титанового сплаву VT22

Таблиця 2. Механічні властивості напівфабрикатів з високоміцного титанового сплаву VT22, одержаного способом ЕПП

Заготовка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	HB
Пресований пруток	1250	1200	10	35	40	320
ОСТ 1 90266–86	>1200	–	>6	>14	>18	300...340

Після нагріву заготовку протягували на діаметр приблизно 180 мм з подальшою правкою.

Далі заготовки діаметром 180 мм були піддані пресуванню в пруток діаметром 60 мм. Нагрівання перед пресуванням здійснювали в електропечі до температури 1050...1100 °С в (α+β)-області. Від отриманих прутків були відібрані проби для визначення макроструктури. У макроструктурі металу отриманих прутків тріщин, розшарувань, пустот, металевих і неметалевих включень не виявлено (рис. 4). Величина макрозерна відповідає 3-му балу відповідно до 10-бальної шкали макроструктур по ГОСТ 26492–85.

Отримані прутки були піддані термічній обробці за такими режимами: нагрів до температури 850 °С з подальшою витримкою 1,5 год; охолодження з піччю до 790 °С, витримка 2 год з подальшим охолодженням на повітрі; старіння при 600 °С, витримка 4 год з подальшим охолодженням на повітрі.

Дані проведених досліджень дозволяють зробити висновок, що механічні властивості напівфабрикатів зі сплаву VT22, одержаного способом ЕПП, повністю відповідають вимогам стандартів (табл. 2).

Вивчення процесів деформаційної обробки сплаву VT19 з метою отримання листових напівфабрикатів, які використовують в подальшому для зварювання конструкцій, є досить важливим завданням.

При виробництві деформованих напівфабрикатів з псевдо-β-сплавів хороші результати отримують при прокатці заготовок, нагрітих до температур β-області, при цьому заключні операції обробки необхідно проводити при температурі трохи нижче точки $T_{\text{пп}}$. Це дозволяє при наступній операції гартування з (α+β)-області отримати матеріал з підвищеними характеристиками міцності, пластичності і в'язкості.

В результаті проведеної термомеханічної обробки зливоків ЕПП сплаву VT19 діаметром 110 мм отримані листи розмірами 300×350 мм, товщиною 6 мм.

Дослідження деформованого металу сплаву VT19, отриманого зі зливка ЕПП, показало, що після прокатки при температурах, що відповідають області існування β-фази, структура складається з рівновісних поліедричних первинних β-зерен розмірами від 80 до 125 мкм (рис. 5, а). Механічні властивості сплаву VT19 наведені в табл. 3.

Слід зауважити, що сплав VT19 зміцнюється шляхом проведення операцій загартовування в воду і старіння. Після проведення вищевказаних операцій міцність матеріалу може підвищуватися до 1550 МПа.

Листи з титанового сплаву VT23 виготовляли із застосуванням поздовжньо-поперечної прокатки, а для отримання необхідної якості поверхні листів застосовували стандартні оздоблювальні операції.

Внутрішньозеренна структура отриманих листів сплаву VT23 (рис. 5, б) складається з пластин α-фази, між якими знаходилася β-фаза. Товщина α-пластин становить 0,7...1,0 мкм. По границях β-зерен спостерігалася α-облямівка товщиною до 1,5 мкм. Така мікроструктура характерна для титанових (α+β)-сплавів мартенситного типу, до якого відноситься і сплав VT23. Напрямок частинок α-фази ненаправлений.

Аналіз результатів механічних властивостей сплаву VT23 показав, що метал напівфабрикатів у вигляді листів відповідає вимогам стандартів (табл. 4).

Таблиця 3. Механічні властивості деформованого сплаву VT19 ЕПП

Термообробка	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Відпал 750 °С, 1 год	978	887	12	42

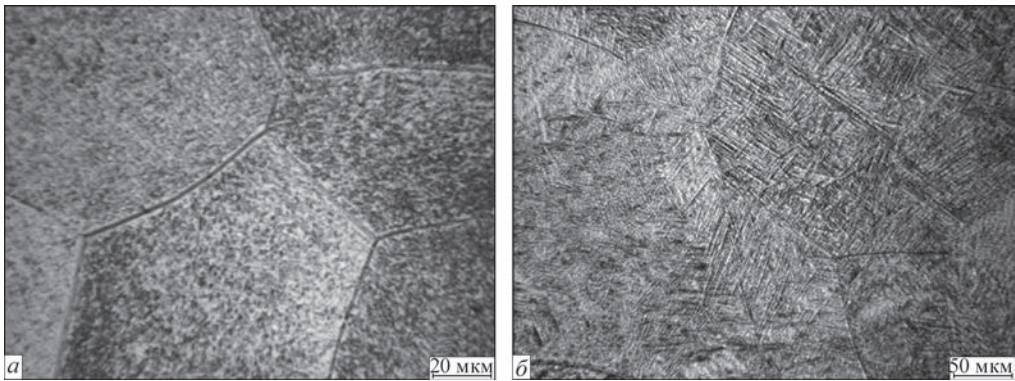


Рис. 5. Мікроструктура пластин деформованих сплавів: а — BT19; б — BT23

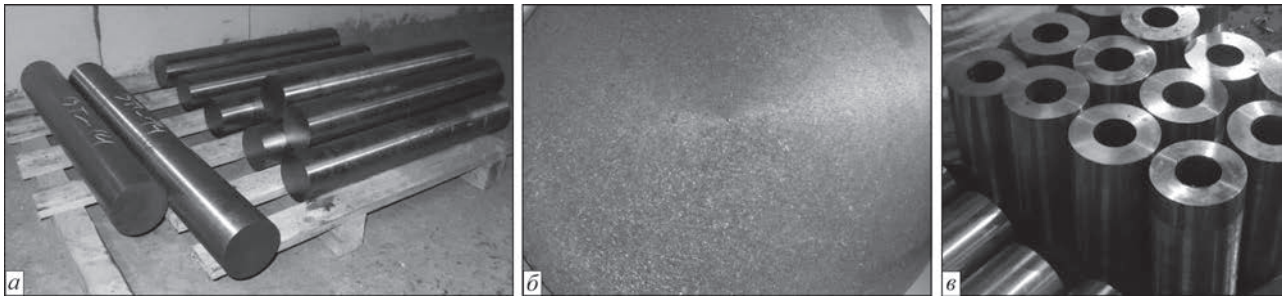


Рис. 6. Сплав BT14: а — ковані прутки діаметром 200 мм; б — макроструктура кованих прутків; в — трубні заготовки діаметром 190/90 мм

Таблиця 4. Механічні властивості металу листів сплаву BT23

Зразок	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCV, Дж/см ²
1	1126	1072	11,2	19,5	43,7
2	1106	1054	12,7	24,9	47,9
3	1114	1065	10,7	19,7	43,3
ОСТ 1-90013–81	1100...1200	—	10...13	—	—

Таблиця 5. Механічні властивості трубних заготовок діаметром 190/90 зі сплаву BT14

Поковка	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/м ²
1	923	14,0	40,0	6,9
2	911	17,0	42,0	7,0
3	903	13,0	39,0	6,3
ТУ 1-5-127–73	900...1100	>10,0	>35,0	>5,0

Зі зливків діаметром 600 мм титанового сплаву BT14, виплавленого способом ЕПП, були отримані ковані прутки діаметром 200 мм (рис. 6, а).

Макроструктура кованої заготовки, що виявлена на макротемплеті, не має тріщин, розшарувань, волосовин, пустот, металевих і неметалевих включень, видимих неозброєним оком, і відповідає 6-му балу шкали макроструктур (рис. 6, б).

Трубні заготовки отримували механічною обробкою кованих прутків. Способом свердління було отримано отвір діаметром 90 мм в центральній частині трубних заготовок (рис. 6, в).

Трубні заготовки діаметром 190/90 мм із титанового сплаву BT14 піддавали відпалу при тем-

пературі 750 °С протягом 1 год з наступним охолодженням на повітрі.

Механічні властивості трубних заготовок визначалися на зразках, вирізаних в поздовжньому напрямку (табл. 5). Як видно з таблиці, межа міцності трубних заготовок в поздовжньому напрямку дещо знижується, проте підвищуються показники пластичності.

Висновки

1. Проведені роботи показують, що розроблена технологія ЕПП є ефективним способом отримання якісних зливків промислових високоміцних сплавів титану, а якість напівфабрикатів у вигляді листів, прутків, трубних заготовок, виготовлених з цих зливків, відповідає вимогам стандартів. При цьому метал одержаних напівфабрикатів характеризується підвищеною пластичністю при високих показниках міцності.

2. За розробленою технологією на ДП «НВЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України» організовано промислове виробництво зливків високоміцних титанових сплавів діаметром від 110 до

600 мм та довжиною до 4 м. Продукція ДП «НВЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України» постає як вітчизняним заводам, так і за кордон.

3. Виконані дослідження дозволили створити технологію електронно-променевого плавлення зливків високоміцних титанових сплавів та обладнання для її реалізації і організувати в Україні конкурентоспроможне на світових ринках виробництво високоякісних зливків та напівфабрикатів з титану та сплавів на його основі, що, в свою чергу, вирішило питання імпортозаміщення виробів з високоміцних титанових сплавів.

Список літератури

1. Каблов Е.Н. (2012) Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 г. *Авиационные материалы и технологии*, **5**, 7–17.
2. Хорев А.И. (2000) Титановые сплавы для авиакосмической техники и перспектива их развития. *НТС «Авиационные материалы и технологии. Перспективные алюминиевые и титановые сплавы для авиакосмической техники»*, 11–32.
3. Моляр А.Г., Коцюба А.А., Бычков А.С. и др. (2015) *Конструкционные материалы в самолетостроении*. Киев, КВИЦ.
4. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В. (2006) *Электронно-лучевая плавка титана*. Киев, Наукова думка.
5. Патон Б.Е., Ахонин С.В., Березос В.А. (2018) Развитие технологий электронно-лучевой плавки металлов в ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. *Современная электрометаллургия*, **4**, 19–35. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2018.04.01>
6. Ахонин С.В. (2003) *Процессы рафинирования в вакууме и оптимизация режимов электронно-лучевой плавки высококреакционных и тугоплавких металлов*: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона.
7. Лесной А.Б., Демченко В.Ф. (2003) Моделирование гидродинамики и массообмена при электронно-лучевом переплаве титановых слитков. *Современная электрометаллургия*, **3**, 19–24.
8. Жук Г.В. (2008) Моделирование процессов переноса тепла при формировании слитков ЭЛПЕ. *Там же*, **4**, 14–17.
9. Ахонин С.В., Северин А.Ю., Березос В.А. и др. (2016) Особенности выплавки слитков титанового сплава BT19 в электронно-лучевой установке с промежуточной емкостью. *Там же*, **2**, 23–27.
10. Ахонин С.В., Березос В.О., Бондар О.І. та ін. (2021) Математичне моделювання гідродинамічних та теплових процесів при кристалізації титанових зливків ЕПП. *Сучасна електрометалургія*, **1**, 17–24. <https://doi.org/10.37434/sem2021.01.02>

References

1. Kablov, E.N. (2012) Strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period up to 2030. *Aviats. Materialy i Tekhnologii*, **5**, 7–17 [in Russian].
2. Khorev, A.I., (2000) Titanium alloys for aerospace engineering and prospect of their development. In: Promising aluminum and titanium alloys for aerospace engineering. *Aviats. Materialy i Tekhnologii*, 11–32 [in Russian].
3. Molyar, A.G., Kotsyuba, A.A., Bychkov, A.S. et al. (2015) *Structural materials in aircraft construction*. Kiev, KVITs [in Russian].
4. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk, G.V. (2006) *Electron beam melting of titanium*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
5. Paton, B.E., Akhonin, S.V., Berezos, V.A. (2018) Development of technologies of electron beam melting of metals at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. *Suchasna Elektrometal.*, **4**, 19–35 [in Ukrainian]. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/sem2018.04.01>
6. Akhonin, S.V. (2003) *Processes of refinement in vacuum and optimization of modes of electron beam melting of high-reactive and refractory metals*: Syn. of Thesis for Dr. of Tech. Sci. Degree. Kiev, PWI [in Russian].
7. Lesnoj, A.B., Demchenko, V.F. (2003) Modeling of hydrodynamics and mass exchange in electron beam remelting of titanium alloys. *Advances in Electrometallurgy*, **3**, 17–21.
8. Zhuk, G.V., Trigub, N.P., Fesan, A.A. (2008) Energy characteristics of EBCHM process of titanium alloys. *Ibid.*, **4**, 13–15.
9. Akhonin, S.V., Severin, A.Yu., Berezos, V.A. et al. (2016) Peculiarities of melting of titanium alloy VT19 ingots in electron beam cold hearth installation. *Sovrem. Elektrometall.*, **2**, 23–27 [in Russian].
10. Akhonin, S.V., Berezos, V.A., Bondar O.I. et al. (2021) Mathematical modeling of hydrodynamic and thermal processes at crystallization of titanium ingots produced by EBM. *Suchasna Elektrometal.*, **1**, 17–24 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.37434/sem2021.01.02>

PRODUCTION OF INGOTS FROM HIGH-STRENGTH STRUCTURAL TITANIUM-BASE ALLOYS BY ELECTRON BEAM MELTING

V.O. Berezos

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

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

Mathematical modeling methods were used to study the thermal condition of titanium alloy ingots at electron beam melting, taking into account the hydrodynamic flows and processes of chemical element evaporation during electron beam melting of high-strength structural titanium alloys. Proceeding from calculations conducted within the scope of the mathematical models, technological modes were determined and technology was developed for electron beam melting of high-strength titanium alloy ingots, ensuring the high quality of the produced metal. Work to produce the semi-finished products was performed, and the high quality of titanium alloys, obtained by the developed electron beam melting technology, was demonstrated. Ref. 10, Tabl. 5, Fig. 6.

Key words: electron beam melting; cold hearth; ingot; high-strength titanium alloy; mathematical model; crystallization; evaporation; alloying components; chemical composition; structure; deformation treatment; heat treatment; mechanical properties

Надійшла до редакції 10.11.2021

ПЕРЕПЛАВ ВІДХОДІВ ТИТАНУ ТА ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ В УМОВАХ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОЇ ПЛАВКИ

В.Р. Бурнашев, Ю.О. Никитенко, В.В. Барабаш, В.О. Шаповалов

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Розглянуто можливості щодо переробки титану та титанових відходів в умовах плазово-дугового перепау в наскрізний кристалізатор у вигляді возгонів, що утворилися в електронно-променевих печах, та ливникових систем сплаву типу BT5, отриманих в вакуумно-індукційних печах. Вивчено можливості плазово-дугової гарнісажної плавки при переробці цих відходів в невеликі зливки та 70%-ний феротитан. Вивчено поведінку водню в атмосфері печі при перепау зазначених відходів. Показано, що в умовах плазово-дугового перепау можливо переробляти відходи титану та титанових сплавів в заготовки для подальшого перепау, виливки та феротитан. Бібліогр. 9, табл. 3, рис. 7.

Ключові слова: плазово-дуговий перепад; плазово-дуговий гарнісажний перепад; титан; феротитан; сплави титану; перепад відходів титану; зливки

Основна задача виробництва титану складається в зниженні його вартості при забезпеченні високої якості металу по всьому технологічному ланцюгу.

Зростання обсягів виробництва титану і його сплавів неминує супроводжується збільшенням відходів, що утворюються. Проблемі ефективного використання відходів титану та сплавів на його основі приділялося достатньо уваги з початку промислового виробництва. Кількість відходів цього металу на різних стадіях виробництва може досягати до 70 % від вихідної шихти.

Значна кількість титанових відходів у вигляді стружки, обрізків утворюються на підприємствах хімічного машинобудування та інших галузей промисловості. Більшість з них є кондиційними матеріалами, хімічний склад яких відповідає марочним. Відповідно відходи можуть залучатися у виробництво зливок і литих виробів з титану та титанових сплавів, феротитану і лігатур.

Найбільш ефективним способом утилізації відходів є перепад.

На даний час існує декілька технологічних процесів спеціальної електрометалургії, в яких використовуються відходи титану, що отримані на стадіях його виплавки або механічної обробки. Це гарнісажний вакуумно-дуговий перепад (ВДП) [1, 2] з залученням відходів до 30...35 %. Титанові зливки з недроблених блоків губчастого титану отримують способом електронно-променевої плавки (ЕПП) [3, 4]. Електрошлаковий перепад (ЕШП) з невитратним електродом застосовується для перепау шихтових матеріалів, утилізації стружки і мірних обрізків титану [5]. Були спроби переробляти відходи титану і титанових сплавів в умовах індукційної плавки в секційному криста-

лізаторі (ІПСК). Важливою особливістю ІПСК є те, що плавлення і кристалізація зливка відбувається в електромагнітному полі великої інтенсивності, що викликає енергійне перемішування металевого розплаву. Інтенсивна циркуляція металу є одною з найважливіших переваг цього процесу, оскільки забезпечується рівномірний обігрів і розподіл елементів в обсязі рідкої ванни. Впроваджено в промисловість і плазово-дугову технологію виробництва титанових зливок [6, 7], яка характеризується наявністю незалежного джерела нагріву — плазмотрона. Це дозволяє регулювати тривалість перебування металу в рідкому стані, глибину і форму металеві ванни. Застосування декількох плазмотронів додає процесу плазово-дугового перепау (ПДП) значної технологічної гнучкості.

Технологічні схеми ПДП передбачають перепад як витратної заготовки, так і некомпактної шихти. Як показали численні дослідження [8, 9], титанова губка дрібної фракції, ливарні відходи титанових сплавів, листові обрізи та стружка можуть бути перепавлені способом ПДП в зливки первинного і вторинного титану і його сплавів.

Методика проведення експериментів. Дана робота присвячена вивченню процесу перепау відходів титану у вигляді возгонів, що утворилися в електронно-променевих печах, а також ливникових систем сплаву марки BT5-Л.

Експерименти проводили на печі УПП-3 за двома схемами.

Схема 1 — класичний перепад в наскрізний мідний водоохолоджуваний кристалізатор діаметром 100 мм (рис. 1, а).

В.Р. Бурнашев — <https://orcid.org/0000-0001-6807-3810>, Ю.О. Никитенко — <https://orcid.org/0000-0002-3603-2333>, В.В. Барабаш — <https://orcid.org/0000-0001-8138-3565>, В.О. Шаповалов — <https://orcid.org/0000-0003-1339-3089>

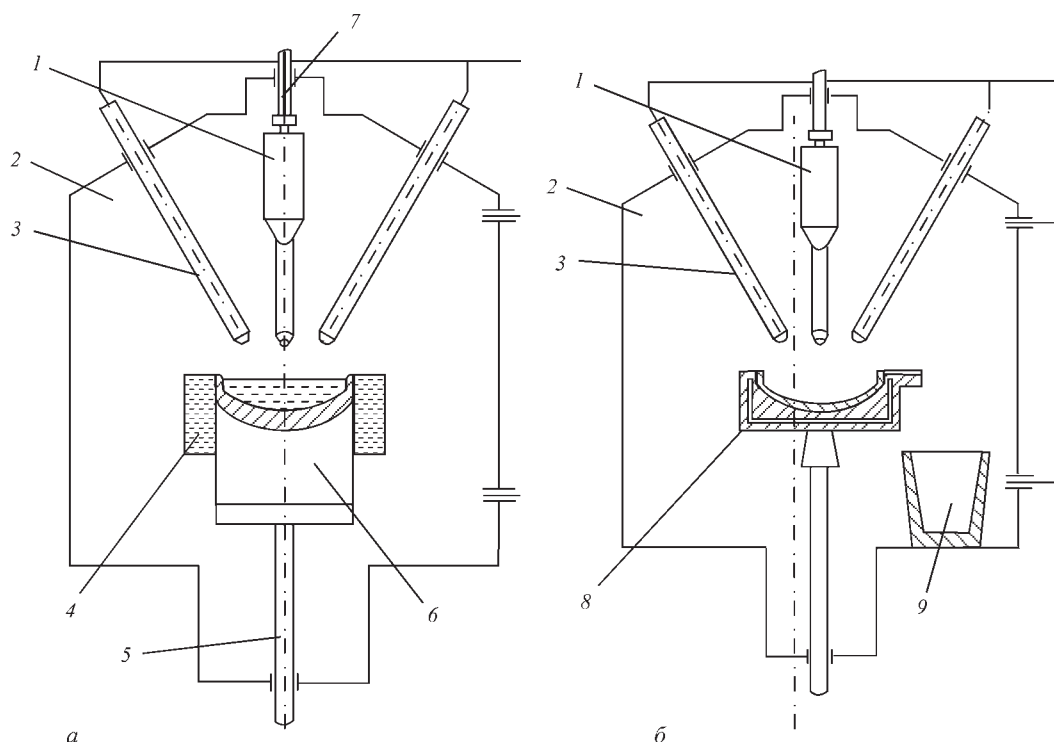


Рис. 1. Схеми перепау в наскрізний мідний водоохолоджуванй кристалізатор (а) та в мідному водоохолоджуваному тиглі (б): 1 — заготовка; 2 — плавильна камера; 3 — плазмотрон; 4 — кристалізатор; 5 — зливок; 6 — механізм витягування зливка; 7 — механізм подачі заготовки; 8 — тигель; 9 — виливниця

Схема 2 — плавка відходів титану та його сплавів в мідному водоохолоджуваному тиглі ємністю 1000 см³ (рис. 1, б).

Установка обладнана чотирма плазмотронами постійного струму загальною потужністю 120 кВт. Радіально розташовані плазмотрони забезпечують рівномірний обігрів і можливість спрямованого нагрівання в будь-якій точці рідкої ванни.

Для проведення даних досліджень способом аргонного зварювання з конгломератів титанових возгонів (рис. 2, а) і ливників (рис. 2, б) були зварені витратні заготовки, які використовувалися при перепау на печі УПП-3 в кристалізатор діаметром 100 мм.

Експерименти починали з того, що закріплювали витратні заготовки на механізм подачі. Закривали камеру і проводили вакуумування за допомогою вакуумного насоса ВН-2 до тиску $1 \cdot 10^{-2}$ МПа. Після цього камеру заповнювали аргонном.

При досягненні надлишкового тиску (0,025 МПа) проводили перепау в наскрізний кристалізатор діаметром 100 мм.

Переробку титанових відходів в феротитан і невеликі зливки проводили в мідному водоохолоджуваному тиглі. Для отримання якісних зливоків в кінці плавки тиск в камері піднімали до 0,05...0,07 МПа, після цього нахилили тигель і зливали метал в кокіль.

В якості плазموутворюючого газу використовували аргон (ГОСТ 10157-74). Витрату плазمو-

творюючого газу контролювали: загальну ротаметром РС-5, а на кожному плазмотроні — РС-3.

При цьому змінювали технологічні параметри — витрату газу, тиск газу в камері, швидкість витягування зливка і потужність.



Рис. 2. Витратні заготовки для перепау: а — конгломерати титанових возгонів; б — ливникові системи

Таблиця 1. Основні технологічні параметри переплаву титану і титанових сплавів

Схема переплаву	Швидкість витягування зливка, мм/хв	Тиск газу в плавильній камері, МПа	Загальна потужність плазмотронів, кВт	Щільність енергії, кВт/см²	Витрати аргону, л/год
Схема 1	3	0,025	40	0,51	1640
	6	0,04	48	0,61	1680
Схема 2	—	0,05	52	0,26	1920
		0,1	64	0,318	1960

Таблиця 2. Хімічний склад вихідного матеріалу і після переплаву

Матеріал переплаву	Хімічний склад, мас. %						
	Al	Si	Ca	V	Cr	Mn	Fe
Вихідний	0,7	0,59	0,015	0,065	0,23	0,065	0,75
Переплав конгломерату	0,2	—	—	—	0,43	0,018	0,46
Вихідний	5,3	0,21	—	—	0,04	—	0,34
Переплав BT5-Л	5,2	0,15	—	—	0,021	—	—»—

Закінчення табл. 2

Матеріал переплаву	Хімічний склад, мас. %				Вміст газових домішок		
	Ni	Cu	Zr	Ti	[O]	[N]	[H]
Вихідний	0,025	0,041	0,32	97,2	0,43	0,011	0,0056
Переплав конгломерату	—	0,023	—	98,7	—»—	—»—	0,0036
Вихідний	—	—	0,116	94,0	0,025	—»—	0,0041
Переплав BT5-Л	—	—	0,100	94,4	0,024	0,012	0,0030

Режими проведення експерименту наведені в табл. 1.

Методи та результати досліджень. Для вирішення поставлених завдань і отримання основних результатів даної роботи використовували аналітичні та експериментальні методи досліджень. Склад металу визначали методами хімічного та спектрального аналізу. Вміст газів в металі вимірювали на апараті фірми «LECO», водню в відпрацьованих газах в атмосфері печі — методом хроматографічного аналізу приладом «Газохром 3101».

В результаті проведених експериментів по переплаву конгломерату возгонів титану були отримані заготовки діаметром 98 мм, довжиною

300...320 мм, вагою 8,0...8,5 кг (рис. 3). Хімічний склад злиwkів наведено в табл. 2.

При проведенні експерименту по отриманню феротитану в якості вихідних матеріалів використовували армко-залізо марки Ар-1, а також возгони титану з електронно-променевих печей. Зовнішній вигляд возгонів представлений на рис. 2. Відомо, що при електронно-променевому переплаві 1-ої тонни титану випаровується і осідає на стінках камери близько 20...50 кг металу [1]. Тому переробка таких відходів є перспективною.

Особливістю плазово-дугової гарнісажної плавки є те, що метал для його очищення можна підтримувати в рідкому стані скільки необхідно без побоювання забруднити його домішками з тигля.

Завантаження компонентів сплаву здійснювали наступним чином: частину возгонів дрібної фракції укладали на дно тигля, зверху завантажували армко-залізо, відсутню частину шихти титану (возгонів) у вигляді довгомірних конгломератів підвішували на механізм подачі заготовки печі УПП-3 (рис. 1). Загальне завантаження зашихтовувалось при витратах титану (возгонів) 70 %, армко-заліза — 30 %.

Після завантаження шихти камеру печі вакуумували до тиску 10⁻² МПа з наступним заповненням аргоном до тиску 0,025 МПа. Потім включали чотири плазмотрони ПДМ-7, доводили потужність до 60 кВт і розплавляли шихту в тиглі.



Рис. 3. Зовнішній вигляд поверхні злиwkів: а — переплавлений конгломерат титанових возгонів; б — переплавлені ливникові системи типу BT5-Л

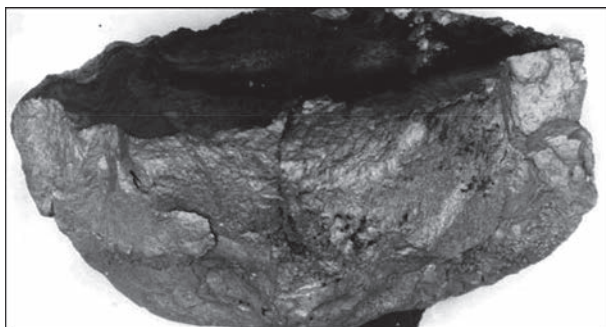


Рис. 4. Зовнішній вигляд відколу зразка феротитану

Надалі в зону дії плазмотронів подавали конгломерат возгонів титану і сплавляли його в рідку ванну. Плазмотрони розташовували в радіальному положенні для більш повного перемішування рідкого металу. Витримка після розплавлення шихти для феротитану становила 15 хв.

В результаті експериментів отримані зразки вагою 4,5 кг кожної плавки. Зовнішній вигляд відколу зразка феротитану показав, що метал щільний, без будь-яких несучільностей (рис. 4).

Також були отримані невеликі зливки з відходів сплаву ВТ5-Л (рис. 5) у вигляді кілець з розмірами, мм: діаметр — 110, товщина — 12, висота — 45 та вагою 0,6 кг.

У даній роботі досліджено хімічний склад феротитану. Порівняння хімічного складу, виплавленого способом плазово-дугової гарнісажної плавки (ПДГП) і феротитану по ГОСТ 4761–91, наведено в табл. 3.

Обговорення результатів. Хімічний склад, наведений у табл. 2, показує, що після переплавки конгломерату возгонів титану підвищується чистота титану майже на 1,5 %. Причому, знижується вміст таких шкідливих домішок, як мідь, нікель, кальцій та ін. Вірогідно, що зниження вмісту цих домішок відбувається за рахунок їх випалювання в процесі плавки. Також знижується вміст водню. При проведенні цих експериментів було вивчено поведінку водню в атмосфері печі (рис. 6).

З наведених даних видно, що в початковий період плавки в атмосфері печі водень відсутній і з'являється при появі крапель з розплавленої заготовки. Причому для конгломерату возгонів титану він становить до 1,25 %, а для ливників — до 0,4 %. При зниженні швидкості подачі заготовки

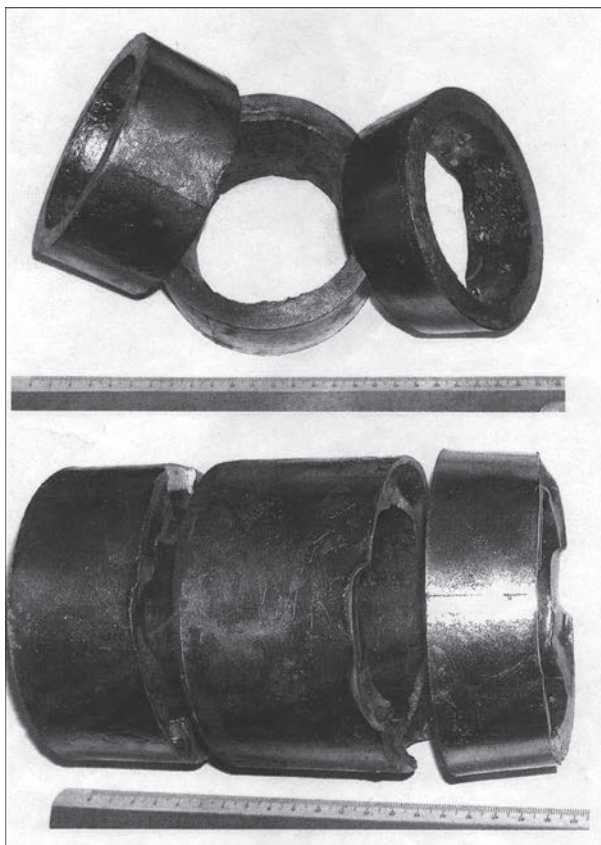


Рис. 5. Зливки, що виплавлені з відходів сплаву ВТ5-Л

в зону плавки знижується вміст водню в атмосфері печі до 0,47 і 0,1 % відповідно. Для того, щоб знизити вміст водню в кінцевому продукті проводили відкачування відпрацьованих газів з камери, доводячи надлишковий тиск до 0,01...0,02 МПа. В результаті такої процедури вміст водню в металі знизився на 50...70 % (табл. 2).

Металографічні дослідження поперечного темплету зливка показали, що отримана структура без помітних металургійних дефектів (рис. 7).

З наведених у табл. 3 даних видно, що в складі феротитану, виплавленого з конгломерату, практично відсутні елементи W, Mo, Zr, Al. Відсутність цих домішок призвело до зниження температури плавлення феротитану. Цей показник, а також чистота по різних включенням є важливим при виплавці та легуванні різних сталей і сплавів відповідального призначення.

При цьому продуктивність виплавки феротитану складала 20 кг/год при питомій витраті електроенергії — 2,5 кВт/кг, аргону — 0,12 м³/кг.

Таблиця 3. Хімічний склад стандартного феротитану, отриманого ПДГП, мас. %

Марка феротитану	Ti	Al	Si	C	P	S	Cu	V	Mo	Zr	Sn
	не менше	не більше									
ФТi70C05	68...75	0,50	0,50	0,20	0,05	0,05	0,20	0,60	0,60	0,60	0,10
ФТi70C1	—»—	5,00	1,00	0,40	—»—	—»—	0,04	3,00	2,50	2,00	0,50
ФТi70 після ПДГП	70,20	—	—	0,15	0,03	0,02	0,07	—	—	—	—

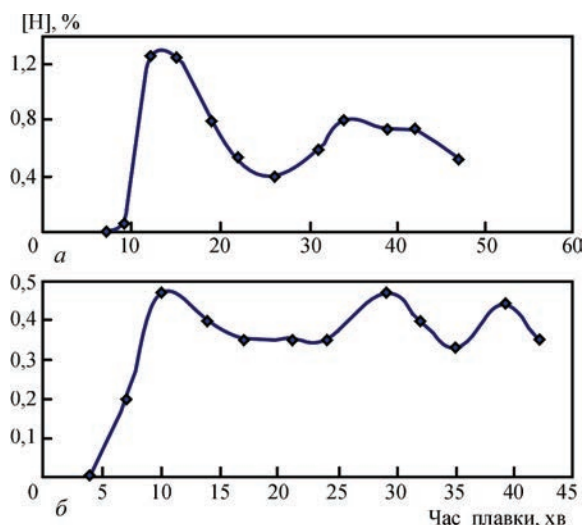


Рис. 6. Поведінка водню в газовій атмосфері печі при переплаві возгонів титану (а) та ливників (б)

Отримані результати досліджень роблять привабливими процес плазово-дугової гарнісажної плавки при отриманні 70%-ного феротитану, а також плазово-дугової плавки для отримання заготовок з конгломератів титанових возгонів і ливників.

Висновки

1. Показано, що після ПДП титанових возгонів і відходів ливників можливо отримати якісні заготовки діаметром 98 мм для подальшого переділу.

2. Визначено, що при переробці титанових відходів необхідно контролювати вміст домішок у вихідному металі та в аргоні.

3. Експериментально встановлено, що при переплаві титану і титанових сплавів необхідно відкачувати відпрацьовані гази з атмосфери печі, що знижує вміст газових домішок.

4. Досліджено поведінку водню при переробці титану і його сплавів та визначено, що для зниження вмісту водню в металі на 50...70 % необхідно вчасно видаляти відпрацьовані гази з атмосфери печі.

5. Показано, що в умовах ПДГП можливе отримання якісного 70%-ного феротитану.

Список літератури

1. Гармата В.Л., Петрунько А.Н., Галицкий Н.В. и др. (1983) *Титан*. Москва, Металлургия.
2. Константинов В.С., Шаповалов В.А., Давыдов С.И. и др. (2009) Получение расходимых электродов из губчатого титана для переплава в гарнисажных литейных печах. *Современная электрометаллургия*, 2, 39–42.
3. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В. (2005) Получение титановых слитков из недробленых блоков губчатого титана методом электронно-лучевой плавки. *Титан*, 2, 23–36.
4. Тригуб Н.П., Ахонин С.В. Жук Г.В. и др. (2006) Электронно-лучевая плавка недробленых блоков губчатого титана. *Там же*, 4, 6–9.



Рис. 7. Структура отриманого зливка титану

5. Патон Б.Е., Медовар Б.И., Саенко В.Я., Кумыш В.Н. (1995) Получение слитков титана и его сплавов путем переплава непосредственно титановой губки и скрапа. *Проблемы специальной электрометаллургии*, 3, 14–23.
6. Латаш Ю.В., Константинов В.С., Горбенко В.А. и др. (1989) Промышленное применение низкотемпературной плазмы при выплавке слитков электродов из низкосортного губчатого титана для производства запорной титановой арматуры. *Там же*, 3, 71–75.
7. Шейко И.В., Шаповалов В.А., Константинов В.С. (2007) Альтернативные технологии переплава промышленных отходов титана и его сплавов. *Современная электрометаллургия*, 3, 44–53.
8. Должиков В.В., Латаш Ю.В., Шехтер С.Я. и др. (1983) Некоторые исследования выплавки слитков вторичного титана на установке У-599. *Проблемы специальной электрометаллургии*, 18, 85–88.
9. Жадкевич М.Л., Шаповалов В.А., Теслевич С.М. и др. (2004) Исследование состава газовой фазы при плазменно-дуговой плавке титана из прессованной заготовки. *Современная электрометаллургия*, 4, 24–28.

References

1. Garmata, V.L., Petrunko, A.N., Galitsky, N.V. et al. (1983) *Titanium*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
2. Konstantinov, V.S., Shapovalov, V.A., Davydov, S.I. et al. (2009) Production of consumable electrodes from titanium sponge for remelting in skull casting furnaces. *Advances in Electrometallurgy*, 2, 123–126
3. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V. (2005) Producing of titanium ingots from whole blocks of sponge titanium by electron beam melting method. *Titan*, 2, 23–36.
4. Trigub, N.P., Akhonin, S.V., Zhuk, G.V. et al. (2006) Electron beam melting of uncrushed sponge titanium blocks. *Ibid.*, 4, 5–7.
5. Paton, B.E., Medovar, B.I., Saenko, V.Ya., Kumysh, V.N. (1995) Production of ingots of titanium and its alloys by remelting of titanium sponge and scrap. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, 3, 14–23 [in Russian].
6. Latash, Yu.V., Konstantinov, V.S., Gorbenko, V.A. et al. (1989) Industrial application of low-temperature plasma in smelting of ingots of electrodes from low-grade spongy titanium for production of titanium stop valves. *Ibid.*, 3, 71–75 [in Russian].
7. Shejko, I.V., Shapovalov, V.A., Konstantinov, V.S. (2007) Alternative technologies of remelting of industrial wastes of titanium and alloys thereof. *Advances in Electrometallurgy*, 3, 44–50.

8. Dolzhikov, V.V., Latash, Yu.V., Shekhter, S.Ya. et al. (1983) Some investigations of melting of secondary titanium ingots in U-599 unit. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **18**, 85–88 [in Russian].
9. Zhadkevich, M.L., Shapovalov, V.A., Teslevich, S.M. et al. (2004) Study of gas phase composition in plasma-arc melting of titanium from a pressed billet. *Advances in Electrometallurgy*, **4**, 21–24.

REMELTING WASTES OF TITANIUM AND TITANIUM ALLOYS UNDER THE CONDITIONS OF PLASMA-ARC MELTING

V.R. Burnashev, Yu.O. Nykytenko, V.V. Barabash, V.O. Shapovalov

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

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

Possibilities are considered of processing titanium and titanium wastes under the conditions of plasma-arc remelting into a through crucible in the form of sublimates, which formed in electron beam furnaces and gate systems from VT5 type alloy, produced in vacuum induction furnaces. Possibilities of plasma-arc skull melting at processing these wastes into small ingots and 70 % ferrotitanium were studied. Hydrogen behaviour in furnace atmosphere at remelting of the above-mentioned wastes was investigated. It is shown that under the conditions of plasma-arc remelting it is possible to process titanium and titanium alloy wastes into billets for further remelting, castings and ferrotitanium. Ref. 9, Tabl. 3, Fig. 7.

Key words: plasma-arc remelting; plasma-arc skull remelting; titanium; ferrotitanium; titanium alloys; remelting of titanium wastes; ingots

Надійшла до редакції 05.11.2011

РОЗРОБЛЕНО В ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА

ТЕХНОЛОГІЯ РЕМОНТУ ЗНОШЕНИХ ДІЛЯНОК РОБОЧИХ ОРГАНІВ СТАЛЕВИХ І МАТРИЧНИХ КОРПУСІВ БУРОВИХ ДОЛІТ

Область застосування: буровий інструмент для видобутку нафти і газу.

Галузі застосування: нафтогазова та гірничодобувна промисловість.

Основні технічні характеристики та переваги

- ▶ Діаметр обстежуваних бурових доліт від 92 до 450 мм;
- ▶ Відновлення озброєння робочих органів корпусів матричних і сталевих доліт модифіковані полікристалічні алмазні різці PDC (Polycrystalline Diamond Cutter) з високою ударною, абразивною стійкістю та поліпшеною термостійкістю;
- ▶ Матричні долота PDC із твердосплавним корпусом, що відновлюються композиційні матеріали на основі систем: Ni–Cr, Ni–Cr–Co, Ni–Cr–B–Si з вмістом ультратвердих карбідів вольфраму до 65 %;
- ▶ Сталеві долота PDC із захисним покриттям робочих органів, що відновлюються композиційні матеріали на основі систем: Ni, Ni–Cr, Ni–Cr–Co, Ni–Cr–B–Si з вмістом ультратвердих карбідів вольфраму до 75 %;
- ▶ Стійкість відремонтованих матричних і сталевих бурових доліт підвищує середню проходку на долото, механічну і комерційну швидкість буріння та суттєво зменшує затрати при спуску-підніманні бурових доліт

Особливості застосування

- ▶ Діагностика аномального зношення робочих органів бурових доліт і головок після певного ресурсу роботи для визначення критеріїв ремонтпридатності
- ▶ Буріння нафтогазових свердловин відновленими долотами дозволяє заощадити до 100 % коштів



Матричне 6-ти лопатеве долото



Рестаурація лопаті



Відновлене долото

ВПЛИВ ТРИВАЛИХ ВИТРИМОК НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ ЗРАЗКІВ ЗІ СПЛАВУ IN625, ВИГОТОВЛЕНИХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ

Н.О. Лисенко, О.О. Педаш, В.В. Клочихін, П.О. Касай

АТ «МОТОР СІЧ». 69068, м. Запоріжжя. E-mail: tb.ugmet@motorsich.com

Наведено результати дослідження тривалих витримок на структуру і властивості зразків, виготовлених способом селективного лазерного плавлення порошків зі сплаву Inconel 625, отриманих методом відцентрового плазмового розпилення пруткової заготовки, що швидко обертається (PREP-процес). Виконано дослідження хімічного складу, макро- і мікроструктури, механічних і жароміцних властивостей зразків, побудованих в напрямку x і z . Дослідженню підлягали зразки в стані після побудови та гарячого ізостатичного пресування з наступною термообробкою за різними варіантами. Результати дослідження показали, що проведення операції гарячого ізостатичного пресування зразків з подальшою стандартною термообробкою сприяють практично повного усунення мікропористості у внутрішніх обсягах металу і отримання більш однорідного твердого розчину. Встановлено, що тривалі витримки при температурі 900 °C сприяють зниженню пластичних і жароміцних властивостей сплаву Inconel 625 за рахунок пластинчастих виділень частинок δ -фази. На підставі проведеного дослідження запропоновано режим відновлювальної термообробки. Крім того, показано, що тривалі витримки при температурах 700 і 980 °C не призводять до виділення пластинчастої δ -фази. Бібліогр. 6, табл. 5, рис. 7.

Ключові слова: жароміцний сплав; адитивні технології; селективне лазерне плавлення; гаряче ізостатичне пресування; термічна обробка

Розвиток адитивних технологій, зокрема технології селективного лазерного плавлення (СЛП), дозволяє виготовляти вироби з металу складної геометричної форми за рахунок 3D компактування безпосередньо з комп'ютерної моделі пошаровим нанесенням металевих порошків та його подальшого плавлення. Адитивні технології — узагальнене найменування групи технологій, які передбачають виготовлення виробів за цифровими моделями шляхом пошарового додавання матеріалу [1–4]. Насамперед інтерес до адитивних технологій та безпосереднього «друку» або вирощування металевих деталей, як альтернатива традиційним технологіям, виник в авіації, космічній промисловості, медицині та енергетичному машинобудуванні. При цьому основним рушійним фактором була економічна доцільність. Особливо це стосується поодиноких складних виробів, пресформ зі складними каналами охолодження, виробництво яких традиційними методами виявляється суттєво дорожчим, ніж за допомогою адитивних технологій [1]. Крім нижчої вартості виробництва унікальних виробів, адитивні технології дозволяють суттєво скоротити час, що витрачається на отримання готового виробу. Немає необхідності виготовлення складних оснасток. Виходячи з цього, час з моменту створення моделі до отримання готової деталі скорочується з декількох тижнів до декількох днів.

У даній роботі досліджували вплив тривалих витримок за різних температур на структуру та властивості сплаву Inconel (IN625) на зразках, виготовлених методом 3D принтингу (селективного лазерного плавлення).

Матеріали та методи дослідження. Як об'єкт для досліджень використовували зразки зі сплаву Inconel 625 для випробування механічних властивостей та мікроструктури, отримані методом селективного лазерного плавлення на 3D установці фірми EOS GmbH (Німеччина) з розмірами робочої камери ($x \times y \times z$) 400×400×400 мм, оснащеної ітербієвим лазером потужністю 1000 Вт.

Порошок виготовляли методом відцентрового розпилення швидкообертової заготовки (PREP-процес). Фракції гранул, що використовували для виготовлення зразків, становили 20...50 мкм.

Лазерне спікання порошків являє собою багаторазово повторюваний процес, що включає кілька стадій: нанесення порошкового шару і вирівнювання його роликком; лазерна обробка (сканування) порошкового шару з повним проплавленням порошкової суміші у відповідності з геометрією вихідної 3D моделі; чищення отриманого шару; зсув платформи з деталлю вниз на величину товщини одного шару; повторення всього процесу, тобто нанесення наступного порошкового шару, лазерне сканування і т.п. Обробка здійснюється в камері з

Лисенко Н.О. <https://orcid.org/0000-0003-2319-1260>, Педаш О.О. <https://orcid.org/0000-0003-1231-9951>, Клочихін В.В. <https://orcid.org/0000-0002-0754-5543>, Касай П.О. <https://orcid.org/0000-0003-2181-8381>

Таблиця 1. Режими термообробки 3D зразків після ГП

Варіант	Гомогенізація I		Старіння		Гомогенізація II	
	$T, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{ч}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{ч}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\tau, \text{ч}$
1	1190	1	—	—	—	—
2	—»—	—»—	900	16	—	—
3	—»—	—»—	—»—	700	—	—
4	—»—	—»—	—»—	1000	—	—
5	—»—	—»—	—»—	2100	—	—
6	—»—	—»—	—»—	—»—	1000	1
7,a	—»—	—»—	—»—	1000	1180	—»—
7,b	—»—	—»—	—»—	2100	—»—	—»—
8	—»—	—»—	700	700	—	—
9	—»—	—»—	980	1400	—	—

продуванням інертним газом і керується комп'ютером для отримання заданої 3D геометрії деталі.

Зразки виготовляли як циліндричні діаметром 14 мм, так і прямокутного перерізу розмірами 16×16 мм. Довжина зразків — 65 мм. Побудову зразків на 3D принтері здійснювали у напрямку x , а також у напрямку z . Для усунення внутрішньої пористості та підвищення щільності зразків після процесу селективного лазерного плавлення виконували гаряче ізостатичне пресування (ГП) на гарячому ізостатичному пресі QIH 09×1,5-2070-1400 MURC (фірми «QUINTUS», Швеція). ГП проводили за режимом: нагрів до температури $1160 \pm 10 ^\circ\text{C}$, тривалість витримки — 3 год, тиск робочого газу в посудині високого тиску — 160 МПа. При охолодженні зразків було застосовано функцію високошвидкісного рівномірного охолодження.

Зразки після ГП піддавали термічній обробці у вакуумній печі IPSEN T²T в середовищі динамічного вакууму, охолодження проводили в потоці інертного газу (аргоні).

Режими термообробки зразків після газостаткування представлені у табл. 1.

Після обробки за різними варіантами заготовки піддавали механічній обробці для забезпечення розмірів, передбачених технічною документацією на виготовлення зразків для механічних і жароміцних випробувань.

Хімічний склад сплаву визначали методами спектрального і хімічного аналізів. Механічні властивості (σ_b , $\sigma_{0.2}$, δ , ψ) зразків випробовували на розривній машині ZDMY 30 на відповідність вимогам стандарту AMS 7000.

Ударну в'язкість (KCU) визначали на ударних зразках, випробуваних на маятниковому копрі Instron SI-1M.

Твердість визначали методом Брінелля на приладі LECO AMH-43.

Час до високотемпературного руйнування (τ_p) (показник, що визначається при випробуваннях на

тривалу міцність) зразків визначали на установці Instron M3 при температурі $700 ^\circ\text{C}$ та постійно доданому навантаженні 333 МПа. При випробуваннях на тривалу міцність зразки доводили до руйнування.

Фрактографічне дослідження морфології поршків, а також зламів розривних і ударних зразків після випробування механічних властивостей здійснювали за допомогою бінокулярного мікроскопа STEMI 2000-C та електронного скануючого мікроскопа «JEOL JSM 6360LA».

Дослідження мікроструктури проводили на не травлених і травлених мікрошліфах з використанням мікроскопа «Axio Observer. Dlm».

Аналіз та обговорення отриманих результатів. При мікрорентгеноструктурному дослідженні встановлено, що порошок, який використовується для отримання зразків методом 3D принтинга (СЛП), характеризується практично повною відсутністю сателітних гранул, гарною сферичністю з невеликою кількістю часток нерегулярної форми (рис. 1).

Хімічний склад виготовлених зразків задовільний та відповідає вимогам AMS 7000 для досліджуваного сплаву (табл. 2).

Сплав IN625 — типовий приклад сплавів з малим зміцненням (чи, що не зміцнюються). Сплав

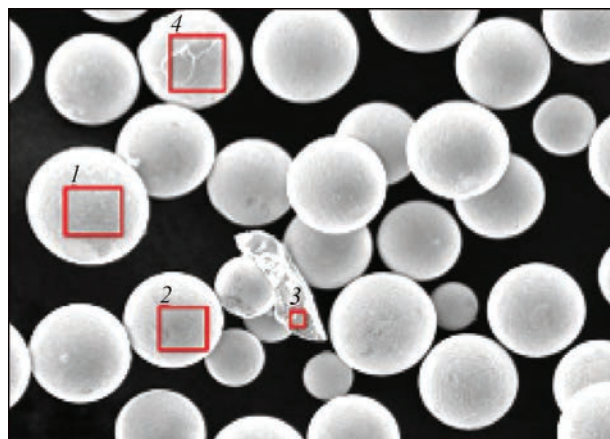


Рис. 1. Морфологія порошків зі сплаву IN625

Таблиця 2. Хімічний склад зразків зі сплаву Inconel 625, мас. %

Марка сплаву	Вміст елементів, %						
	C	Cr	Al	Ti	Nb	Mo	Fe
IN625	0,03	21,20	0,20	0,20	3,88	8,55	3,03
Норми AMS 7000	≤ 0,10	20,0...23,0	≤ 0,4	≤ 0,4	3,15...4,15	8,0...10,0	≤ 5,00

Примітка. Ni — залишок.

Таблиця 3. Механічні властивості сплаву IN625 при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Варіант термообробки	Напрямок побудови зразків	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	HB
1	xy	882	438,5	56,4	57,7	281,3	201
	z	869	433,5	57,0	59,0	308,7	207
2	xy	881	448,0	48,4	53,9	281,3	—»—
	z	866	433,0	52,0	53,7	308,7	—»—
Норми AMS 7000		≥ 827	≥ 344,7	≥ 30,0	—	—	—

використовується головним чином при температурах до 1000 °С, де найбільш важливою вимогою є стійкість проти окислення [5]. Крім того, при температурах вище 550 °С цей сплав може зазнавати істотних змін мікроструктури і механічних властивостей [6].

Встановлено, що механічні властивості зразків, вирощених у напрямках *xy* та *z* (варіанти 1, 2), відповідають вимогам AMS 7000 для сплаву IN625. Значення відносного подовження (δ) приблизно в 2 рази перевищують вимоги AMS 7000 (табл. 3).

Тривала міцність ($T_{icp} = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\sigma = 333\text{ МПа}$) зразків після термообробки по 1-му і 2-му варіантам (див. табл. 1) знаходиться приблизно на одному рівні (табл. 4); при цьому час до руйнування (τ_p) становить 437,5...655,4 год; згідно з AMS 7000 τ_p не регламентовано.

Слід зазначити, що проведення старіння при температурі 900±10 °С протягом 16 год (варіант 2) не призвело до помітного підвищення механічних і жароміцних властивостей.

Металографічне дослідження показало, що мікроструктура зразків у стані побудови (до проведення операції ГП та термообробки як вертикальних (*z*), так і горизонтальних (*xy*)) являє собою γ -твердий розчин Ni–Cr–Mo–Nb–Fe з наявністю карбідів та карбонітридів і відповідає нетермоо-

бробленому стану сплаву IN625, виготовленого методом 3D принтингу (рис. 2, а). У вихідних зразках спостерігається структурна неоднорідність, обумовлена формуванням зон пошарового сплавлення, а також тонкі дендрити, витягнуті у напрямку зростання зразка, що утворилися завдяки високим швидкостям нагрівання та охолодження, які відбуваються під час процесів плавлення та затвердіння за короткий час.

У процесі високотемпературних нагрівань при ГП (1160±10 °С) і термообробці (1190±10 °С) формується більш однорідна структура за рахунок гомогенізації твердого розчину внаслідок вирівнювання хімічного складу між зонами пошарового сплавлення (рис. 2, б).

При термообробці за варіантом 2 (ГП + (гомогенізація + старіння при 900 °С, 16 год)) спостерігається виділення зміцнюючої інтерметалідної γ'' (Ni₃Nb)-фази з ОЦТ структурою і незначна коагуляція карбідів типу $M_{23}C_6$ (рис. 2, в).

Пластинчасті виділення δ -фази, а також структури, характерні для перегрітого стану сплаву IN625 у вигляді оплавлень по границях зерен, у вихідних зразках, термооброблених за 1-им і 2-им варіантами, не виявлені.

Проведення операції ГП за вказаним вище режимом сприяє практично повному «заліковуванню» пор і мікронесуцільностей, зосереджених у внутрішніх обсягах металу. При цьому в зонах «заліковування» виявлено глобулярні та (або) тонкі плівкові оксиди. Розміри оксидних включень у матеріалі досліджуваних зразків, в основному, складали приблизно 7 мкм (поодинокі, що рідко зустрічаються — ~ 20 мкм). Карбіди і карбонітриди виділяються у вигляді дискретних глобулярних частинок розміром біля 5 мкм.

Проведення тривалих витримок при температурі 900 °С (варіанти 3, 4, 5) сприяло виділенню з

Таблиця 4. Жароміцні властивості сплаву IN625

Варіант термообробки	Напрямок побудови зразків	Тривала міцність		
		$T_{випр}$, °С	σ , МПа	Час до руйнування (τ_p), год
1	xy	700	333	446 ¹⁵
	z	—»—	—»—	627 ²⁰
2	xy	—»—	—»—	517 ⁵⁰
	z	—»—	—»—	590 ³⁰

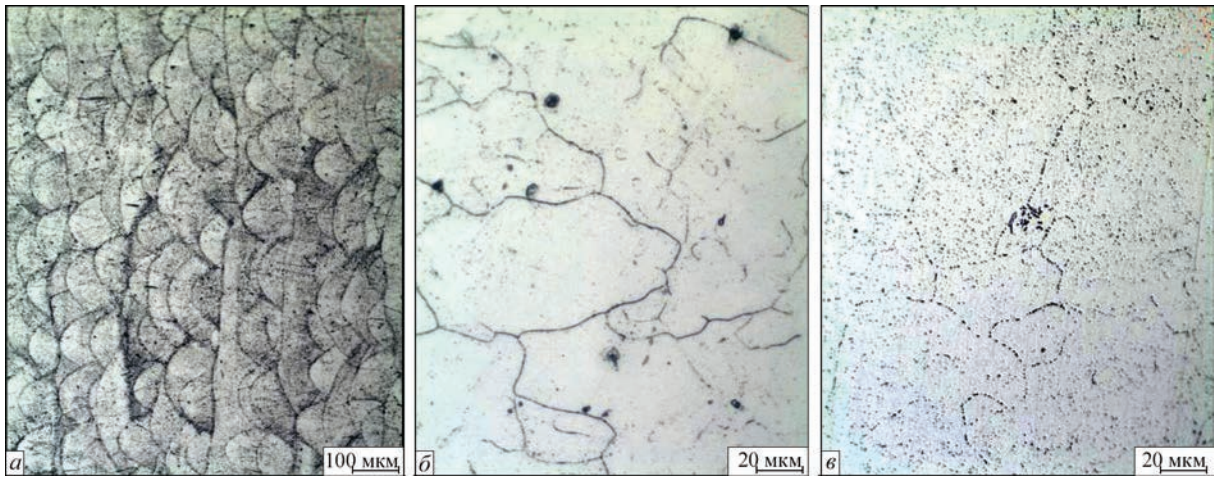


Рис. 2. Мікроструктура 3D зразків зі сплаву IN625: *a* — вихідний стан, $\times 100$; *b* — варіант 1, $\times 500$; *c* — варіант 2, $\times 500$ (див. табл. 1)

γ -матриці значної кількості пластинчастих частинок δ -фази (рис. 3). Зі збільшенням часу витримки відбулося збільшення кількості та розмірів пластин δ -фази: при витримці протягом 700 год (варіант 3) ширина пластин досягала приблизно 0,85 мкм (рис. 3, *a*); при витримці протягом 1000 год (варіант 4) виявлено пластини шириною приблизно до 1,5 мкм (рис. 3, *b*); при витримці протягом 2100 год (варіант 5) максимальна ширина пластин становить біля 3,75 мкм (рис. 3, *в*).

Також слід зазначити, що в матеріалі зразків, оброблених по 3...5-му варіантам, спостерігається огрубіння структури внаслідок зростання та коагуляції карбідів типу Cr_{23}C_6 , в особливості, на границях зерен. Виділення частинок зміцнюючої інтерметалідної γ -фази незначне.

Випробування зразків, оброблених за 4-им варіантом, показало, що тривалі витримки (1000 год) при температурі 900 °C призводять до зниження пластичних характеристик (δ , ψ — в $\sim 1,5$ рази, KCU — в ~ 6 разів), при деякому підвищенні міцності (σ_b , σ_{02}) та твердості (HB) матеріалу, порівня-

но зі значеннями, отриманими після термообробки за варіантами 1 і 2 (табл. 5).

Тривала міцність зразків, термооброблених за варіантом 4 (з витримкою при старінні 900 °C протягом 1000 год), знизилася більш ніж у 3 рази (рис. 4).

З метою підвищення пластичності і жароміцності сплаву IN625, а також усунення утворених у процесі проведення тривалих витримок при температурі 900 °C небажаних фаз (пластинчастої і великих приграничних карбідів) були проведені відновлювальні термообробки при температурах 1000 °C (варіант 6) і 1180 °C (варіанти 7а, 7б) з витримкою протягом 1 год.

У мікроструктурі зразків зі сплаву IN625, термооброблених за варіантом 6 при температурі 1000 °C (1 год), спостерігається дроблення та утонення пластин δ -фази, а також часткове розчинення δ -фази та карбідів Cr_{23}C_6 в γ -твердому розчині (рис. 5).

Термообробка зразків за варіантами 7а, 7б при температурі 1180 °C (1 год) (після тривалих витримок протягом 1000 год (варіант 4) і 2100 год (варіант 5)) сприяє повному розчиненню пластинчастої

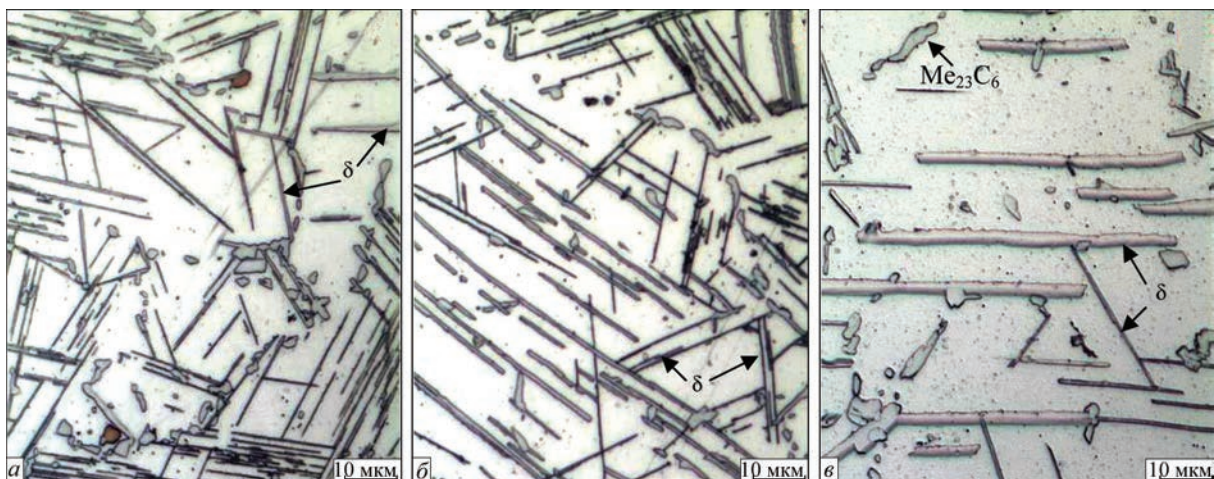


Рис. 3. Мікроструктура 3D зразків зі сплаву IN625 після термообробки, $\times 1000$: *a* — варіант 3; *b* — варіант 4; *в* — варіант 5 (див. табл. 1)

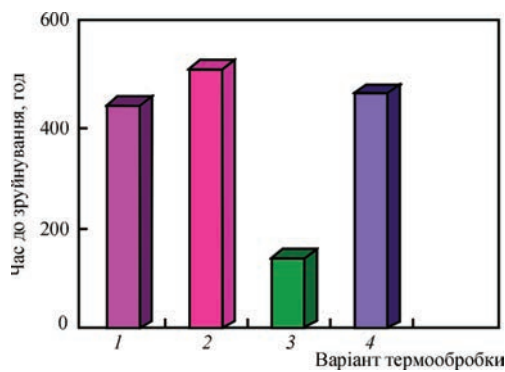


Рис. 4. Тривала міцність 3D зразків зі сплаву IN625 залежно від варіанта термообробки: 1 — варіант 1; 2 — варіант 2; 3 — варіант 4; 4 — варіант 7а (див. табл. 1)

δ-фази та карбідів типу $Cr_{23}C_6$ з подальшим виділенням карбідів типу $Cr_{23}C_6$ у вигляді дрібних дискретних частинок (рис. 5). Мікроструктура являє собою Ni–Cr–Mo–Nb–Fe γ-твердий розчин з наявністю карбідів, карбонітридів і невеликої кількості інтерметалідної γ'-фази; відповідає гомогенізованому стану сплаву IN625, аналогічна варіанту 1.

На рис. 6 показано будову зламів зразків зі сплаву IN625 (3D принтинг), термооброблених за варіантами 1, 4 і 7а, після випробувань на розтяг і ударну в'язкість при кімнатній температурі. Чашкова будова зламів та утворення «шийки» в зоні руйнування на розривних зразках і наявність скосів на ударних зразках варіантів 1 і 7а свідчать про досить високу пластичність сплаву (рис. 6, а, в, г, е). Практично відсутність «шийки» в зоні

руйнування на розривних зразках і скосів на ударних зразках, оброблених за 4-им варіантом, характерно для матеріалу з нижчою пластичністю (рис. 6, б, д).

В результаті проведеного дослідження встановлено, що термообробка при температурі 1180 °C протягом 2 год (варіанти 7а і 7б) сприяє відновленню механічних і жароміцних властивостей, що обумовлено гомогенізацією сплаву IN625, при якій спостерігається розчинення пластинчастої δ-фази і карбідів типу $Cr_{23}C_6$ у γ-твердому розчині, з подальшим виділенням карбідів типу $Cr_{23}C_6$ і невеликої кількості інтерметалідної γ'-фази у вигляді дрібних дискретних частинок, що зміцнюють матрицю.

Крім того, було досліджено мікроструктурний стан зразків зі сплаву IN625, отриманих методом селективного лазерного плавлення (3D принтинга), після термообробки за варіантами 8 і 9 з тривалими витримками при температурах 700 °C (700 год) та 980 °C (1400 год) відповідно.

Металографічне дослідження зразків при збільшенні до ×1000 показало, що тривалі витримки при температурах 700 °C (700 год, варіант 8) і 980 °C (1400 год, варіант 9) не призводять до утворення пластинчастої δ-фази. При цьому відмічено, що при обробці за 8-м варіантом (700 °C, 700 год) відбувається огрубіння структури, в основному, за рахунок зростання і коагуляції карбідів типу $Cr_{23}C_6$, що виділяються переважно на границях зерен (рис. 7, а).

Таблиця 5. Механічні властивості сплаву IN625 при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Варіант термообробки	Напрямок побудови зразків	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	KCU, Дж/см ²	HB
1	xy	882,0	438,5	56,4	57,7	281,3	201
4	—>—	912,0	467,0	38,0	33,4	49,0	241
7а	—>—	885,0	456,7	60,0	64,2	262,2	207
Норми AMS 7000		≥827,0	≥344,7	≥30,0	—	—	—

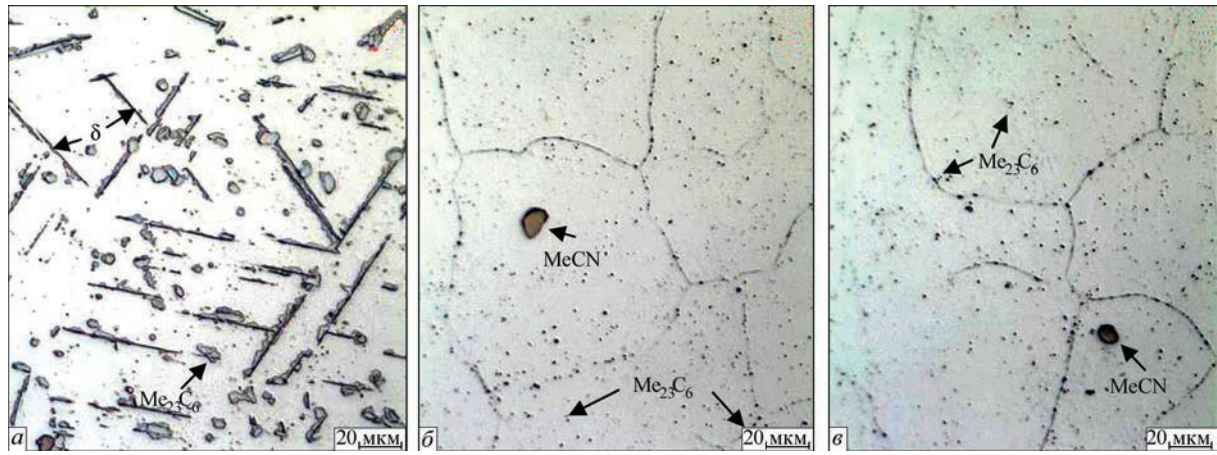


Рис. 5. Мікроструктура 3D зразків зі сплаву IN625 після відновної термообробки, ×1000: а — варіант 6 (варіант 4 + нагрівання при 1000 °C (1 год)); б — варіант 7а (варіант 4 + нагрівання при 1180 °C (1 ч)); в — варіант 7б (варіант 5 + нагрівання при 1180 °C (1 ч))

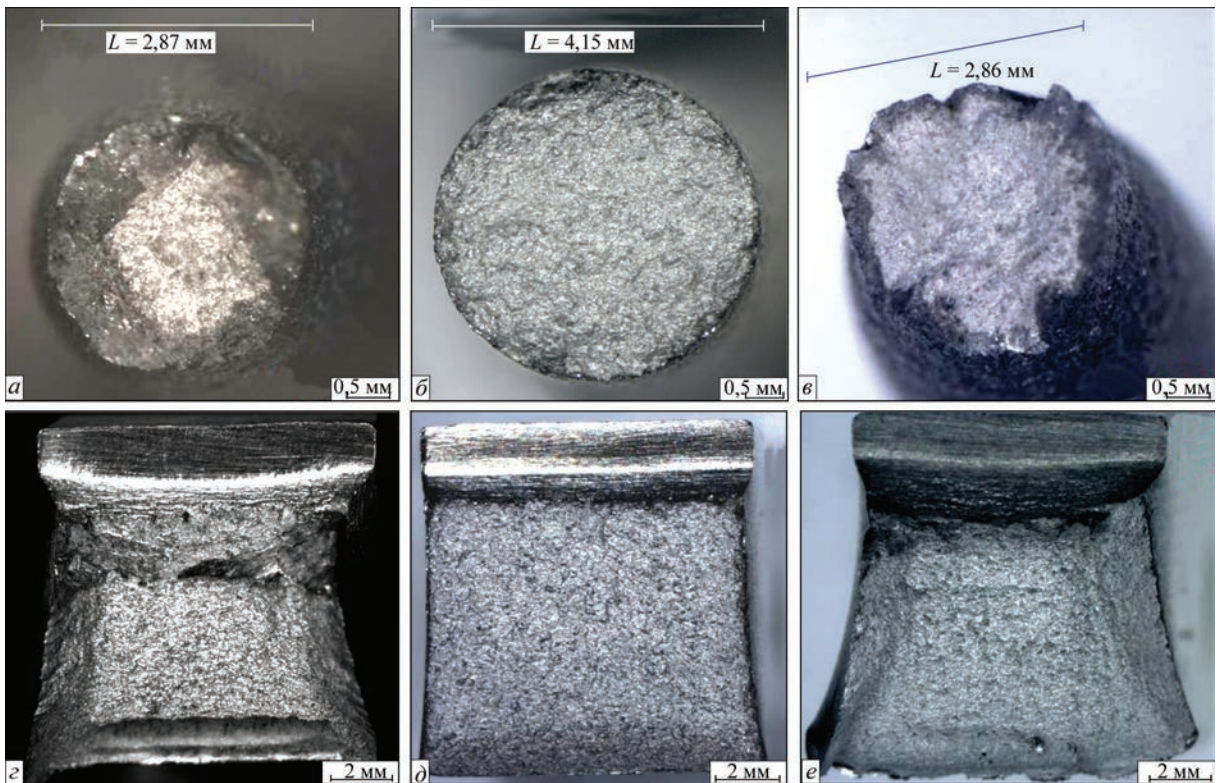


Рис. 6. Фрактографічна будова зламів розривних (а, б, е, $\times 12,5$) та ударних (с, д, е, $\times 6,5$) 3D зразків зі сплаву IN625: а, с — варіант 1; б, д — варіант 4; е, е — варіант 7а

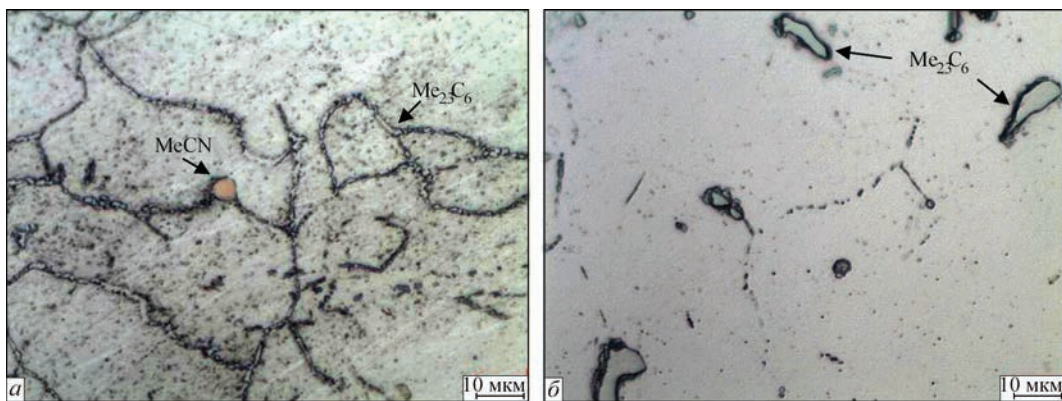


Рис. 7. Мікроструктура 3D зразків зі сплаву IN625 після термообробки, $\times 1000$: а — варіант 8; б — варіант 9 (див. табл. 1)

У зразках, оброблених за 9-м варіантом (980 °C, 1400 год), границі зерен тонкі, є значна кількість карбідів типу Cr_{23}C_6 , у вигляді зкоагульованих частинок розміром приблизно 7...15 мкм, рівномірно розподілених в об'ємі металу (рис. 7, б).

Висновки

1. Хімічний склад зразків, виготовлених із сплаву IN625 методом 3D принтингу на установці «EOS M400», відповідає вимогам AMS 7000 для сплаву IN625.

2. Встановлено, що тривалі витримки при температурі 900 °C протягом 700 год (варіант 3), 1000 год (варіант 4) і 2100 год (варіант 5) призво-

дять до зниження пластичності та жароміцності сплаву IN625 внаслідок виділення з γ -матриці значної кількості пластинчастих частинок δ -фази, а також огрублення структури за рахунок зростання та коагуляції карбідів типу Cr_{23}C_6 особливо на границях зерен. Збільшення часу витримки сприяє збільшенню кількості та розмірів пластин δ -фази, а також огрубленню границь зерен.

3. Термообробка зразків зі зниженими властивостями, наявністю великої кількості пластин δ -фази та огрубленням границь зерен (варіанти 4, 5) при температурі 1180 °C протягом 1 год (варіанти 7а та 7б) сприяє відновленню механічних і жароміцних властивостей, що обумовлено гомогенізацією сплаву IN625, при якій спостері-

гається розчинення пластинчастої δ -фази і карбідів типу Cr_{23}C_6 в γ -твердому розчині, з подальшим виділенням карбідів типу Cr_{23}C_6 і невеликої кількості інтерметалідної γ'' -фази у вигляді дрібних дискретних частинок, що зміцнюють матрицю.

4. Тривалі витримки при температурах 700 °C (700 год, варіант 8) і 980 °C (1400 год, варіант 9) не призводять до утворення пластинчастої фази.

Список літератури

1. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. (2013) *Аддитивные технологии в машиностроении*. Санкт-Петербург, Изд-во Политехн. ун-та.
2. Santos E.C. (2006) Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 46(12–13), 1459–1468.
3. Allen J. (2011) The potential for aero engine component manufacture using additive layer manufacturing. *AERODAYS Conf., Madrid*.
4. (2013) *National Institute of Standards and Technology. Measurement science roadmap for metal-based additive manufacturing*. Prepared by Energetics Incorporated, Columbia, Maryland, for NIST, U.S. Department of Commerce, May, 2013.
5. Симс Ч., Хагель В. (1976) *Жаропрочные сплавы*. Москва, Металлургия.

6. Суаве Л.М., Кормиер Дж., Виллекез П. и др. (2014) Микроструктурные эволюции при термическом старении сплава IN625: влияние температуры и процесса формирования. *Metall. Mater. Sci.*, 45, 2963–2982.

References

1. Zlenko, M.A., Popovich, A.A., Mutylyna, I.N. (2013) *Additive technologies in mechanical engineering*. St.-Petersburg, SPbPU [in Russian].
2. Santos, E.C. (2006) Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 46(12–13), 1459–1468.
3. Allen, J. (2011) The potential for aero engine component manufacture using additive layer manufacturing. *AERODAYS Conf., Madrid*.
4. (2013) *National Institute of Standards and Technology. Measurement science roadmap for metal-based additive manufacturing*. Energetics Incorp., Columbia, Maryland, for NIST, U.S. Department of Commerce, May, 2013.
5. Sims, Ch., Hagel, V. (1976) *Heat-resistant alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
6. Suave, L.M., Cormier, J., Villechaise, P. et al. (2014) Microstructural evolutions during thermal aging of alloy IN625: Impact of temperature and forming process. *Metall. Mater. Sci.*, 45, 2963–2982.

INFLUENCE OF LONG-TERM SOAKING ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF IN625 ALLOY SAMPLES MADE BY SELECTIVE LASER MELTING

N.O. Lysenko, O.O. Pedash, V.V. Klochykhin, P.O. Kasai

JSC «MOTOR SICH». 69068, Zaporizhzhya, Ukraine. E-mail: tb.ugmet@motorsich.com

The paper presents the results of studying the influence of long-term soaking on the structure and properties of samples made by selective laser melting of Inconel 625 alloy powders, produced by the method of off-center plasma spraying of a rapidly rotating rod billet (PREP-process). Investigations of chemical composition, macro- and microstructure, mechanical and heat-resistant properties of the samples plotted in xy and z direction was performed. Samples after building and hot isostatic pressing with subsequent heat treatment by different variants were examined. Investigation results showed that performance of the operation of hot isostatic pressing of the samples with subsequent standard heat treatment promotes practically complete elimination of microporosity in inner volumes of the metal and obtaining a more uniform solid solution. It was established that long-term soaking at the temperature of 900 °C facilitates lowering of ductile and heat-resistant properties of Inconel 625 alloy due to platelike precipitates of δ -phase. Performed study was the basis for recommending the restorative heat treatment mode. In addition, it is shown that long-term soaking at the temperatures of 700 and 980 °C does not lead to precipitation of platelike δ -phase. Ref. 6, Tabl. 5, Fig. 7.

Key words: heat-resistant alloy; additive technologies; selective laser melting; hot isostatic pressing; heat treatment

Надійшла до редакції 27.10.2021

ЖУРНАЛИ для професіоналів



Видається з 1948 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0005-111X
doi.org/10.37434/as
Передплатний індекс 70031



Видається з 2000 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0957-798X
doi.org/10.37434/trwj
Передплатний індекс 21791



Видається з 1989 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 0235-3474
doi.org/10.37434/tdnk
Передплатний індекс 74475



Видається з 1985 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 2415-8445
doi.org/10.37434/sem
Передплатний індекс 70693

СТРУКТУРА І КОРОЗІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ МІДІ ТА ВОЛЬФРАМУ, ОТРИМАНИХ СПОСОБОМ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ВИПАРОВУВАННЯ-КОНДЕНСАЦІЇ

М.І. Гречанюк¹, В.Г. Гречанюк², І.М. Гречанюк³, В.О. Чорновол²

¹Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України.
03142, м. Київ, вул. Академіка Кржижановського, 3. E-mail: dir@ipms.kiev.ua

²Київський національний університет будівництва та архітектури.

03037, м. Київ, Повітрофлотський просп., 31. E-mail: knuba@knuba.edu.ua

³НВП «ЕЛТЕХМАШ». 21011, м. Вінниця, вул. Ватутіна, 25. E-mail: vin25ebt@ukr.net

Вивчено структуру, корозійну стійкість, механічні властивості композиційних матеріалів Cu–W, що використовуються для електричних контактів різного призначення. Показано вплив концентрації вольфраму в композиційному матеріалі Cu–W на ці властивості. Наведено гравіметричні залежності композитів Cu–W з різним вмістом вольфраму та визначено склад корозійного середовища до і після корозійних випробувань. Бібліогр. 14, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: структура; корозійна стійкість; механічні властивості; композиційні матеріали; вольфрам; мідь

Основними матеріалами для електричних контактів різного призначення, наприклад, які використовуються в будівельних машинах та пристроях (ліфтах, будівельних кранах, піднімальних машинах, рубильниках тощо), є доступні в економічному плані і з високими характеристиками міцності матеріали на основі міді та її сплавів. Такі контакти виготовляють або з литих і прокатних матеріалів (пластин, листів, прутків, дротів), або з матеріалів, одержаних способами порошкової металургії. Литі сплави мають ряд значних недоліків, таких як низькі характеристики міцності, стійкості до мостикоутворення, дугогасних властивостей тощо. Контакти, виготовлені методами порошкової металургії, відрізняються високими характеристиками міцності й більш високими електроконтактними властивостями, але значним їхнім недоліком є складність технології їх одержання, яка включає кілька операцій: одержання порошків необхідного складу; компактування цих порошків; спечення або газостатичне пресування їх при високих температурах в контрольованому середовищі; формування необхідних розмірів та ін. [1].

При одержанні конденсованих композиційних матеріалів для електричних контактів економічно обґрунтованим є використання способу високошвидкісного електронно-променевого випаровування й конденсації металів і неметалів у вакуумі [2–7]. Технологічні переваги такого методу полягають в тому, що випаровуванням одночас-

но кількох речовин, змішуванням їхніх парових потоків і конденсацією на підкладці можна одержати такі співвідношення компонентів і створити такі структури, які дуже важко або практично неможливо здійснити традиційними способами.

Велике значення у розвитку засобів комутування струмів високої потужності, особливо у високовольтних вимикачах, зіграли композиційні матеріали на основі міді та тугоплавких металів — вольфраму чи молібдену. Для мідно-вольфрамових контактів характерні такі властивості, як тугоплавкість, твердість, дугостійкість, стійкість проти приварювання, механічна міцність при кімнатній і підвищеній температурах, хороші тепловідвід і електропровідність [8]. На сьогодні є відомості про структуру і механічні властивості контактів, виготовлених із композиційних матеріалів на основі міді й вольфраму [9–11]. Разом з тим відомості щодо корозійної стійкості композиційних матеріалів (КМ) Cu–W і її зв'язок зі структурою взагалі відсутні.

Виходячи з вищезазначеного, метою даної роботи є вивчення структури, фізико-механічних властивостей й корозійної стійкості мідно-вольфрамових композиційних матеріалів для електричних контактів різного призначення, що одержані способом електронно-променевого випаровування-конденсації у вакуумі.

Методика досліджень. Композиційні матеріали Cu–W одержували на стаціонарній підкладці,

М.І. Гречанюк — <https://orcid.org/0000-0002-2609-6018>

Таблиця 1. Хімічний склад КМ мідь–вольфрам, які використовували для досліджень, мас. %

Зразок	W	Cu
1	0,64	решта
2	3,57	—»—
3	8,27	—»—
4	15,23	—»—
5	20,39	—»—
6	32,98	—»—

виготовлений із Ст3, розміром 250×220×10 мм при температурі 900 ± 30 °С (температура лишалася незмінною для всіх дослідів) способом електроно-променевого випаровування і подальшої конденсації у вакуумі [2–5].

Корозійну стійкість конденсатів досліджували гравіметричним методом [12]. Зразки площею 100 мм² після попереднього оброблення занурювали в корозійне середовище (воду) на 100 год. Контроль за зміною маси зразків здійснювали через кожні 20 год. Дослідження проводили в статичному режимі. Для вивчення структури одержаних конденсатів використовували макро- і мікроструктурний аналізи із застосуванням оптичної й електронної скануючої мікроскопії [13].

Корозійну стійкість і структуру мідно-вольфрамових конденсатів вивчали для шести складів зразків із вмістом вольфраму від 0,64 до 32,98 мас. % (табл. 1)

Результати досліджень. Проведені дослідження мікроструктури конденсатів Cu–W показали,

що структура останніх змінюється від однорідної при концентрації вольфраму до 1 % до шаруватої при збільшенні концентрації вольфраму в композиційних матеріалах до 32,98 мас. %.

Слід зауважити, що чим більша концентрація вольфраму в зразках, тим шаруватість виявляється виразніше. Для прикладу наводимо структуру КМ при концентрації вольфраму в ньому 20,39 мас. % (рис. 1).

Із зростанням вмісту вольфраму в конденсаті виникає неоднорідність його розподілу в шарах (рис. 2).

Для композиційних матеріалів Cu–W переважаючим морфологічним типом структури шарів є полігональна (рівноосні зерна). Для шарів, збагачених міддю, біля підкладки властива стовпчаста структура (рис. 3).

Така неоднорідність виявляється у вигляді концентраційних згустків, які, як можна припустити, є зародками для утворення нової стовпчастої структури. В композитах із вмістом вольфраму до 20,39 мас. % ці стовпці конусоподібні зі сфероїдальними вершинами. При збільшенні вмісту вольфраму в конденсаті до 32,98 мас. % вони стають безперервними, їх частка в розрізі зразків зростає, а висота співставна з товщиною макрошарів.

Згідно з експериментальними даними [14] електропровідність зразків з підвищенням вмісту вольфраму в них закономірно падає, наприклад, з вмістом вольфраму приблизно 10 мас. % вона складає 80 % від електропровідності чистої міді.

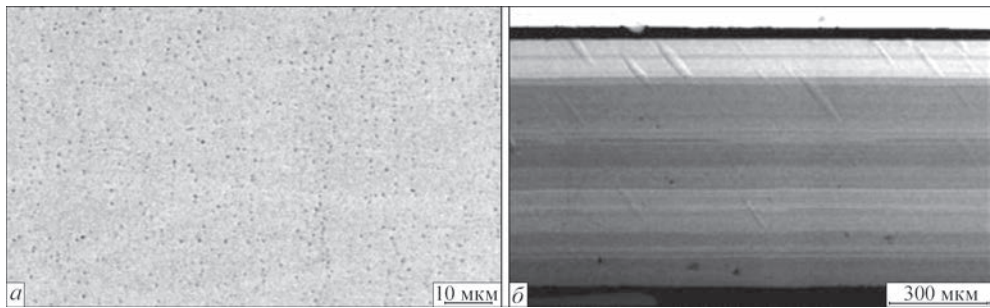


Рис. 1. Мікроструктура композиційних матеріалів Cu–W при концентрації W, мас. %: а — 0,64; б — 20,39

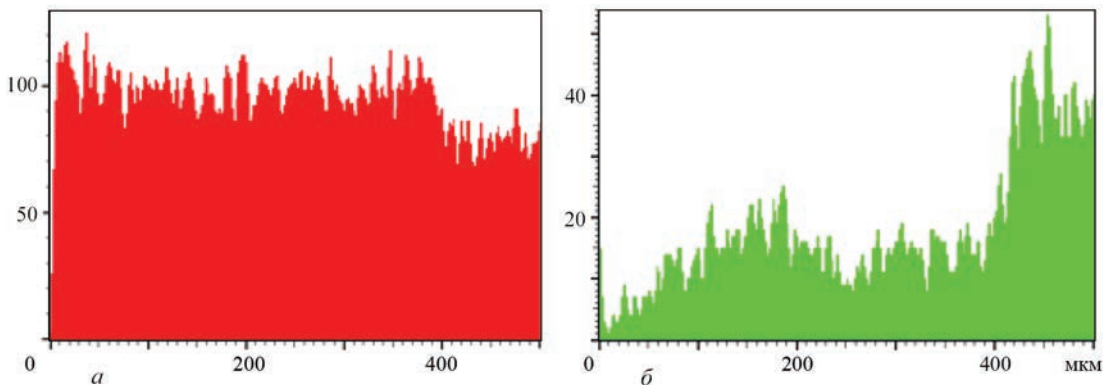


Рис. 2. Розподіл компонентів міді (а) та вольфраму (б) в КМ Cu–20,39 % W

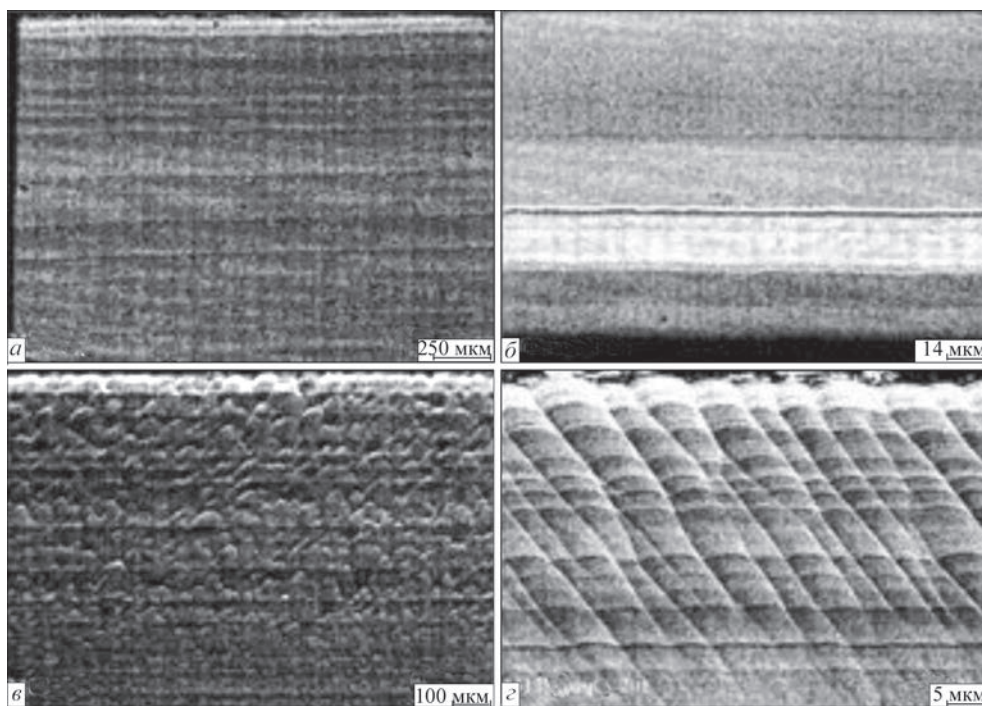


Рис. 3. Структура зразків КМ Cu–W з різним вмістом вольфраму, мас. %: *a* — шарувата (3,57); *б* — шарувата із слідами локального збагачення (8,27); *в* — конусоподібна (15,23); *г* — стовпчаста (32,98)

Механічні властивості при випробуванні конденсату на розтягування також змінюються. Межі плинності й міцності ростуть, характеристики пластичності знижуються зі збільшенням вмісту вольфраму в композиційних матеріалах (рис. 4).

Як видно з рис. 4, залежності меж міцності (σ_b) і плинності ($\sigma_{0,2}$), а також відносного подовження (δ) від концентрації вольфраму мають монотонний характер. Спостерігається збільшення значень σ_b і $\sigma_{0,2}$ зі зростанням вмісту W і зниження δ від 30,2 до 2,2 % при концентрації останнього 32,98 мас. %. Зменшення пластичності, що спостерігається для зразків із значним вмістом вольфраму, обумовлене впливом дефектів типу «стрижнів», які пронизують всю товщину конденсату, як було показано в попередніх дослідженнях [14].

Падіння пластичності при підвищенні вмісту вольфраму (вище 20,39 %) корелює з особливостями структури конденсатів. В'язко руйнується збагачений міддю макрошар, що утворюється на підкладці, на яку конденсуються пари металів. На зміну властивостей впливають і ослаблені домішками межі розподілу макрошарів і стрижнів, які служать або джерелами руйнування, або визначають напрям руху тріщини долома [14].

Оскільки руйнування контактів відбувається не тільки під час роботи в режимі замикавання/розмикавання, але й в неробочому стані за дії навколишнього середовища, було проведено гравіметричні корозійні дослідження композиційних матеріалів мідь–вольфрам у воді, що імітує 100%-ну вологість відповідно до ГОСТ 25927–81.

Рентгенографічний аналіз показав, що за процесу протікання корозії композитів Cu–W в атмосферних умовах на поверхні утворюються оксиди міді та вольфраму.

За результатами попередніх досліджень відомо, що у разі використання контактів системи Cu–W продуктами окислення найчастіше є оксиди WO_3 і Cu_2O . Дослідження складу поверхні до та після корозійних випробувань показали наявність вмісту кисню від 10 до 31 % на поверхні конденсатів після корозійних випробувань. У той самий час наявність кисню на поверхні зразків до корозійних випробувань не зафіксовано.

Механізм електрохімічної корозії полягає у виникненні на поверхні металів короткозамкнутих мікрогальванічних елементів з різними значеннями мікро-ЕРС (електрорушійної сили), яка виникає в результаті різниці електродних потен-

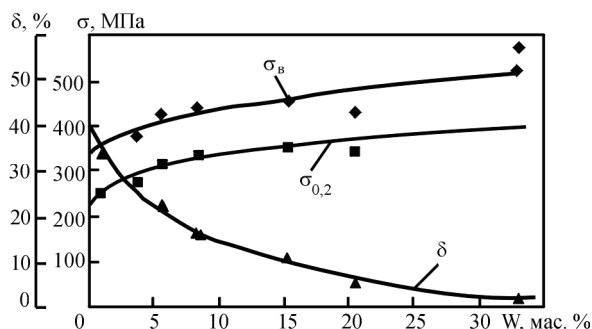


Рис. 4. Залежність меж міцності (σ_b), плинності ($\sigma_{0,2}$) і відносного подовження (δ) композитів Cu–W від вмісту вольфраму (після вакуумного відпалу 1173 К, 1 год) при температурі 293 К

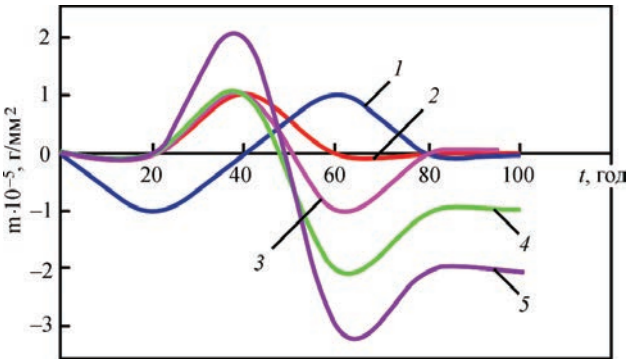


Рис. 5. Гравіметричні залежності композитів Cu–W з різним вмістом вольфраму, мас. %: 1 — 0,64; 2 — 8,27; 3 — 15,23; 4 — 20,39; 5 — 32,98

ціалів міді і вольфраму. Ділянки поверхні металів характеризуються різними потенціалами не тільки за наявності різних за електродними потенціалами металів, але й внаслідок різних концентрацій дефектів структури, різних обробок (шорсткості) поверхні, концентрацій домішок, товщини плівок адсорбованої вологи, концентрацій розчиненого кисню у плівках вологи тощо. Тому для композиційних матеріалів мідь–вольфрам можлива наявність мікрогальванопар між міддю і вольфрамом на ділянках, збагачених вольфрамом. У цьому випадку відбувається анодна іонізація більш активного металу — вольфраму. На решті ділянок поверхні можливим є утворення гальванопар між міддю з іонізацією міді і переходом її іонів у розчин. Про це свідчить аналіз середовища, проведений до і після корозійних випробувань (табл. 2).

Як видно з наведених даних, у корозійному середовищі присутні іони міді й вольфраму.

Зі збільшенням вмісту в композитах Cu–W вольфраму концентрація іонів вольфраму в середовищі збільшується, а іонів міді залишається приблизно такою самою. Як і слід було очікувати, найвища концентрація міді є в розчині при самому низькому вмісті вольфраму в зразках.

Гравіметричні дослідження показали, що в початковий момент корозійних випробувань відбувається незначне зменшення маси зразків незалежно від їхнього складу, що обумовлено іонізацією і переходом у розчин іонів міді й вольфраму. Після 20 год

Таблиця 2. Склад корозійного середовища до і після корозійних випробувань

Склад композитів, мас. %		Вміст компонентів у воді після корозійних досліджень, мг/л	
W	Cu	Cu	W
0,64	решта	1,299	0,003
3,57	—»—	0,924	0,006
8,27	—»—	0,788	0,014
15,23	—»—	0,687	0,016
20,39	—»—	0,704	0,018
32,98	—»—	0,750	0,209
Вихідна вода — 0,014		0	

випробувань починається збільшення маси зразків. З підвищенням концентрації вольфраму в композитах Cu–W процес стає інтенсивнішим (рис. 5).

Це пов'язано з неможливістю безмежного зростання концентрації іонів металу в розчині у зв'язку з утворенням обмежено розчинних сполук — оксидів міді й вольфраму. Крім того, зі збільшенням концентрації вольфраму в композитах можливе також утворення малорозчинних солей вольфраматів міді.

Таким чином, нарощування плівки, утвореної із малорозчинних сполук, стає інтенсивнішим за збільшення концентрації вольфраму в композитах, а маса зразків відповідно стає більшою. Утворена плівка екранує поверхню металу, дифузійні обмеження анодної реакції при цьому поглиблюються і швидкість корозії знижується. При руйнуванні металів у природних атмосферних умовах на катоді протікає реакція кисневої деполяризації. Зважаючи на малу розчинність кисню у воді (приблизно 0,008 г/л) за цієї реакції виникають дифузійні обмеження. Тому швидкість корозії з кисневою деполяризацією обмежується швидкістю подачі молекул кисню до поверхні кородуючого металу. Це також є однією із причин гальмування корозійного процесу.

Про зниження швидкості протікання корозійних процесів свідчать дослідження структури зразків з різним вмістом вольфраму до і після корозійних випробувань (рис. 6).

Характер руйнування композитів з вмістом мо- лібдену до 3,57 мас. % однаковий для всіх зразків.

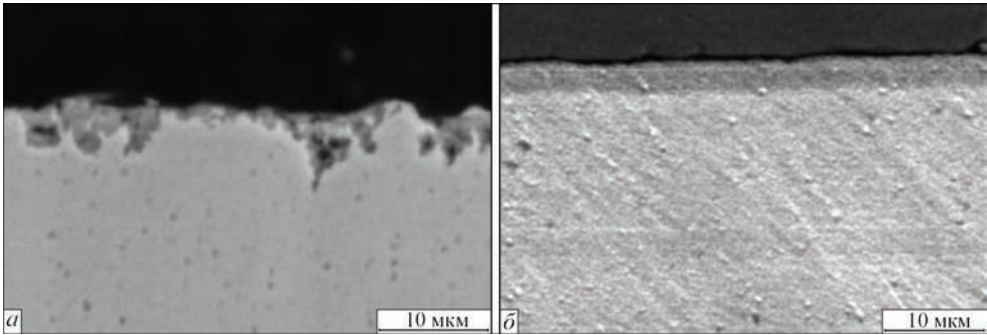


Рис. 6. Руйнування композитів з різним вмістом вольфраму, мас. %: а — 3,57; б — 15,23

Корозійні процеси спостерігаються переважно на тих ділянках, на яких присутні дефекти структури. При концентраціях вольфраму 15,23...32,98 мас. % корозія не зафіксована (рис. 6, б).

Висновки

1. Проведено дослідження хімічного складу, структури і властивостей композиційних матеріалів мідь-вольфрам, одержаних за способом електронно-променевого випаровування-конденсації у вакуумі.

2. Показано, що мідно-вольфрамовий конденсат є шаруватим градієнтним матеріалом, морфологічні особливості якого змінюються при збільшенні в ньому вмісту вольфраму (від 0,63 до 32,98 мас. %).

3. Характеристики міцності конденсату при випробуванні на розтягнення підвищуються, а пластичності знижуються від 30,2 до 2,2 % при збільшенні в ньому вмісту вольфраму від 0,63 до 32,98 мас. %.

4. Гравіметричним аналізом і мікроскопічними дослідженнями встановлено, що корозійна стійкість композиційних матеріалів на основі міді і вольфраму підвищується зі збільшенням концентрації вольфраму в зразках від 0,63 до 32,98 мас. %.

Список літератури

1. Затовський В.Г., Хоменко О.В., Хоменко О.І. (2018) Сучасні порошкові композиційні матеріали для комутаційної та зварювальної техніки. *Зб. Електричні контакти та електроди*. Київ, ІПМ ім. І.М. Францевича НАН України, **14**, 139–150.
2. Гречанюк М.І., Гречанюк І.М., Затовський В.Г., Гречанюк В.Г. (2017) *Композиційний матеріал для електричних контактів та спосіб його отримання*. Україна, Пат. 114451. https://sis.ukrpatent.org/media/INVENTIONS/2015/a201510758/published_description.pdf
3. Grechanyuk N.I., Grechanyuk V.G., Khomenko E.V. et al. (2016) The new condensed from vapor phase composite materials based on copper and their applications. *Electrotechnica & Electronica* (Bulgaria), **5–6**, 199–205. <https://epluse.ceec.bg/wp-content/uploads/2018/09/20160506-34.pdf>
4. Grechanyuk N.I., Grechanyuk V.G., Khomenko E.V. et al. (2016) Modern composite materials for switching and welding equipment. Information 2. Application of high-rate vacuum evaporation methods for manufacturing electric contacts and electrodes. *The Paton Welding J.*, **2**, 34–39. <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.02.06>
5. Bogdan M., Marcin H., Grechanyuk I.N. et al. (2014) The actual state and prospects of a high power electron beam technology for metallic and non-metallic compositions used in electric contacts and electrodes. *Advanced Materials Research*, **875–877**, 1437–1448 doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.875-877.1437
6. Гречанюк Н.И., Минакова Р.В., Василега О.П. и др. (2010) Современное состояние и перспективы применения технологии высокоскоростного электронно-лучевого испарения и последующей конденсации в вакууме металлов и неметаллов для получения материалов электрических контактов и электродов. Серия «Композиционные слоистые и градиентные материалы и покрытия». *Сб. ИПМ НАНУ*, сс. 54–67. <http://www.materials.kiev.ua/issue/39/article/462>
7. Grechanyuk N.I., Minakova R.V., Grechanyuk I.N. et al. (2014) Current state and prospects for application of a high power electron beam technology to produce metallic and nonmetallic components for electric contacts and electrodes. *Там же*, сс. 233–245. <http://www.materials.kiev.ua/issue/72/article/1157>
8. Денесенко В.О., Минакова Р.В., Гречанюк В.Г., Гречанюк І.М. (2008) Структура і фізико-хімічні властивості композиційних матеріалів на основі міді та вольфраму, отриманих методом електронно-променевого випаровування. *Науковий вісник Чернівецького університету*, **422**, 26–33. http://library.chnu.edu.ua/res/library/elib/visnyk_chnu/visnyk_chnu_2008_0422.pdf
9. Minakova R.V., Grechanyuk I.N., Bukhanovsky V.V. et al. (2010) Structure, electrical conductivity and mechanical characteristics of copper-tungsten composite obtained by electron beam physical vapour deposition (EB-PVD) technique. *Transact. of Famena*, **34(2)**, 37–46. <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=20325&tip=sid>
10. Bukhanovskii V.V., Minakova R.V., Grechanyuk I.N. et al. (2011) Effect of composition and heat treatment on the structure and properties of condensed composites of the Cu–W system. *Metal Science and Heat Treatment*, **53 (1–2)**, 14–23. doi: 10.1007/s11041-011-9334-x
11. Grechanyuk N.I., Grechanyuk I.N., Osokin V.A. et al. (2008) Structure, physico-chemical, mechanical, and operational characteristics of condensed composite materials of the Cu–W system for electric contacts. *Proc. of 8th Intern. Symp. of Croatian Metallurgical Society SHMD-2008, June 2008, Sibenik, Croatia*, p. 232.
12. (1980) *Унифицированная методика лабораторных испытаний эффективности ингибиторов коррозии в водных системах*. Рига, Институт неорг. химии АН Литов. ССР.
13. Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г. (1983) *Материаловедение, методы анализа, лабораторные работы и задачи*. Москва, Металлургия. <https://www.twirpx.com/file/403315/>
14. Чорновол В.О. (2011) *Структура і корозійна стійкість композиційних матеріалів Cu–Mo, Cu–W, отриманих методом електронно-променевого випаровування-конденсації*: автореф. дис. ... канд. техн. наук.

References

1. Zatovskiy, V.G., Khomenko, O.V., Khomenko, O.I. (2018) Modern powder composite materials for switching and welding equipment. In: *Transact. Electric contacts and electrodes*. Kyiv, IPMS, NASU, **14**, 139–150 [in Ukrainian].
2. Grechanyuk, M.I., Grechanyuk, I.M., Zatovskiy, V.G., Grechanyuk, V.G. (2017) *Composite material for electric contacts and method of its realization*. Ukraine, Pat. 114451 [in Ukrainian]. https://sis.ukrpatent.org/media/INVENTIONS/2015/a201510758/published_description.pdf
3. Grechanyuk, N.I., Grechanyuk, V.G., Khomenko, E.V. et al. (2016) The new condensed from vapor phase composite materials based on copper and their applications. *Electrotechnica & Electronica* (Bulgaria), **5–6**, 199–205. <https://epluse.ceec.bg/wp-content/uploads/2018/09/20160506-34.pdf>
4. Grechanyuk, N.I., Grechanyuk, V.G., Khomenko, E.V. et al. (2016) Modern composite materials for switching and welding equipment. Information 2: Application of high-rate vacuum evaporation methods for manufacturing electric contacts and electrodes. *The Paton Welding J.*, **2**, 34–39. <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.02.06>

5. Bogdan, M., Marcin, H., Grechanyuk, I.N. et al. (2014) The actual state and prospects of a high power electron beam technology for metallic and non-metallic compositions used in electric contacts and electrodes. *Advanced Materials Research*, **875–877**, 1437–1448 doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.875-877.1437
6. Grechanyuk, N.I., Minakova, R.V., Vasilega, O.P. et al. (2010) Modern state-of-the-art and prospects of application of technology of high-rate vacuum evaporation and subsequent condensation in vacuum of metals and nonmetals for producing of electric contacts and electrodes. Series: Composite laminated and gradient materials and coating. *Transact. of IMPS, NASU*, 54–67 [in Russian]. <http://www.materials.kiev.ua/issue/39/article/462>
7. Grechanyuk, N.I., Minakova, R.V., Grechanyuk, I.N. et al. (2014) Current state and prospects for application of a high power electron beam technology to produce metallic and nonmetallic components for electric contacts and electrodes. *Ibid.*, 233–245 [in Russian]. <http://www.materials.kiev.ua/issue/72/article/1157>
8. Denesenko, V.O., Minakova, R.V., Grechanyuk, V.G., Grechanyuk, I.M. (2008) Structure and physical-chemical properties of composite materials based on copper and tungsten produced by electron beam evaporation method. *Nauk. Visnyk Chernivetskogo Un-tu*, **422**, 26–33 [in Ukrainian]. http://library.chnu.edu.ua/res//library/elib/visnyk_chnu/visnyk_chnu_2008_0422.pdf
9. Minakova, R.V., Grechanyuk, I.N., Bukhanovsky, V.V. et al. (2010) Structure, electrical conductivity and mechanical characteristics of copper-tungsten composite obtained by electron beam physical vapour deposition (EB-PVD) technique. *Transact. of Famena*, **34(2)**, 37–46. <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=20325&tip=sid>
10. Bukhanovskii, V.V., Minakova, R.V., Grechanyuk, I.N. et al. (2011) Effect of composition and heat treatment on the structure and properties of condensed composites of the Cu–W system. *Metal Sci. and Heat Treatment*, **53 (1–2)**, 14–23. Doi: 10.1007/s11041-011-9334-x
11. Grechanyuk, N.I., Grechanyuk, I.N., Osokin, V.A. et al. (2008) Structure, physicochemical, mechanical, and operational characteristics of condensed composite materials of the Cu–W system for electric contacts. In: *Proc. of 8th Intern. Symp. of Croatian Metallurgical Society SHMD-2008 (June 2008, Sibenik, Croatia)*, 232.
12. (1980) *Unified procedure for laboratory tests of effectiveness of corrosion inhibitors in water systems*. Riga, I-t of Inorganic Chemistry, Litov. SSR [in Russian].
13. Geller, Yu.A., Rakhshadt, A.G. (1983) *Materials science, methods of analysis, laboratory works and problems*. Moscow, Metallurgiya [in Russian]. <https://www.twirpx.com/file/403315/>
14. Chornovol, V.O. (2011) *Structure and corrosion resistance of Cu–Mo, Cu–W composite materials produced by electron beam evaporation-condensation*: Syn. of Thesis for Cand. of Tech. Sci. Degree [in Ukrainian].

STRUCTURE AND CORROSION PROPERTIES OF COPPER- AND TUNGSTEN-BASED COMPOSITE MATERIALS, PRODUCED BY HIGH-RATE EVAPORATION-CONDENSATION

M.I. Grechanyuk¹, V.G. Grechanyuk², I.M. Grechanyuk³, V.O. Chornovol²

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

3 Krzhizhanovskiy Str., 03142, Kyiv, Ukraine. E-mail: dir@ipms.kiev.ua

²Kyiv National University of Construction and Architecture.

31 Povitroflotskyi Prosp. 03037, Kyiv, Ukraine. E-mail: knuba@knuba.edu.ua

³NVP «ELTEKHMASH». 25 Vatutin Str., 21011, Vynnytsa, Ukraine. E-mail: vin25ebt@ukr.net

Structure, corrosion resistance, and mechanical properties of Cu–W composite materials used for various-purpose electric contacts were studied. Shown is the influence of tungsten concentration in Cu–W composite material on these properties. Gravimetric dependencies of Cu–W composite materials with different tungsten content are given and composition of the corrosive environment before and after corrosion testing is determined. Ref. 14, Tabl. 2, Fig. 6.

Key words: structure; corrosion resistance; mechanical properties; composite materials; tungsten; copper

Надійшла до редакції 08.11.2021



ЗВАРЮВАННЯ • МЕТАЛУРГІЯ • МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО
Під редакцією академіка НАН України В. Крайча

Електронно-променева плавка
зливків псевдо-β титанових
сплавів

Ахонін С.В., Березос В.О.

НОВА КНИГА

Ахонін С.В., Березос В.О. Електронно-променева плавка зливків псевдо-β титанових сплавів. — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2021. — 88 стр.

В монографії розглянуто особливості виробництва зливків псевдо-β сплавів титану методом електронно-променевої плавки. Детально досліджено механізми та закономірності поведінки легуючих елементів під час виготовлення зливків псевдо-β сплавів титану методом електронно-променевої плавки з використанням проміжної ємності. Показано особливості кристалізації рідкого металу зливків псевдо-β сплавів титану в умовах дії електронно-променевого нагріву. З урахуванням виявлених залежностей, на прикладі титанових сплавів BT19 та BT22 запропоновано оптимальні технологічні режими їх виготовлення методом електронно-променевої плавки, які забезпечують високий рівень якісних та техніко-економічних показників. Наведено характеристики хімічного складу, стану поверхні, макро- та мікроструктури зливків псевдо-β сплавів титану. Розглянуто питання деформаційної обробки сплавів та наведено механічні характеристики напівфабрикатів із псевдо-β сплавів титану, виготовлених методом електронно-променевої плавки. Представлено особливості конструкції промислових електронно-променевих установок та дано опис технологічних схем плавки зливків діаметром 110...600 мм псевдо-β сплавів титану. Для наукових та інженерно-технічних працівників, а також для студентів металургійних спеціальностей.

Бібліогр. 107, Табл. 17, Рис. 55.

Замовлення на книгу надсилати на пошту:
E-mail: journal@paton.kiev.ua

ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ВИСОКОМІЦНИХ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ β -ФАЗИ

С.В. Ахонін¹, В.Ю. Білоус¹, Р.В. Селін¹, Е.Л. Вржижевський¹, І.К. Петриченко¹, С.Л. Антонюк²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ДП «АНТК ім. О.К. Антонова». 03062, м. Київ, вул. Академіка Туполева, 1. E-mail: info@antonov.com

Вивчено властивості з'єднань, виконаних електронно-променевим зварюванням, економнолегованого титанового псевдо- β -сплаву типу LCB системи легування Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe та конструкційного псевдо- β -сплаву BT19 системи легування Ti–3Al–5,5Mo–3,5V–5,5Cr–1Zr. Встановлено, що структура з'єднань складається з зерен β -фази, в яких присутні дисперсні виділення α -фази, причому кількість β -фази в металі шва в стані після електронно-променевого зварювання в сплаві Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe фіксується на рівні 71...74 %, а в сплаві Ti3Al–5,5Mo–3,5V–5,5Cr–1Zr — 74...87 %. Локальна термічна обробка зварних з'єднань не забезпечує зниження вмісту β -фази в металі шва і зоні термічного впливу, але дозволяє отримати майже рівномірні зварні з'єднання з рівнем міцності 98 % від міцності основного металу в стані прокату. Загартування з наступним старінням для з'єднань сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe є найбільш ефективною термічною обробкою, яка дозволяє підняти міцність з'єднань до 1204 МПа при показниках ударної в'язкості на рівні 3,7...4,2 Дж/см². Бібліогр. 14, табл. 4, рис. 5.

Ключові слова: титан; титанові сплави; зварні з'єднання; економнолеговані; псевдо- β -сплави; термічна обробка; відпал; гартування; старіння; мікроструктура, механічні властивості

Титановими β -сплавами вважаються сплави, які при різкому охолодженні від температур β -області гартуються на β -фазу. Найважливішою перевагою сучасних псевдо- β -сплавів титану є їхня висока міцність, а недоліки — висока вартість легуючих елементів [1, 2]. Для зниження вартості сплавів на основі β -фази розроблено економнолеговані сплави LCB, Timetal 125 [3, 4]. Цей клас титанових сплавів є перспективним для застосування в недорогих конструкціях [5–7]. Створені на даний час новітні псевдо- β -сплави мають сприятливий комплекс міцності і пластичних властивостей, що перевершує як за абсолютними значеннями, так і за питомими показниками якості α - і α + β -сплавів при кімнатній температурі. Багато з них можуть бути використані для виробництва листових штамповок без нагріву заготовок з подальшим зміцненням готового продукту за допомогою низькотемпературного старіння [8]. Розробка технології зварювання та режимів термічної обробки з'єднань таких сплавів є складним завданням

[9, 10]. Порівняння властивостей з'єднань економнолегованих сплавів з властивостями сучасних псевдо- β -сплавів доцільно проводити з урахуванням наступної термообробки після зварювання [11]. Метою даної роботи було визначення впливу електронно-променевого зварювання (ЕПЗ) та додаткових заходів ЕПЗ, таких як попередній підігрів та локальна термообробка, на властивості зварних з'єднань економнолегованих титанових псевдо- β -сплавів, а також можливості зміцнення з'єднань за рахунок трьох видів пічної термообробки.

Досліджували властивості з'єднань економнолегованого титанового псевдо- β -сплаву типу LCB системи легування Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe та конструкційного псевдо- β -сплаву BT19 системи легування Ti–3Al–5,5Mo–3,5V–5,5Cr–1Zr (табл. 1). Досліджені сплави мають коефіцієнт β -стабілізації $K_{\beta} \geq 1$, тому вони при різкому охолодженні від температур β -області гартуються на β -фазу. Сумарний вміст β -стабілізаторів та α -зміцнювачів

Таблиця 1. Властивості дослідних титанових псевдо- β -сплавів

Сплав	Система легування	K_{β}	[Mo] _{екв} %	[Al] _{екв} %	Межа міцності (σ_b), МПа	Відносне подовження (δ), %
LCB	Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe	1,12	12,4	6,3	1015	5
BT19	Ti–3Al–5,5Mo–3,5V–5,5Cr–1Zr	1,31	14,4	7,1	958	12

С.В. Ахонін — <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>, В.Ю. Білоус — <https://orcid.org/0000-0002-0082-8030>,

Р.В. Селін — <https://orcid.org/0000-0002-2990-1131>, Е.Л. Вржижевський — <https://orcid.org/0000-0001-8651-8510>,

І.К. Петриченко — <https://orcid.org/0000-0002-0476-3983>

Таблиця 2. Види зміцнюючої термічної обробки економнолегованого псевдо-β-сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe

Номер режиму	Термообробка	Примітка
1	Відпал — нагрівання до 750 °С, витримка 1 год, охолодження з піччю	Нагрівання і охолодження у вакуумній печі
2	Гартування — нагрівання до 750 °С, витримка 1 год, гартування в воду, старіння при температурі 450 °С, 5 год витримка, охолодження на повітрі	Нагрівання, відпал та старіння в печі без захисної атмосфери
3	Уповільнене охолодження з температури 750 °С з регламентованою швидкістю 1 °С/хв	Нагрівання і охолодження у вакуумній печі

чів цих сплавів можна оцінити за $[Mo]_{екв}$, $[Al]_{екв}$. Пластини економнолегованого титанового сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe товщиною 8 мм та титанового сплаву VT19 товщиною 6 мм було отримано за технологією електронно-променевої плавки з проміжною ємністю [12] та наступної гарячої деформаційної обробки на реверсивному прокатному ДУО-стані Skoda 355/500.

Електронно-променеве зварювання зразків довжиною 200 мм та шириною 100 мм здійснювали на модернізованій установці УЛ-144, оснащених енергоблоком ЕЛА 60/60. Струм променя становив 90 мА. Була застосована наступна термообробка: попередній підігрів до температури поверхні зразків 400 °С; локальна термообробка (ЛТО) у вакуумній камері після зварювання до температури поверхні зразків 750 °С, 10 хв.

Контроль температури здійснювали за допомогою термопар, прикріплених з зворотньої сторони шва. Методика попереднього підігріву описана у роботі [13].

Після зварювання зразки з'єднань економнолегованого псевдо-β-сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe та конструкційного псевдо-β-сплаву VT19 системи легування Ti–3Al–5,5Mo–3,5V–5,5Cr–1Zr, виконаних з ЛТО, були піддані одній з трьох видів зміцнюючих термообробок: відпалу, гартуванню з наступним старінням, уповільненому охолодженню (табл. 2).

Поперечні макрошліфи цих зварних з'єднань в стані після термообробки наведено на рис. 1. На

макрошліфах можна відзначити метал шва, ЗТВ та зону ЛТО.

Дослідження мікроструктури отриманих зварних з'єднань показало, що структура основного металу економнолегованого титанового псевдо-β-сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe складається з зерен β-фази розміром 10...70 мкм (рис. 2, а), в яких присутні дисперсні виділення α-фази розміром не більше 2...3 мкм, рівномірно розподілені в об'ємі зерна. Структура металу шва дендритна (рис. 2, б), складається переважно з β-фази, границі β-зерен декоровані дисперсними виділеннями α-фази. Мікроструктура металу шва з'єднання сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe, виконаного ЕПЗ з подальшою ЛТО, дуже схожа на мікроструктуру металу шва, виконаного ЕПЗ з одним лише попереднім підігрівом.

Кількість β-фази в основному металі та металі шва в стані після зварювання фіксується на рівні 71...74 %. Сплав Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe не є чутливим до термічного циклу ЕПЗ, кількість β-фази в металі шва зросла на 3 % при ЕПЗ з попереднім підігрівом та залишилася на тому ж рівні при ЕПЗ з додатковою ЛТО — 72 %. В цілому, для підвищення механічних властивостей металу з'єднань і основного металу необхідно рекомендувати додаткову термічну обробку — гартування або відпал, що дозволить для економнолегованих псевдо-β-сплавів ще знизити кількість β-фази.

Таким чином, застосування після ЕПЗ ЛТО на електронно-променевій установці не дозволяє

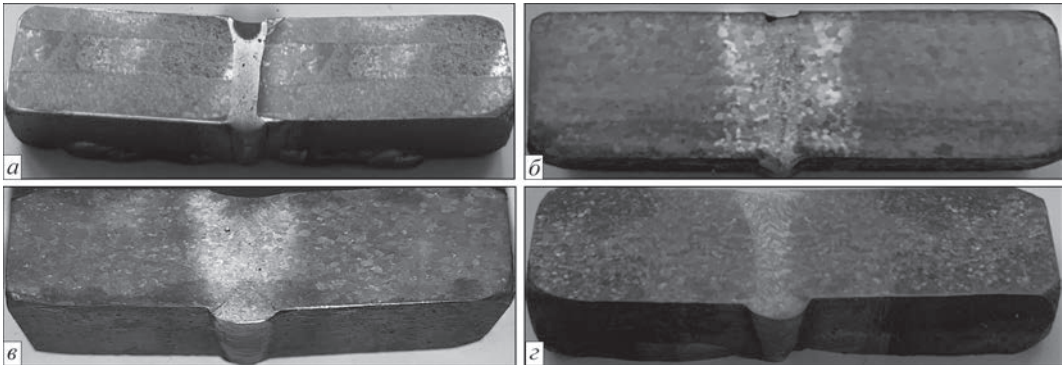


Рис. 1. Макрошліфи зварних з'єднань економнолегованого титанового псевдо-β-сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe, виконаного ЕПЗ, в стані після: а — зварювання та ЛТО; б — відпалу 750 °С; в — гартування в воду і старіння при 450 °С; з — уповільненого охолодження по режиму 3 від температури 750 °С

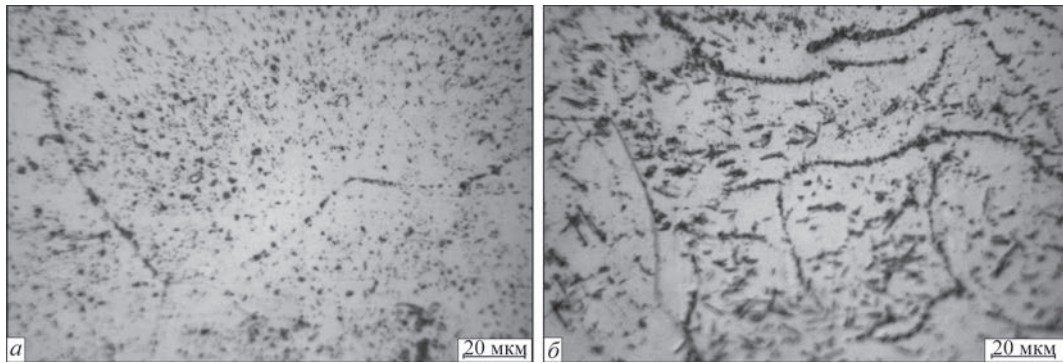


Рис. 2. Мікроструктура основного металу (а) та металу шва (б) з'єднання економнолегованого титанового сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe, виконаного ЕПЗ з попереднім підігрівом та ЛТО в стані після зварювання

в сплаві Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe регулювати співвідношення між α - і β -фазами в металі зварного з'єднання і не забезпечує зниження вмісту метастабільної β -фази в металі шва та отримання однорідної рівномірної структури у всіх зонах зварного з'єднання, що не дає змоги відмовитися від пічної термообробки після зварювання. Для формування рівномірної однорідної структури, що виключає присутність метастабільних фаз, а також для зняття зварювальних напружень зварні з'єднання економнолегованого титанового псевдо- β -сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe, виконані ЕПЗ, було піддано трьом видам термічної обробки — відпалу; гартуванню в воду з послідовним старінням; відпалу з наступним уповільненим охолодженням зі швидкістю 1 °C/хв (табл. 2).

Основний метал зварного з'єднання економнолегованого титанового сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe, виконаного ЕПЗ з подальшим відпалом при температурі 750 °C протягом 1 год, складається з рівноосних поліедричних первинних β -зерен розміром 200...800 мкм (рис. 3, а), в об'ємі яких на тлі матричної β -фази спостерігаються як пластинчасті α -частинки довжиною 2...7 мкм і товщиною близько 1 мкм, так і більш дисперсні виділення розміром близько 1 мкм, границі зерен потовщені, товщина зернограничних виділень становить 1,5...2,0 мкм. Мікроструктура металу шва в стані після відпалу складається з рівноосних і витягнутих в напрямку тепловідводу первинних β -зерен різного розміру, проте структура металу шва дрібніше структури основного металу (рис. 3, б).

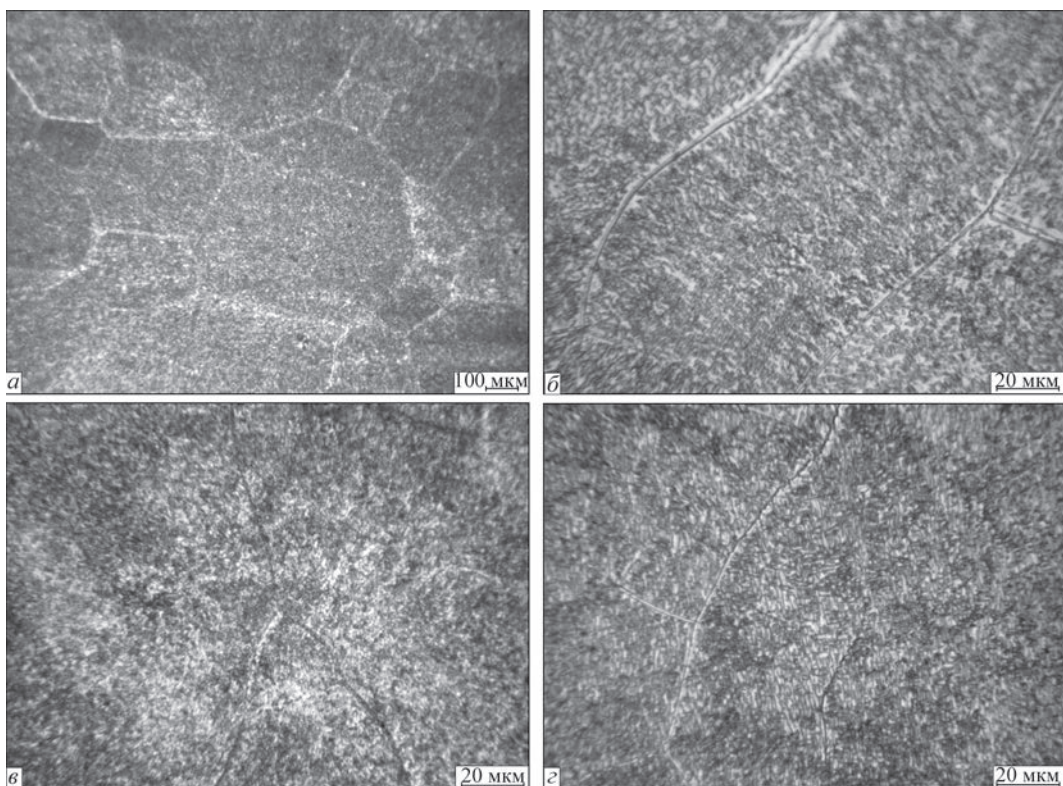


Рис. 3. Мікроструктура основного металу (а) та металу шва (б) з'єднання економнолегованого титанового сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe, виконаного ЕПЗ в стані після відпалу 740...750 °C і подальшим охолодженням в печі; металу шва в стані після гартування (в) та уповільненого охолодження (г)

В об'ємі зерен стався розпад β -фази з виділенням пластинчастих (довжиною до 4 мкм) і округлих (розміром до 1 мкм) частинок, який в зернах металу переважно рівномірний. Границі зерен потовщені, ширина фази (найімовірніше α -фаза), що виділилася уздовж границь, складає близько 2 мкм.

Мікроструктуру металу шва зварного з'єднання сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe, виконаного ЕПЗ з наступним гартуванням в воду від температури 750 °C і старінням при 450 °C протягом 5 год, представлено на рис. 3, в. В металі шва проявляється дендритна структура. Метал шва складається з рівноосних і витягнутих в напрямку теплопроводу первинних β -зерен різного розміру. Усередині зерен стався розпад β -твердого розчину з виділенням дисперсних частинок α -фази, розмір яких в основному становить 1 мкм і менше. Дисперсність виділившихся частинок пояснюється різким загартуванням в воду від температури, близької до $T_{\text{пл}}$, і відсутністю часової витримки.

Мікроструктуру металу шва зварного з'єднання сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe, виконаного ЕПЗ з подальшим уповільненим охолодженням від 760 °C зі швидкістю 1 °C/хв, показано на рис. 3, г. Метал шва характеризується дендритною структурою, на тлі якої виявляються рівноосні і витягнуті в напрямку теплопроводу первинні β -зерна, в обсязі яких мають місце частинки α -фази плас-

тинчастої форми довжиною 2...7 мкм і товщиною близько 1 мкм. Границі зерен потовщені. Товщина фази, що виділилася уздовж границь, становить 1,5...2,0 мкм. Метал шва має внутрішньозеренну мікроструктуру з більшими розмірами, у порівнянні зі з'єднанням після відпалу та гартування, дисперсних частинок α -фази, що виділилися при розпаді β -фази (довжина 2...7 мкм і в ОМ, і в металі шва). Більш крупна структура з великими α -частинками має найменші значення міцності як ОМ, так і металу шва.

Основний метал зварного з'єднання титанового конструкційного псевдо- β -сплаву BT19 системи легування Ti-3Al-5,5Mo-3,5V-5,5Cr-1Zr перед зварюванням мав повністю рекристалізовану структуру, в рівноосних поліедричних зернах спостерігалися рівномірно розподілені по тілу зерна дисперсні виділення α -фази (рис. 4, а), кількість β -фази — 44 %.

Метал шва після ЕПЗ складається з витягнутих в напрямку теплопроводу зерен β -фази, границі яких проявляються на тлі дендритної структури (рис. 4, б), нечисленні дисперсні фазові виділення зустрічаються в деяких зернах металу шва. Кількість β -фази дорівнює 87 %, що значно більше, ніж в дослідженому економнолегованому сплаві Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe. Таким чином, конструкційний псевдо- β -сплав BT19 є більш чутливим до термічного циклу ЕПЗ.

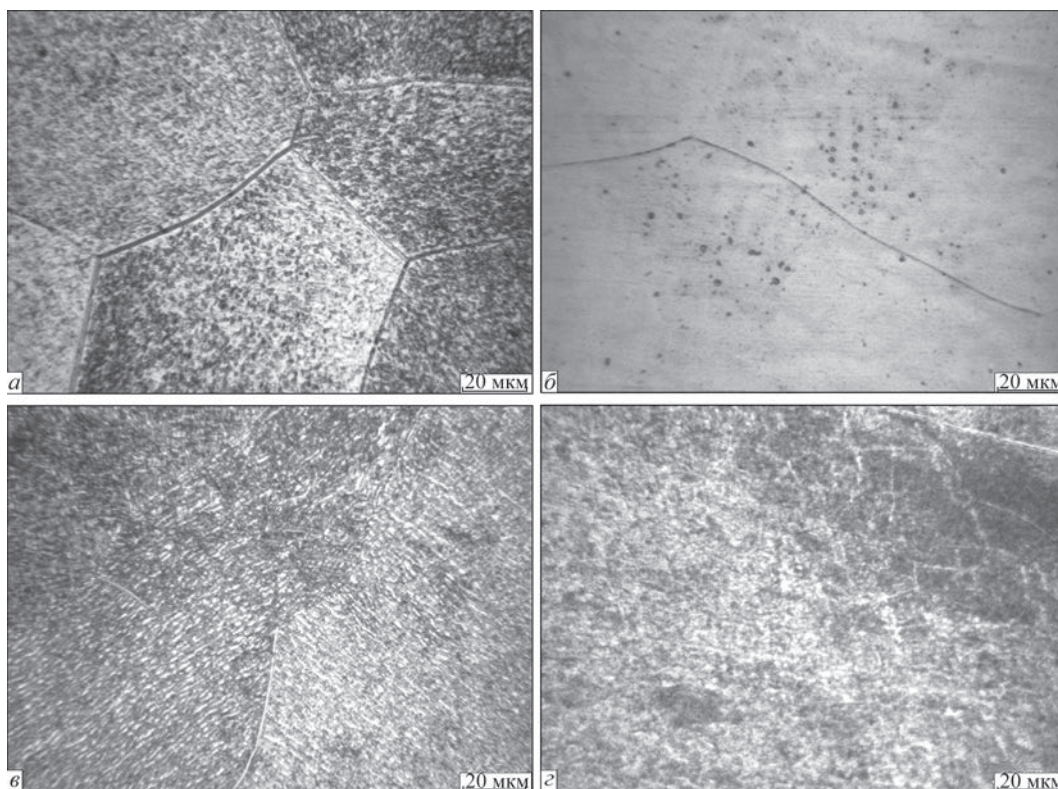


Рис. 4. Мікроструктура основного металу (а) та металу шва (б) з'єднання титанового сплаву BT19, виконаного ЕПЗ в стані після зварювання; металу шва в стані після відпалу (г) та гартування (з)

Метал шва після відпалу складається з рівновісних і витягнутих в напрямку тепловідводу первинних β -зерен, які зазнали розпаду з утворенням рівномірної однорідної двофазної структури, що складається з частинок α - і β -фаз (рис. 4, в). Частинки α -фази мають пластинчасту морфологію, довжина α -пластин становить 1...5 мкм при товщині 0,5...0,8 мкм.

Внутрішньозеренна структура металу шва після гартування найбільш дрібнодисперсна, розмір продуктів розпаду не перевищує 1 мкм (рис. 4, г). Кількість β -фази дорівнює 36 %, що значно менше, ніж після відпалу сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe.

Уповільнене охолодження з регламентованою швидкістю 1 °C/хв викликає в металі шва розпад β -фази з виділенням α - і β -частинок різних розмірів, поряд з дисперсними продуктами розпаду розміром менше 1 мкм на тлі β -матриці спостерігаються α -пластинки завдовжки 2...5 мкм.

Таким чином, основний метал і метал шва зварних з'єднань, виконаних ЕПЗ з наступним загартуванням в воду і старінням, має найбільш дисперсну внутрішньозеренну мікроструктуру в порівнянні зі з'єднанням після відпалу та уповільненого охолодження. Більш дисперсна структура забезпечує великі значення міцності основного металу і металу шва при менших показниках ударної в'язкості.

Кількість β -фази в металі шва сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe після термообробок знизилася в порівнянні зі з'єднанням після зварювання і знаходиться на рівні 47...57 % (табл. 3). При цьому в металі шва найбільша кількість β -фази присутня після гартування в воду і старіння і становить 47 %, а найменша — 57 % після уповільненого охолодження.

В цілому, найбільш простою термообробкою для з'єднань, виконаних ЕПЗ, економнолегованого псевдо- β -сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe є відпал після зварювання без контрольованого охолодження або перенесення в гартівне середовище, але який забезпечує однорідну рівномірну структуру як ОМ, так і металу шва і ЗТВ та найбільш близькі значення вмісту β -фази в ОМ і металі шва. У разі необхідності забезпечення максимальної міцності ОМ і зварних з'єднань доцільне застосування гартування в воду і старіння.

Таким чином, в результаті проведення термічної обробки після зварювання (відпалу, гартування зі старінням чи уповільненим охолодженням) структура основного металу, металу шва та ЗТВ стала однорідною, вирівнявся фазовий склад, у всіх зонах зварного з'єднання переважає (α + β)-структура, кількість β -фази в ОМ і металі шва знаходиться

на рівні 47...57 %. Відрізняються з'єднання після термообробок розміром частинок α -фази, що виділилися при розпаді β -фази, при цьому найменший розмір частинок до 1...2 мкм в ОМ і до 1 мкм в шві спостерігається після гартування в воду і старіння, а найбільший після уповільненого охолодження зі швидкістю 1 °C/хв та складає 2...7 мкм і в ОМ, і в металі шва. Конструкційний псевдо- β -сплав VT19 більш чутливий до термічного циклу ЕПЗ. Кількість β -фази в металі шва після ЕПЗ з попереднім підігрівом залишається більшою (див. рис. 4, б) в порівнянні з економнолегованим сплавом Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe (див. рис. 2, б), що становить 87 та 73 % відповідно.

Аналіз механічних властивостей зварних з'єднань досліджених титанових сплавів дозволив зробити висновок, що міцність зварного з'єднання сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe в стані після зварювання знаходиться на рівні 97 % від міцності основного металу в стані прокату (табл. 4). Найвищі значення міцності для сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe мають з'єднання, які були піддані гартуванню в воду з подальшим старінням і становлять 1204 МПа. З'єднання сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe в стані після відпалу мають значення міцності на рівні 1169 МПа. Сповільнене охолодження з регламентованою швидкістю 1 °C/хв призводить до зниження міцності з'єднань сплаву з 997 до 964 МПа. Слід відзначити, що руйнування з'єднань, виконаних ЕПЗ та підданих відпалу, гартуванню зі старінням або уповільненому охолодженню, відбувається по основному металу.

Зниження міцності ОМ та з'єднань сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe після сповільненого охолодження з регламентованою швидкістю 1 °C/хв можливо пояснити утворенням в більшій кількості інтерметалідів на основі заліза, чому сприяє більший розмір виділень α -фази пластинчастої форми довжиною 2...7 мкм, потовщені границі зерен як в металі шва, так і в металі ЗТВ та ОМ, а також найбільша товщина фази, що виділилася уздовж границь зерен, становить 1,5...2,0 мкм. Час перебування при температурі вище 450 °C при уповільненому охолодженні зі швидкістю 1 °C/хв складає 5 год. Імовірно, що за цей час сформувалися потовщені границі зерен в ОМ, металі ЗТВ і шва та виділення в границях зерен більшої кількості інтерметалідів на основі заліза. При температурі старіння 450 °C час старіння складає 5 год, але в сплаві Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe формується дрібнодисперсна структура, в якій відсутні потовщені границі зерен. Це дозволяє зробити додатковий висновок про небажаність термообробки сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe, яка передбачає перебуван-

Таблиця 3. Кількість β-фази в металі з’єднань економнолегованих титанових сплавів Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe та BT19, %

Тип зразка та його термообробка	Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe	BT19
Основний метал	71	44
Зварне з’єднання, попередній підігрів 400 °С	74	87
Зварне з’єднання, попередній підігрів 400 °С, ЛТО 750 °С	72	73
Зварне з’єднання, відпал	47	43
Зварне з’єднання, гартування в воду, старіння	—»—	39
Зварне з’єднання, уповільнене охолодження 1 °С/хв	57	45

Таблиця 4. Механічні властивості зварних з’єднань титанових псевдо-β-сплавів BT19 та Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe

Тип зразка та його термообробка	Межа міцності (σ _в), МПа	Межа текучості (σ _т), МПа	Відносне подовження (δ), %	Відносне звуження (ψ), %	Ударна в’язкість металу шва (KCV), Дж/см²
Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe					
Зварне з’єднання, ЛТО 750 °С після зварювання	997	964	6,5	—	5,3
Зварне з’єднання, відпал	1169	1141	1,3	1,3	4,8
Зварне з’єднання, гартування	1204	1199	8,6	1,7	4,2
Зварне з’єднання, уповільнене охолодження	964	905	4,7	12,6	7,1
BT19					
Зварне з’єднання, ЛТО 750 °С після зварювання	937	868	5,3	19	21
Зварне з’єднання, відпал	1027	985,7	12,0	31,5	26
Зварне з’єднання, гартування	1285	1234	4,7	20,6	23
Зварне з’єднання, уповільнене охолодження	1068	1012	11,3	36	22,5

ня металу чи з’єднання при температурах більше 450 °С значний проміжок часу – більше 1 год.

Показники ударної в’язкості для ОМ та металу з’єднання Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe після гартування зі старінням знаходяться на рівні 3,7...4,2 Дж/см². Метал з’єднання Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe після ТО з подальшим уповільненим охолодженням зі швидкістю 1 °С/хв має внутрішньозеренну мікроструктуру з найбільшими розмірами виділень α-фази довжиною 2...7 мкм і в ОМ, і в металі шва та найбільші значення показників ударної в’язкості, які становлять 5,6...7,1 Дж/см², але все одно менші, ніж після прокату (11,5 Дж/см²).

Доцільно відзначити, що найбільш простою термообробкою для з’єднань, виконаних ЕПЗ, економнолегованого псевдо-β-сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe є відпал після зварювання без контрольованого охолодження або перенесення в гартівне середовище, але який забезпечує однорідну рівномірну структуру як ОМ, так і металу шва

та ЗТВ. Найбільш близькі значення вмісту β-фази в ОМ і металі шва, а також високі механічні властивості з’єднань на рівні 1169 МПа, що складає 115 % від міцності сплаву в стані після прокату чи 97 % від міцності з’єднань в стані після гартування в воду зі старінням.

Конструкційний псевдо-β-сплав BT19 після гартування та старіння має найбільшу міцність — 1285 проти 1204 МПа для сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe. На відміну від псевдо-β-сплаву BT19 відпал при 750 °С для сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe є більш ефективною термообробкою. Так, гартування та старіння дозволяє підняти рівень тимчасової міцності з’єднань псевдо-β-сплаву BT19, виконаних ЕПЗ, на 348 МПа, а відпал при 750 °С цих самих з’єднань лише на 90 МПа [13, 14]. Відпал при 750 °С з’єднань сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe дозволяє підняти рівень міцності на 172 МПа.

Дослідження мікроструктури виконаних зварних з’єднань і їх зіставлення з результатами досліджень механічних властивостей дозволили встановити залежність міцності з’єднань, виконаних ЕПЗ, економнолегованого псевдо-β-сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe від кількості β-фази в металі шва (рис. 5) наступного виду:

σ_в = 1460 – 6,4(β, %), МПа.

Відповідно до цієї діаграми мінімальні значення міцності (σ_в = 820 МПа) зварних з’єднань фіксуються при вмісті β-фази 99,9 %, а при 35 % очікувана міцність з’єднань становить 1236 МПа.

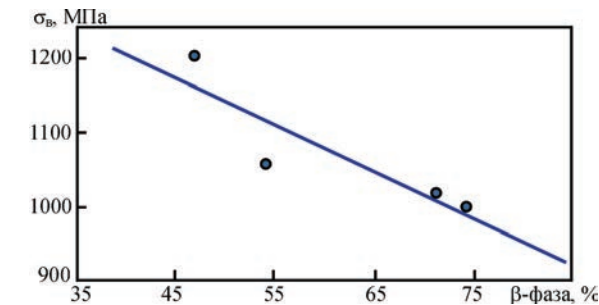


Рис. 5. Міцність зварних з’єднань економнолегованого псевдо-β-сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe в залежності від кількості β-фази

Висновки

1. Конструкційний псевдо- β -сплав ВТ19 більш чутливий до термічного циклу ЕПЗ та термообробки після зварювання. Найвищі значення міцності на рівні 1285 МПа при значеннях показників ударної в'язкості 23 Дж/см² мали з'єднання сплаву ВТ19 після гартування у воду і старіння.

2. Найвищі значення міцності титанового сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe на рівні 1204 МПа при значеннях показників ударної в'язкості 4,2 Дж/см² мали з'єднання після гартування у воду і старіння. При цьому сформувалася найбільш дисперсна однорідна і рівномірна внутрізеренна мікроструктура з розмірами α -частинок від менше 1 до 2...3 мкм, а кількість β -фази знаходилася на рівні 47 %.

3. Попередній підігрів з наступною ЛТО при ЕПЗ економного титанового сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe дозволив знизити вміст β -фази в металі шва з'єднань до 72 % та забезпечити міцність зварних з'єднань на рівні 98 % від міцності основного металу в стані після прокату. Для формування однорідної структури зварних з'єднань сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe, виконаних ЕПЗ, необхідно застосування пічної термообробки.

4. Відпал без контрольованого охолодження або перенесення в гартівне середовище є найбільш простою термообробкою для сплаву Ti–2,8Al–5,1Mo–4,9Fe, який забезпечив однорідну рівномірну структуру, вміст β -фази в ОМ на рівні 54 %, а також високі механічні властивості з'єднань на рівні 1169 МПа.

Список літератури

1. Lütjering G., Williams J.C. (2003) *Titanium (engineering materials and processes)*. Berlin, Springer-Verlag.
2. (2002) *EHK Technologies: Opportunities for low cost titanium in reduced fuel consumption, improved emissions, and enhanced durability heavy-duty vehicles*. Subcontract 4000013062, EHK Technologies, Vancouver, WA, USA.
3. Lavender C.A. (2004) *Low-cost titanium evaluation*. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, USA.
4. (2004) *EHK Technologies: Summary of emerging titanium cost reduction technologies*. A study performed for US Department of Energy and Oak Ridge National Laboratory. Subcontract 4000023694, EHK Technologies, Vancouver, WA, USA.
5. Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. (2009) *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*: Справочник. Москва, ВИАМ–МАТИ.
6. Boyer R.R., Williams J.C. (2011) Developments in research and applications in the titanium industry in the USA. *Proc. of 12th World Conf. on Titanium*, **1**, 10–19.
7. Хорев А.И., Белов С.П., Глазунов С.Г. (1992) *Металловедение титана и его сплавов*. Москва, Металлургия.
8. Антипов В.В. (2012) Стратегия развития титановых, магниевых, бериллиевых и алюминиевых сплавов. *Юбилей-*

ный науч.-техн. сб. «Авиационные материалы и технологии». Москва, ВИАМ, сс. 157–167.

9. Глазунов С.Г., Моисеев В.Н. (1974) *Конструкционные титановые сплавы*. Москва, Металлургия.
10. Бокштейн С.З., Кишкин С.Т., Мирский Л.М. (1971) Влияние тонкой структуры, возникающей в титане в процессе полиморфного ($\alpha+\beta$)-превращения, на диффузионную подвижность. *Изв. АН СССР. Металлы*, **5**, 210–215.
11. Yu Y., Hui S.X., Ye W.J., Xiong B.Q. (2009) Mechanical properties and microstructure of an $\alpha+\beta$ titanium alloy with high strength and fracture toughness. *Rare Met.*, **28**(4).
12. Ахонин С.В., Пикулин А.Н., Березос В.А. и др. (2019) Лабораторная электронно-лучевая установка УЭ-208М. *Современная электрометаллургия*, **3**, 15–22. <https://doi.org/10.15407/sem.2019.03.03>
13. Ахонин С.В., Белоус В.Ю., Селин Р.В. и др. (2018) Электронно-лучевая сварка и термообработка сварных соединений высокопрочного псевдо- β -титанового сплава ВТ19. *Автоматическая сварка*, **7**, 12–17. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/as.2018.07.02>
14. Ахонин С.В., Белоус В.Ю., Селин Р.В., Вржижевский Э.Л. (2017) Влияние электронно-лучевой сварки и локальной термической обработки на свойства сварных соединений высокопрочного псевдо- β -титанового сплава ВТ19. *Сб. тр. восьмой Междунар. конф. «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов», 11–15 сентября 2017 г., г. Одесса, Украина*. Киев, Международная Ассоциация «Сварка», сс. 7–10.

References

1. Lütjering, G., Williams, J.C. (2003) *Titanium (Engineering materials and processes)*. Berlin, Springer-Verlag.
2. (2002) *EHK Technologies: Opportunities for low cost titanium in reduced fuel consumption, improved emissions, and enhanced durability heavy-duty vehicles*. Subcontract 4000013062, EHK Technologies, Vancouver, WA, USA.
3. Lavender, C.A. (2004) *Low-cost titanium evaluation*. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA, USA.
4. (2004) *EHK Technologies: Summary of emerging titanium cost reduction technologies*. A study for US Department of Energy and Oak Ridge National Laboratory. Subcontract 4000023694, EHK Technologies, Vancouver, WA, USA.
5. Ilin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties*: Refer. Book. Moscow, VILS, MATI [in Russian].
6. Boyer, R.R., Williams, J.C. (2011) Developments in research and applications in the titanium industry in the USA. In: *Proc. of 12th World Conf. on Titanium*, **1**, 10–19.
7. Khorev, A.I., Belov, S.P., Glazunov, S.G. (1992) *Physical metallurgy of titanium and its alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
8. Antipov, V.V. (2012) Strategy of development of titanium, magnesium, beryllium and aluminium alloys. In: *Jubilee Sci.-Tech. Transact. on Aviation Materials and Technologies*. Moscow, VIAM, 157–167 [in Russian].
9. Glazunov, S.G., Moiseev, V.N. (1974) *Structural titanium alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
10. Bokshstein, S.Z., Kishkin, S.T., Mirsky, L.M. (1971) Influence of thin structure developing in titanium during polymorphous ($\alpha+\beta$)-transformation on diffusion mobility. *Izv. AN SSSR. Metallurgy*, **5**, 210–215 [in Russian].
11. Yu, Y., Hui, S.X., Ye, W.J., Xiong, B.Q. (2009) Mechanical properties and microstructure of an $\alpha+\beta$ titanium alloy with high strength and fracture toughness. *Rare Met.*, **28**(4).

12. Akhonin, S.V., Pikulin, O.M., Berezos, V.O. et al. (2019) Laboratory electron beam unit UE-208M. *Sovrem. Elektro-metall.*, 3, 15–22 [in Russian]. <https://doi.org/10.15407/sem.2019.03.03>
13. Akhonin, S.V., Belous, V.Yu., Selin, R.V. et al. (2018) Electron beam welding and heat treatment of welded joints of high-strength pseudo- β titanium alloy VT19. *The Paton Welding J.*, 7, 10–14. DOI: <http://dx.doi.org/10.15407/tpwj.2018.07.02>
14. Akhonin, S.V., Belous, V.Yu., Selin, R.V., Vrzhezhevsky, E.L. (2017) Influence of electron beam welding and local heat treatment on properties of welded joints of high-strength pseudo- β titanium alloy VT19. In: *Proc. of 8th Int. Conf. on Beam Technologies in Welding and Processing of Materials (Ukraine, Odessa, 11–15 September 2017)*. Kiev, MAW, 7–10 [in Russian].

INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF HIGH-STRENGTH TITANIUM ALLOYS BASED ON β -PHASE

S.V. Akhonin¹, V.Yu. Bilous¹, R.V. Selin¹, E.L. Vrzhezhevskyi¹, I.K. Petrychenko¹, S.L. Antonyuk²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

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

²SC «O.K. Antonov ASTC». 1 Tupolev Str., 03062, Kyiv, Ukraine. E-mail: info@antonov.com

The properties of electron beam welded joints of sparsely-alloyed titanium pseudo- β -alloy of LCB type of Ti–2.8Al–5.1Mo–4.9Fe alloying system and structural VT19 pseudo- β -alloy of Ti–3Al–5.5Mo–3.5V–5.5Cr–1Zr alloying system were studied. It was found that the joint structure consists of β -phase grains, in which dispersed precipitates of α -phase are present. The quantity of β -phase in the weld metal after electron beam welding is recorded on the level of 71...74 % in Ti–2.8Al–5.1Mo–4.9Fe alloy and of 74...87 % in Ti–3Al–5.5Mo–3.5V–5.5Cr–1Zr alloy. Local heat treatment of welded joints does not ensure lowering of β -phase content in the metal of the weld and HAZ, but allows producing almost full strength joints, with strength level of 98 % of that of the base metal in as-rolled condition. Hardening followed by aging for joints of Ti–2.8Al–5.1Mo–4.9Fe alloy is the most effective heat treatment, which allows increasing the joint strength up to 1204 MPa at impact toughness values on the level of 3.7...4.2 J/cm². Ref. 14, Tabl. 4, Fig. 5.

Key words: titanium; titanium alloys; welded joints; sparsely-alloyed; pseudo- β -alloys; heat treatment; annealing; hardening; aging; microstructure, mechanical properties

Надійшла до редакції 24.11.2021

VI Міжнародна конференція ТИТАН 2022: ВИРОБНИЦТВО ТА ЗАСТОСУВАННЯ

Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

30 травня – 1 червня 2022 р.

Голова програмного комітету
академік С.В. Ахонін



Національна академія наук України
Інститут електроварювання ім. Є.О. Патона НАНУ
Національний університет «Запорізька політехніка»
Міжнародна Асоціація «Зварювання»



Тематика конференції

- Технології та обладнання для отримання губки, злитків та відливок з титану та його сплавів
- Структура та властивості титанових сплавів
- Адитивні технології в виробництві виробів з титанових сплавів
- Нові сплави на основі титану та інтерметалідів титану
- Деформаційна обробка титану
- Інженерія поверхні титанових сплавів
- Виробництво та використання порошків титану
- Технології зварювання та пайки титанових сплавів
- Застосування виробів та конструкцій з титану та сплавів на його основі в промисловості

Контрольні дати

Надання заявок на участь в конференції та тез доповідей	до 12.05.2022 р.
Розсилка другого інформаційного повідомлення та підтвердження участі	до 19.05.2022 р.
Оплата реєстраційного внеску	до 30.05.2022 р.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ
вул. Казимира Малевича, 11,
м. Київ, 03150, Україна
Тел./факс: (38044) 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.pwi-scientists.com/ukr/titan2022

Інформаційна підтримка:

«Сучасна електрометалургія»

«Автоматичне зварювання»

«Biuletyn Instytutu Spawalnictwa»

НАШІ ВІТАННЯ!

АХОНІНУ С.В. — 60!



13 грудня 2021 р. виповнилося 60 років академіку Національної академії наук України, доктору технічних наук, професору, заступнику директора з наукової роботи Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, завідувачу відділу «Металургія та зварювання титанових сплавів» Сергію

Володимировичу Ахоніну — відомому фахівцю в галузі матеріалознавства, спеціальної електрометалургії та зварювання титанових сплавів.

У 1985 р. С.В. Ахонін з відзнакою закінчив Київське відділення Московського фізико-технічного інституту і приступив до роботи в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, де пройшов шлях від стажера-дослідника до заступника директора з наукової роботи інституту. Сергій Володимирович у 1990 р. успішно захистив дисертацію на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, у 2003 р. — доктора технічних наук, з 2015 р. член-кореспондент НАН України, а у 2021 р. був обраний академіком Національної академії наук України.

Ахонін С.В. створив визнану вітчизняною та світовою науковою спільнотою школу з металургії титанових сплавів, запропонував підхід до розв'язання наукових проблем взаємодії рідкого металу з газовою фазою в умовах нагріву концентрованими джерелами енергії та структуроутворення в сплавах на основі титану при кристалізації в процесах спеціальної електрометалургії та під дією термічного циклу зварювання. Він уперше отримав кінетичні рівняння десорбції водню, азоту, кисню і вуглецю з рідких тугоплавких та хімічно активних металів у вакуумі та визначив численні значення коефіцієнтів масопереносу та констант швидкості реакцій молізації азоту та водню для титану, ніобію, танталу, розробив математичні моделі процесів кристалізації та випаровування металу під час електронно-променевої плавки. За результатами досліджень була створена технологія електронно-променевої плавки з проміжною смістю сплавів на основі титану, яка дозволяє одержувати зливки із гарантованим хімічним складом як за складом легуючих елементів, так і за вмістом домішок та виплавляти високоякісні зливки титану масою до 20 тон.

Наукові та організаторські здібності С.В. Ахоніна дозволили провести роботи по створенню нових вітчизняних титанових сплавів з підвищеними експлуатаційними характеристиками, які добре зварюються та визначити закономірності впливу структури, фазового складу та термообробки на їх механічні характеристики. Розроблені сплави знайшли своє практичне використання на ДП «АНТК ім. О.К. Антонова» в якості бронезахисних елементів конструкції літаків та в медицині, як матеріали для виготовлення ендопротезів та стоматологічних імплантів. Науково-дослідні роботи по впровадженню виробів з титанових сплавів з підвищеними експлуатаційними властивостями проводилися в співпраці з ДП «Запорізьке машинобудівне конструкторське бюро «ПРОГРЕС» ім. академіка О.Г. Івченко» та ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля».

Під керівництвом С.В. Ахоніна розроблені та експортовані до Китаю установки для автоматичного зварювання способом у вузький зазор магнітокереною дугою високоміцних титанових сплавів товщиною до 120 мм, що відповідає найкращим світовим зразкам.

За його безпосередньої участі на базі Державного підприємства «Науково-виробничий центр «Титан» Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України» вперше в Україні створено металургійне виробництво зливок титану та сплавів на його основі. Виготовлені на цьому підприємстві зливки титану та сплави на його основі постачаються на вітчизняні заводи для виробництва відливок (ПАТ «Мотор-Січ»), поковок (ДП «ВО «Південний машинобудівний завод» ім. О.М. Макарова», АТ «Сумське НВО» та ін.), труб і прутків (спеціалізовані трубні заводи, створені на базі ВАТ «Нікопольський південно-трубний завод») та за кордон (Китай, США, Німеччина, Франція, Італія, Польща, Японія, Швеція). Використання нових сучасних технологій електронно-променевої плавки забезпечило конкурентоздатність цього виробництва на світових ринках за рахунок високої якості зливок та техніко-економічної ефективності процесу виробництва. За ці роботи С.В. Ахоніну присвоїли звання лауреата Державної премії України в галузі науки і техніки «Розробка фізико-металургійних і технологічних основ виготовлення та обробки титану і сплавів на його основі та їх впровадження в промисловість України» (2005).

З 2012 по 2021 р. С.В. Ахонін очолював ДП «НВЦ» «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

Ахонін С.В. приймав активну участь в реалізації сумісних міжнародних науково-дослідних проєктів з фірмами з США («General Electric», «Air Force Research Laboratory»), Німеччини («Thyssen Krupp Titanium»), Японії («Mitsubishi Heavy Industries»), Південної Кореї («Korea Institute of Machinery & Materials»), Китаю (Шандунський інститут океанографічних приладів, Пекінський інститут авіаційних матеріалів, Китайсько-український інститут зварювання в м. Гуанчжоу).

Результати робіт С.В. Ахоніна представлені в 304-х наукових працях, в тому числі 8-х монографіях і 18-х авторських свідоцтвах та патентах України.

Сьогодні С.В. Ахонін успішно веде значну науково-організаційну роботу. Він є членом Спеціалізованої вченої ради ІЕЗ ім. Є.О. Патона по захисту докторських та кандидатських дисертацій за спеціальностями «Матеріалознавство» та «Металургія чорних та кольорових металів і спеціальних сплавів»; головним редактором фахового журналу «Сучасна електрометалургія»; членом редакційних колегій наукових журналів «The Paton Welding Journal» та «Металофізика та новітні технології».

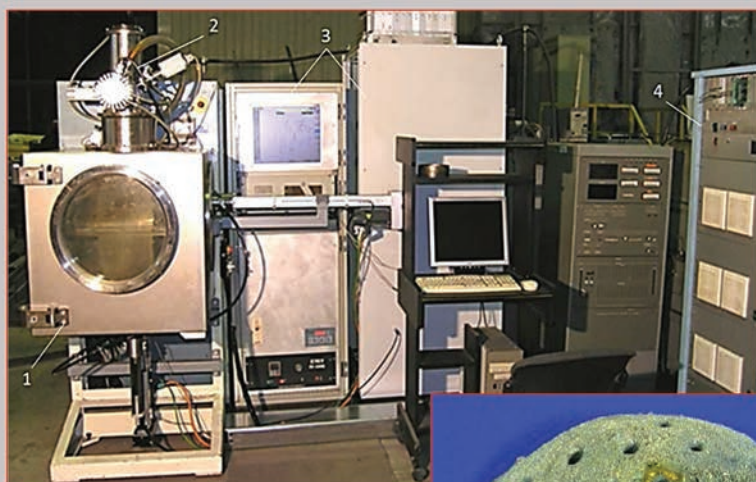
Як керівник наукової школи С.В. Ахонін успішно підготував 1-го доктора та 5-х кандидатів технічних наук.

Щиро вітаємо ювіляра, бажаємо міцного здоров'я, творчої наснаги та успіхів у всіх напрямках діяльності.

*ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України,
Редколегія та редакція журналу
«Сучасна електрометалургія»*

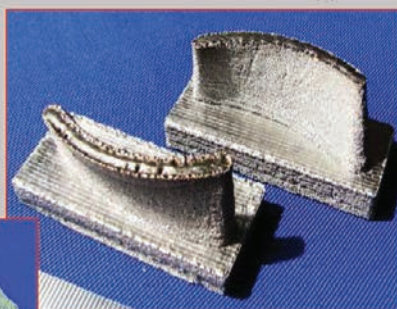
РОЗРОБЛЕНО В ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА

ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВІДТВОРЕННЯ ПРОЦЕСУ 3D ДРУКУ



3D принтер

Заготовка лопатки ГТД



Імплант черепної коробки

Науковцями ІЕЗ ім. Є.О. Патона були розроблені вимоги та технічна документація до електронно-променевого технологічного обладнання для відтворення процесу 3D друку за технологією EBM (Electron Beam Melting) з використанням металевих порошкових матеріалів. Спільно з компанією Materialise (Бельгія) співробітники ІЕЗ ім. Є.О. Патона розробили та випробували нову версію програми Build-processor, яка реалізує функції pre-heat та post-heat деталі, що дозволяє забезпечити локальну температуру металевого порошку в зоні побудови виробу близьку до температури плавлення, що покращує якість кінцевого виробу. Відпрацьовані режими 3D друку за технологією EBM виробів заданої форми, вироблені експериментальні зразки деталей промислового призначення з використанням металевих порошків титанових сплавів вітчизняного та іноземного виробництва з частинками сферичної та довільних форм. Створено електронно-променеве технологічне DM (Direct Manufacturing) обладнання, розроблені методи пошуку та розрахунку технологічних режимів його роботи. Практично підтверджена можливість застосовування технології DM до реальних завдань промисловості.

XX МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ

Мета Промислового Форуму — підтримка та розвиток промисловості України!

З 16 по 19 листопада 2021 р. у Києві в Міжнародному виставковому центрі в умовах ковід-пандемії та пов'язаних з цим обмежень був успішно проведений ювілейний XX Міжнародний Промисловий Форум, який вкотре продемонстрував свій високий статус, підтверджений масштабом та популярністю серед учасників та відвідувачів. Число учасників, у тому числі дебютантів виставок, акцент на українському виробнику, різноманітність представленого обладнання, нові технологічні рішення, унікальні розробки, тематичні конференції зробили форум ефектним, наповненим, цікавим та результативним. В роботі Форуму взяли участь 232 компанії та організації з України та 30 — з-за кордону на площі 15000 м². За чотири дні роботи біля 9000 відвідувачів змогли ознайомитись з останніми досягненнями, розгорнутими на виставках Форуму: Металообробка, Гідравліка, Пневматика, УкрЗварювання, Автоматизація та робототехніка, Підйомно-транспортне та складське обладнання, УкрЛиття, Безпека виробництва.

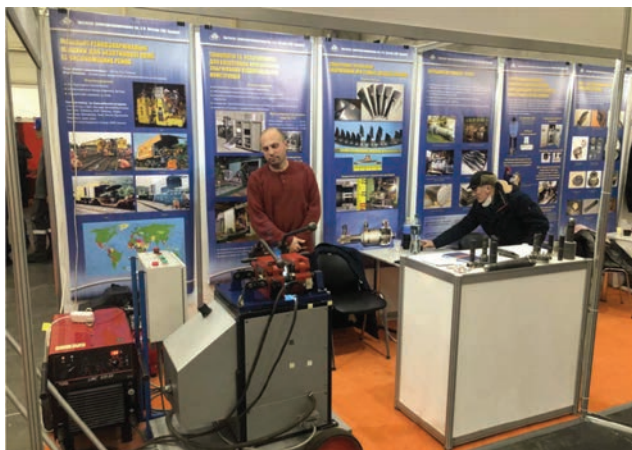
МЕТАЛООБРОБКА. 110 компаній учасників розділу «Металообробка» знайомили відвідувачів Форуму з найновішим та універсальним металообробним обладнанням, інструментами та технологіями. Стенди зі Швейцарії, Туреччини та Чехії цього року містили значну кількість зразків обладнання. Лідери з продажу промислових лазерних комплексів АРАМІС, АЛІСТА, СТАН-КОМПЛЕКТ, ЕЛЬ-СЕЛ, ЮА-СТАЛЬ, МАШИНТЕХ представили на Форумі новітні лазерні технології для різання металу та зварювання. На своїх стендах компанії продемонстрували роботу цього обладнання у дії. Листозгинальні преси, ножиці, гільйотини та машину лазерного розкрою металу всесвітньо відомого бренду BAYKAL демонстрував офіційний представник в Україні — Галсофт Сервіс. Лідер нанотехнологій в електроіскровій обробці металу ТМ SODICK (Японія) був представлений на Форумі компанією СОДИКОМ-ДНІПРО.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА РОБОТОТЕХНІКА.

Впровадження роботизованих систем у виробничий процес — показник високого рівня розвитку компанії, її готовності відкривати для себе нові напрями та вступати в епоху Індустрії 4.0. Кооперація з такою компанією — це завжди прибутково та перспективно. На експозиції було представлено сучасні рішення для автоматизації підприємств, систем управління технологічними процесами та об'єктів промисловості загалом. Гості спостерігали за маніпуляціями роботів ТМ: ABB, CROBOT, KAWASAKI ROBOTICS, ROVICOR, FANUC, KUKA, PANASONIC, MOTOMAN, знайомилися з найсучаснішими технологіями та матеріалами, інноваційними рішеннями для зварювання, плазмового розкрою металу, обробки поверхні та суміжних технологій. ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ САПР, ІНВЕСТИЦІЇ та ЗРОСТАННЯ, АППАУ, СОФТПРОМ СОЛЮШНЗ не лише презентували свої напрацювання на стендах, а й ділилися ними на відкритих конференц-майданчиках. Близько 20 доповідей було присвячено темі «Індустрія 4.0».

ЗВАРЮВАННЯ. Виставка «УкрЗварювання» продемонструвала сучасну продукцію цього напрямку з широким спектром обладнання та технологій для зварювання, різання, обробки поверхні, нанесення захисних покриттів. На стендах учасників — компаній MAGMAWELD, БІНЦЕЛЬ УКРАЇНА ГМБХ, ДЖЕЙСІК УКРАЇНА, ІДЕЛЬ, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, КОРСАЛ, ПАТОН ІНТЕРНЕТІНЛ, CAMMIT, TESLAWELD, TRIADA-WELDING відвідувачі знайомилися з новинками в лінійці продукції. Вперше участь у виставці взяла компанія WELDMAN OÜ (Естонія). Відвідувачам пропонували товари та послуги для диджиталізації зварювального виробництва у рамках Індустрії 4.0. На стенді ІЕЗ ім. Є.О. Патона було представлено обладнання для зварювання труб різного сортаменту





Демонстрація технології зварювання труб дугою, що обертається у магнітному полі, на стенді ІЕЗ ім. Є.О. Патона

дугою, що обертається в магнітному полі, яке зацікавило багатьох відвідувачів виставки, та фахові науково-технічні журнали «Автоматичне зварювання», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», «Сучасна електрометалургія».

Вітчизняні виробники представили такі напрямки:

- ВІТАПОЛІС, ДНІПРОМЕТИЗ, ТМ.ВЕЛТЕК — матеріали власного виробництва для зварювання, наплавлення та напилення;

- АНДІС-ТЕХНО, ДОНМЕТ, ТЕСЛА, ПРОМ-ТЕХГРУП, ФАВОРИТ-АМ — порталні машини для термічного розкрою металу;

- АТОН СЕРВІС, ФАБРИКА РУКАВНИХ ФІЛЬТРІВ — комплексні вирішення питань аспірації та промислової вентиляції.

Всі дні проведення Форуму відвідувачі спостерігали за зварювальними роботами від провідних світових виробників: ABB, CROBOTR, FANUC, KUKA, OTC DAIHEN, PANASONIC, YASKAWA MOTOMAN.

ЛИТТЯ. Цьогорічна виставка «УкрЛиття» була значно розширена. Провідні компанії в галузі ливарного виробництва презентували повний пакет



Стенд компанії «ВІТАПОЛІС»



Стенд компанії «ПАТОН ІНТЕРНЕШНЛ»

послуг у своїй сфері. Яскраво заявив про себе дебютант виставки — УКРФАВОРИТ, ексклюзивний представник EUROTEK FOUNDRY PRODUCTS LTD в Україні (компанія-лідер серед постачальників високоефективних матеріалів та інженерних рішень для організації та функціонування ливарного виробництва в Україні). INDEMAK презентувала свою компанію з виробництва плавильних індукційних печей та супутнього обладнання до них. ЗАВОД ЕКОПРОМЛІТ — сучасне ливарне підприємство у складі групи компаній «Турбоком», яке реалізує повний цикл робіт з виробництва чавунних виробів для автомобільної, сільськогосподарської, залізничної, трубопровідної та машинобудівної галузей.

ДІЛОВА ПРОГРАМА. Ділову програму виставок склали 29 різнопланових заходів. Відмітимо деяких з них.

Конференція керівників та спеціалістів ливарної галузі України «Ливарне виробництво — основна заготівельна галузь базових галузей промисловості».

Товариство зварників України провело XV відкритий конкурс зварників «Золотий кубок Бенардоса–2021». Ця яскрава, жива, динамічна подія покликана підвищити престиж професії зварювальника з особливим духом змагання та почесними кубками переможцям. Учасники здобули емоції, нагороди, мотивацію рухатися далі до наступних перемог!



Переможці XV відкритого конкурсу зварників «Золотий кубок Бенардоса–2021»



Доповідь М.А. Яременка, ІЕЗ ім. Є.О. Патона

Конкурс проходив за трьома номінаціями:

- ручне дугове зварювання покритим електродом;
- дугове зварювання плавким електродом в активних газах;
- дугове зварювання вольфрамовим електродом в інертних газах.

У конкурсі взяли участь 25 зварювальників з десяти підприємств та двох навчальних закладів з восьми областей України. У їх числі: Полтавський ГЗК та Єристовський ГЗК (м. Горишні Плавні, Полтавська обл.), УМБР «Укргазспецбудмонтаж» (м. Красноград, Харківська обл.), «МК «АЗОВ-СТАЛЬ» (м. Маріуполь, Донецька обл.), «Хансавест Юкрейн» (м. Львів), ДП «МТП «Южний» (м. Южне, Одеська обл.), «Лемтранс» і КВПУ (м. Кам'янське, Днепропетровська обл.), «Хансавокер» (Київська обл.), ВПУ (м. Кременчук, Полтавська обл.), Попаснянський ВРЗ (м. Попасна, Луганська обл.).

Конкурс традиційно проводився в два тури.

Тур I — теоретичний. Конкурсантам було запропоновано відповісти на 30 тестових питань. Ці питання наведені на сайті Одеського ТЗУ (tzu.od.ua/test/) і зварювальники завжди мають можливість перевірити свої знання та відповідно підготуватися до конкурсу W01. Положення зварних швів у всіх номінаціях визначалось шляхом жеребкування з усіх можливих положень.

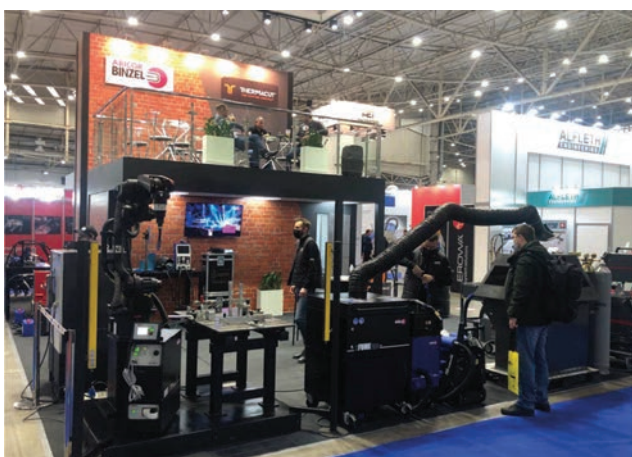
Тур II — практичний. Для кожної номінації оргкомітетом були підготовлені окремі завдання зі зварювання зразків із матеріалів групи сталей.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України на відкритому майданчику провів конференцію з актуальних проблем зварювання:

- «Метод акустичної емісії для моніторингу відповідальних конструкцій» (М.А. Яременко, Ін-



Доповідь О.В. Павлія, ТОВ «НВФ Діагностичні прилади»



На стенді компанії «БІНЦЕЛЬ УКРАЇНА ГМБХ»

ститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ);

- «Гібридні технології зварювання» (В.Ю. Хаскін, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ);

- «Актуальні методи неруйнівного контролю зварних з'єднань» (О.В. Павлій, ТОВ «НВФ Діагностичні прилади», Київ);

- «Адитивне виготовлення та зварювання виробів з пластмас» (М.В. Юрженко, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ);

- «Оптичні методи діагностики відповідальних конструкцій та виробів» (В.В. Савицький, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ).

ВДЯЧНІСТЬ. Окрему подяку висловлюємо всім медіа-партнерам Міжнародного Промислового Форуму — ключовим провідникам між виробником та споживачем! Рухаємось далі до нових перемог та чекаємо всіх на Міжнародному Промисловому Форумі-2022!

За матеріалами пост-релізу ТОВ «МВЦ»

ПЕРЕДПЛАТА 2022

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	пів року	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 12 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031.	240	720	1440	2880
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693.	–	240	480	960
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475.	–	240	480	960
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	520	1560	3120	6240

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

**«The Paton Welding Journal» – переклад журналу «Автоматичне зварювання» на англійську мову.

Передплату на журнали можна оформити по каталогах передплатних агенцій «Преса», «Прес Центр», «АС Медіа» та у видавництві. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.

Передплата на електронну версію журналів.

Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf або для IP-адреси комп'ютера передплатника надається доступ до відповідних архівів журналу.

Передплата через сайт видавництва:

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/subscription>
<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/subscription>
<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk/subscription>
<https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/subscription>

На сайті видавництва у 2020 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2018 рр.



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 – 200x200 мм.

Друга, третя і четверта сторінки обкладинки – 200x290 мм.

Перша, друга, третя, четверта сторінки внутрішньої обкладинки – 200x290 мм.

Вклейка А4 – 200x290 мм. Розворот А3 – 400x290 мм. А5 – 185x130 мм.

Розміри журналів після обрізу 200x290 мм.

Всі файли в форматі IBM PC, кольорова модель СМΥΚ, 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 200-82-77
 E-mail: journal@paton.kiev.ua
<https://patonpublishinghouse.com>