

З А В Т О М А Т И Ч Н Е 7 С В А Р Ю В А Н Н Я 2021

Автоматическая сварка

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Automatic Welding

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

ЗВАРЮВАННЯ КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ

Покляцький А.Г., Мотруніч С.І., Кушнарєва О.С. Властивості стикових з'єднань тонколистового алюмінієво-літійового сплаву 1460, отриманих тертям з перемішуванням та TIG.....3

Прилуцький В.П., Петриченко І.К. Вплив концентрації кисню в аргоні на властивості і колір поверхні зварних швів при TIG зварюванні титану.....9

ПРОЦЕСИ ПАЙКИ

Максимова С.В., Ковальчук П.В., Воронов В.В. Вакуумне паяння різномірних з'єднань Ковар-молібден15

ЗВАРЮВАННЯ ПОЛІМЕРІВ

Кораб М.Г., Юрженко М.В., Ващук А.В., Гальчун А.М. Термоімпульсне зварювання полімерних матеріалів.....21

ЗВАРЮВАННЯ В МЕДИЦИНІ

Соловйов В.Г., Ланкін Ю.М., Романова І.Ю. Скін-ефект в м'якій біологічній тканині і особливості її нагріву при автоматизованому біполярному зварюванні.....27

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ

Позняков В.Д., Дядін В.П., Давидов Є.О., Дмитрієнко Р.І. Оцінка пошкодженості суцільнозварних поздовжніх головних балок мосту ім. Є.О. Патона через р. Дніпро.....33

ЗВАРЮВАННЯ ЗА КОРДОНОМ

Welding in the World № 4-6, 202142

СПАДЩИНА Б.Є. ПАТОНА

Неруйнівний контроль зварних з'єднань.....44

ІНФОРМАЦІЯ

Міжнародні та європейські стандарти в зварювальному виробництві України48

Наші привітання57

До 50-річчя відділу «Фізико-хімічні процеси паяння».....59

Міжнародна конференція – POLYWELD 202161

Міжнародна конференція «Сучасні технології з'єднання матеріалів»62

CONTENT

WELDING OF NONFERROUS METALS

Poklyatsky A.G., Motrunich S.I., Kushnaryova O.S. Properties of butt joints of fine-sheet aluminum-lithium 1460 alloy, produced by friction stir and TIG welding3

Prilutskiy V.P., Petrichenko I.K. Influence of oxygen concentration in argon on the properties and colour of weld surface in TIG welding of titanium9

BRAZING PROCESSES

Maksymova S.V., Kovalchuk P.V., Voronov V.V. Vacuum brazing of Kovar-molybdenum dissimilar joints15

POLYMER WELDING

Korab M.G., Iurzhenko M.V., Vashchuk A.V., Galchun A.M. Thermal pulse welding of polymeric materials.....21

WELDING IN MEDICINE

Solovyov V.G., Lankin Yu.M., Romanova I.Yu. Skin-effect on soft biological tissue and features of tissue heating during automatic bipolar welding27

NONDESTRUCTIVE TESTING

Poznyakov V.D., Dyadin V.P., Davydov Ye.O., Dmitrienko R.I. Evaluation of damage of all-welded longitudinal main beams of the E.O. Paton bridge across the Dnipro river.....33

WELDING ABROAD

Welding in the World № 4-6, 202142

B.E. PATON'S HERITAGE

Non-destructive testing of welded joints44

INFORMATIONS

International and European standards in welding production of Ukraine48

Our congratulations57

To the 50th anniversary of «Physico-Chemical Brazing Processes» Department of PWI59

International Conference – POLYWELD 202161

International Conference «State-of-the-Art Technologies of Joining Materials».....62



Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ представляє Україну
в Міжнародному інституті зварювання
та в Європейській зварювальній федерації
The E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU represents Ukraine
in International Institute of Welding
and in European Federation for Welding



Автоматичне зварювання Автоматическая сварка Automatic Welding

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ:
І.В. Кривцун (головний редактор),
В.М. Ліподаєв (штатний заст. гол. ред.)
О.М. Берднікова, Ю.С. Борисов,
В.В. Книш, В.М. Коржик,
Ю.М. Ланкін, Л.М. Лобанов,
С.Ю. Максимов, М.О. Пашчин,
В.Д. Позняков, І.О. Рябцев,
К.А. Ющенко;
В.В. Дмитрик, НТУ «ХПІ», Харків;
В.В. Квасницький, Є.П. Чвертко,
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ;
М.М. Студент, Фізико-механічний інститут
ім. Г.В. Карпенка НАНУ, Львів;
М. Зініград, Аріельський університет, Ізраїль;
У. Райсген, Інститут зварювання та з'єднань,
Аахен, Німеччина;
Я. Пілярчик, Інститут зварювання, Глівіце, Польща

Засновники

Національна академія наук України,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ,
Міжнародна Асоціація «Зварювання» (видавець)

Адреса

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ
03150, Україна, Київ-150,
вул. Казимира Малевича, 11
Тел.: (38044) 200 2302, 200 8277
Факс: (38044) 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/ukr/journal/as

Журнал входить до переліку затверджених
Міністерством освіти і науки України видань
для публікації праць здобувачів наукових ступенів за
спеціальностями 131, 132, 151
Наказ МОН України № 409 від 17.03.2020.

Рекомендовано до друку
редакційною колегією журналу

Свідоцтво про державну
реєстрацію KB 4788 від 09.01.2001

ISSN 0005-111X
DOI: <http://dx.doi.org/10.37434/as>

Передплата 2021

Передплатний індекс 70031.

12 випусків на рік (видається щомісячно).

Друкована версія: 2880 грн. за річний комплект

з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

Електронна версія: 2880 грн. за річний комплект

(випуски журналу надсилаються електронною поштою

у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера

передплатника надається доступ до архіву журналу).

Передплата можлива на попередні випуски за будь-який рік.

Журнал «Автоматичне зварювання» перевидается

англійською мовою під назвою

«The Paton Welding Journal»:

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

За зміст рекламних матеріалів
редакція журналу відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

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

I.V. Krivtsun (Editor-in-Chief),
V.M. Lipodaev (Staff Deputy Editor-in-Chief)
O.M. Berdnikova, Yu.S. Borisov,
V.V. Knysh, V.M. Korzhyk,
Yu.M. Lankin, L.M. Lobanov,
S.Yu. Maksimov, M.O. Pashchin,
V.D. Poznyakov, I.O. Ryabtsev,
K.A. Yushchenko;
V.V. Dmitrik, NTU «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv;
V.V. Kvasnytskyi, E.P. Chvertko, NTUU «Igor Sykorsky
Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv;
M.M. Student, Karpenko Physico-Mechanical Institute
of NASU, Lviv;
M. Zinigrad, Ariel University, Israel;
U. Reisgen, Welding and Joining Institute, Aachen, Germany;
Ja. Pilarczyk, Welding Institute, Gliwice, Poland

Founders

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

Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU
03150, Ukraine, Kyiv-150,
11 Kazymyr Malevych Str.
Tel.: (38044) 200 2302, 200 8277
Fax: (38044) 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/as

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 131, 132, 151.

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 4788 dated 09.01.2001

ISSN 0005-111X

DOI: <http://dx.doi.org/10.37434/as>

Subscription 2021

Subscription index 70031.

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

\$216, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.

\$144, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).

Subscription is possible for previous issues for any year.

«Avtomatychne Zvaryuvannya» (Automatic Welding)
journal is republished in English under
the title «The Paton Welding Journal»:
www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

The editorial board is not responsible
for the content of the promotional material.

ВЛАСТИВОСТІ СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ ТОНКОЛИСТОВОГО АЛЮМІНІЄВО-ЛІТІЄВОГО СПЛАВУ 1460, ОТРИМАНИХ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ ТА TIG

А.Г. Покляцький, С.І. Мотруніч, О.С. Кушнар'ова

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

У статті проаналізовані структурні особливості, характеристики міцності та довговічності стикових з'єднань алюмінієво-літєвого сплаву 1460 товщиною 2 мм, отриманих зварюванням тертям з перемішуванням та аргонодуговим зварюванням неплавким електродом в аргоні. Показано, що зварювання тертям з перемішуванням запобігає утворенню великодендритної структури швів, забезпечує формування нероз'ємних з'єднань з мінімальним рівнем концентрації напружень у місцях переходу від шва до основного матеріалу та дозволяє уникнути в швах дефектів у вигляді пор, макровключень оксидної плівки та гарячих тріщин, обумовлених розплавленням і кристалізацією металу при зварюванні плавленням. Бібліогр. 16, рис. 7.

Ключові слова: алюмінієво-літєвий сплав 1460, зварювання тертям з перемішуванням, твердість, дефекти, мікроструктура, межа міцності, опір втомі, тонка структура

Легкі, міцні та стійкі до корозії алюмінієво-літєві сплави мають низьку густину і високий модуль пружності, що дозволяє широко використовувати їх при створенні авіаційної та ракетно-космічної техніки. До найбільш високоміцних (>500 МПа при густині $2,6 \text{ г/см}^3$) належить сплав 1460 системи легування Al-Cu-Li (номінальний склад 3 % Cu; 2 % Li) з добавками цирконію та скандію. Одночасне збільшення показників міцності та пластичності цього сплаву при наднизьких температурах робить його перспективним для виготовлення зварних кріогенних баків [1–3]. Для отримання нероз'ємних з'єднань у більшості випадків застосовують різні способи зварювання плавленням. При цьому зварний шов утворюється внаслідок розплавлення певного об'єму з'єднуваних матеріалів і присадного дроту в загальній зварювальній ванні та їх кристалізації. Це призводить до значних структурних перетворень як в металі шва, так і на прилеглих до нього ділянках основного матеріалу, а також утворення характерних дефектів у вигляді пор, макровключень оксидних плівок і гарячих кристалізаційних тріщин. Тому межа міцності таких зварних з'єднань у більшості випадків не перевищує 70 % від цього показника для основного матеріалу [4, 5].

При зварюванні тертям з перемішуванням (ЗТП) формування шва відбувається у твердій фазі внаслідок нагрівання невеликого об'єму металу до пластичного стану за рахунок тертя та перемішування його по всій товщині зварюваних кромок робочими поверхнями спеціального інструмента. Завдяки цьому вдається уникнути проблем, обумовлених розплавленням і кристалізацією металу, та максимально зберегти у зварних вузлах властивості напівфабрикатів, які застосовуються при їх виготовленні [6, 7]. Серед основних переваг процесу ЗТП у порівнянні зі зварюванням плавленням відмічають формування дрібнокристалічної структури швів та повне збереження у них легуючих елементів, відсутність пор, оксидних включень і гарячих тріщин, зменшення ступеня розміцнення металу в зоні зварювання та рівня залишкових напружень і деформацій у з'єднаннях, а також підвищення їх межі міцності при статичному розтягуванні й опору втомі при циклічних навантаженнях [8–11].

Мета даної роботи – оцінити переваги процесу ЗТП над аргонодуговим зварюванням неплавким електродом (АДЗНЕ) при отриманні стикових з'єднань тонколистового алюмінієво-літєвого сплаву 1460.

Для досліджень використовували листи алюмінієво-літєвого сплаву 1460 товщиною 2 мм. Стикові з'єднання отримували аргонодуговим зварюванням неплавким електродом в аргоні зі швидкістю 20 м/год на струмі 145 А за допомогою зварювальної установки MW-450 («Fronius», Австрія) з використанням присадного дроту Св1201 діаметром 1,6 мм. ЗТП здійснювали на розробленій в ІЕЗ ім. Є.О. Патона лабораторній установці, використовуючи спеціальний інструмент з конічним наконечником і діаметром бурта 12 мм [12], швидкість обертання якого становила 1420 об/хв, а швидкість лінійного переміщення 14 м/год. З отриманих зварних з'єднань виготовляли шліфи для дослідження структурних особливостей швів і зразки з шириною робочої частини 15 мм для ви-

Покляцький А.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-4101-2206>, Мотруніч С.І. – <https://orcid.org/0000-0002-8841-8609>, Кушнар'ова О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-2125-1795>

© А.Г. Покляцький, С.І. Мотруніч, О.С. Кушнар'ова, 2021

значення їх межі міцності при одноосному розтягуванні відповідно до ДСТУ EN ISO 4136х. Зразки, отримані АДЗНЕ в аргоні, випробовували як зі знятими до рівня основного матеріалу проплавами, так і з додатково зачищеними підсиленнями швів. Ширина робочої частини зразків для визначення опору втомі становила 25 мм. Механічні випробування зразків здійснювали на універсальному сервогідравлічному комплексі MTS 318.25. Циклічні випробування проводили при осьовому регулярному навантаженні з коефіцієнтом асиметрії циклу навантажень $R_\sigma = 0,1$ і частоті 15 Гц до повного руйнування зразків. За однакових умов випробовували 5...7 однотипних зразків. Експериментальні дані випробувань на втому оброблялися методами лінійного регресивного аналізу, типовими для такого виду випробувань. За отриманими результатами для кожної серії зразків на основі встановлених границь обмеженої витривалості будувалася відповідна крива втоми – лінія регресії експериментальних даних в координатах $2\sigma_a - \lg N$. Твердість металу вимірювали на лицьовій поверхні зачищених з'єднань. Ступінь розміцнення металу в зоні зварювання оцінювали на приладі «ROCKWELL» при навантаженні $P = 600$ Н. Оцінку структурних особливостей зварних з'єднань здійснювали з використанням оптичної (МИМ-8) та просвічуючої мікродифракційної електронної мікроскопії (JEM-200CX). Тонкі фольги для «просвічування» готували двошступінчастим методом – попереднім електрополіруванням та наступним багаторазовим іонним потоншенням іонізованими потоками аргону в спеціальній установці [13], що дозволило зробити

«прозорими» для електронів усі структурно-фазові складові досліджуваних швів.

В результаті проведених досліджень встановлено, що завдяки формуванню нероз'ємних з'єднань на підкладці без канавки і без використання присадного дроту отримані при ЗТП шви за формою та розмірами вигідно відрізняються від зварених плавленням (рис. 1). Відсутність проплавів і підсилень на таких швах дозволяє уникнути високих рівнів концентрації напружень у місцях переходу від шва до основного матеріалу, які негативно впливають на експлуатаційні та ресурсні характеристики зварних з'єднань.

Крім того, формування нероз'ємних з'єднань у твердій фазі без розплавлення основного матеріалу запобігає появі характерних для зварювання плавленням дефектів у вигляді пор (див. рис. 1, б, з). Відсутність в зоні зварювання розплавленого металу, в якому розчинність водню різко зростає, дозволяє уникнути додаткового насичення ним цієї зони в результаті міграції цього газу із прилеглих шарів металу. А перемішування й ущільнення зварюваного металу в зоні формування нероз'ємних з'єднань забезпечує отримання швів без пор.

Деформування та інтенсивне перемішування пластифікованого металу по всій товщині зварюваних кромок сприяє подрібненню оксидних плівок, які на них миттєво утворюються навіть після механічного видалення безпосередньо перед зварюванням. А відсутність розплавленого металу в зоні формування нероз'ємного з'єднання дозволяє уникнути його окислення в процесі зварювання. Тому у швах, отриманих ЗТП, відсутні дефекти у вигляді окремих чи протяжних [14, 15] макровключень оксидних плівок, характерних для швів, отриманих при АДЗНЕ алюмінієво-літєвого сплаву 1460 (рис. 2).

Найбільш небезпечними та недопустимими дефектами для конструкцій відповідального призначення є гарячі тріщини, які доволі часто утворюються в процесі кристалізації розплавленого металу в місці накопичення легкоплавких евтектичних включень. При зварюванні алюмінієвих сплавів плавленням такі кристалізаційні тріщини можуть виникати як в металі шва, так і в зоні сплавлення його з основним матеріалом. Проведені дослідження показали, що при АДЗНЕ спеціальних зразків Хоулдрокфта, які дозволяють оцінювати гарячеламкість алюмінієвих сплавів при зварюванні плавленням, без використання присадного дроту гарячі тріщини утворюються в центральній частині швів (рис. 3). Звичайно, що при ЗТП таких зразків гарячі тріщини не можуть з'явитися, оскільки зварювання відбувається у твердій фазі, коли процеси плавлення та кристалізації металу повністю відсутні.

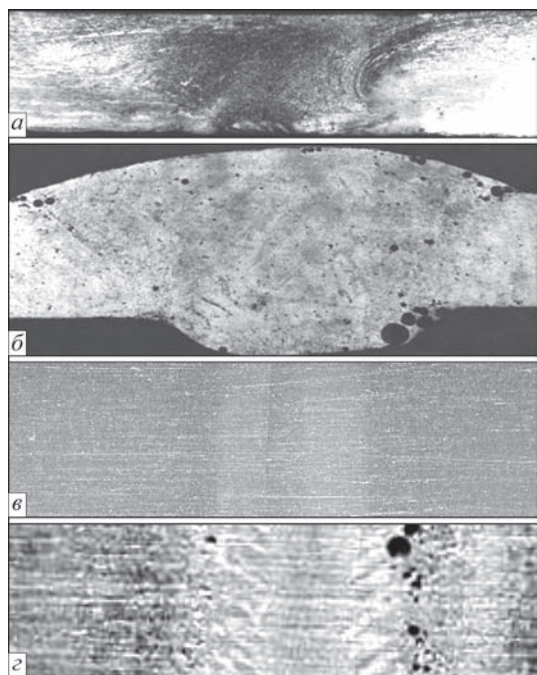


Рис. 1. Поперечні перерізи (а, б) і кореневі частини (в, з) швів сплаву 1460 товщиною 2 мм, отриманих ЗТП (а, в) та АДЗНЕ (б, з)

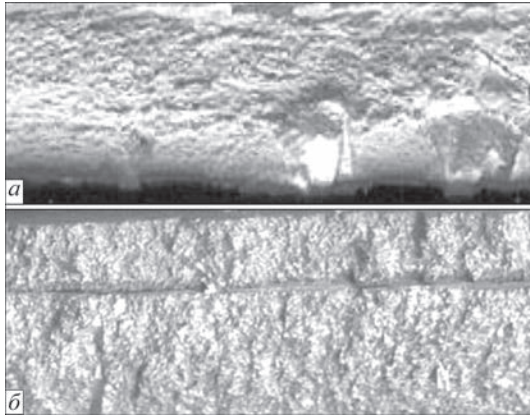


Рис. 2. Дефекти у вигляді характерних окремих (а) і протяжних (б) макровключень оксидних плівок на поздовжніх зламках швів сплаву 1460 товщиною 2 мм, отриманих АДЗНЕ

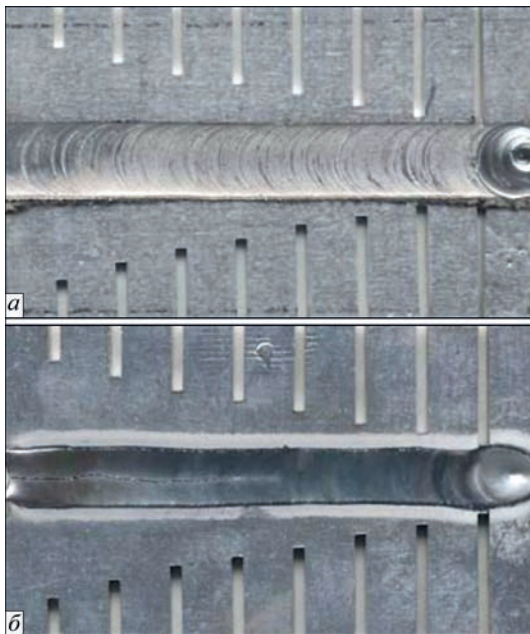


Рис. 3. Зразки Хоулдрокфта зі сплаву 1460 товщиною 2 мм, проварені ЗТП (а) та АДЗНЕ (б)

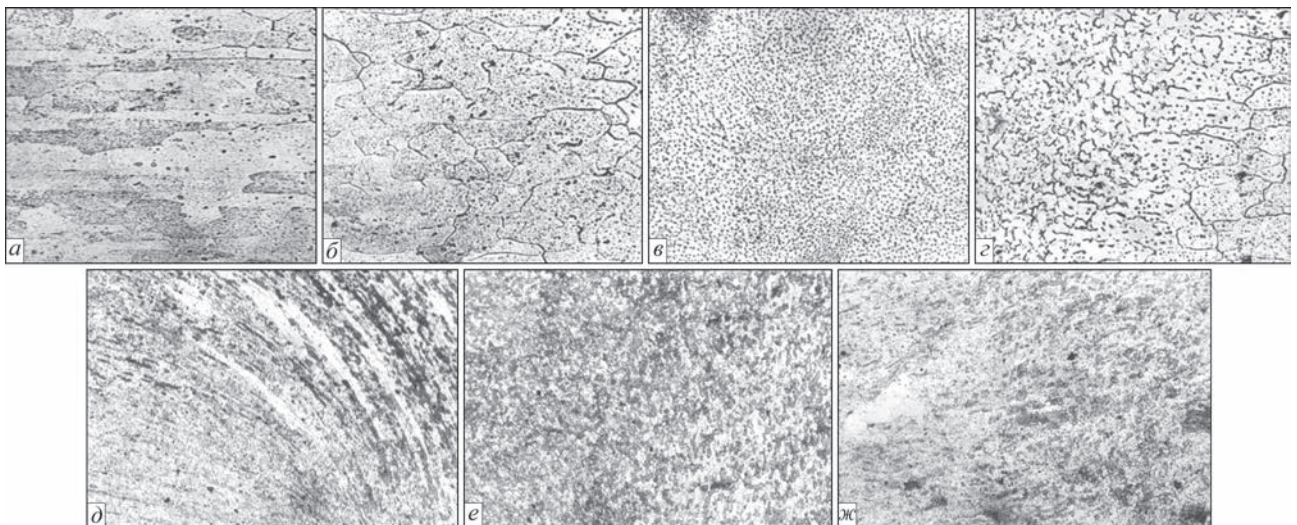


Рис. 4. Мікроструктура ($\times 400$) основного металу (а) і зварних з'єднань алюмінієво-літійового сплаву 1460 товщиною 2,0 мм, отриманих АДЗНЕ з використанням присадного дроту Св1201 (б, в – зони сплавлення шва з основним матеріалом, г – шов) та ЗТП (д – зона термомеханічного впливу зі сторони набігання інструмента, е – ядро шва, ж – зона термомеханічного впливу зі сторони його відходу)

Аналіз мікроструктури зварних з'єднань алюмінієво-літійового сплаву 1460, отриманих АДЗНЕ, показав, що метал шва має в основному дрібнокристалічну структуру з проявами на деяких його ділянках окремих фрагментів центрального кристаліта (рис. 4). Поблизу зони сплавлення шва з основним матеріалом у ньому спостерігається прошарок з дрібною субдендритною будовою (рис. 4, б–в). В зоні термічного впливу біля зони сплавлення шва з основним матеріалом наявні ділянки перегріву та рекристалізації. Протяжність зони оплавлення структурних складових складає близько 2,25 мм від границі сплавлення шва з основним матеріалом. У зоні термічного впливу найбільший розмір мають зерна, які безпосередньо прилягають до вищевказаної зони.

При зварюванні цього сплаву тертям з перемішуванням у центральній частині (ядрі) шва внаслідок інтенсивної пластичної деформації метал утворюються дуже дрібні (3...5 мкм) рівноосні зерна (рис. 4 д, е, ж). У зоні термомеханічного впливу відбувається плавна зміна орієнтації зерен у напрямку переміщення робочих поверхонь інструмента. В результаті в ній формуються протяжні витягнуті зерна, орієнтовані вздовж цієї траєкторії, а також дрібні рівноосні зерна.

Аналіз тонкої структури металу швів, отриманих АДЗНЕ та ЗТП, показав, що в обох випадках відбувається формування двох типів фазових виділень. Одні з них (зернограничні фази або фази міжзеренного типу), які розміщуються вздовж міжзеренних границь, представляють собою евтектичні утворення (рис. 5). Інший вид фазових утворень – внутрішньозеренні фазові виділення або фази внутрішньозеренного типу. Спосіб зварювання суттєво впливає на розміри таких фазових виділень. Так, у швах, отриманих плавленням

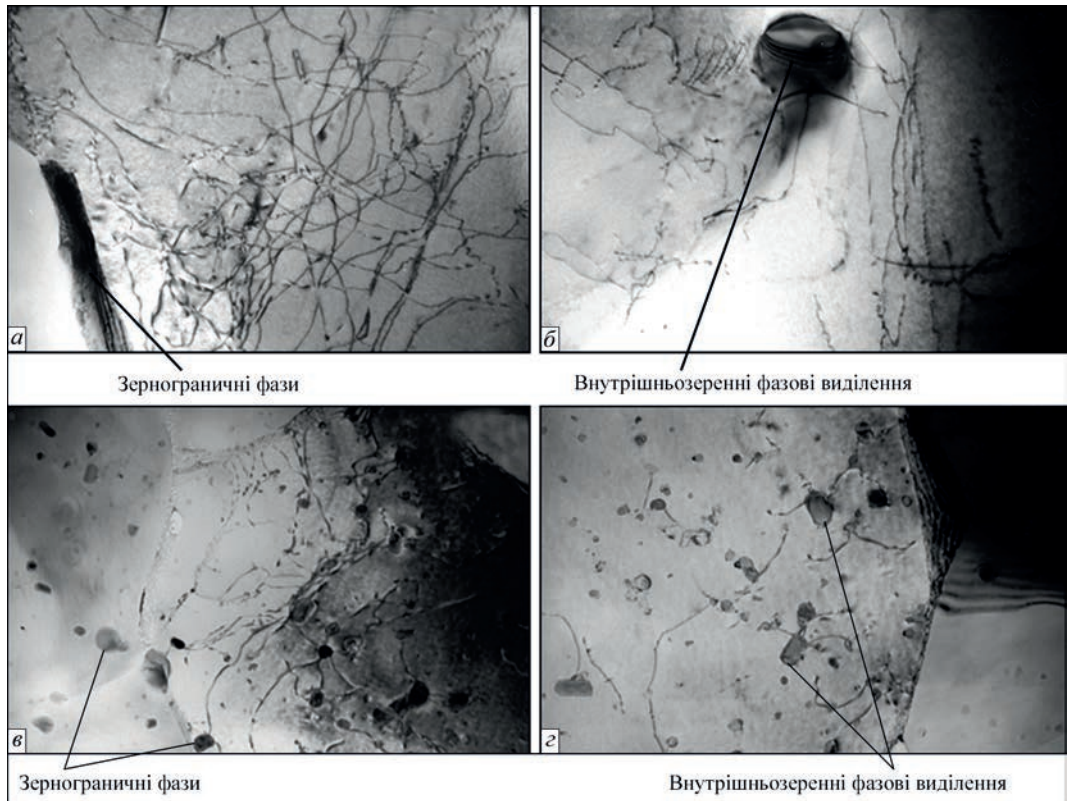


Рис. 5. Тонка структура металу шва алюмінієво-літєвого сплаву 1460, отриманого АДЗНЕ (а, б) та ЗТП (в, г) з характерними для цих способів отримання нероз’ємних з’єднань зернограничними фазами (а, в) та внутрішньозеренними фазовими виділеннями (б, г): а, б, г – 30000; в – 20000

ням, зернограничні фази можуть мати товщину до 0,2...0,5 мкм і доволі значну протяжність (до 2,0...2,5 мкм). Фази внутрішньозеренного типу відрізняються глобулярною формою і можуть у 6 разів перевищувати аналогічні виділення в основному матеріалі. У швах, зварених тертям з перемішуванням, розміри фазових виділень у 2,5...3,5 рази менші. При цьому спостерігається суттєве збільшення їх кількості при рівномірному розподілі як по внутрішньозеренних, так і по зернограничних об’ємах. Крім того, значна частина фазових виділень оточена навколофазною оболонкою, що може свідчити про інтенсивне легування локального навколофазного простору в об’ємах матричних зерен.

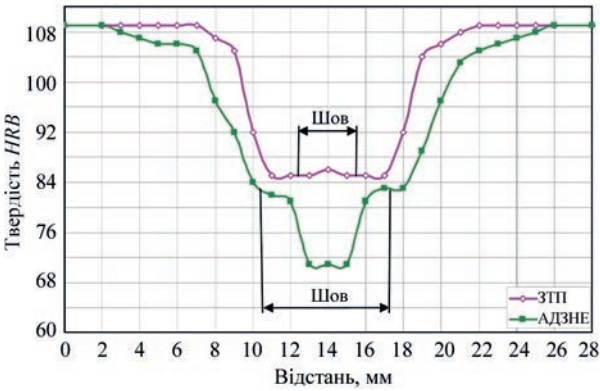


Рис. 6. Розподіл твердості у зварних з’єднаннях сплаву 1460 товщиною 2 мм, отриманих ЗТП та АДЗНЕ

Завдяки нижчій температурі нагрівання зварюваних кромок і формуванню дрібнокристалічної структури швів у процесі ЗТП ступінь розміцнення металу менша, ніж при АДЗНЕ (рис. 6). Так, в результаті вимірювань твердості металу на різних ділянках зварних з’єднань встановлено, що мінімальна твердість металу шва, отриманого АДЗНЕ з використанням присадного дроту Св1201, становить *HRB* 71, а в зонах сплавлення його з основним матеріалом – *HRB* 82...83. Тоді як при ЗТП твердість металу у шві та зонах спряження його з основним матеріалом знаходиться на рівні *HRB* 85...86.

Тому при одноосному статичному розтягуванні зразки зварних з’єднань без підсилення шва, отримані АДЗНЕ з використанням присадного дроту Св1201, руйнуються по металу шва і мають найменшу (257 МПа) міцність. Руйнування зразків зварних з’єднань, отриманих ЗТП, відбувається в зоні термомеханічного впливу. При цьому їх межа міцності знаходиться на рівні 310 МПа, як і у зразків з підсиленням шва, виконаних АДЗНЕ, які руйнуються в зоні сплавлення шва з основним матеріалом.

Експериментально визначені криві втоми стикових з’єднань алюмінієво-літєвого сплаву 1460, отриманих ЗТП, свідчать про високі показники опору втомі таких з’єднань [16]. Границі обмеженої витривалості зразків з’єднань, виконаних ЗТП, алюмінієвого сплаву 1460Т1 при асиметрії ци-

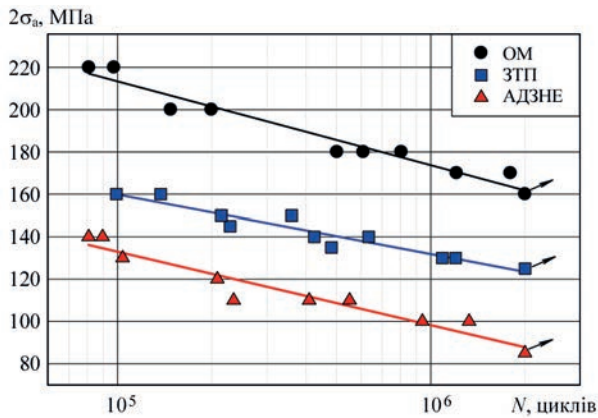


Рис. 7. Криві втоми основного металу та зварних з'єднань алюмінієво-літєвого сплаву 1460 товщиною 2 мм при асиметрії циклу напружень $R_\sigma = 0,1$

клу напружень $R_\sigma = 0,1$ складають 75...77 % від відповідних показників основного металу у всій області довговічності $10^5...2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень і для бази 10^5 та $2 \cdot 10^6$ складають 160 і 123 МПа відповідно (рис. 7). При цьому границя обмеженої витривалості на базі $2 \cdot 10^6$ циклів зміни напружень для з'єднань, отриманих АДЗНЕ, не перевищує 88 МПа, що на 28 % нижче аналогічного показника для з'єднань, отриманих ЗТП.

Висновки

1. Процес ЗТП забезпечує формування нероз'ємних з'єднань алюмінієво-літєвого сплаву 1460 з мінімальним рівнем концентрації напружень у місцях переходу від шва до основного матеріалу та дозволяє запобігти утворенню у швах дефектів у вигляді пор, макровключень оксидних плівок і гарячих тріщин, характерних для АДЗНЕ і обумовлених розплавленням та кристалізацією металу.

2. Формування нероз'ємних з'єднань у твердій фазі дозволяє уникнути утворення литої великодендритної структури швів, притаманної процесам зварювання плавленням. При цьому навколо наконечника інструмента, де метал зазнає найбільшого термомеханічного впливу, внаслідок його інтенсивної пластичної деформації відбувається подрібнення зерен та утворення нової однорідної дезорієнтованої структури з розміром зерен у ядрі шва 3...5 мкм і диспергованими (0,06...0,40 мкм) евтектичними фазовими виділеннями. Поблизу ядра в зоні термомеханічного впливу утворюється комбінована, що містить дрібні рівноосні зерна і деформовані тонкі протяжні зерна, орієнтовані вздовж напрямку переміщення робочих поверхонь інструмента.

3. При ЗТП термічно зміцнюваного алюмінієво-літєвого сплаву 1460 внаслідок термомеханічного впливу крім подрібнення зерен у зоні зварювання, яке сприяє підвищенню твердості металу, одночасно відбувається часткове виділення з пе-

ресиченого твердого розчину надлишкових фаз та їх коагуляція, в результаті чого твердість металу дещо знижується. Проте ступінь розміцнення металу в зоні формування нероз'ємного з'єднання при ЗТП значно менший, ніж при АДЗНЕ. Завдяки цьому межа міцності зразків зварних з'єднань, отриманих ЗТП, знаходиться на одному рівні з цим показником для зразків з підсиленням шва та на 20 % перевищує його для зразків без підсилення шва, отриманих АДЗНЕ з використанням присадного дроту Св1201.

4. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що стикові з'єднання алюмінієво-літєвого сплаву 1460, отримані ЗТП, мають високі показники опору втомі і можуть успішно застосовуватися в конструкціях, які експлуатуються в умовах змінних навантажень. Границі обмеженої витривалості зразків зварних з'єднань при асиметрії циклу напружень $R_\sigma = 0,1$ складають 75...77 % від відповідних показників основного металу у всій області довговічності $10^5...2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень і для бази $2 \cdot 10^6$ складають 123 МПа.

Список літератури

- Братухин А.Г. (2003) *Современные авиационные материалы: технологические и функциональные особенности*. Москва, Авиатехинформ.
- Белецкий В.М., Кривов Г.А. (2005) *Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение)* Справочник. Фридляндер И.Н. (ред.). Киев, КОМИНТЕХ.
- (2002) *Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002. Юбилейный научно-технический сборник*. Каблов Е.Н. (ред.). Москва, МИСИС «ВИАМ», сс. 198–220.
- Рабкин Д.М., Лозовская А.В., Склабинская И.Е. (1992) *Металловедение сварки алюминия и его сплавов*. Замков В.Н. (ред.). Киев, Наукова думка. ISBN 5-12-002022-4.
- Машин В.С., Покляцкий А.Г., Федорчук В.Е. (2005) Механические свойства соединений алюминиевых сплавов при сварке плавящимся и неплавящимся электродом. *Автоматическая сварка*, 9, 43–49.
- Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C. et al. (1991) *Friction Stir Butt Welding*. Int. Patent Application №PCT/GB 92/02203; GB Patent Application № 9125978.8.
- Dawes C.J., Thomas, W.M. (1996) Friction Stir Process Welds Aluminum Alloys. *Welding J.*, 3, 41–45.
- Defalco, J. (2006) Friction stir welding vs. fusion welding. *Ibid*, 3, 42–44.
- Ericsson, M., Sandstrom, R. (2003) Influence of melting speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG. *International Journal of Fatigue*, 25, 1379–1387.
- Enomoto, M. (2003) Friction Stir Welding: research and industrial applications. *Welding International*, 5, 341–345.
- Larsson H., Karlsson L., Svensson L. (2000) Friction Stir welding of AA5083 and AA6082 aluminium alloys. *Svetsaren*, 2, 6–10.
- Іщенко А.Я., Покляцкий А.Г. (2010) Пат. 54096 Україна, МПК В23К 20/12. Інструмент для зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів; заявник і патентотримач ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. № u201005315; заяв. 30.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20.
- Даровский Ю.Ф., Маркашова Л.И., Абрамов Н.П. и др. (1985) Методика утонения образцов разнородных сварных соединений для электронно-микроскопических исследований. *Автоматическая сварка*, 12, 60.

14. Poklyatsky A.G., Lozovskaya A.V., Grinyuk A.A. (2002) Prevention of formation of oxide films in welds on Li-containing aluminium alloys. *The Paton Welding J.*, **12**, 39–42.
15. Lukianenko A., Motrunich S., Labur T. et al. (2020) Mechanical properties of welded thin sheets of Al–Cu–Li alloy and noise level assessment during FSW and TIG welding. *FME TRANSACTIONS*, **49**(1), 220–224.
16. Motrunich, S., Klochkov, I., Poklyatsky, A. (2020) High cycle fatigue behaviour of thin sheet joints of aluminium–lithium alloys under constant and variable amplitude loading. *Weld World*, **64**, 1971–1979.
7. Dawes, C.J., Thomas, W.M. (1996) Friction stir process welds aluminum alloys. *Welding J.*, **3**, 41–45.
8. Defalco, J. (2006) Friction stir welding vs. fusion welding. *Ibid.*, **3**, 42–44.
9. Ericsson, M., Sandstrom, R. (2003) Influence of melting speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG. *Int. J. Fatigue*, **25**, 1379–1387.
10. Enomoto, M. (2003) Friction stir welding: Research and industrial applications. *Welding Intern.*, **5**, 341–345.
11. Larsson, H., Karlsson, L., Svensson, L. (2000) Friction stir welding of AA5083 and AA6082 aluminium alloys. *Svet-saren*, **2**, 6–10.
12. Ishchenko, A.Ya., Poklyatsky, A.G. (2010) *Tool for friction stir welding of aluminium alloys* Pat. 54096, Int. Cl. B23K 20/12; u201005315; filled 30.04.2010; publ. 25.10. PWI [in Ukrainian].
13. Darovsky, Yu.F., Markashova, L.I., Abramov, N.P. et al. (1985) Procedure of thinning of dissimilar welded joint samples for electron microscopic examinations. *Avtomatic. Svarka*, **12**, 60 [in Russian].
14. Poklyatsky, A.G., Lozovskaya, A.V., Grinyuk, A.A. (2002) Prevention of formation of oxide films in welds on Li-containing aluminium alloys. *The Paton Welding J.*, **12**, 39–42.
15. Lukianenko, A., Motrunich, S., Labur, T. et al. (2020) Mechanical properties of welded thin sheets of Al–Cu–Li alloy and noise level assessment during FSW and TIG welding. *FME TRANSACTIONS*, **49**(1), 220–224.
16. Motrunich, S., Klochkov, I., Poklyatsky, A. (2020) High cycle fatigue behaviour of thin sheet joints of aluminium–lithium alloys under constant and variable amplitude loading. *Weld World*, **64**, 1971–1979.

References

1. Bratukhin, A.G. (2003) *Modern aircraft materials: Technological and functional peculiarities*. Moscow, Aviatekhinform [in Russian].
2. Beletsky, V.M., Krivov, G.A. (2005) *Aluminium alloys (Composition, properties, technology, application)*: Refer. book. Ed. by I.N. Fridlyander. Kiev, KOMINTEKh [in Russian].
3. (2002) *Aircraft materials. Selected works of VIAM for 1932–2002*. In: *Jubilee Sci.-Techn. Collect.* Ed. by E.N. Kablov. Moscow, MISIS VCIAM, 198–220 [in Russian].
4. Rabkin, D.M., Lozovskaya, A.V., Sklabinskaya, I.E. (1992) *Physical metallurgy of welding of aluminium and its alloys*. Ed. by V.N. Zamkov. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
5. Mashin, V.S., Poklyatsky, A.G., Fedorchuk, V.E. (2005) Mechanical properties of aluminium alloys in consumable and nonconsumable electrode arc welding. *The Paton Welding J.*, **9**, 39–45.
6. Thomas, W.M., Nicholas, E.D., Needham, J.C. et al. (1991) *Friction stir butt welding*. Int. Patent Application PCT/GB 92/02203; GB Patent Application 9125978.8.

PROPERTIES OF BUTT JOINTS OF FINE-SHEET ALUMINUM-LITHIUM 1460 ALLOY, PRODUCED BY FRICTION STIR AND TIG WELDING

A.G. Poklyatsky, S.I. Motrunich, O.S. Kushnaryova

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

The article analyzes the structural features, characteristics of strength and life of butt joints of aluminum-lithium 1460 alloy with a thickness of 2 mm, produced by friction stir welding and argon arc welding using non-consumable electrode. It is shown that friction stir welding prevents the formation of a large-dendritic structure of welds, provides the formation of dissimilar joints with a minimum level of stress concentration at the place of transition from the weld to the base material and allows avoiding defects in the welds in the form of pores, oxide film and hot cracks, predetermined by melting and crystallization of metal during fusion welding. 16 Ref., 7 Fig.

Keywords: aluminum-lithium 1460 alloy, friction stir welding, hardness, defects, microstructure, tensile strength, fatigue resistance, fine structure

Надійшла до редакції
20.05.2021



Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Десята міжнародна конференція

**ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЗВАРЮВАННІ
ТА ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ**

6 – 11 вересня 2021 р.
Україна, Одеса

Голова програмного комітету
академік І.В. Кривцун

Тематика конференції

- Лазерне та електронно-променеве зварювання, різання, наплавлення, термообробка, нанесення покриттів
- Електронно-променева плавка та рафінування
- Гібридні процеси
- 3D технології
- Моделювання променевих технологій
- Неруйнівний контроль
- Матеріалознавчі проблеми лазерних та електронно-променевих технологій

ОБЛАДНАННЯ • ТЕХНОЛОГІЇ • МОДЕЛЮВАННЯ



АДРЕСА ОРГКОМІТЕТУ

Україна, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Тел./факс: (05044) 200-82-77

E-mail: journal@paton.kiev.ua

http://pwi-scientists.com/ru/ltwmp2021



Національна академія наук України

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

II МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

**НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ
ТА
МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ**

6–10 вересня 2021
Одеса, Аркадія, готель «Аркадія»

Генеральний спонсор

ПРАТ «УкрНАІНК»

Офіційний спонсор

ТОВ «НВФ «Діагностичні прилади»




ОРГАНІЗАТОР КОНФЕРЕНЦІЇ

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

вул. Казимира Малевича 11, м. Київ, 03150

тел. +38 (044) 200-82-77, (050) 352-73-50

journal@paton.kiev.ua

posypalko.yurii@gmail.com

http://pwi-scientists.com/ukr/nktd2021

ВПЛИВ КОНЦЕНТРАЦІЇ КИСНЮ В АРГОНІ НА ВЛАСТИВОСТІ І КОЛІР ПОВЕРХНІ ЗВАРНИХ ШВІВ ПРИ TIG ЗВАРЮВАННІ ТИТАНУ

В.П. Прилуцький, І.К. Петриченко

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

Приведені результати досліджень процесу утворення газонасиченого шару на поверхні зварного шва при випадковому порушенні умов захисту аргоном (під насадкою) при TIG зварюванні титана BT1-0. Встановлено, що зміна вмісту кисню в аргоні захисної насадки в межах 0,024...1,18 об. % призводить до зміни кольору ділянки поверхні шва, який утворюється. Показано, що кожному кольору відповідає певна глибина газонасиченого шару, що досягає 0,25 мм. Встановлена кореляційна залежність: колір поверхні шва – товщина газонасиченого шару – вміст кисню в захисній насадці. Результати газового аналізу і механічних випробувань зварних швів показують, що кисень і азот повітря в аргоні захисної насадки практично не взаємодіють в процесі зварювання з розплавленим металом зварювальної ванни. Тому кількісні показники властивостей металу швів знаходяться на рівні властивостей металу швів, отриманих в стандартних умовах. Для підвищення експлуатаційної надійності зварних вузлів з кольоровою поверхнею ділянки шва запропоновано видаляти її залежно від кольору на глибину в межах від 0,10 до 0,25 мм. Бібліогр. 9, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: аргонодугове зварювання (TIG), сплав титана BT1-0, колір поверхні зварних швів, порушення захисту аргоном, властивості металу швів

Для виготовлення титанових конструкцій широке промислове застосування отримало зварювання вольфрамовим електродом в інертному газі (TIG). З підвищенням температури зростає активність взаємодії титану з газами атмосфери – киснем, азотом, вуглекислим газом, парами вологи, які є для титану шкідливими домішками. Помітне поглинання кисню титаном починається вже при температурі 300 °С, азоту – при 800 °С [1]. Розчинність кисню в α -фазі може досягати 34 % ат., а азоту – 0,75 % ат., при цьому швидкість взаємодії титану з киснем в 50 разів більше, ніж з азотом [2]. Високотемпературна взаємодія титану з повітряним середовищем супроводжується дифузиею кисню углиб матриці і утворенням твердого розчину кисню та азоту в титані, яке призводить до сильного спотворення кристалічної решітки і внаслідок цього до погіршення механічних характеристик металу. Оксидний шар, що утворився на поверхні у вигляді крупногочагої α' -фази, має підвищену твердість і крихкість [3]. Слід зазначити, що домішки впровадження найбільшою мірою впливають не лише на зварюваність титанових сплавів, але і сприяють уповільненому руйнуванню зварних конструкцій у зв'язку з утворенням холодних тріщин в швах і зоні термічного впливу (ЗТВ) [4, 5]. Тому при зварюванні TIG особлива увага приділяється надійності захисту від контакту з повітрям не лише розплавленого металу зварювальної ванни, але і остигаючого зварного з'єднання [6]. Для виключення забруднення металу шва шкідливими домішками, окрім засто-

сування аргону високої чистоти, використовують зварювальні пальники і захисні пристосування, які забезпечують якісний захист усієї зони зварного з'єднання інертним газом. Важливе значення при цьому має правильний вибір співвідношення витрат аргону в зварювальний пальник і захисну насадку. Проте, незважаючи на якісний захист, під час зварювання можуть виникнути випадкові порушення захисту аргоном як в зоні горіння дуги під соплом пальника, так і в зоні остигаючого зварного з'єднання. У роботі [7] приведено метод, що дозволяє виявити порушення аргонного захисту в зоні горіння дуги під час зварювання і встановити міру впливу цього порушення на механічні властивості зварного шва. Але встановити порушення захисту аргоном поверхні остигаючого зварного шва такою методикою практично неможливо. Таке порушення можна виявити тільки при виходу зварного шва з-під захисної насадки. При дотриманні усіх технологічних вимог до процесу зварювання поверхня шва має сріблястий колір, а зміна умов захисту аргоном під насадкою призводить до зміни кольору поверхні шва в результаті утворення на ньому окисно-нітридного шару титану. Нині такий ефект розглядається як показник властивостей і працездатності зварного з'єднання. Так, запропоновано стандарт, згідно з яким тільки за кольором поверхні швів оцінюється допуск до експлуатації зварних конструкцій з такими швами [8]. У літературі відсутня інформація про обґрунтування кількісної оцінки властивостей ділянки металу швів з кольоровою поверхнею. Тому до-

Прилуцький В.П. – <https://orcid.org/0000-0002-3174-1966>

© В.П. Прилуцький, І.К. Петриченко, 2021

слідження впливу випадкового підвищення вмісту кисню в аргоні захисної насадки на властивості металу зварного шва при зміні кольору його поверхні є актуальною задачею. Рішення її дозволить створити базу даних: колір поверхні шва – властивості металу шва, мета якої – підвищити експлуатаційну надійність вузлів зварних конструкцій, на поверхні швів яких виявлені кольорові ділянки.

Методика і матеріали. Для кількісної оцінки впливу концентрації домішок впровадження (кисню і азоту), в аргоні захисної насадки на властивості металу зварних швів залежно від кольору їх поверхні було використано комплекс методів:

- спектральний аналіз;
- фотографування кольору поверхні швів;
- металографічний аналіз;
- вимір мікротвердості металу шва;
- визначення вмісту газів в металі шва;
- механічні випробування металу швів.

Спектральний аналіз. Наявність кисню в дуговому проміжку визначали по інтенсивності випромінювання атомних ліній кисню за методикою, яка викладена в роботі [7]. У аргон, що поступає в захисну насадку, вводили дозовану кількість повітря. Повітря подавали в аргон за схемою, представленою на рис. 1.

Оптимальне співвідношення між витратою аргону в пальник і насадку, що забезпечує необхідну якість, визначали експериментально, домагаючись сріблястого кольору шва. Режим зварювання: зварювальний струм 160 А, швидкість зварювання 12 м/ч, довжина дугового проміжку 1,5 мм. Витрата аргону в пальник складала 12 л/хв, в захисну насадку – 27 л/хв. Вміст повітря в аргоні захисної насадки змінювали в межах 0,12...5,9 об. %, при цьому вміст кисню змінювався в межах 0,024...1,18 об. % (табл. 1). Зварювання виконували на пластинах сплаву титану марки ВТ1-0 завтовшки 3 мм. Для забезпечення якісного захисту остигаючого металу ЗТВ відстань площини поверхні захисної насадки до поверхні пластини знаходилась в межах 1,0...1,5 мм. При кожному значенні концентрації повітря зварювали не

менше трьох зразків і визначали середнє значення інтенсивності випромінювання атомних ліній кисню.

Фотографування поверхні шва виконувалося за допомогою цифрової камери марки «CANON». Умови зйомки (експозиція, освітлення, відстань до поверхні шва) для усіх зварних зразків були однакові. Після зварювання з кожним варіантом концентрації кисню в аргоні захисної насадки фотографували поверхню зварних швів для отримання кореляційної залежності: колір поверхні шва – властивості металу шва.

Металографічний аналіз. Підвищення вмісту повітря в аргоні захисної насадки призводить до утворення на поверхні шва окисдно-нітридних щонайтонших плівок, що мають різне забарвлення. Товщину таких плівок можна оцінити по інтерференційному забарвленню [9]. Під кольоровою плівкою знаходиться метал з підвищеним вмістом кисню і азоту, в якому спотворено кристалічні ґрати і утворена крупногольчата α' -фаза. Дослідження змін мікроструктури в поверхневому шарі металу швів, зварених при фіксованих значеннях концентрації кисню в аргоні захисної насадки, виконували на мікроскопі «NEOFOT-2».

Мікротвердість поверхневого шару металу шва вимірювали пошарово приладом ПМТ-3 під навантаженням 50 г. На мікрошліфах з поверхні шва, звареного при кожній концентрації повітря в захисній насадці, видаляли шар певної товщини і виконували не менше 10 вимірів в декількох ділянках шліфа. Потім процес повторювали, видаляючи шар металу з виміряною твердістю і знову вимірювали твердість поверхні металу шва. Такий процес виконувався до тих пір, поки значення твердості металу шва на подальших шарах практично не змінювалися. Для порівняння такі ж виміри виконували для металу швів, зварених без введення повітря в захисну насадку. Отримані дані були використані для побудови залежності: твердість поверхневого шару металу шва – відстань від поверхні шва.

Вміст газів (кисню і азоту) визначали в металі швів при кожній концентрації повітря в аргоні захисної насадки і без введення в неї повітря. Для

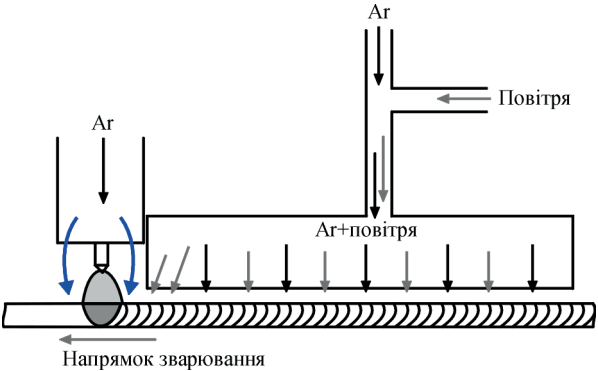


Рис. 1. Схема подачі повітря у захисну насадку

Таблиця 1. Вміст повітря (кисню та азоту) в аргоні захисної насадки, об. %

Індекс зразка	Вміст повітря	Вміст кисню	Вміст азоту
1	0,12	0,024	0,09
2	0,19	0,038	0,14
3	0,37	0,074	0,28
4	0,48	0,096	0,37
5	0,60	0,120	0,46
6	1,10	0,220	0,85
7	1,60	0,320	1,24
8	2,24	0,440	1,74
9	5,90	1,180	4,60

оцінки змін змісту газів в металі швів будували графіки по середніх значеннях результатів вмісту кисню $[O]_{(Ar)}$ і азоту $[N]_{(Ar)}$ у швах, зварених в чистому аргоні і зварених при різних концентраціях кисню $[O]_{(Ar+air)}$ і азоту $[N]_{(Ar+air)}$ в аргоні захисної насадки.

Механічні випробування металу швів. Для визначення межі міцності і відносного подовження металу шва зі швів виготовляли зразки для механічних випробувань. Критерієм оцінки властивостей металу зварних швів, отриманих при введенні в аргон дозованих концентрацій повітря, порівнювали показники меж міцності, відносних подовжень в цих швах з відповідними показниками металу швів, отриманих при зварюванні в аргоні без домішок повітря. Результати механічних випробувань і змісту газів в металі швів, виконаних без домішки повітря в захисній насадці, приведені в роботі [7].

Для випробувань на статичний вигин (шириною 10 мм) вирізували зразки упоперек шва відповідно до Designation ASTM B265. Діаметр оправляння D вибраний з умови $D = 5b$, де b – товщина пластин ($b = 3$ мм). Перед випробуваннями зразка шліфуванням видаляли метал із зворотного валика шва. Після випробувань вимірювали кут вигину, а також аналізували поверхню зварних швів на наявність мікротріщин.

Результати досліджень. Наявність кисню в дуговому проміжку визначали при зміні концентрації

кисню в аргоні захисної насадки відповідно до табл. 1. Як показали дослідження, незважаючи на підвищення вмісту кисню в аргоні захисної насадки (від 0,024 до 1,180 об. %) випромінювання ліній кисню в дуговому проміжку не було виявлено. Можна припустити, що деяка частина суміші аргону і повітря, яка вводиться в аргон захисної насадки, захоплюється за рахунок інжекції периферійною частиною потоком аргону з пальника і виноситься, не потрапляючи в стовп дуги. Інша частина поглинається остигаючою твердою поверхнею зварного шва, що утворюється, і ЗТВ. Можливо, також, що частина молекул кисню потрапляє в низькотемпературні ділянки дуги, недостатньо диссоціює і тому випромінювання ліній кисню в дузі не зареєстровано.

При аналізі колірної гамми поверхні зварних швів металу був зроблений наступний висновок. Зі збільшенням вмісту кисню в аргоні захисної насадки колір поверхні шва змінюється від золотистого (0,024 об. % кисню) до сіро-блакитного (1,180 об. % кисню). На рис. 2 представлені кольори поверхні швів, характерні для кожного значення концентрації повітря, яке вводилось в захисну насадку.

Аналіз мікроструктури поверхневих шарів зварних швів показав, що при вмісті кисню в аргоні захисної насадки 0,024 об. % на поверхні

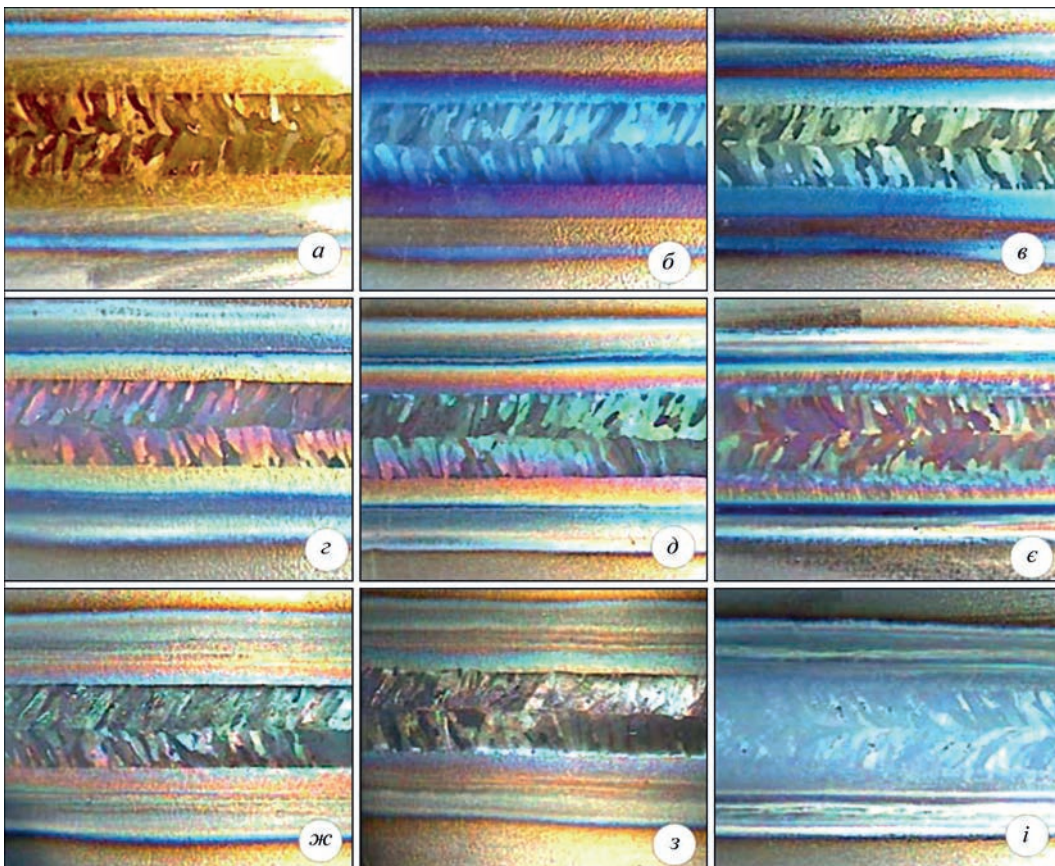


Рис. 2. Колір поверхні зварних швів, зварених при вмісті кисню в аргоні захисної насадки, (об. %): а – 0,024; б – 0,038; в – 0,074; г – 0,096; д – 0,120; е – 0,220; ж – 0,320; з – 0,440; і – 1,180

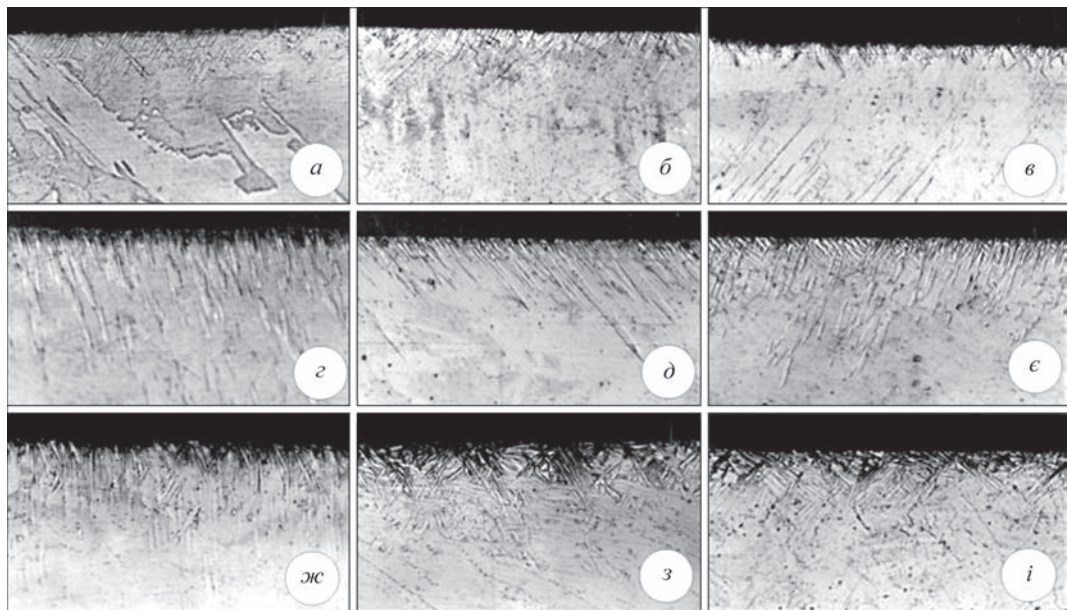


Рис. 3. Мікроструктури ($\times 250$) поверхневого шару зварних швів, зварених при вмісті кисню в аргоні захисної насадки (об. %): а – 0,024; б – 0,038; в – 0,074; г – 0,096; д – 0,120; е – 0,220; ж – 0,320; з – 0,440; и – 1,180

металу шва утворюється шар з тонкими голчастими виділеннями глибиною не більше 0,012 мм (рис. 3, а). Такі виділення чергуються із структурою, типовою для металу шва, звареного в чистому аргоні. При вмісті кисню в аргоні 0,038 об. % (рис. 3, б) утворюється суцільний шар з голчастою структурою глибиною не більше 0,02 мм. Причому голки мають як однакову, так і різну спрямованість відносно поверхні. Такі структурні змі-

ни пов'язані з поглинанням кисню і азоту в цих ділянках металу. При подальшому підвищенні вмісту кисню в аргоні до 0,074 об. % (рис. 3, в) зростає і товщина шару металу з голчастою структурою до 0,05 мм. При вмісті кисню в аргоні 0,096 об. % (рис. 3, г) структура шару з голчастою морфологією стає неоднорідною по розташуванню і величині голок. Окремі голки проростають на глибину до 0,16 мм. Середня глибина шару – до 0,07 мм. Подальший аналіз мікроструктур показує, що збільшення вмісту кисню до 1,180 об. % призводить до підвищення глибини шару з голчастою структурою до 0,18...0,25 мм (рис. 3, и).

В результаті металографічних досліджень встановлено, що при введенні повітря в аргон захисної насадки поверхневий шар металу зварного шва зазнає структурні зміни, пов'язані з поглинанням кисню і азоту. Ці зміни відбуваються до глибини приблизно 0,25 мм. В глибших ділянках зварного шва подібних структурних змін не виявлено.

Результат пошарового виміру мікротвердості металу швів для кожного значення концентрації кисню в аргоні захисної насадки представлено на рис. 4. Порівнюючи дані, приведені на рис. 3 і 4, можна зробити висновок, що зі збільшенням

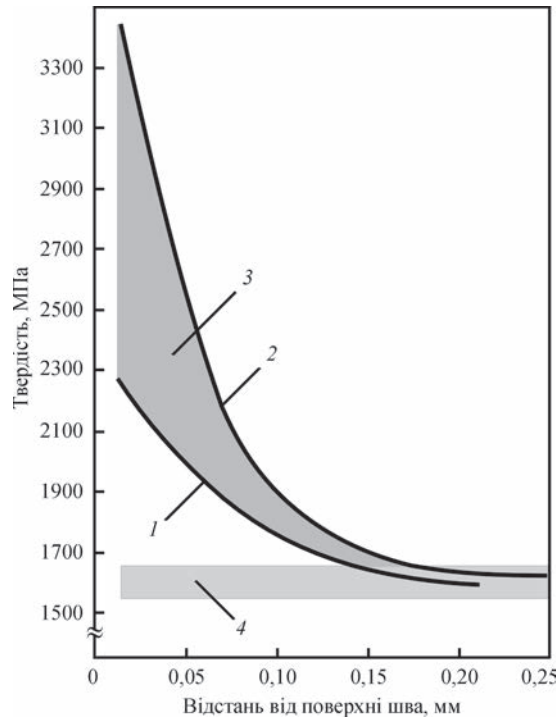


Рис. 4. Мікротвердість поверхневих шарів металу зварних швів, зварених при вмісті кисню в аргоні захисної насадки (об. %): 1 – 0,024; 2 – 1,18; 3 – зона мікротвердості при вмісті кисню в інтервалі 0,038...0,440; 4 – зона мікротвердості поверхневого шару зварного шва, звареного без введення повітря в аргон захисної насадки

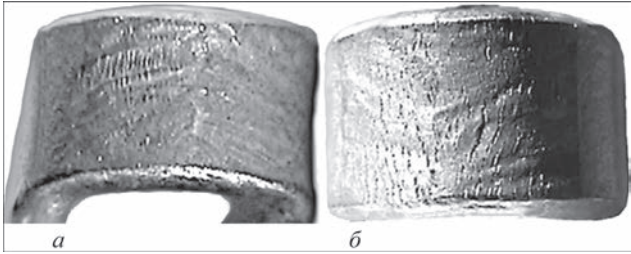


Рис. 5. Мікротріщини на поверхні зразків, зварених при вмісті кисню в аргоні захисної насадки (об. %): а – 0,024; б – 1,18

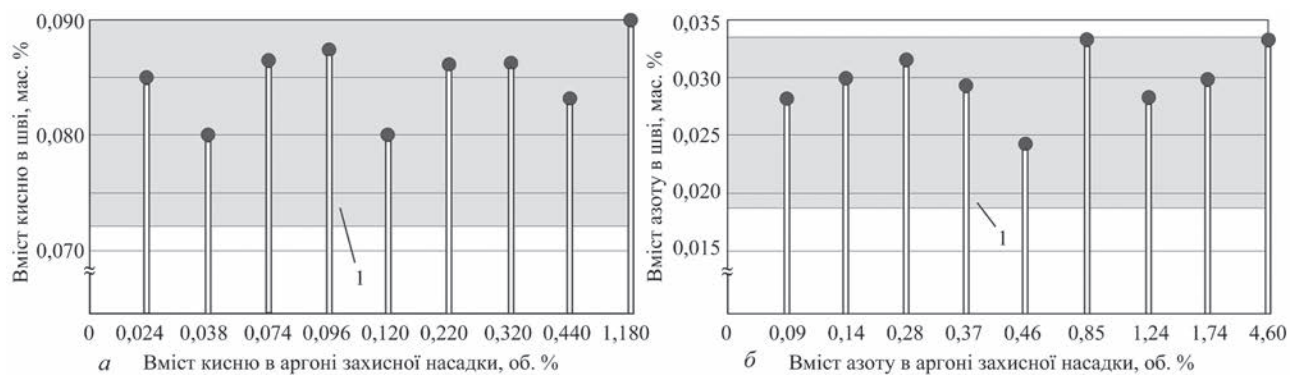


Рис. 6. Вміст кисню (а) і азоту (б) в зварних швах залежно від вмісту цих газів в аргоні захисної насадки: 1 – інтервал вмісту кисню і азоту в зварних швах, виконаних без введення повітря в аргон захисної насадки

кількості повітря в аргоні захисної насадки до 5,9 об. % (1,18 об. % кисню) глибина поверхневого шару металу шва з підвищеним вмістом домішок зростає приблизно до 0,20...0,25 мм.

Випробування зразків на вигин, вирізаних упоперек шва без видалення поверхневого шару, показали, що кут загину усіх зразків складає 180°. Це характеризує метал зварних швів як досить пластичний. Проте, на поверхневому шарі металу усіх зразків спостерігаються мікротріщини (рис. 5).

Появу мікротріщин на поверхні, яка навантажується силою розтягування, можна пояснити низькою пластичністю поверхневого шару металу, пов'язаною з підвищеним вмістом в ньому газових домішок. Для оцінки вірогідного захоплення повітря аргонем пальника з аргону захисної насадки і поглинання його металом зварювальної ванни, був виконаний газовий аналіз металу зварних швів і визначений вміст кисню і азоту. На рис. 6 приведені залежності зміни вмісту кисню і азоту в зварних швах від концентрацій цих газів в аргоні захисної насадки. Порівнюючи отримані результати газового аналізу можна бачити, що зі збільшенням концентрації повітря в аргоні захисної насадки, вміст кисню і азоту в металі зварних швів знаходиться практично в тих же межах, що і в швах, виконаних в чистому аргоні. Ці дані дозволяють зробити висновок, що введення повітря в аргон захисної насадки в досліджуваних межах не підвищує вміст газів в зварних швах. Тому можна припустити, що в процесі зварювання розплавлений метал зварювальної ванни практично не взаємодіє з киснем і азотом повітря, яке вводилося в аргон захисної насадки.

Для визначення впливу концентрацій кисню в аргоні захисної насадки на міцність і відносне подовження металу зварних швів виготовляли плоскі зразки для випробувань, розташовуючи їх уздовж осі шва і видаляючи з поверхні 0,25 мм. Результати механічних випробувань зварних швів показали, що незважаючи на підвищення концентрації повітря в аргоні захисної насадки в досліджуваному інтервалі, межа міцності і відносне подовження металу зварних швів ($\sigma_B = 456,9...451,4$ МПа, $\delta = 35,7...35,4$ %) залиша-

Таблиця 2. Кореляційна залежність колір поверхні шва – товщина газонасиченого шару – вміст кисню в захисній насадці

Індекс шва	Колір поверхні зварного шва	Вміст кисню в аргоні захисної насадки, об. %	Максимальна товщина шару з підвищеною твердістю, мм
1		0,024	0,10
2		0,038	0,10
3		0,074	0,10
4		0,006	0,10
5		0,120	0,12
6		0,220	0,20
7		0,320	0,25
8		0,440	0,25
9		0,180	0,25

ються в тих же межах, що і в швах, виконаних в чистому аргоні ($\sigma_b = 453,0$ МПа, $\delta = 36,0$ %).

Обговорення результатів. Дослідженнями встановлено, що колір поверхні зварного шва після зварювання залежить від вмісту кисню і азоту в аргоні захисної насадки. Результати досліджень мікроструктури і пошарового виміру мікротвердості поверхневого шару зварного шва показують хороший збіг даних по інтенсивності глибини газонасиченого шару залежно від кольору поверхні шва. Таким чином, експериментально встановлена кореляція між зміною кольору поверхні шва і глибиною газонасиченого шару (табл. 2).

Максимальна глибина цього шару складає не більше 0,25 мм. Дослідження зразків на вигин показують, що навіть при мінімальному вмісті кисню в аргоні захисної насадки (0,024 %) і золотистому кольорі поверхні шва (див. рис. 2, а), на ній утворюються мікротріщини, які при експлуатації зварного вузла під навантаженням можуть привести до його руйнування через крихкості поверхневого шару.

Аналіз результатів газового аналізу і механічних випробувань зварних швів показує, що кисень і азот повітря в аргоні захисної насадки практично не взаємодіють в процесі зварювання з розплавленим металом зварювальної ванни. Тому для підвищення експлуатаційної надійності вузлів зварних конструкцій з кольоровою поверхнею ділянки шва можна рекомендувати видалення газонасиченого шару залежно від кольору шва на глибину відповідно до даних табл. 2. У разі потреби після видалення шару можлива компенсація видаленого металу наплавленням відповідно до технологічної інструкції.

Список літератури

1. Гуревич С.М., Замков В.Н., Блащук В. Е. и др. (1986). *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов*. 2-е изд. Киев, Наукова думка.

2. Richardson, L.S., Grant, H.I. (1954) Reaction of oxygen and nitrogen with titanium from 700° to 1050°. *J. Metals*, **1**, 69–70.
3. Бай А.С., Лайнер Д.И., Слесарева Е.Н., Цыпин М.И. (1978). *Окисление титана и его сплавов*. Москва, Металлургия.
4. Mitra, T.K., Venkataraman, G. (1996). Effect of shielding on the properties titanium welds. *WRI Journal*, **17**, **4**, 117–121.
5. Mc Cue Don, Irving, B. (1999). Gas tungsten arc welding: It's built handle titanium. *Welding J.*, **11**, 31–36.
6. Dennis D. Harwig. (1999). Achieving high – quality titanium arc welds. *Practical welding today (EWI Update)*, **1/2**, 48–50.
7. Прилуцький В.П., Єрошенко Л.С. (2021). Вплив умов захисту зварювальної ванни аргонном на властивості швів при ТІГ зварюванні титану. *Автоматичне зварювання*, **6**, 39–43. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.06.06>
8. ГОСТ Р ИСО 15614-5-2009. *Технические требования и аттестация процедур сварки металлических материалов. Проверка процедуры сварки. Часть 5. Дуговая сварка титана, циркония и их сплавов* (Перевод).
9. Грабин В.Ф. (1975). *Основы металловедения и термической обработки сварных соединений из титановых сплавов*. Киев, Наукова думка.

References

1. Gurevich, S.M., Zamkov, V.N., Blashchuk, V.E. et al. (1986) *Metallurgy and technology of welding of titanium and its alloys*. 2nd Ed. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
2. Richardson, L.S., Grant, H.I. (1954) Reaction of oxygen and nitrogen with titanium from 700° to 1050°. *J. Metals*, **1**, 69–70.
3. Baj, A.S., Lajner, D.I., Slesareva, E.N., Tsy-pin, M.I. (1978) *Oxidation of titanium and its alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
4. Mitra, T.K., Venkataraman, G. (1996). Effect of shielding on the properties titanium welds. *WRI J.*, **17**(4), 117–121.
5. Mc Cue Don, Irving, B. (1999) Gas tungsten arc welding: It's built handle titanium. *Welding J.*, **11**, 31–36.
6. Dennis D. Harwig. (1999) Achieving high-quality titanium arc welds. *Practical Welding Today (EWI Update)*, **1/2**, 48–50.
7. Prylutsky, V.P., Yeroshenko, L.E. (2021) Influence of conditions of welding pool protection by argon on properties of TIG of titanium. *The Paton Welding J.*, **6**, 39–43
8. GOST R ISO 15614-5-2009: *Specification and qualification of welding procedures for metallic materials. Welding procedure test. Pt 5: Arc welding of titanium, zirconium and their alloys* (Reedition) [in Russian].
9. Grabin, V.F. (1975) *Fundamentals of physical metallurgy and heat treatment of welded joints from titanium alloys*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

INFLUENCE OF OXYGEN CONCENTRATION IN ARGON ON THE PROPERTIES AND COLOUR OF WELD SURFACE IN TIG WELDING OF TITANIUM

V.P. Prilutskiy, I.K. Petrichenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev

The paper presents the results of investigations of the process of formation of a gas-saturated layer on the weld surface at accidental violation of the conditions of argon protection (under the nozzle) in TIG welding of VT1-0 titanium. It was found that the change of oxygen content in argon of the protective nozzle in the range from 0.024 to 1.18 vol. % leads to a change of the colour of a region of forming weld surface. It is shown that each colour corresponds to a certain depth of the gas-saturated layer that can be up to 0.25 mm. A correlation dependence of weld surface colour – gas-saturated layer thickness – oxygen content in the protective nozzle was established. Results of gas analysis and mechanical testing of the welds show that oxygen and nitrogen from the air practically do not interact with the molten metal of the weld pool in the argon of the protective nozzle during welding. Therefore, the quantitative characteristics of the metal of welds are on the level of those of the metal of welds produced under standard conditions. To increase the operational reliability of welded assemblies with a coloured surface of a weld region, it is proposed to remove it, depending on its colour to the depth in the range from 0.10 up to 0.25 mm. 9 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: argon-arc welding (TIG), VT1-0 titanium alloy, weld surface colour, violation of argon protection, weld metal properties.

Надійшла до редакції
05.05.2021

ВАКУУМНЕ ПАЯННЯ РІЗНОРІДНИХ З'ЄДНАНЬ КОВАР–МОЛІБДЕН

С.В. Максимова, П.В. Ковальчук, В.В. Воронов

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

На підставі проведених досліджень встановлено особливості розтікання припоїв системи Cu–Mn–Co по молібдену і Ковару. Мікрорентгеноспектральним аналізом визначено, що при розтіканні відбувається зональна кристалізація краплі припою на підкладці основного металу: по зовнішньому периметру краплі формуються явно виражені ділянки твердого розчину на основі міді (Cu–12,92Mn–4,69Co), а в центральній зоні краплі кристалізуються дендрити твердого розчину на основі марганцю, які характеризуються більш високою температурою плавлення. Експериментально доведено, що підвищення температури нагріву сприяє збільшенню площі розтікання припою за рахунок покращання розтікання твердого розчину на основі міді. Встановлено, що в паяному шві різномірних з'єднань Ковар–молібден формується твердий розчин на основі міді, а на міжфазній границі молібден–припій кристалізується реакційний шар (шириною біля 1 мкм) на основі молібдену, який збагачений кобальтом (15,80 %), марганцем (14,12 %) та містить незначну кількість міді (1,63 %). Внаслідок механічних випробувань напускних пластинчастих паяних з'єднань Ковар–молібден в умовах статичних навантажень при кімнатній температурі руйнування відбувається частково по паяному шву і частково по основному металу–молібдену. Бібліогр. 14, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: Ковар, молібден, вакуумне високотемпературне паяння, різномірні з'єднання, сплави системи мідь–марганець–кобальт, мікроструктура, міцність, розтікання

Для отримання певних властивостей конструкцій часто використовують окремі вузли з різномірних матеріалів. При їх отриманні шляхом паяння виникає низка проблем, що обумовлена хімічним складом поєднуваних матеріалів, різними фізико-механічними властивостями.

При паянні різномірних з'єднань молібден–нержавіюча сталь (Ковар) необхідно враховувати особливості кожного матеріалу. Молібден відноситься до тугоплавких жароміцних матеріалів завдяки високій температурі плавлення (2600 °C) і значній питомій міцності в умовах високої температури. Його паяння проводять у вакуумі або в захисних газах, оскільки при нагріві на повітрі він активно реагує з киснем, що сприяє його окисленню і знижує механічні властивості [1]. Температура паяння не повинна перевищувати температуру його рекристалізації. При переході через поріг рекристалізації молібден стає крихким [2], що важливо враховувати при виборі припою і його інтервалів плавлення. Окрім того, різниця коефіцієнтів термічного розширення обох металів призводить до виникнення залишкових напружень, деформації виробів і появи тріщин [3, 4, 5]. Тому при їх поєднанні в якості припою зазвичай використовують мідь і її сплави, які слугують демпфером між з'єднуваними деталями і сприяють релаксації виникаючих напружень. Можна застосовувати спеціальні проміжні пластичні прошарки, які ефективні при з'єднанні різномірних металів, що мають значну різницю у їх фізико-механічних властивостях [4].

З'єднанню молібдену з Коваром (Fe–29Ni–17Co) присвячено значно менше робіт, в порівнянні з паянням молібдену з нержавіючою сталлю. Все ж протягом багатьох років такі роботи проводяться і вони стали особливо актуальними у зв'язку зі створенням нових установок та конструкційних елементів в приладобудуванні. На сьогоднішній час актуально з'єднання різномірних матеріалів Ковар–молібден, що призначені для високотемпературного застосування [5, 6]. Ковар відноситься до прецизійних сплавів з заданим температурним коефіцієнтом лінійного розширення (ТКЛР), який близький до такого для борсилікатного скла [7], що сприяє його застосуванню в оптичних приладах, що експлуатуються в широкому інтервалі температур. При паянні даних металів виникають проблеми іншого характеру. З однієї сторони, їх ТКЛР близькі: так, для Ковару він становить $\sim 4,6 \dots 5,29 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (в температурному інтервалі 20...400 °C і з підвищенням температури стрімко зростає) [8], а для молібдену він становить $\sim 5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (в температурному інтервалі 0...100 °C), що є позитивним моментом при створенні паяних з'єднань Ковар – молібден. А з іншої сторони, на основі діаграми плавкості системи Mo–Fe видно, що молібден і залізо мають значні області розчинності при високій температурі, але з її зниженням ці області швидко звужуються і при кімнатній температурі взаємна розчинність практично відсутня. Між розглянутими елементами формується низка інтерметалідних фаз, які можуть відіграва-

Максимова С.В. – <https://orsid.org/0000-0003-0158-5760>, Ковальчук П.В. – <https://orsid.org/0000-0002-2313-5982>, Воронов В.В. – <https://orsid.org/0000-0002-0410-1154>

© С.В. Максимова, П.В. Ковальчук, В.В. Воронов, 2021

ти негативну роль, приводячи до крихкості паяного з'єднання [9]. Утворення інтерметалідних фаз негативно впливає на механічні властивості різномірних з'єднань, що отримані різними методами, в тому числі і зварюванням [6, 10]. Детальні дослідження мікроструктури з'єднань, що отримані при електронно-променевому паянні-зварюванні Ковару з молібденом показали, що на міжфазній границі з'єднання формуються три зони, в яких виявлено твердий розчин на основі заліза і на основі молібдену, а також крихкі інтерметалідні фази: Fe_5Mo_3 , $FeMo$, які і є причиною крихкого руйнування і низької міцності [10].

При вакуумному паянні Ковару з молібденом (при температурі 1115 °C) з застосуванням в якості припою чистої міді товщиною 100 мкм міцність з'єднань становить 72...75 МПа [5].

У даній роботі представлено результати досліджень з розтікання експериментальних припоїв системи Cu–Mn–Co по Ковару і молібдену та особливості формування структури паяних різномірних з'єднань Ковар–молібден, що отримані за допомогою вакуумного високотемпературного паяння.

Експериментальна частина. Для проведення експериментів в якості основного металу використовували пластини молібдену марки МЧ (товщиною 3 мм) та прецизійного сплаву Ковар (товщиною 2 мм, табл. 1).

Експериментальні припої виплавляли на мідній підкладці в середовищі аргону з застосуванням дугового нагріву. Для дослідження впливу кобальту на температуру солідусу і ліквідусу виплавили ряд експериментальних сплавів системи Cu–Mn–(0,5-4,5)Co та визначили їх інтервали плавлення за допомогою високотемпературного диференційного термічного аналізу (ВДТА) (табл. 2) з застосуванням установки ВДТА-8МЗ в високочистому гелії при швидкості нагрівання 40 °C/хв (± 5 °C).

Для проведення експериментів використовували полікристалічні сплави Cu–Mn–(0,5–4,5)Co в литому і прокатаному стані у вигляді стрічки товщиною ~100 мкм.

Експерименти з розтікання досліджуваних сплавів проводили на підкладках молібде-

ну розміром 15×15 мм. Припої в кількості 300 мг розміщали в центральній зоні підкладки основного металу, нагрівання проводили в вакуумній печі з радіаційним нагрівом при температурі, що перевищує температуру ліквідусу на 30 °C при розрідженні робочого простору $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па на протязі 180 с. Площі розтікання експериментальних припоїв вимірювали за допомогою сканування та програми КОМПАС-3D v17.1.

Паяння різномірних напускних з'єднань (з капілярним зазором) теж проводили при температурі, що перевищує $T_{\text{ліквідусу}}$ на 30 °C, час витримки складав 180 с. Отримані зразки різали перпендикулярно поверхні пластини і за стандартною методикою готували мікрошліфи та вивчали хімічну неоднорідність з застосуванням растрового електронного скануючого мікроскопу Tescan Mira 3 LMU. Мікрорентгеноспектральні дослідження і визначення локального розподілу елементів в окремих фазах проводили з використанням енергодисперсійного спектрометра «Oxford Instruments X-max 80 mm²», що оснащений програмним пакетом INCA. Мікрошліфи досліджували без хімічного травлення.

Результати експериментів та їх аналіз. Отримані результати досліджень показали, що експериментальні сплави мають достатньо вузький інтервал плавлення, що не перевищує 22...35 °C, але підвищення концентрації кобальту призводить до його розширення за рахунок підвищення температури ліквідусу. З підвищенням концентрації кобальту від 0,5 до 4,5 мас. % температура солідусу сплаву зростає на 14 °C.

При проведенні експериментів максимальний перегрів над температурою солідусу сплавів становив 65 °C (рис. 1).

Потрійні сплави системи Cu–Mn–(0,5–4,5)Co характеризуються литою структурою, що утворена двома твердими розчинами: на основі міді і марганцю. Останній спостерігається у вигляді темних дендритів твердого розчину з явно вираженою ліквіацією за складовими елементами, що притаманна сплавам даної системи [11]. Кобальт є складовим елементом обох твердих розчинів. Структура Ковару однофазна і утворена γ -твер-

Таблиця 1. Хімічний склад дослідних матеріалів, мас. %

Склад	Fe	C	Si	Ni	Co	Mo
Мо	до 0,01	до 0,005	до 0,01	до 0,005	-	min 99,96
29НК	51,14...54,5	-	-	28,5...29,5	17,0...18,0	-

Таблиця 2. Експериментальні сплави та температура розтікання (паяння)

Номер сплаву	Склад, мас. %	Температура розтікання, °C	Температурний інтервал плавлення, °C	Перегрів вище температури солідусу, °C
1	Cu–Mn–0,5Co	939	22	52
2	Cu–Mn–1Co	946	21	51
3	Cu–Mn–2Co	955	26	56
4	Cu–Mn–4,5Co	966	35	65

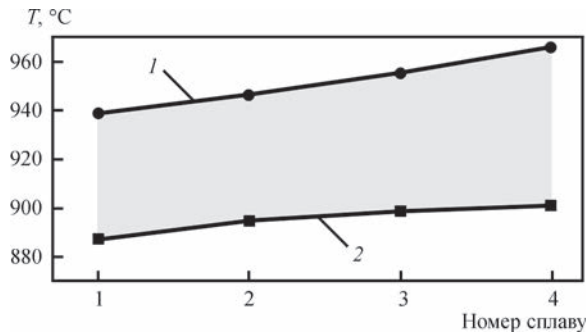


Рис. 1. Температура паяння (1) і температура солідусу (2) експериментальних сплавів

дим розчином, який стійкий при температурі, що вища за -70°C . При несприятливому співвідношенні нікелю і кобальту і наявних домішок при $T = -70^{\circ}\text{C}$ можливе часткове перетворення $\gamma \rightarrow \alpha$ (мартенситного характеру), яке може призводити до збільшення ТКЛР, що необхідно враховувати при створенні конструкцій і вузлів з різнорідних матеріалів: Ковару і молібдену.

Відомо, що однією з важливих фізико-хімічних характеристик отримання якісного з'єднання є здатність припою змочувати основний метал і розтікатися по ньому [12]. Від повноти протікання даного складного металургійного процесу залежить якість паяних виробів. На підставі проведених досліджень встановлено, що при розтіканні литого припою (рис. 2, а) системи Cu–Mn–Co по

молібдену, формується крапля з неоднорідною структурою, яку умовно можна розділити на зони (рис. 2, б, в).

В центральній зоні (№ 1) кристалізується твердий розчин на основі марганцю у вигляді дисперсних дендритів, які формують вершину краплі припою. Вони розташовані на тлі мідної матриці, але їх температура ліквідусу вища за температуру ліквідусу твердого розчину на основі міді [13]. Результатами мікрорентгеноспектрального аналізу виявлено значну хімічну неоднорідність проміжної зони (№ 2), що являє собою твердий розчин на основі міді перемінної концентрації. Морфологія даної зони значно відрізняється від попередньої і складається з доволі крупних дендритів твердого розчину з явно вираженою ліквіацією за складовими елементами (рис. 2, з), що обумовлено швидкістю охолодження та температурним інтервалом кристалізації [11]. Концентрація марганцю знаходиться в межах 16,2...32,15 %.

По периметру краплі (зона № 3) спостерігається ореол у вигляді плоского фронту кристалізації, що утворений твердим розчином на основі міді з мінімальною концентрацією марганцю (12,92Mn), який характеризується самою низькою температурою плавлення та кристалізується в останню чергу. Низька концентрація марганцю в даній зоні обумовлена високою пружністю пару і часом

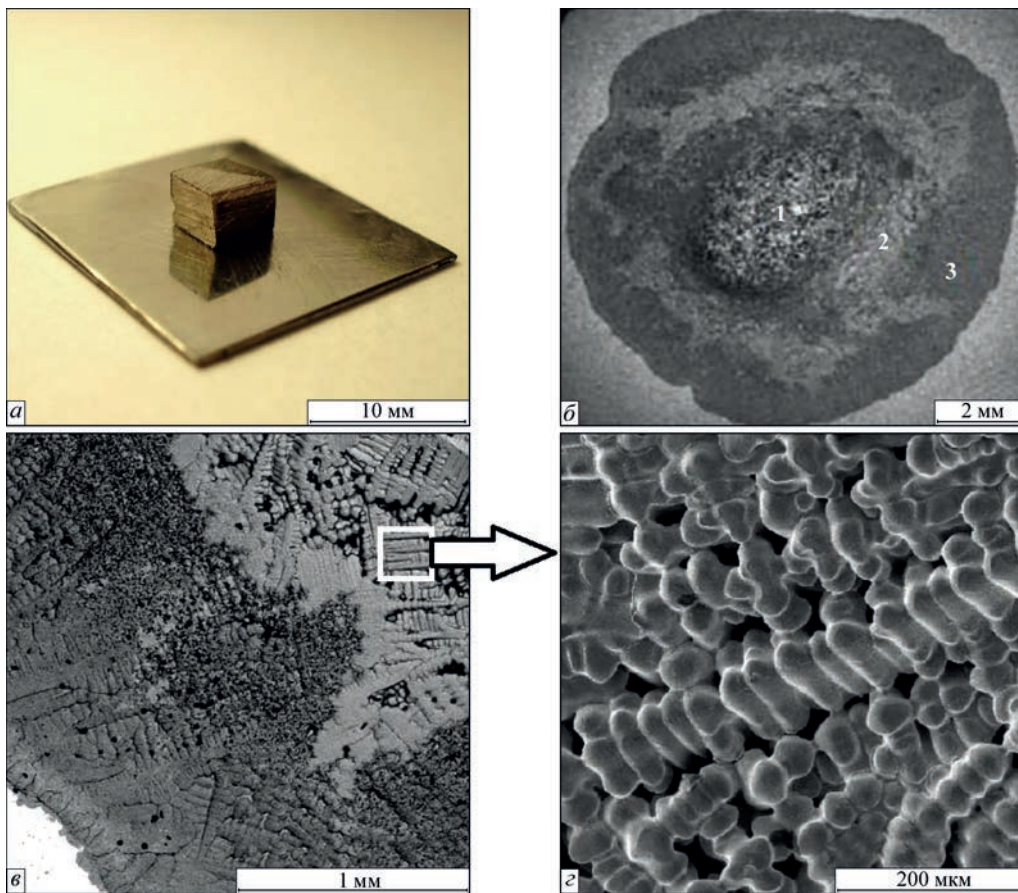


Рис. 2. Припій Cu–Mn–4,5Co перед розтіканням на молібденовій підкладці (а), після розтікання (б, в) та структура проміжної зони – дендрити твердого розчину на основі міді (г)

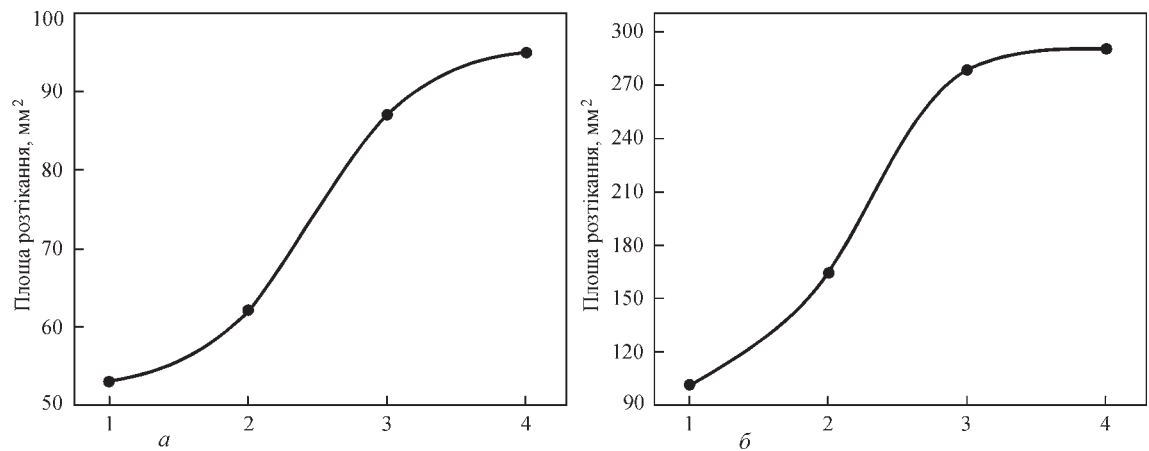


Рис. 3. Площа розтікання припоїв № 1, 2, 3, 4 системи Cu–Mn–Co по молибдену (а) і по Ковару (б)

перебування припою в рідкому стані в умовах вакууму. Слід зазначити, що зональне формування структури при розтіканні по молибдену характерно для всіх досліджуваних припоїв (див. табл. 1).

Експериментально доведено, що при підвищенні температури нагріву площа розтікання припоїв збільшується (рис. 3, а) за рахунок покращання розтікання твердого розчину на основі міді, який кристалізується по периметру краплі припою у вигляді ореолу. Тенденція до збільшен-

ня площі спостерігається при розтіканні експериментальних припоїв як по молибдену (рис. 3, а), так і по Ковару (рис. 3, б). Отримані дані свідчать про хороші капілярні властивості припоїв системи Cu–Mn–Co.

Для вивчення якості паяних швів і проведення металографічних досліджень паяли різнірідні зразки-свідки одночасно зі зразками, що підлягали механічним випробуванням. Зовнішній огляд зразків показав, що при паянні різнірідного з'єднання молибден-Ковар (припоєм Cu–Mn–4,5Co) спостерігається формування повної прямої і зворотної галтельної ділянки (рис. 4, а, б).

Локальним мікрорентгеноспектральним аналізом встановлено, що метал паяного шва складається з матриці – твердого розчину на основі міді Cu–Mn–Ni, який містить 2,87% кобальту та 3,73 % заліза. На міжфазній границі молибден–припій формується реакційний шар (шириною біля 1 мкм) на основі молибдену (рис. 5), який збагачений кобальтом (15,80 %), марганцем (14,12 %) та містить незначну кількість міді (1,63 %).

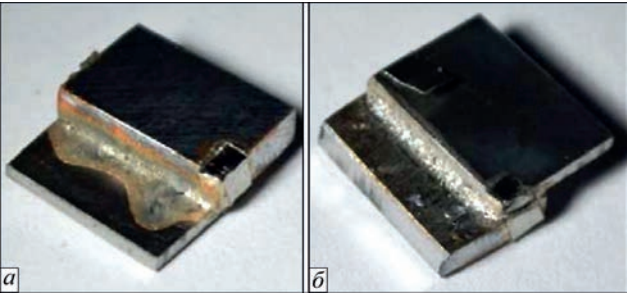


Рис. 4. Зовнішній вигляд паяного різнірідного з'єднання Ковар–Мо: пряма (а) та зворотна галтелі (б)

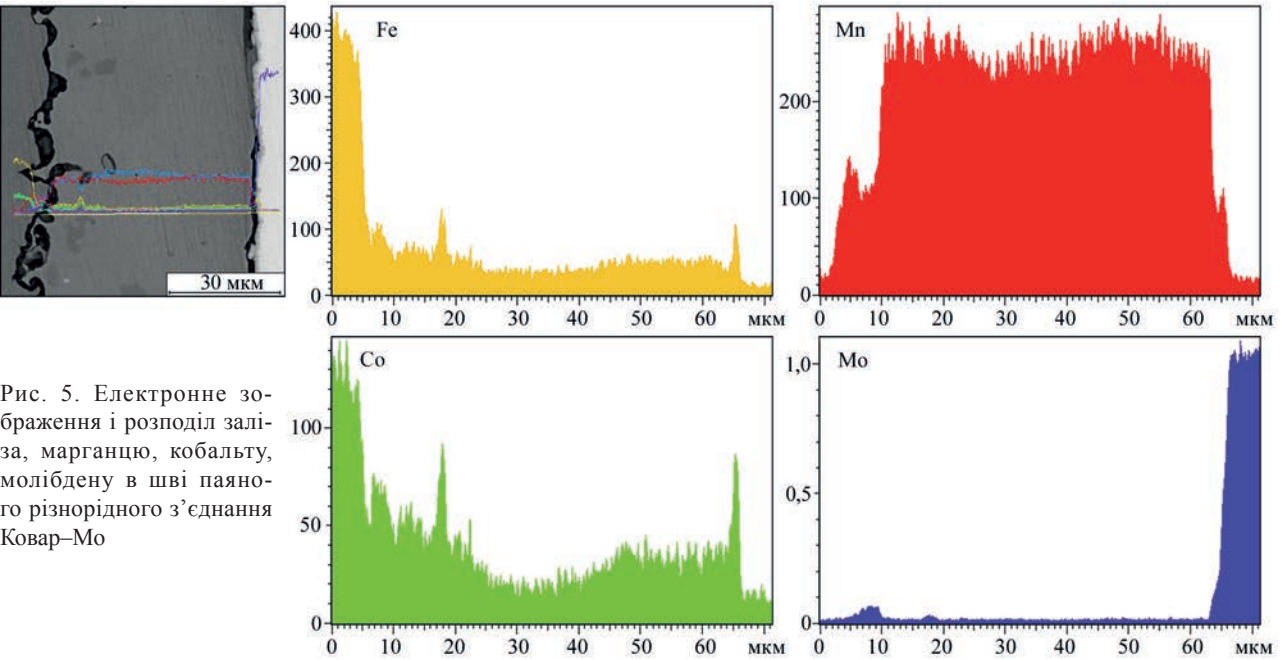


Рис. 5. Електронне зображення і розподіл заліза, марганцю, кобальту, молибдену в шві паяного різнірідного з'єднання Ковар–Мо

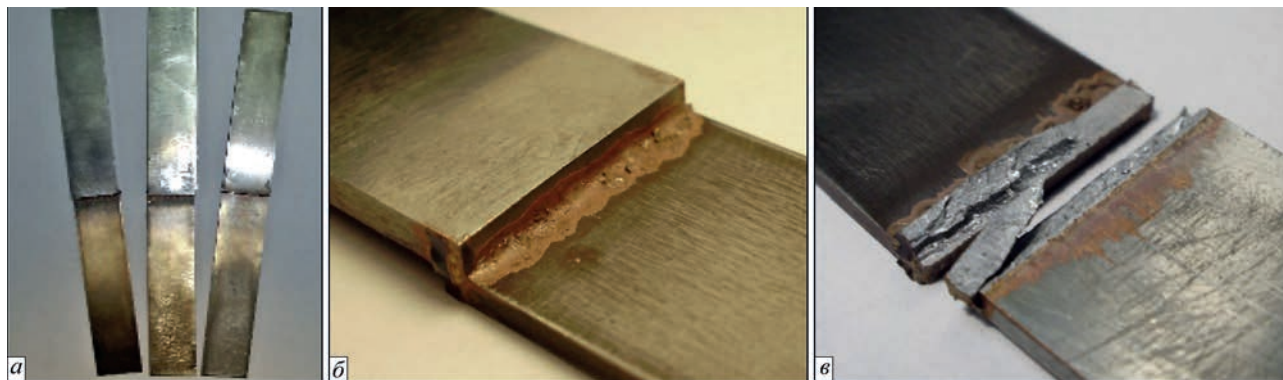


Рис. 6. Зовнішній вигляд паяних зразків Ковар–молібден до (а, б) та після випробувань (в)

Окрім того, на фоні твердого розчину спостерігається незначна кількість дискретних зерен на основі заліза (27,05...28,29 %), які збагачені марганцем (27,94...26,93 %), що підтверджено дослідженнями при скануванні електронним променем паяного зразка (рис. 5).

Необхідно зазначити, що такі особливості формування структури обумовлені нерівноважними умовами кристалізації металу паяного шва, наявністю концентраційного градієнту на міжфазній границі основний метал – припій та дифузійними процесами, що протікають під час паяння. Завдяки дифузійним процесам метал паяного шва насичується елементами основного металу і, як наслідок, відрізняється від вихідного припою за хімічним складом, що відображається на механічних властивостях паяних з'єднань.

Для дослідження механічних властивостей в статичних умовах навантаження при кімнатній температурі використовували напускні пластинчасті паяні зразки [14] Ковар – молібден, що отримані з застосуванням припою №(4) Cu–Mn–4,5Co. Їх зовнішній вигляд у вихідному стані (після паяння) свідчить про якісне формування галтельних ділянок та відсутність пор в швах (рис. 6, а, б).

Під час випробувань руйнування зразків відбувається частково по паяному шву і частково по основному металу – молібдену (рис. 6, в). За результатами механічних випробувань визначено, що міцність на зріз паяних зразків Ковар – молібден знаходиться в межах 168,18...178,87 МПа.

Висновки

Отримані результати досліджень показали, що при розтіканні припоїв системи Cu–Mn–4,5Co по молібдену відбувається зональна кристалізація краплі припою. По периметру краплі формуються явно виражені ділянки з плоским фронтом кристалізації твердого розчину на основі міді (Cu–12,92Mn–4,69Co). В проміжній зоні спостерігаються дендрити твердого розчину на основі міді, що містять перемінну концентрацію марганцю (16,2...32,15 %), що обумовлено дендритною ліквідацією при кристалізації.

В центральній зоні краплі (верхній) на тлі твердого розчину на основі міді кристалізуються дендрити твердого розчину на основі марганцю, температура плавлення яких вища за температуру плавлення твердого розчину на основі міді.

Встановлено, що підвищення температури нагріву призводить до збільшення площі розтікання припою, що обумовлено температурою плавлення твердого розчину на основі міді, яка практично не змінюється.

Міцність на зріз при кімнатній температурі паяних напускних різномірних зразків Ковар – молібден знаходиться в межах 168,18...178,87 МПа. Руйнування зразків відбувається частково по паяному шву і частково по основному металу – молібдену.

Список літератури

1. Титц Т., Уилсон Дж. (1969) *Тугоплавкие металлы и сплавы*. Пер. с англ. Новикова П.К., Новиков И.И. (ред.). Москва, Металлургия.
2. Гуревич С.М., Нероденко М.М., Харченко Г.К. и др. (1982) *Металлургия и технология сварки тугоплавких металлов и сплавов на их основе*. Киев, Наукова думка.
3. Єрмолаєв Г.В., Квасницький В.В., Квасницький В.Ф. та ін. (2015) *Паяння матеріалів*. Підручник. Хорунов В.Ф., Квасницький В.Ф. (ред.). Миколаїв, НУК.
4. Liu, G.W., Valenza, F., Muolo, M.L. et al. (2010) SiC/SiC and SiC/Kovar joining by Ni–Si and Mo interlayers. *J Mater Sci*, 45, 4299–4307. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4337-3>
5. Kumar, S., Upadhyay, A., Dinesh Kumar, P., Agarwal, A. (2015). *Vacuum Brazing of Molybdenum–Kovar and Evaluation of its Joint Strength*. MSF 830–831, 282–285. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.830-831.282>
6. Chen, G., Yin, Q., Guo, C. et al. (2019) Beam deflection effects on the microstructure and defect creation on electron beam welding of molybdenum to Kovar. *Journal of Materials Processing Technology*, 267, 280–288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.017>
7. (1983) *Прецизионные сплавы: Справочник*. Молотиллов Б.В. (ред.). 2-е изд. Москва, Металлургия.
8. Бутурля С.А., Бугаєнко Б.В., Петренко Л.М., Голуб Д.М. (2019) Особливості активного паяння кераміки з металами. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*, 1, 45, 38–42.
9. (1997) *Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник*. Под ред. Лякишева Н.П. (ред.) в 3 т. Т. 2. Москва, Машиностроение.
10. Chen, G., Yin, Q., Dong, Z. et al. (2020) Microstructure evolution analysis for the reaction interface between molybdenum and Kovar acquired by electron beam welding-brazing. *Materials Characterization*, 171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110781>

11. Фавстов Ю.К., Шульга Ю.Н., Рахштадт А.Г. (1980) *Металловедение высокодемпфирующих сплавов*. Москва, Металлургия.
12. Красовський В.П., Габ І.І., Стецюк Т.В., Красовська Н.О. (2017) Змочування кварцового скла легкоплавкими припійними розплавами. *Адгезія расплавов и пайка матеріалов*, 50, 18–27.
13. Дриц М.Е. (1979) *Двойные и многокомпонентные системы на основе меди*. Справочник. Москва, Наука.
14. Максимова С.В., Ковальчук П.В., Воронов В.В. (2019) Вплив кобальту на структуру і технологічні властивості сплавів системи Cu–Mn. *Металофіз. новітні технології*, 41, 10, 1365–135. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1365>
15. Chen, G., Yin, Q., Guo, C. et al. (2019) Beam deflection effects on the microstructure and defect creation on electron beam welding of molybdenum to Kovar. *J. Materials Proc. Technology*, 267, 280–288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.12.017>
16. (1983) *Precision alloys*: Refer. book. Ed. by B.V. Molotilov. 2nd Ed. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
17. Buturlya, E.A., Bugaenko, B.V., Petrenko, L.M., Golub, D.M. (2019) Features of active brazing of ceramics with metals. *Visnyk DDMA*, 1(45), 38–42 [in Ukrainian].
18. (1997) *State diagrams of binary metal systems*: Refer. book. Ed. by N.P. Lyakishev. In: 3 Vol., Vol. 2. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
19. Chen, G., Yin, Q., Dong, Z. et al. (2020) Microstructure evolution analysis for the reaction interface between molybdenum and Kovar acquired by electron beam welding-brazing. *Materials Characterization*, 171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110781>
20. Favstov, Yu.K., Shulga, Yu.N., Rakhshadt, A.G. (1980) *Metals science of high-damping alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
21. Krasovskyi, V.P., Gab, I.I., Stetsyuk, T.V., Krasovska, N.O. (2017) Wetting of quartz glass by low-melting brazing melts. *Adgeziya Rasplavov i Pajka Materialov*, 50, 18–27 [in Russian].
22. Drits, M.E. (1979) *Binary and multicomponent copper-based systems*: Refer. book. Moscow, Nauka [in Russian].
23. Maksymova, S.V., Kovalchuk, P.V., Voronov, V.V. (2019) Influence of cobalt on structure and technological properties of Cu-Mn system alloys. *Metalofiz. Novitni Tekhnologii*, 41(10), 1365–135. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1365>

References

VACUUM BRAZING OF KOVAR–MOLYBDENUM DISSIMILAR JOINTS

S.V. Maksymova, P.V. Kovalchuk, V.V. Voronov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

The features of spreading of brazing filler metal of Cu-Mn-Co system over molybdenum and Kovar were established based on the performed studies. Micro X-ray spectral analysis determined that zonal crystallization of a brazing filler metal droplet on the base metal substrate occurs during spreading: pronounced areas of copper-based solid solution (Cu-12.92Mn-4.69Co) form along the outer perimeter of the droplet, and dendrites of manganese-based solid solution, characterized by a higher melting point, are crystallized in the drop central part. It has been experimentally proven that an increase in the heating temperature contributes to an increase in the spreading area of the brazing filler metal by improving the spreading of copper-based solid solution. It was found that a copper-based solid solution forms in the brazed seam of Kovar-molybdenum dissimilar joints, and a molybdenum-based reaction layer (about 1 μm wide), crystallizes at the molybdenum-brazing filler metal interface. This layer is enriched in cobalt (15.80%) and manganese (14.12%) and contains a small amount of copper (1.63%). As a result of mechanical tests of Kovar-molybdenum overlap joints under static loads at room temperature, destruction occurs partly along the brazed seam and partly along the base metal - molybdenum. 14 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Keywords: Kovar, molybdenum, vacuum brazing, dissimilar joints, copper-manganese-cobalt alloys, microstructure, strength, spreading

Надійшла до редакції
26.05.2021

Нова книга



Электронно-лучевая сварка. Технологии. Оборудование. Материалы: Сб. статей под ред. чл.-кор. НАН Украины В.М. Нестеренкова. — Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, 2021. — 390 с.

Сборник включает 38 статей сотрудников отдела «Физические процессы, техника и оборудование для электронно-лучевой и лазерной сварки» Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, опубликованных за период 2011–2020 гг. В нем обобщен опыт научно-исследовательской и инженерной деятельности отдела в области электронно-лучевой сварки. Может быть интересен и полезен ученым, инженерам и технологам, занимающимся проблемами соединения металлов с помощью высококонцентрированных источников нагрева, а также аспирантам и студентам, изучающим теоретические основы электронно-лучевой сварки и родственных процессов.

ТЕРМОІМПУЛЬСНЕ ЗВАРЮВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ

М.Г. Кораб, М.В. Юрженко, А.В. Вашук, А.М. Гальчун

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

Тканини з поліефірних (поліестерових) синтетичних волокон знаходять широке застосування як при виробництві товарів широкого вжитку, так і у різноманітних технічних виробках. Виробництво фільтрувальних пакетів за допомогою зварювання в даний час в Україні відсутнє, потреба у них досить велика, тому створення подібної технології зварювання є актуальною задачею. Було обрано метод термоімпульсного зварювання тавровими (Т-подібними) рантовими швами із суцільним проплавленням та одночасним розрізанням матеріалу, що зварюється. Розроблено експериментальну установку з нагрівальним елементом із ніхромового дроту діаметром 0,8 мм. За один цикл термоімпульсного зварювання формуються два поздовжніх шва, так звані таврові або Т-подібні рантові шви. Механічні випробування зварних швів фільтрувальної поліестерової тканини, отриманих термоімпульсним зварюванням, показали достатній рівень їх механічної міцності. Для контролю якості готових фільтрувальних пакетів достатньо візуально огляду швів на предмет виявлення непроварів або інших явних дефектів. Бібліогр. 9, рис. 8.

Ключові слова: термопласти, зварні з'єднання, поліестерова тканина, термоімпульсне зварювання

Полімери застосовуються в якості конструкційних матеріалів у самих різних сферах виробництва [1–3]. Зокрема, тканини з поліестерних синтетичних волокон знаходять широке застосування як при виробництві товарів широкого вжитку, так і у різноманітних технічних виробках. Найбільш відомим представником поліестерів, що використовується для виробництва волокон, є поліетилентерефталат (ПЕТ). Традиційна назва ПЕТ у пострадянських країнах – лавсан, інші торгові назви цього полімеру – дакрон (США), терилен (Британія), текадур (Німеччина), теторон (Японія). ПЕТ – це аліфатично-ароматичний поліестер, що отримується поліконденсацією етиленгліколю з терафталевою кислотою. Цей полімер є твердим жорстким термопластом, прозорим у аморфному стані та білим у кристалічному.

Отримання поліестерового волокна відбувається традиційним методом екструзії, тобто продавлюванням розплаву поліетилентерефталату крізь багаточисельні надтонкі отвори филь'єри з наступним повітряним охолодженням. Для виробництва пряжі (ниток) у текстильній промисловості використовуються так звані штапельні волокна спеціально визначеної довжини, не більше 40...45 мм [4]. Переважна кількість усіх синтетичних ниток різних типів використовуються для виробництва різноманітних тканин.

Принцип виготовлення тканин залишається незмінним протягом багатьох століть. Технічні фільтрувальні тканини в залежності від сфери застосування відрізняються способом та щільністю плетіння. У сучасній текстильній промисловості

використовують десятки різних типів плетіння, найпростіший з яких – полотняне, коли поздовжні нитки (основа) та поперечні нитки (уток) по чергово перетинають одна одну. Геометрична щільність тканини визначається як кількість ниток на одиницю довжини [5].

Важлива сфера застосування технічних поліестерових тканин – елементи фільтрів для лабораторного обладнання, призначеного для визначення питомого вмісту сирової клітковини (непоживної частини) у рослинних продуктах. Визначення вмісту клітковини за методом Веенде полягає у тому, що пробу рослинного продукту спочатку піддають гідролізу у розчині сірчаної кислоти, потім луговому гідролізу у розчині їдкого натру [6]. Зразки продуктів при лабораторному аналізі завантажують у спеціальні невеликі пакети із фільтрувальної тканини. Такі пакети в даний час в Україні не виробляються при досить великій потребі на них. Тому розробка вітчизняних технологій та обладнання для виробництва фільтрувальних пакетів є актуальною задачею. Для з'єднання тканин, виготовлених з полімерних термопластичних волокон, можливо використання тих методів зварювання, що розроблені для полімерних плівок [7, 8].

Для виготовлення фільтрувальних пакетів було обрано поліестерову надлегку технічну тканину полотняного плетіння торгової марки Saatifil [9]. Тканина артикулу PES 68/38 стійка до дії кислот та лугів при підвищеній температурі має молочний колір, її питома вага становить 32 г/м².

На рис. 1 у збільшеному вигляді показано структуру поліестерової тканини PES 68/38. Полотняне

М.Г. Кораб – <http://orcid.org/0000-0001-8030-1468>, М.В.Юрженко – <http://orcid.org/0000-0002-5535-731X>

А.В. Вашук – <http://orcid.org/0000-0002-4524-4311>

© М.Г. Кораб, М.В. Юрженко, А.В. Вашук, А.М. Гальчун, 2021

плетіння низької щільності забезпечує формування рівномірної у обох напрямках сітчастої структури тканини, добре проникної для повітря та води. Лінійна щільність тканини становить 90 ниток на сантиметр. Поздовжні та поперечні нитки тканини абсолютно ідентичні, середній діаметр нитки, яка складається із декількох поліестерових моноволокон, становить 40 мкм. Середній розмір квадратних проміжків між нитками становить 68 мкм, отже тканина під час досліджень може надійно утримати фрагменти подрібненого матеріалу з мінімальним розміром до 0,1 мм.

Розмір фільтрувального пакету з поліестерової тканини 120 на 45 мм, його складно та малопродуктивно виготовляти за стандартною технологією шиття нитками. Існує технологія зварювання фільтрувальних пакетів ультразвуковим способом, за якою напускним швом зі стрічки формується тканевий рукав, а на другому етапі поперечним тавровим швом утворюється «дно». Однак міцність таких швів становить не більше 35...40 % від рівня основного матеріалу, що призводить до їх частих руйнувань в процесі проведення аналізу. Перспективним способом з'єднання надтонкого термопластичного матеріалу при виготовленні фільтрувальних пакетів є термоімпульсне зварювання нагрітим інструментом.

Зварювання надтонких полімерних матеріалів з товщиною до 250 мкм, які дуже чутливі до надлишкового нагрівання матеріалу в зоні з'єднання, виконують термоімпульсним способом за допомогою нагрівального інструмента малої маси та теплоємності, який розігрівається на короткий час потужним імпульсом електричного струму. В даному випадку було обрано метод термоімпульсного зварювання тавровими (Т-подібними) рантовими швами із суцільним проплавленням та одночасним розрізанням матеріалу, що зварюється.

Для оптимізації технологічної схеми зварювання тонкої поліестерової тканини було розроблено експериментальну установку (рис. 2). На прямокутній основі 2 закріплені усі деталі установки та розміщуються матеріали, що зварюються 1. Дротяний нагрівальний елемент 3 закріплений в

нижній частині корпусу верхнього електроду 4. З задньої сторони до електроду прикріплені дві консолі 5, зв'язані своїми кінцями з вертикальними стійками 6 горизонтальною віссю 7. Верхній електрод з консолями може гойдатися відносно осі 7, входячи у контакт із площиною основи, його власної ваги достатньо для створення робочого зусилля притискання P . Нагрівальний елемент було виготовлено з циліндричного ніхромового дроту діаметром 0,8 мм та довжиною 150 мм. Нагрівач через ізоляційну прокладку був закріплений в нижній частині рухомого електроду установки з приєднанням до нього дротів електричного живлення.

Порівнювали дві технологічні схеми формування фільтрувального пакету. В першому варіанті зварювали два зразки тканини, накладені один на другий та отримували фільтрувальні пакети типу 8а з двома бічними та одним нижнім швом. В другому варіанті зварювали зразки тканини, складені навпіл у поздовжньому напрямку та отримували пакети типу 8б з двома бічними швами та дном, сформованим складкою тканини.

При проходженні крізь нагрівальний елемент електричного струму величиною 9...10 А дріт протягом приблизно 1 с нагрівається до температури насичення на рівні 270...290 °С, і в подальшому його температура збільшується повільно. Отже, нагрів зони зварювання регулювали тривалістю робочого імпульсу струму.

Етапи процесу термоімпульсного зварювання поліестерової тканини схематично показані на рис. 3. На початковому етапі (рис. 3, а) нагрівальний елемент 1 підходить до місця зварного з'єднання зразків тканини 2, що укладені у два шари на пласку основу 3. Після цього вмикається джерело живлення та починається робочий імпульс струму. На другому етапі (рис. 3, б) розігрітий дротяний інструмент починає розплавляти полімерний матеріал тканини. Під дією робочого зусилля притискання нагрівальний інструмент поступово опускається донизу, розплавляючи спо-

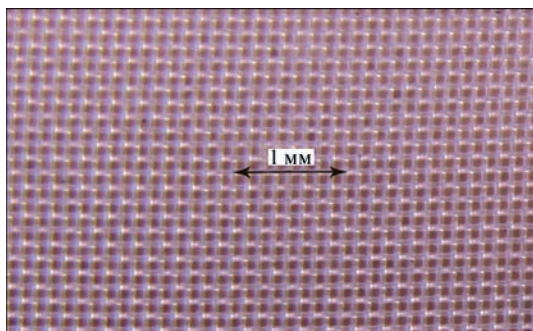


Рис. 1. Структура легкої поліестерової (лавсанової) фільтрувальної тканини полотняного плетіння

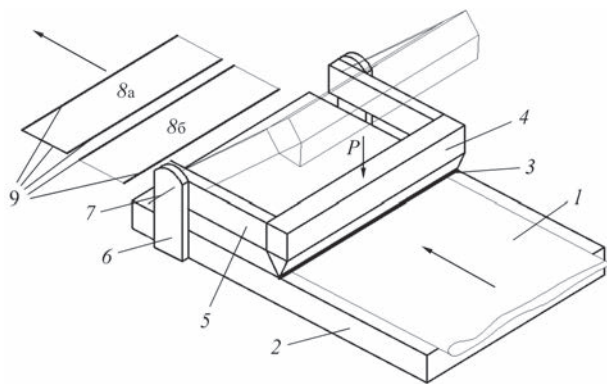


Рис. 2. Принципова схема експериментальної установки для термоімпульсного зварювання фільтрувальних пакетів (позначення. див. у тексті)

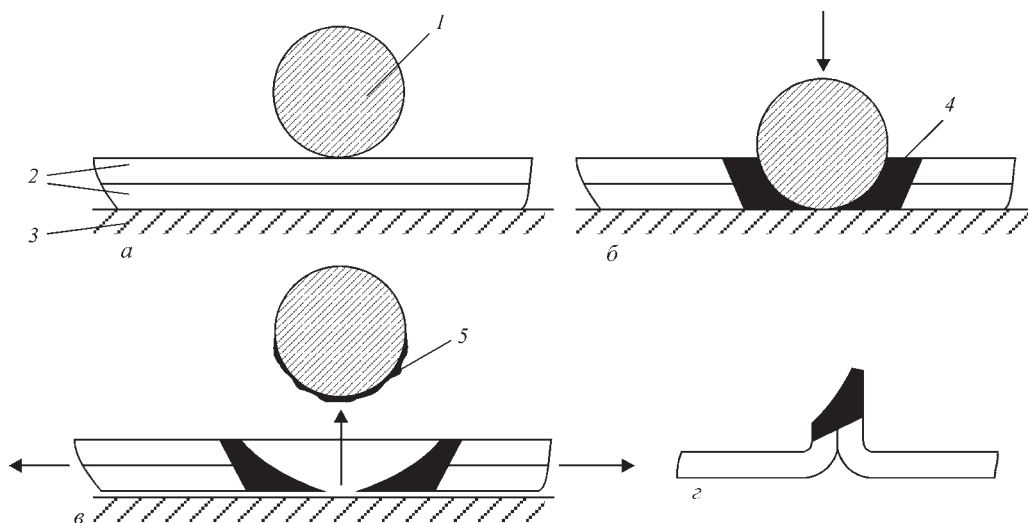


Рис. 3. Основні етапи технологічного процесу термоімпульсного зварювання з одночасним тепловим розрізанням (позначення див. у тексті)

чатку верхній шар тканини, а потім нижній. Закінчується це проплавлення в момент, коли нагрівач торкається поверхні основи, а обидва шари тканини розрізаються циліндричним дротом у місці з'єднання. По обидва боки нагрівача формуються невеликі об'єми розплавленого полімеру 4, які у подальшому утворюють зварні шви.

Таким чином, за один цикл термоімпульсного зварювання формуються два поздовжніх шва по обидва боки циліндричного нагрівального елемента. Після повного проплавлення тканини її розрізані частини відводяться одна від одної (рис. 3, в), нагрівальний елемент піднімається та виводиться із зони зварювання. На поверхні дроту нагрівача залишається невелика кількість розплавленого полімерного матеріалу 5. Якщо тривалість робочого імпульсу струму продовжити на 1...2 с, налиплий матеріал повністю випаровується та практично не впливає на якість шва, який буде зварено у наступному циклі. Розроблена технологія дозволяє отримувати так звані таврові або Т-подібні рантові шви, форма та розміри яких залежать від режиму нагрівання полімерного матеріалу. Зазвичай такі шви у робочому стані розташовуються перпендикулярно основній площині тканини (рис. 3, г).

Випробування зварених пакетів в умовах, що моделюють робочі навантаження, показали, що найбільш небезпечними з точки зору руйнування є початкові ділянки швів біля горловини мішечка та кінцеві ділянки швів на кутах внизу виробу. Тому було вирішено вивертати фільтрувальні пакети перед використанням, щоб ранти Т-подібних швів в робочому середовищі були направлені всередину. Навантаження на небезпечні ділянки зварних швів у цьому випадку суттєво зменшується через зміну геометричної форми тканини (рис. 4).

Т-подібний рантовий шов поліестерової тканини утворюється в результаті розплавлення ниткового полімерного матеріалу тканини, який піс-

ля охолодження та ствердження формує суцільну жорстку полімерну структуру. В результаті утворюється зварне з'єднання гнучкого сітчастого полотнища тканини, що складається з волокнистого матеріалу з твердим затверділим полімерним матеріалом шва (рис. 5). При навантаженні Т-подібного рантового шва основні напруження концентруються у вузькій зоні вздовж шва, де волокнистий нитковий матеріал тканини стикується з затверділим жорстким полімерним матеріалом зварного шва. Тому розміри та форма самого шва практично не впливають на міцність зварного з'єднання.

Сітчастий волокнистий полімерний матеріал фільтрувальної тканини досить швидко розплавляється при температурі 260...270 °С, тому навіть при нетривалому контакті нагрівача з полотнищем, протягом 3...5 с, на тканині розплавляється поздовжня стрічка шириною 1...2 мм. В результаті після ствердження розплаву утворюється твердий поліестеровий рант шириною від 1 до 3 мм з нерівномірно розподіленою вздовж шва товщи-



Рис. 4. Вивернутий фільтрувальний пакет, підготовлений для використання

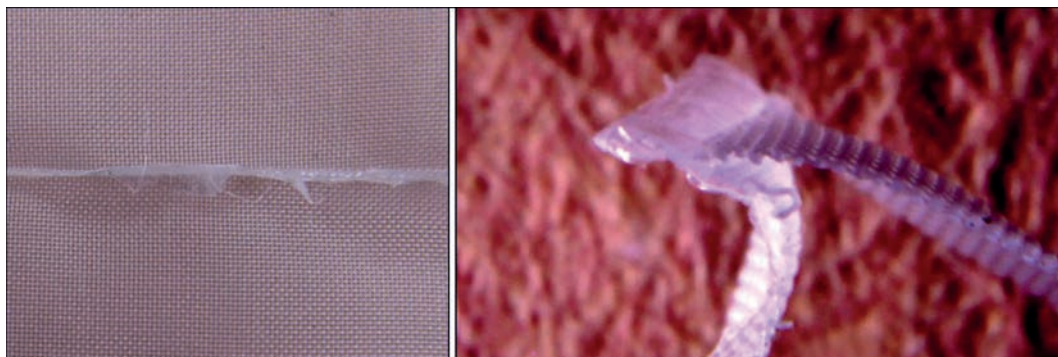


Рис. 5. Поздовжній тавровий шов поліестерової фільтрувальної тканини

ною. При цьому безпосередньо зварне з'єднання у місці контакту ниток тканини та твердого шва має практично однакову товщину, що приблизно дорівнює товщині одного шару фільтрувальної тканини. Це добре видно на збільшеному зображенні поперечного перерізу шва (рис. 5).

Для оцінки міцнісних параметрів Т-подібних зварних швів поліестерової тканини було проведено серію механічних випробувань. Міцність зварних з'єднань тканини визначали за допомогою розривної машини випробуванням на розтяг стрічкових зразків шириною 50 мм з рантовим зварним швом у центрі зразка. З перевищенням критичного рівня навантаження починається руйнування зварного шва у найслабших місцях по обидва боки від жорсткого рантового утворення, а затверділий полімерний матеріал шва лишається неушкодженим. Сітчаста структура полотняного переплетіння тканини при відриванні основного полотна від зварного шва зберігає свою регулярність та лишається практично неушкодженою. Отже, головними чинниками, які впливають на міцність зварного з'єднання фільтрувальної тканини, є фізичні та геометричні параметри місця з'єднання кожної поперечної відносно зварного шва нитки тканини з жорстким полімерним матеріалом Т-подібного ранту. Таким чином, міцність усього зварного шва утворюється як інтегральна сума міцності приєднання до монолітного матеріалу окремих ниток.

Полотняне сітчасте плетіння тканини з невеликою щільністю прилягання ниток одна до одної створює симетричну просторову структуру тканини без суттєвих відмінностей між формою поздовжніх та поперечних ниток. Усі нитки тканини після переплетіння набувають хвилястої синусоподібної форми, отже у зоні з'єднання тканини зі швом присутні почергові «верхні» та «нижні» поперечні нитки, переплетені відносно поздовжньої нитки. Відповідно і сплюснення на нитках біля з'єднання утворюються почергово то зверху, то знизу, що на фотографіях шва в плані виглядає, як чергування таких утворень через один (рис. 6).

При руйнуванні зварного шва тканини під дією навантаження на розтяг розрив відбувається по лі-

нії з'єднання, яка утворюється ланцюгом сплюснених поперечних ниток, частково з'єднаних з залишками поздовжньої нитки, що не повністю розплавилась в процесі зварювання. Вздовж відіраного від шва фрагменту кромки тканини почергово слідують один за одним деформовані кінці верхніх та нижніх поперечних ниток. На збільшеному зображенні відіраної кромки (рис. 7) видно, що деформація кінців ниток являє собою саме сплюснювання волокнистого циліндричного матеріалу, який стає плоским, розширюється та зменшує свою товщину.

Схема формування зварного з'єднання сітчастої ниткової структури, яку являє собою поліестерова тканина, представлена на рис. 8. Фрагменти тканини, що з'єднуються, утворені переплетінням поперечних відносно лінії шва та поздовжніх ниток. В процесі зварювання частина ниток, яка опиняється безпосередньо під нагрівальним інструментом, розплавляється та утворює суцільний масив полімерного розплаву вздовж усієї лінії шва. Оскільки

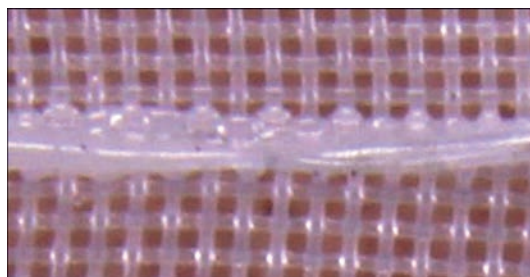


Рис. 6. З'єднання сітчастої структури полотна фільтрувальної тканини з матеріалом зварного шва

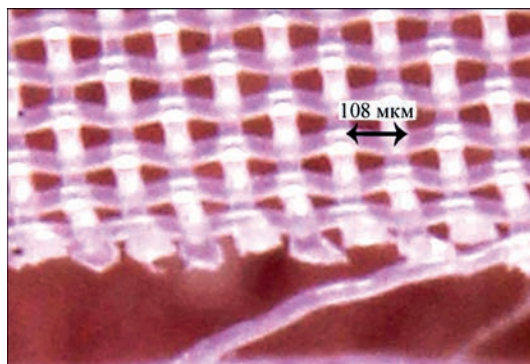


Рис. 7. Деформовані кінці поперечних ниток, відірваних від зварного шва сітчастої тканини

процес нагрівання шва нетривалий та становить одиниці секунд, нитки, що не мають безпосереднього контакту з нагрівачем, практично не зазнають термічного впливу та не змінюють своїх розмірів та форми. Це стосується поздовжніх відносно шва ниток, які в сітчастій тканині розділені між собою вільними проміжками у 65...70 мкм. Поздовжні нитки, безпосередньо наближені до лінії сплавлення, оплавляються лише частково та на вибіркових ділянках в залежності від їх відстані до нагрівача під час зварювання.

Навпаки, усі поперечні нитки неминуче контактують з нагрівальним інструментом під час прогріву тканого матеріалу, відповідні ділянки їх розплавляються та беруть участь в утворенні вання гомогенного розплаву. Через зону переходу від полімерного розплаву до неперетвореного волокнистого полімерного матеріалу нитки саме і формується лінія з'єднання тканин, що зварюються. На схемі, рис. 8 показано, що товщина ниток в цих місцях суттєво зменшується в результаті їх сплющування, оскільки дріт нагрівального інструмента діаметром 800 мкм діє як пуансон пресу на нитку з середнім діаметром у 40 мкм.

Після завершення прогріву та видалення нагрівального інструмента масив суцільного полімерного розплаву твердіє та утворює вздовж усієї лінії зварювання жорсткий шов. Оскільки в даному випадку відбувається зварювання з розрізанням, одночасно формуються два поздовжні шви по обидві боки від струни нагрівача. Об'єм розплавленого матеріалу ниток невеликий, тому і поперечні розміри жорсткого шва становлять долі міліметра. З іншого боку, при розніманні розрізаних теплом частин тканини утворюються тяжі з розплаву, які після твердіння утворюють в деяких місцях шва «хвости» у вигляді волокон різної форми і довжини.

Таким чином, з'єднання сітчастої тканини з жорстким швом відбувається через деформовані сплюснені ділянки поперечних ниток, міцність яких безумовно є зменшеною у порівнянні з основною

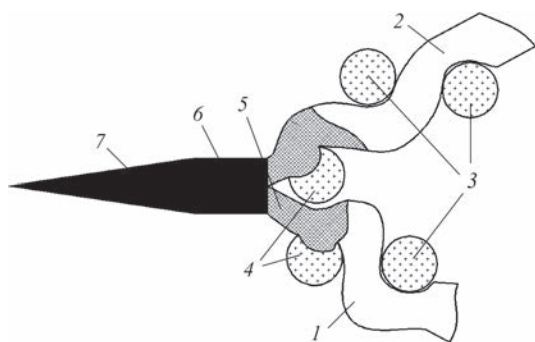


Рис. 8. Схема утворення відрізного таврового шва сітчастої фільтрувальної тканини: 1, 2 – нижня та верхня поперечні нитки; 3 – поздовжні недеформовані нитки; 4 – поздовжні частково оплавлені нитки; 5 – зміни форми у місцях приєднання поперечних ниток; 6 – суцільний затверділий шов; 7 – «хвіст» затверділого розплаву, що утворюється при розніманні швів

міцністю нитки. Кожна нитка тканини має складну внутрішню структуру та сплетена з декількох десятків первинних штапельних або безперервних волокон поліестеру. У зварному з'єднанні ці волокна у сплюснених ділянках частково рвуться, змінюють кут нахилу та взаємну орієнтацію. Зберегти неушкоджену волокнисту структуру нитки при утворенні зварного з'єднання практично неможливо.

Механічні випробування зварних швів фільтрувальної поліестерової тканини, отриманих термоімпульсним зварюванням, показали, що максимальний рівень їх механічної міцності на розрив не перевищує 60...70 % відсотків від рівня основного матеріалу. Враховуючи високу первинну міцність тканого поліестерового матеріалу, така міцність швів є цілком достатньою для надійної експлуатації виготовлених з нього фільтрувальних пакетів. Зварені фільтрувальні пакети після вивертання повністю готові до використання. Беручи до уваги невеликий рівень механічних навантажень на тканину та зварні шви пакету при роботі його в складі лабораторної установки, для контролю якості готових виробів достатньо візуально огляду швів на предмет виявлення несправів або інших явних дефектів.

Висновки

Дослідження показали, що найбільш ефективним методом з'єднання сітчастої фільтрувальної поліестерової тканини є теплове термоімпульсне зварювання. Розроблено технологію виготовлення фільтрувальних пакетів з сітчастої поліестерової тканини з використанням модифікованої схеми термоімпульсного зварювання рантовими швами із суцільним проплавленням та одночасним розрізанням матеріалу, що зварюється. Створено зварювальну установку, проведено дослідження морфології та міцнісних характеристик зварних з'єднань, отриманих за допомогою модифікованого способу термоімпульсного зварювання. Визначено, що отримані зварні з'єднання відповідають необхідним критеріям цільового використання виробів з відповідних надтонких плетених тканин.

Список літератури

1. Аржаков, М.С., Жирнов, А.Е., Ефимова и др. (2012) *Высокомолекулярные соединения* [Macromolecular compounds]. Москва, Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова.
2. Buketov, A., Brailo, M., Yakushchenko, S., Sapronova, A. (2018) Development of Epoxy-Polyester Composite with Improved Thermophysical Properties for Restoration of Details of Sea and River Transport [Rozrobka epoksydno-poliefirnogo kompozytu z polipshenymy teplofizychnymy vlastyvostyamy dlya vidnovlennya detaley mors'koho ta richkovoho transportu]. *Advances in materials science and engineering*, 1–6. Doi: <https://doi.org/10.1155/2018/6378782>.
3. Buketov, A., Brailo, M., Yakushchenko, S. et al. (2019) Investigation of Tribological Properties of Two-Component Bidisperse Epoxy-Polyester Composite Materials for Its Use in the Friction Units of Means of Sea Transport [Doslidzhennya trybolohichnykh vlastyvostey dvokomponentnykh dvodyspersnykh epoksydno-poliefirnykh kompozytsiynykh materialiv

- dlya yoho vykorystannya v vuzlakh tertya zasobiv mors'koho transportu]. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 3(63), 171–182. Doi: <https://doi.org/10.3311/PPme.13161>.
4. *Polyester Manufacturing*. Available at: <http://www.teonline.com/knowledge-centre/polyester-manufacturing.html> [Accessed 10 May 2021].
 5. Савостицкий Н.А., Амирова Э.К. (2012) *Материаловедение швейного производства*. Москва, Академия.
 6. ДСТУ 2004. ISO 5498:1981. *International Standards Office. Продукти сільськогосподарські харчові. Загальний метод визначення вмісту сирової клітковини*.
 7. Jevšnik, S., Vasiliadis, S., Bahadir, S. K. et al. (2016) Applying Heat for Joining Textile Materials. In *Joining Technologies. Intech Open*. Doi: <https://doi.org/0.5772/64309>.
 8. Midha, V.K., Dakuri, A. (2017) Spun bonding technology and fabric properties: a review [Tekhnolohiya pryadenoho skleyuvannya ta vlastyvoli tkanyny: ohlyad]. *J. Textile Eng Fashion Techno*, 1(4), 126–133. Doi: <https://doi.org/10.15406/jteft.2017.01.00023>.
 9. Фільтрувальні поліестерові тканини торгової марки Saatifil. Available at: <http://www.saati.com/images/filtration/tds-saatifil-polyester.pdf> [Дата звернення 10 травня 2021].
- References**
1. Arzhakov, M.S., Zhirnov, A.E., Efimova, A.A. et al. (2012) *Macromolecular compounds*. Moscow, MGU [in Russian].
 2. Buketov, A., Brailo, M., Yakushchenko, S., Sapronova, A. (2018) Development of epoxy-polyester composite with improved thermophysical properties for restoration of details of sea and river transport. *Advances in Materials Sci. and Engineering*, 1–6. Doi: <https://doi.org/10.1155/2018/6378782>.
 3. Buketov, A., Brailo, M., Yakushchenko, S. et al. (2019) Investigation of tribological properties of two-component bidisperse epoxy-polyester composite materials for its use in the friction units of means of sea transport. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 3(63), 171–182. Doi: <https://doi.org/10.3311/PPme.13161>.
 4. *Polyester Manufacturing*. <http://www.teonline.com/knowledge-centre/polyester-manufacturing.html> [Accessed 10 May 2021].
 5. Savostitskiy, N.A., Amirova, E.K. (2012) *Materials science of clothing manufacture*. Moscow, Akademiya [in Russian].
 6. DSTU 2004. ISO 5498:1981. *International Standards Office. Agricultural food products. Determination of crude fibre content. General method*.
 7. Jevsni, S., Vasiliadis, S., Bahadir, S. K. et al. (2016) Applying heat for joining textile materials. In *Joining Technologies. Intech Open*. Doi: <https://doi.org/0.5772/64309>.
 8. Midha, V.K., Dakuri, A. (2017) Spun bonding technology and fabric properties: A review *J. Textile Eng. Fashion Techno.*, 1(4), 126–133. Doi: <https://doi.org/10.15406/jteft.2017.01.00023>.
 9. *Filter polyester cloth of trade mark Saatifil*. <http://www.saati.com/images/filtration/tds-saatifil-polyester.pdf>

THERMAL PULSE WELDING OF POLYMERIC MATERIALS

M.G. Korab, M.V. Iurzhenko, A.V. Vashchuk, A.M. Galchun

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

The aim of the work is to test the technology of welding filter bags made of polyester ultralight fabric of linen weaving. The tasks are the choice of welding method, creating an experimental installation, adjusting the parameters of the welding process and evaluating the quality of the produced welds. The method of heat-pulse welding with T-shaped (T-shaped) welt seams with continuous penetration and simultaneous cutting of the welded material was chosen. An experimental installation with a heating element made of nichrome wire with a diameter of 0.8 mm was developed. During one cycle of heat-pulse welding, two longitudinal welds are formed, the so-called T-shaped or T-shaped welt seams, the shape and size of which depend on the heating mode of the polymeric material. Welded filter bags were inverted before using in such a way that T-shaped welds in the working environment were directed inwards and the load on dangerous areas of welds was reduced. Mechanical tests of welds of filter polyester fabric produced by thermal pulse welding showed a sufficient level of their mechanical strength. To control the quality of the finished filter bags, it is sufficient to visually inspect the welds for leaks or other obvious defects. Results of the work is the technology of manufacturing filter bags from mesh polyester fabric by means of thermopulse welding of welt seams with continuous penetration and cutting of the welded material is worked out. The welding installation was created. Parameters of a welding mode were established. It was determined that produced welded joints in terms of strength characteristics meet the necessary criteria for the intended use of filter bags made of ultra-thin polymeric fabrics. 9 Ref., 8 Fig.

Keywords: thermoplastics, welded joints, polyester fabric, thermopulse welding

Надійшла до редакції 21.02.2021

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/twpj
Передплатний індекс 21791



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



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

СКІН-ЕФЕКТ В М'ЯКІЙ БІОЛОГІЧНІЙ ТКАНИНІ І ОСОБЛИВОСТІ ЇЇ НАГРІВУ ПРИ АВТОМАТИЗОВАНОМУ БІПОЛЯРНОМУ ЗВАРЮВАННІ

В.Г. Соловійов, Ю.М. Ланкін, І.Ю. Романова

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

Скін-ефект, що виникає в електричному ланцюзі при високочастотній електрохірургії, включаючи електрозварювання м'яких біологічних тканин (МБТ) електродами для біполярного зварювання, викликає інтерес дослідників як можливе джерело значної нерівномірності нагріву МБТ при автоматизованому зварюванні. Проведено дослідження математичними методами протікання електричних і теплових процесів при автоматизованому біполярному зварюванні з урахуванням і без урахування дії скін-ефекту на частоті 300 кГц. Визначено, що в біологічній тканині скін-ефект викликає нерівномірність нагріву в меншій мірі. Головними причинами, які впливають на нерівномірність нагріву, є наявність гострих ребер на поверхні електродів, що контактують з тканиною, ступінь стискання м'яких біологічних тканин за тисками електродів, розмір проміжку стиснутої МБТ між електродами, а також час протікання процесу нагріву МБТ. Бібліогр. 13, рис. 6.

Ключові слова: скін-ефект, біполярні електроди, електрозварювання м'яких тканин, біологічна тканина, анізотропія питомої електропровідності

Електрохірургія із застосуванням струмів високої частоти (СВЧ) більше 200 кГц [1] набула широкого поширення в медицині. При проходженні СВЧ через електричний ланцюг провідників, якими є електроди електрохірургічних інструментів і ділянка м'яких біологічних тканин (МБТ), яка зварюється, виникає високочастотне електромагнітне поле, що приводить до концентрації щільності струму поблизу поверхні провідників. Виникає так званий поверхневий ефект (скін-ефект) [2]. Внаслідок нерівномірного розподілу щільності струму відбувається нерівномірний розподіл джоулевого нагріву в поперечній площині перерізу провідника. Однією з вимог якості електрозварювання м'яких тканин є рівномірність нагріву зварюваної ділянки МБТ. У зв'язку з цим ряд дослідників в своїх роботах приділили увагу рівномірності нагріву МБТ при проведенні електрохірургічних операцій з урахуванням впливу скін-ефекту. В роботах [3, 4] розглянуто вплив скін-ефекту, який виникає на частоті 440 кГц в тонкому циліндричному монополярному електроді при приварюванні сітківки ока, яка відшарувалася, до судинної оболонки ока. Під мікроскопом явно видно коагуляційні кільця як сліди проходження струму. Детально розглянуто питання моделювання скін-ефекту в електроді, але не наведено аналіз електричних і теплових процесів в МБТ при виникненні коагуляційних кілець на оболонці ока. У роботах [5–8] основну увагу приділено усуненню нерівномірності розподілу щільності струму в електродах при наявності

скін-ефекту, але без аналізу яким чином ця нерівномірність позначається на розподілі джоулевого тепла в МБТ.

Мета роботи – показати результати математичного аналізу протікання електричних і теплових процесів в МБТ (сердечний м'яз свині) при автоматизованому біполярному зварюванні з різною мірою стискання тканини між електродами з урахуванням дії скін-ефекту на частоті 300 кГц, а також в припущенні, що скін-ефект відсутній.

Модель, на якій проводився математичний експеримент дії скін-ефекту на МБТ, побудована з використанням пакету COMSOL Multiphysics 5.3a. До складу моделі включені модулі («physics») «Electric Currents» і «Heat Transfer in Solids» з вирішувачем «Multiphysics/Electromagnetic Heating», який дозволяє об'єднати ці різні фізики для вирішення завдань моделі. В якості матеріалів, використовуваних в моделі, прийняті сердечний м'яз свині і мідні накладки браншей (електроди). Діапазон встановлюваного тиску електродів складав 15...1100 кПа. Переріз електродів 3×10 мм. Розміри фрагмента сердечного м'яза склали: первинна товщина нестиснутої тканини $mh = 6,9$ мм, ширина 35 мм і глибина 25 мм. Коефіцієнт стискання розраховується за формулою

$$K_{\text{ст}} = \left(1 - \frac{hs}{mh}\right) \cdot 100 \%, \text{ де } hs - \text{товщина МБТ між електродами.}$$

Соловійов В.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-1454-7520>, Ланкін Ю.М. – <https://orcid.org/0000-0001-6306-8086>, Романова І.Ю. – <https://orcid.org/0000-0001-7154-1830>

© В.Г. Соловійов, Ю.М. Ланкін, І.Ю. Романова, 2021

Виходячи з положень теорії подібності [9], у пакеті COMSOL Multiphysics створена модель, що враховує подібність її геометричних параметрів з геометричними параметрами фізичної моделі. Моделювання дозволило визначити анізотропію питомої електропровідності в зоні локального стискання МБТ (рис. 1) [10].

Основна умова для моделювання була такою, щоб забезпечити найкращу відповідність геометричної частини моделі з геометричними параметрами фізичного експерименту, при цьому необхідно було використати фізичні властивості МБТ свині, що відповідають серцевому м'язу, з урахуванням анізотропії її питомої електропровідності при стисканні.

Математичний експеримент проводився на частоті змінного гармонійного струму $f = 300$ кГц.

Для поля, що коливається з частотою f , маємо:

$$\Delta \sim 50 \sqrt[3]{(\sigma \mu f)^{-1}}, \quad (1)$$

де Δ – товщина скін-шару, м; σ – питома електропровідність, См/м; μ – відносна магнітна проникність, відн. од.

Якщо товщина скін-шару велика в порівнянні з розмірами тіла ($\Delta \gg lh$), то розподіл магнітного поля в кожний момент часу буде таким же, як в стаціонарному випадку при заданому значенні поля поза тілом. При цьому вихровим електричним полем і пов'язаними з ним резистивними втратами можна нехтувати [11].

Якщо врахувати анізотропію питомої електропровідності в зоні локального стискання МБТ (рис. 1), то можна розрахувати залежність Δ від $K_{\text{ст}}$. Розрахунки показують, що найменша товщина скін-шару для умов нашого експерименту складає 1,7 м (рис. 2). Це набагато більше розмірів того електромагнітного поля, що діє навколо електродів з поперечним перерізом 3×10 мм. Як відомо, електрозварювання МБТ відрізняється від електрокоагуляції обов'язковим застосуванням значного зусилля стискання електродами [12]. Тиск

електродів веде до руйнування мембран клітин (можливо), до перенесення електропровідної тканини води від центру електродів до периферії у напрямку зниження тиску, до підвищення температури пароутворення і максимальної температури тканини. У зв'язку з цим при максимальній мірі стискання серцевого м'яза свині $K_{\text{ст}} = 78\%$ товщина скін-шару (рис. 2) складає 2,5 м.

З урахуванням викладеного з великою часткою достовірності можна стверджувати, що струм високої частоти, що проходить через МБТ, в умовах електрохірургічних операцій на м'яких біологічних тканинах практично не повинен викликати змін в розподілі щільності струму у МБТ.

Виникає питання, що відбувається з розподілом щільності струму на поверхні електродів при їх зіткненні з МБТ. Оскільки МБТ є елементом ланцюга, по якому проходить СВЧ, то нерівномірності струму, пов'язаної зі скін-ефектом, на межі зіткнення електродів з МБТ бути не повинно. Проте зворотна ситуація спостерігалася з «коагуляційними кільцями» на сітківці ока в роботі [3].

У нашій моделі електроди представлені у вигляді мідних накладок браншей. СВЧ протікає від джерела напруги через мідну накладку розміром $3 \times 10 \times 1,5$ мм, потім через ділянку МБТ, стиснутою електродами, і далі через другу мідну накладку. Електричний ланцюг замикається на джерело напруги.

Навіть для провідника круглого перерізу розрахунок скін-ефекту представляє значні труднощі. Для виконання розрахунку використовують багато припущень по прямолінійності провідника, нескінченності його довжини та ін. Для провідників, що мають прямокутний переріз, в роботі [13] розрахунок базується на припущенні, що переріз провідника складається з наборів провідників круглого перерізу, діаметр яких дорівнює подвоєній товщині скін-шару і, відповідно, на припущенні щодо прямолінійності провідника і нескінченності його довжини.

Для нашої моделі для спрощення розрахунку впливу скін-ефекту приймаємо наступні припущення:

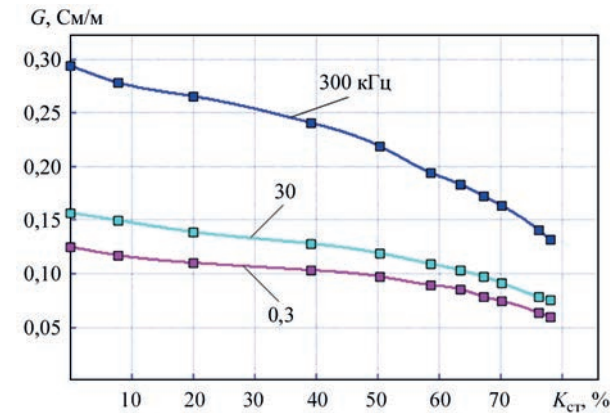


Рис. 1. Залежність питомої електропровідності серцевого м'яза свині G від міри стискання $K_{\text{ст}}$ для частот 0,3, 30 та 300 кГц

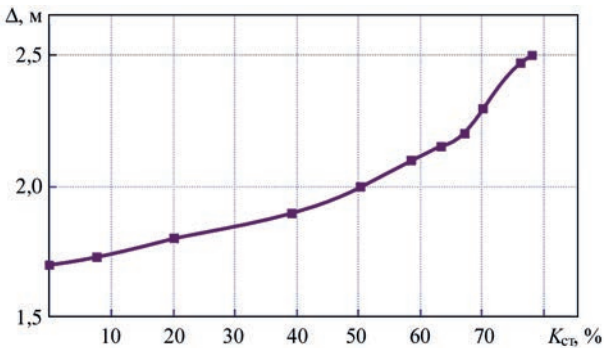


Рис. 2. Товщина скін-шару в серцевому м'язі свині при $f = 300$ кГц залежно від міри стискання

– скін-ефект є присутнім тільки в мідних накладках баншей;

– оскільки скін-ефект проявляється в концентрації щільності струму на поверхні провідника, здійснюємо імітацію скін-ефекту за рахунок заданої нелінійності питомої електропровідності по довжині і ширині мідної накладки;

– залежність зменшення щільності струму від частоти в міді при віддаленні від поверхні добре апроксимується гіперболічним косинусом;

– скін-ефект проявляється як уздовж ширини, так і уздовж довжини мідної накладки, при цьому щільність струмів усереднюється.

Позначимо половину ширини мідної накладки як $a_{\text{ш}}$, половину довжини як $b_{\text{д}}$. Тоді $a_{\text{ш}} = 1,5$ мм, $b_{\text{д}} = 5$ мм. Координата X накладки знаходитиметься в межах $\{-a_{\text{ш}} \dots a_{\text{ш}}\}$. Координата Y накладки знаходитиметься в межах $\{-b_{\text{д}} \dots b_{\text{д}}\}$. Щільність струму J_x по координаті X обчислюється за формулою:

$$J_x = \text{ch}(kf^{0.5}X), \quad (2)$$

аналогічно для

$$J_y = \text{ch}(kf^{0.5}Y). \quad (3)$$

На лівій та правій поверхнях мідної накладки, що обмежують її ширину, щільність струму буде $J_{\text{кш}} = \text{ch}(kf^{0.5}a_{\text{ш}})$. Відповідно на протилежних поверхнях, що обмежують довжину накладки, щільність струму буде $J_{\text{кд}} = \text{ch}(kf^{0.5}b_{\text{д}})$. Значення коефіцієнта k визначається шляхом зворотного перетворення гіперболічних косинусів у формулах (2) та (3) і підстановки значення товщини скін-шару для міді при частоті 300 кГц, отримане за допомогою (1). Оскільки для міді $\Delta = 0,119$ мм, то $k = 15,36$.

У зв'язку з тим, що щільність струму J пропорційна питомій електропровідності σ елементарного майданчика нормальною вектору струму, то приймаємо:

$$\sigma(X, Y) = 6E^7 \left(\frac{J_x(X)}{J_{\text{кш}}} + \frac{J_y(Y)}{J_{\text{кд}}} \right) 0,5.$$

Замінивши в розрахунковій частині моделі значення питомої електропровідності міді, яке

незмінне в кожному елементарному об'ємі мідної накладки ($\sigma = 6E^7$, См/м) для постійного струму, на $\sigma(X, Y)$, отримаємо розподіл щільності струму в мідних накладках баншей, що відповідає розподілу при скін-ефекті для частоти 300 кГц. На рис. 3 представлено графіки розподілу відносної щільності струму уздовж ширини і довжини мідних накладок баншей, а також 3d зображення $\sigma(X, Y)$.

Щоб отримати певніше розуміння того, як розподіляється щільність струму при скін-ефекті усередині об'єму мідної накладки, у тому числі на межі з МБТ, розрахуємо розподіл струму по лініях А і Б (рис. 4, а, б). Лінія А лежить в площині, яка є межею між мідною накладкою і МБТ (МБТ на рисунку для спрощення не показана) і проходить посередині накладки уздовж її ширини. Лінія Б проходить між центром поверхні лівої сторони накладки і центром поверхні правої сторони мідної накладки. На рис. 4, а бачимо, як щільність струму уздовж лінії Б зменшується від лівої поверхні мідної накладки з 28000 А/м² практично до нуля і потім зростає до правої поверхні накладки до 28000 А/м². Розподіл щільності струму уздовж лінії А повторюється з тією ж закономірністю, але має набагато менші значення на кінцях (приблизно 2000 А/м²), а посередині значення щільності струму перевищує значення на лінії Б.

Для уточнення результатів розрахуємо розподіл щільності струму по відрізку січної лінії, що з'єднує центри лінії Б і лінії А (рис. 4, в), а також по відрізку січної, що з'єднує ліві кінці цих ліній (рис. 4, г).

Очевидно, що щільність струмів при наближенні до МБТ різко змінює свої значення, перший (рис. 4, в) у бік збільшення, другий (рис. 4, г) – зменшення. Це свідчить про те, що електричні властивості МБТ мають домінуючий вплив на розподіл щільності струму в мідній накладці поблизу МБТ.

Далі розрахуємо розподіли струмів по тих же лініях, що і в попередніх розрахунках, але від-

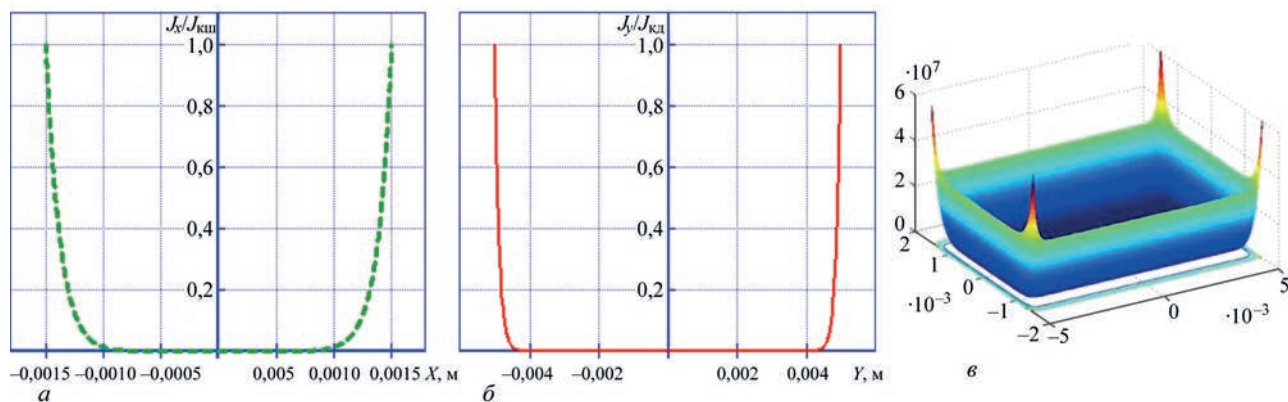


Рис. 3. Графіки розподілу відносної щільності струму уздовж ширини (а), довжини (б) мідної накладки баншей і розподілу питомої електропровідності в 3d зображенні (в)

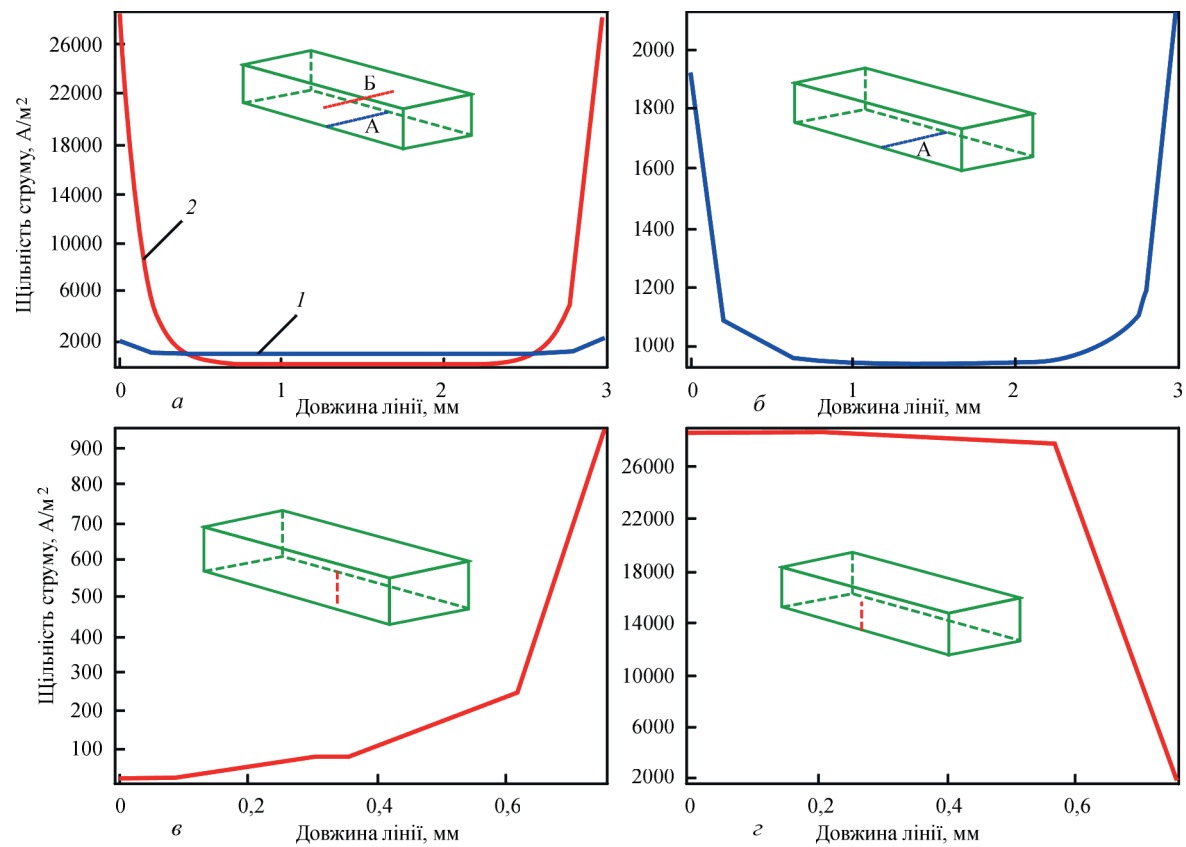


Рис. 4. Розподіл щільності струму при скін-ефекті всередині обсягу мідної накладки по лініях А та Б (а) (1 – розподіл щільності струму по лінії А; 2 – по лінії Б) і А (б). Розподіл щільності струму при скін-ефекті всередині обсягу мідної накладки по вертикальній січній лінії, що з'єднує центри ліній Б і лінії А (в) і січної лінії, що з'єднує ліві кінці ліній А і Б (г)

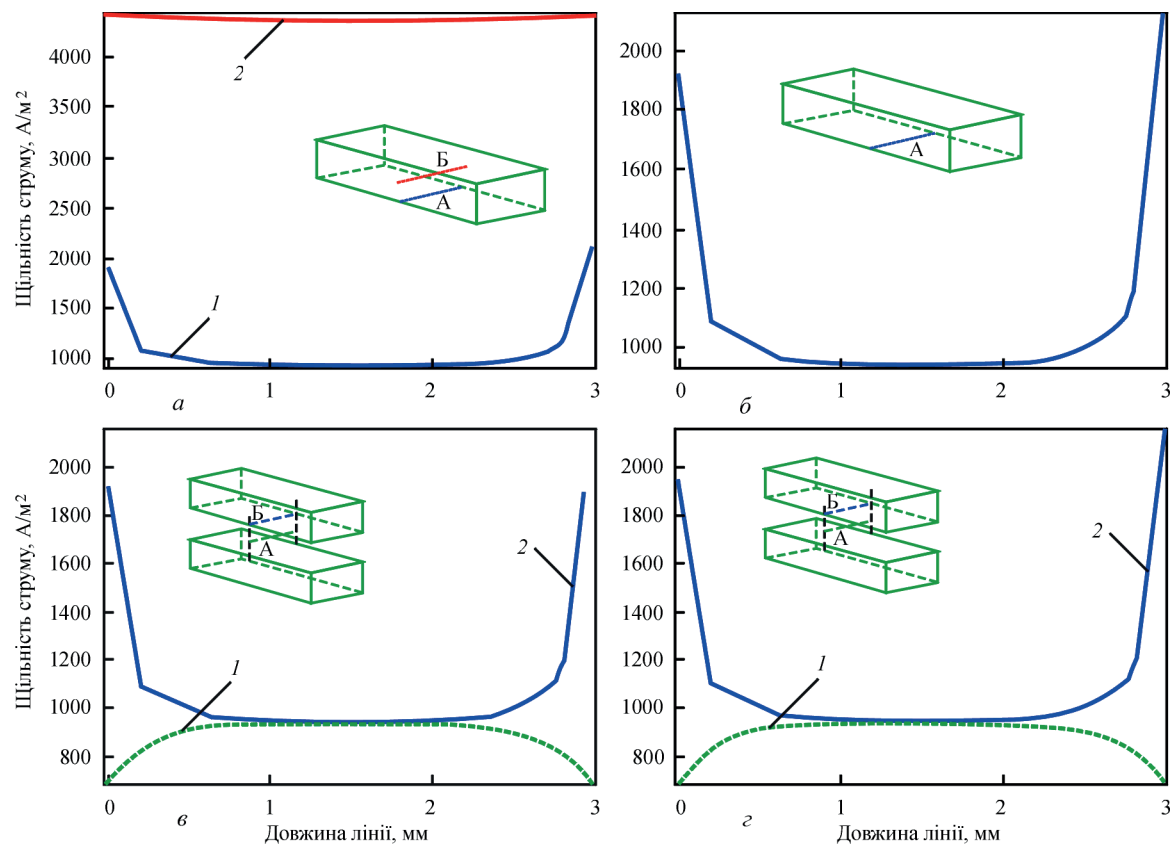


Рис. 5. Розподіл щільності струму без урахування скін-ефекту всередині обсягу мідної накладки по лініях А і Б (а) і тільки лінії Б (б). Розподіл щільності струму при скін-ефекті всередині обсягу МБТ по лініях А і Б (в) і без урахування скін-ефекту (г) (1 – розподіл щільності струму по лінії А; 2 – по лінії Б)

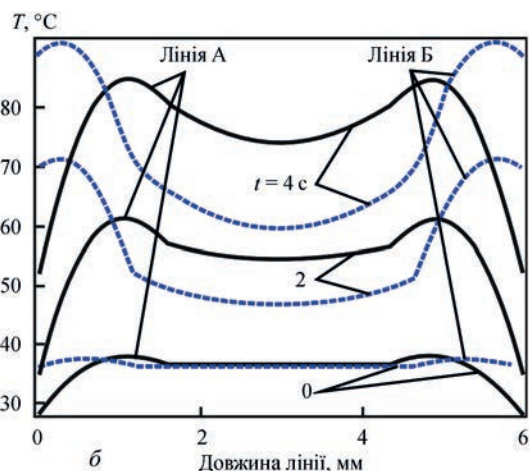
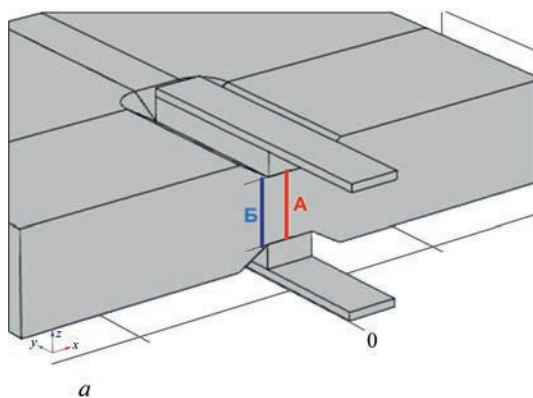


Рис. 6. Вертикальні лінії А і Б на поверхні МБТ (а). Розподіл температури у МБТ по осі Z уздовж вертикальних ліній А і Б в моменти часу 0, 2 і 4 с (б)

ключимо імітацію скін-ефекту (рис. 5, а, б). Розподіл щільності струму по лінії Б практично рівномірний і складає близько 5000 A/m^2 , а розподіл щільності струму по лінії А такий же, як і розподіл струму, розрахований при скін-ефекті (рис. 4, б і рис. 5, б).

Таким чином, ми отримали ще одне підтвердження, що скін-ефект при височастотному біполярному зварюванні в біологічній тканині практично відсутній.

Подальші розрахунки розподілів щільності струмів всередині біологічної тканини по лініях А і Б з «включеним» скін-ефектом (рис. 5, в) і по цих же лініях без скін-ефекту (рис. 5, з), показали повну ідентичність результатів.

Звертає на себе увагу той факт, що щільність струмів в середині лінії А і в середині лінії Б збігаються (рис. 5, в, з). Тобто середня частина МБТ, що стиснута між електродами, має однакову питому електропровідність по вертикалі. При віддаленні від середини вліво і вправо по лінії А питома електропровідність зменшується через наближення до ділянок МБТ з меншим ступенем стискання. При віддаленні від середини вліво і вправо по лінії Б щільність струму зростає у зв'язку з наближенням до ребер мідної накладки, на яких спостерігається збільшення щільності електричного поля через різке збільшення кривизни провідника. Внаслідок такої нерівномірності розподілу щільності струму на кордоні електрод – МБТ на поверхні тканини виникає нерівномірний розподіл теплового поля.

Проведено розрахунок розподілу температури уздовж вертикальної лінії А у МБТ (рис. 6, а) між серединами електродів і уздовж лінії Б, яка дорівнює по довжині лінії А і проходить вертикально лівіше за нижній кут мідної накладки на 0,05 мм. Розрахунок робився для трьох моментів часу нагріву 0, 2 та 4 с. На графіку (рис. 6, б) показано, що за 4 с нагріву температура на кінцях лінії Б досягла критичного значення $\sim 90^\circ\text{C}$, а темпера-

тура в середині стиснутої ділянки МБТ на лінії А $\sim 70^\circ\text{C}$. Така нерівномірність нагріву МБТ може привести на етапі дегідратації в деяких ділянках тканини до незапланованих коагуляційних процесів, а на етапі полімеризації в деяких ділянках може статися некроз тканини.

Найімовірніше, коагуляційні кільця на сітківці ока, про які йдеться в роботі [3], утворилися з-за підвищеної щільності струму на ребрах електродів. Передбачається, що закруглення ребер поверхні електродів, що знаходяться на межі з МБТ, дозволить частково усунути нерівномірність розподілу нагріву у МБТ при моно- та біполярному зварюванні.

Висновки

1. Важливим для вирішення завдань автоматизації біполярного зварювання МБТ є висновок, що скін-ефект, що виникає при проходженні СВЧ по мідних накладках браншей, не впливає на процеси протікання струму і нагріву МБТ.

2. На нерівномірність щільності струму в МБТ і на протікання процесу нагріву впливають наявність гострих ребер на поверхні електродів, що контактують з тканиною, коефіцієнт стискання МБТ затискачами електродів, розмір проміжку стиснутих МБТ між електродами, а також час протікання процесу нагріву МБТ.

3. Розроблена в ході математичного експерименту модель з використанням COMSOL multiphysics надалі дозволить досліджувати методику вибору необхідних співвідношень геометричних параметрів електродів; вибору законів автоматичної зміни живлячої напруги (струму) в часі для досягнення оптимального процесу нагріву при автоматизованому зварюванні м'яких біологічних тканин для поліпшення якості отриманих зварних з'єднань.

Список літератури

1. ДСТУ EN 60601-2-2:2019 (EN 60601-2-2:2009, IDT; IEC 60601-2-2:2009, IDT) *Изделия медицинские электрические. Часть 2-2. Дополнительные требования насчет*

безопасности и основных рабочих характеристик высокочастотной хирургической аппаратуры и высокочастотных хирургических принадлежностей.

- Поливанов К.М. (1969) *Теоретические основы электротехники. Ч.3. Теория электромагнитного поля*. Москва, Энергия.
- Сидорець В.М., Дубко А.Г. (2015) Розподіл струму в електродах електрохірургічних інструментів при зварюванні біологічних тканин. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, **3**, 24–28. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.43372>.
- Sydorets, V., Dubko, A., Bondarenko, O., Kosenko, R. (2016) Influence of Skin Effect on Current Flow Through Electrodes of Electro-Surgical Instruments and Biological Tissue. *15th Biennial Conference on Electronics and Embedded Systems (BEC-2016)*, Tallinn, Estonia, 211–214.
- Сидорець В.М., Дубко А.Г. (2015) Особенности анализа распределения тока высокой частоты в осесимметричных электродах электрохирургических инструментов. *Электротехника та електроенергетика*, **2**, 42–47.
- Sydorets, V., Lebedev, A., Dubko, A. (2015) Mathematical Modeling of the Current Density Distribution in a High-Frequency Electrosurgery. *16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, Lviv, Ukraine, 215–217. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEE.2015.7333379>.
- Dubko, A., Sydorets, V., Bondarenko, O. (2018) Simulation of the Temperature Distribution with High-Frequency Electrosurgical Heating. *38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO – 2018)*, Kyiv, Ukraine, 394–397.
- Дубко А.Г., Чвертко Н.А., Лебедев О.В. та ін. (2020) Математичні моделі розподілу густини струму високої частоти в електродах з різними формами поперечного перерізу. *Біомедична інженерія і технологія*, **3**, 92–98.
- Гухман А.А. (1973) *Введение в теорию подобия. 2-е изд.*, Москва, Высш. шк.
- Ланкін Ю.М., Соловйов В.Г., Романова І.Ю. (2021) Дослідження зміни питомої електропровідності біологічних тканин в результаті локального стискання електродами при біполярному зварюванні. *Автоматичне зварювання*, **1**, 38–43. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.01.07>
- Пегель І.В. (2009) *Електродинаміка сверхвысоких частот. Уч. пособие*. Издательство Томского политехнического университета.
- Швед О.Є. (2008) *Обґрунтування нового хірургічного методу гемостазу (експериментально-клінічне дослідження)*: автореф. дис.... канд. мед. наук: 14.01.03, Київ.
- Булгаков О., Петров С., Лупандин В. (2009) Учет скин-эффекта в задачах о потоках самоиндукции и взаимной индукции, наводимых током, протекающим в проводнике с прямоугольным поперечным сечением. *Компоненты и технологии*, **4**, 122–125.

References

- DSTU EN 60601-2-2:2019 (EN 60601-2-2:2009, IDT; IEC 60601-2-2:2009, IDT) *Medical electrical products. Pt 2-2. Additional safety requirements and basic performance of high frequency surgical equipment and high frequency surgical accessories* [in Russian].
- Polivanov, K.M. (2015) *Theoretical principles of electrical engineering. Pt. 3: Theory of electromagnetic field*. Moscow, Energiya [in Russian].
- Sydorets, V.M., Dubko, A.G. (2015) Distribution of current in electrodes of electrosurgical instruments in welding of biological tissues. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, **3**, 24–28 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.43372>.
- Sydorets, V., Dubko, A., Bondarenko, O., Kosenko, R. (2016) Influence of skin effect on current flow through electrodes of electro-surgical instruments and biological tissue. In: *Proc. of 15th Biennial Conf. on Electronics and Embedded Systems (BEC-2016, Tallinn, Estonia)*, 211–214.
- Sydorets, V.M., Dubko, A.G. (2015) Peculiarities of analysis of high-frequency current distribution in axisymmetric electrodes for electrosurgical instruments. *Elektrotehnika ta Elektroenergetyka*, **2**, 42–47 [in Russian].
- Sydorets, V., Lebedev, A., Dubko, A. (2015) Mathematical modeling of the current density distribution in a high-frequency electrosurgery. In: *Proc. of 16th Int. Conf. on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE, Lviv, Ukraine)*, 215–217. DOI: <https://doi.org/10.1109/CPEE.2015.7333379>.
- Dubko, A., Sydorets, V., Bondarenko, O. (2018) Simulation of the temperature distribution with high-frequency electrosurgical heating. In: *Proc. of 38th Int. Conf. on Electronics and Nanotechnology (ELNANO – 2018, Kyiv, Ukraine)*, 394–397.
- Dubko, A.G., Chvertko, N.A., Lebedev, O.V. et al. (2020) Mathematical models of density distribution of high-frequency current in electrodes with different shapes of transverse cross-section. *Biomedychna Inzheneriya i Tekhnologiya*, **3**, 92–98 [in Ukrainian].
- Gukhman, A.A. (1973) *Introduction to similarity theory*. 2nd Ed. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
- Lankin, Yu.M., Solovyov, V.G., Romanova, I.Yu. (2021) Study of change in specific electrical conductivity of biological tissues as a result of local compression by electrodes in bipolar welding. *The Paton Welding J.*, **1**, 35–39. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.01.07>
- Pegel, I.V. (2009) *Electrodynamics of superhigh frequency: Manual*. TPU [in Russian].
- Shved, O.E. (2008) Substantiation of new surgical method of hemostasis (experimental-clinical study). In: *Syn. of Thesis for Cand. of Med. Sci. Degree*, Kyiv [in Ukrainian].
- Bulgakov, O., Petrov, S., Lupandin, V. (2009) Allowing for skin effect in problems of self-induction and mutual induction induced by current flow in conductor with rectangular cross-section. *Komponenty i Tekhnologii*, **4**, 122–125 [in Russian].

SKIN-EFFECT ON SOFT BIOLOGICAL TISSUE AND FEATURES OF TISSUE HEATING DURING AUTOMATIC BIPOLAR WELDING

V.G. Solovyov, Yu.M. Lankin, I.Yu. Romanova

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

The skin-effect that occurs in the electrical circuit at high-frequency electrosurgery, including electric welding of soft biological tissues (SBT) with electrodes for bipolar welding, is of interest to researchers as a possible source of considerably uneven heating of SBT in automatic welding. Mathematical study of electrical and thermal processes in automatic bipolar welding was performed, taking into account and ignoring the impact of skin effect at the frequency of 300 kHz. It was determined that in biological tissue the skin-effect causes uneven heating to a smaller degree. The main reasons that influence the unevenness of heating are the presence of sharp ridges on the surface of electrodes that contact the tissue, degree of SBT compression by the electrode clamps, length of SBT compressed between the electrodes, and also duration of the process of SBT heating. 13 Ref., 6 Fig.

Keywords: skin-effect, bipolar electrodes, electric welding of soft tissues, biological tissue, anisotropy of specific conductivity

Надійшла до редакції
23.03.2021

ОЦІНКА ПОШКОДЖЕНОСТІ СУЦІЛЬНОЗВАРНИХ ПОЗДОВЖНИХ ГОЛОВНИХ БАЛОК МОСТУ ім. Є.О. ПАТОНА ЧЕРЕЗ р. ДНІПРО

В.Д. Позняков, В.П. Дядін, Є.О. Давидов, Р.І. Дмитрієнко

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

Розглянуто питання щодо загальної оцінки технічного стану головних поздовжніх балок мосту ім. Є.О. Патона за результатами вибіркового неруйнівного контролю елементів ферм. Показано, що основною причиною пошкодження елементів головних балок є корозія вузлових зварних з'єднань в місцях скупчення сміття. Відмічена висока якість зварних стикових з'єднань, виконаних за допомогою автоматичного та напівавтоматичного зварювання під флюсом. Бібліогр. 10, рис. 18.

Ключові слова: міст ім. Є.О. Патона, головні балки, зварне з'єднання, корозія, неруйнівний контроль, технічна діагностика, автоматичне та напівавтоматичне зварювання, пошкодження зварних з'єднань

Київський міст ім. Є.О. Патона через р. Дніпро знаходиться в експлуатації з 1953 р. та є першим в світі суцільнозварним автодорожнім мостом, який увійшов в аналі світового мостобудування. До введення в експлуатацію цієї споруди всі мости при з'єднанні елементів були клепаніми. Поодинокі спроби створення зварних мостів до цього часу закінчувалися невдачею. В першу чергу це було пов'язано з різким падінням несучої здатності зварних з'єднань при виготовленні великогабаритних металоконструкцій. Основною причиною такого падіння була проста заміна клепанних з'єднань на зварні без урахування особливостей напруженого стану зварених елементів та недосконалістю розроблених на той час технологій зварювання, що приводило до появи тріщин як під час виготовлення (заводське та монтажне зварювання), так і під час експлуатації зварених конструкцій.

Крихкі руйнування зварних конструкцій у 1940-х роках почали носити масовий характер, які у своїй більшості мали ряд особливостей:

- осередки руйнувань зазвичай розташовувалися в місцях зварних з'єднань;
- руйнування мало місце при дуже низьких робочих навантаженнях та відносно високих температурах;
- значно підвищилась кількість часткових руйнувань зварних конструкцій.

Так, з 2500 кораблів типу «Либєрти», збудованих під час Другої світової війни, 145 зруйнувались навіпіл та 700 зазнали тяжких пошкоджень. Схожа участь спіткала багато мостів та інших конструкцій [1, 2].

Подібного роду руйнування дуже сильно стимулювали розвиток досліджень в області зварних з'єд-

нань та багато в чому визначили їх спрямованість. Значний вклад в розвиток досліджень несучої здатності зварних з'єднань були внесені Лабораторією електрозварювання, яка входила до Всеукраїнської академії наук в м. Київ, пізніше у 1934 р. перетвореної в Інститут електрозварювання АН УССР.

Накопичений досвід Інституту електрозварювання щодо виготовлення металевих конструкцій дозволив використати передові на той час технології механізованого зварювання під шаром флюсу, які добре себе зарекомендували під час Другої світової війни на підприємствах, що виготовляли корпуси броньових машин. На той час Є.О. Патон змінив концепцію побудови мосту і запропонував виготовити його суцільнозварним за допомогою автоматичного зварювання. Такий підхід викликав необхідність розробити нові конструктивні рішення прогонових будов, сталь для їх виготовлення та автоматичного обладнання для зварювання.

Беручи до уваги, що на той час технології зварювання були ще недосконалими, не дозволяли у повній мірі оцінити властивості зварних з'єднань з урахуванням термодинамічного циклу зварювання та залишкових напружень, запропоновані Є.О. Патоном технології автоматичного зварювання дозволили значно підвищити якість та міцність зварних з'єднань. Саме ці технології зварювання були взяті за основу та застосовані під час виготовлення металевих конструкцій мосту ім. Є.О. Патона в заводських умовах, а також під час їх монтажу на будівельному майданчику [3–6]. До суттєвих переваг, запропонованих Є.О. Патоном, перед існуючими на той час підходами до будівництва сталевих мостів слід відзначати наступне:

- максимальне використання автоматичного та



Рис. 1. Зварювання поздовжніх ребер жорсткості та поясних швів ферми [3]

напівавтоматичного зварювання під флюсом на заводі, який виготовляв конструкції, та на монтажному майданчику (рис. 1, 2);

– збирання великоблочних елементів на заводі, який виготовляв конструкції (рис. 1);

– зведення монтажних з'єднань до однотипних стику суцільних ферм двотаврового перетину (рис. 3), що дозволило значно спростити складання ферм та скоротити час на виконання зварювальних робіт за допомогою використання автоматичного та напівавтоматичного зварювання під флюсом;

– розробка спеціальної конструкції монтажного стику ферм зі вставкою в вертикальну стінку та верхню полицю та послідовність їх з'єднань за допомогою автоматичного зварювання поясів під флюсом з виводом шва на додаткові планки (рис. 2, 3).

– максимальне скорочення використання ручно-



Рис. 2. Приклад застосування автоматичного зварювання під шаром флюсу нижнього поясу при стикуванні ферм головних балок [4]

го дугового зварювання покритими електродами;

– розробка низьковуглецевої сталі М16С, мало-

чутливої до термодетформованого циклу зварювання;

– розробка нових електродних дротів та флюсів;

– розробка нового обладнання для автоматичного та напівавтоматичного зварювання під флюсом у широкому діапазоні технологічних режимів його використання в промисловості.

Комплекс цих рішень забезпечив необхідну надійність та якість вузлових зварних з'єднань мостових споруд (більш детальну інформацію можна знайти в роботі [6]). Саме тому у 1995 р. міст отримав визнання Американської асоціації зварювання як видатна зварна споруда XX століття.

Загальна довжина мосту має 1542,2 м, складається з 24-х прогонових споруд. Будівництво мосту починалось з лівого берега р. Дніпро.

Правобережна частина мосту складається з десяти прогонів, які перекриті двома суцільнозварними п'ятипрогоновими нерозрізними спорудами – $(5 \times 58) + (5 \times 58)$ м (у подальшому позначення 1-5П та 2-5П).

Середня частина мосту над судноплавною ділянкою річки має шість прогонів, які перекриті нерозрізними суцільнозварними спорудами – $58 + 4 \times 87 + 58$ (м) (у подальшому позначення 6П).

Лівобережна частина мосту має 8 прогонів по 58 м та перекрита двома чотирьохпрогоновими суцільнозварними нерозрізними спорудами – $(4 \times 58) + (4 \times 58)$ м (у подальшому позначення 1-4П та 2-4П).

У поперечному перерізі кожна споруда має чотири головні поздовжні балки двотаврового перетину, що складаються з вертикальної стінки, висотою 3600 мм і товщиною 14 мм та поясів різної товщини, яка змінюється від 30 до 80 мм, при ширині до 1000 мм (рис. 4). Стійкість стінки балки додатково забезпечується вертикальними ребрами, встановленими з кроком 7,25 м.

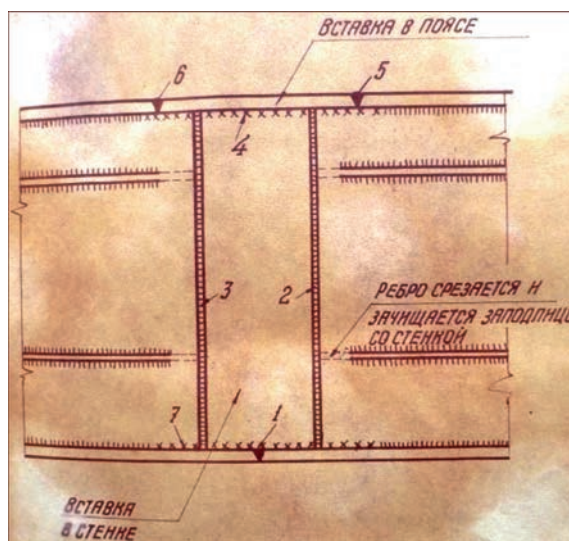


Рис. 3. Порядок монтажного складання та зварювання типових ферм мосту [4]

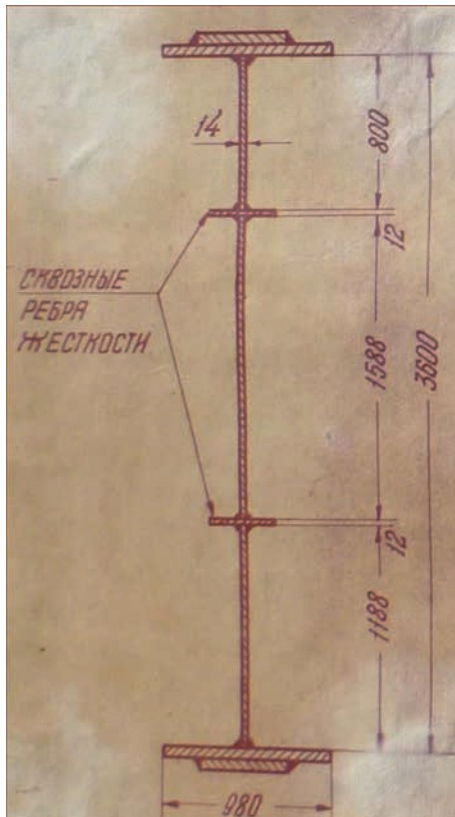


Рис. 4. Поперечний переріз ферми головних поздовжніх балок чотирьох- та п'ятипрогонових споруд мосту [4]

У шестипрогонових спорудах висота стінки над проміжними опорами за рахунок пристрою вутів збільшена до 6200 мм.

Головні поздовжні балки складаються з ферм, які зварені між собою в стик з використанням автоматичного зварювання під флюсом під час монтажу металевих конструкцій. Кількість ферм в кожній з чотирьохпрогонових головних поздовжніх балок становить 9 шт, в п'ятипрогонових головних балках – 11 шт, а в шестипрогонових головних балках – 21 шт. Ферми виготовлені з низьковуглецевої сталі марки М16С.

Міст ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві було запроектовано, виходячи з умов, що проектна інтенсивність руху має складати 10 тис. автомобілів на добу. В процесі тривалої експлуатації мосту навантаження на його несучі елементи поступово зростали, що пов'язано як із збільшенням інтенсивності руху автомобілів на добу (наразі вона зросла практично в 10 разів – у години «пік» – до 85 тис. на добу), так і з збільшенням ваги автомобілів [7]. Внаслідок прокладання труб теплотраси та збільшення товщини асфальтобетонного покриття постійні навантаження на міст також підвищилися. Враховуючи це, у 1994–1998 рр. було виконано посилення поперечних балок мосту, які розташовані біля деформаційних швів, та встановлено додаткові ребра жорсткості на окремих ділянках вертикальних стінок ферм головних балок [7].

До 2019 р. головні поздовжні балки мосту об-

стежувались лише візуально без використання інструментальних та фізичних методів контролю, що не дозволяло отримати більш детальну інформацію фактичного технічного стану металевих конструкцій [7, 8]. Так, за результатами обстеження мосту, виконаного наприкінці 2018 р. спеціалістами ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського», було звернуто увагу на те, що на стінках головних балок споруди в місцях розташування деформаційних швів спостерігали утворення шару продуктів корозії. Враховуючи та аналізуючи результати виконаних досліджень, Український інститут сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського прийшов до висновку, що міст ім. Є.О. Патона знаходиться в аварійному стані та невідкладно потребує капітального ремонту з частковою заміною його конструктивних елементів. Це питання неодноразово обговорювалося на нарадах в Київській міській державній адміністрації та КП «Київавтодор», за підсумками яких було прийнято рішення щодо реконструкції мосту та необхідності проведення більш детального обстеження його конструктивних елементів. У 2019 р. роботи з оцінювання загального технічного стану мосту було покладено на ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського» з залученням фахівців ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України в частині обстеження головних поздовжніх балок мосту.

Обстеження технічного стану головних балок споруд мосту виконувалося у 2020 р. Частково результати проведених досліджень фахівцями ІЕЗ ім. Є.О. Патона приведені в роботі [9]. Дослідження проводилися за наступними напрямками:

- вибіркового ультразвукового контролю стикових заводських і монтажних зварних з'єднань балок та основного металу елементів балок на наявність розшарування;
- товщинометрія основних елементів головних балок в місцях доступу;
- вибіркового магнітного контролю кутових і стикових зварних з'єднань.

Вибір таких методів контролю було визначено за результатами попереднього обстеження фахівцями Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (в липні 2019 р.) головних поздовжніх балок мосту, розташованих між 2-ю і 3-ю опорами, враховуючі дані [10]. Під час проведення робіт виконувався також 100% -й візуальний огляд зварних з'єднань. За результатами виконаного попереднього обстеження були визначені основні напрямки досліджень, які можна поділити на три складові:

- виявлення можливого втомного пошкодження зварних з'єднань після тривалої експлуатації;
- оцінка суцільності основного металу, з якого виготовлені елементи ферм;
- оцінка розмірів корозійного пошкодження еле-

ментів ферм та зварних з'єднань головних балок.

Основна увага під час проведення вибіркового ультразвукового контролю стикових швів приділялась місцям, в яких при монтажі та виготовленні елементів ферм були виявлені дефекти [3, 4, 9], та максимально напруженим зонам. При загальній довжині монтажних та заводських зварних з'єднань близько 110 км було проконтрольовано 150 м зварних з'єднань, 50 % з яких складали монтажні шви в місцях з'єднання ферм (рис. 2, 3, 5, 6).

Враховуючі, що ультразвуковий метод контролю не дозволяє надійно проконтролювати поверхневі та приповерхневі шари зварного з'єднання, було додатково застосовано магнітний метод контролю. Магнітний контроль виконувався в різних місцях прогонових споруд на 124 ділянках зварних з'єднань загальною площею 40,0 м². Враховуючи



Рис. 5. Приклад контролю стикових вертикальних швів з'єднувальної вставки



Рис. 6. Приклад контролю стикового шва у верхньому поясі з'єднувальної вставки



Рис. 7. Приклад відсутності росту дефекту, залишеного під час монтажу (кінці тріщини були зупинені методом свердлування) [4]

більш складні умови монтажу, більше уваги з застосуванням магнітного методу контролю приділялось монтажним зварним з'єднанням. Усі місця, де виконувався неруйнівний контроль, вносилися в робочі карти контролю, які були прив'язані до номерів ферм, з яких виготовлена поздовжня балка та номерів опор, між якими вона знаходиться.

Проведений візуальний огляд зварних з'єднань та аналіз результатів ультразвукового та магнітного контролю монтажних і заводських зварних швів прогонових споруд свідчать про те, що зварні з'єднання головних балок знаходяться у задовільному стані. Тріщини втоми в зварних з'єднаннях після тривалої експлуатації не утворилися. Навіть ті дефекти, що були виявлені ще на етапі будівництва мосту, в процесі тривалої експлуатації не розвивалися (рис. 7).

Отримані результати контролю ще раз підтверджують, що запропоновані конструктивні рішення великоблочної зборки та закладений на заводі та монтажному майданчику принцип максимального використання автоматичного та напівавтоматичного зварювання під флюсом дозволив забезпечити гарантовану високу якість зварних з'єднань. Значну роль в досягненні цих результатів мали також розроблена апаратура та запропоновані прогресивні технології щодо зварювання та збирання великоблочних елементів (ферм).

Перевірка суцільності основного металу головних балок неруйнівним методом контролю була пов'язана з тим, що при виготовленні ферм головних поздовжніх балок у ряді випадків були виявлені локальні місця з розшаруванням в металі горизонтальних ребер жорсткості. В ряді випадків, коли виявлені в процесі виготовлення та монтажу розшарування не досягали зварних з'єднань, такі ділянки не ремонтувалися [3]. В цих місцях для оцінки ймовірного подальшого росту розшарування було вибірково проконтрольовано 7 м² поверхні металу. Контролю піддавалися ділянки основного металу різної товщини, які безпосередньо примикали до зварних з'єднань, в яких під час монтажу було виявлено розшарування. В жодних з проконтрольованих місць поширення розшарування на інші ділянки не виявлено.

При проектуванні горизонтальних ребер жорсткості була передбачена їх приварка до вертикальної стінки ферми без повного проплавлення (рис. 4), що дозволило значно зменшити залишкові напруження по товщині металу та за рахунок цього суттєво знизити ризик розвитку даного дефекту.

Загалом за результатами проведених досліджень було встановлено, що в процесі тривалої експлуатації тріщини втоми в зварних з'єднаннях металевих конструкцій головних балок не утворилися і ці з'єднання знаходяться в задовільному стані.

Як свідчать попередні висновки з отриманих результатів вибіркового технічного діагностування головних поздовжніх балок [9], основною причиною, яка може значно скоротити подальший термін експлуатації мосту, є корозія. За час експлуатації метал головних балок зазнав певних втрат товщини від корозії. Особливо це спостерігалось на ділянках великого скупчення сміття на нижніх горизонтальних ребрах, нижніх поясах крайніх балок та на кінцях спирання прогонових споруд (рис. 8–10).

Для уточнення і виявлення найбільш характерних ушкоджень елементів головних балок і супутніх їм факторів при обстеженні прогонових



Рис. 8. Ділянка скупчення сміття та стану оглядових проходів з внутрішньої сторони крайньої балки п'ятипрогонової споруди



Рис. 9. Ділянка скупчення сміття із зовнішньої сторони крайньої балки п'ятипрогонової споруди

споруд за допомогою товщинометрії кількість вимірювань на крайніх балках (№ 1, № 4) була значно більшою ніж на балках № 2 та № 3. Підвищена кількість вимірювань була обумовлена обмеженим доступом до елементів контролю внаслідок незадовільного стану оглядових проходів та великим скупченням сміття на крайніх балках споруд.

При вибіркового контролю товщини елементів ферм в місцях скупчення сміття було виконано 12640 вимірювань. Всього при частковому обстеженні головних поздовжніх балок прогонових споруд було проведено 16876 вимірювань товщини, які вносилися у робочі карти контролю (168 карт-ферм) з фіксацією ділянки, де проводився контроль, та на узагальнені схеми прогонових споруд. Виявлені найбільш типові місця корозії-



Рис. 10. Ділянка скупчення сміття в опорній частині чотирьохпрогонової споруди

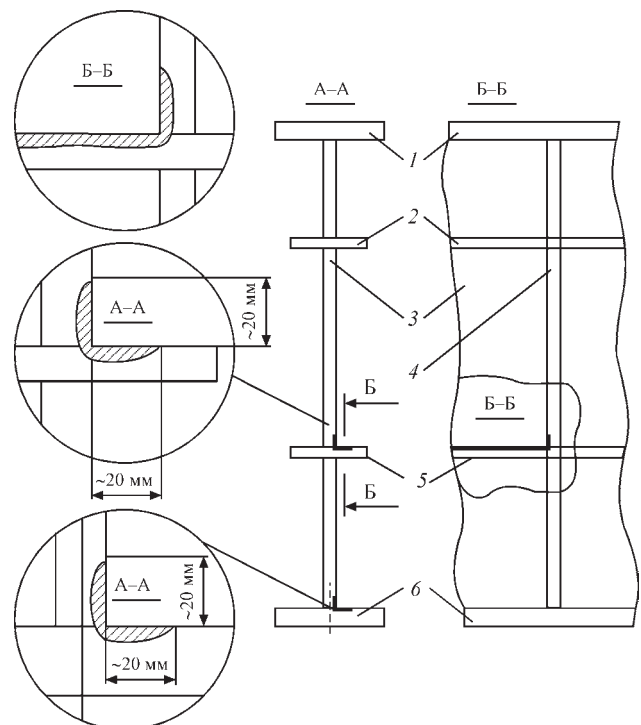


Рис. 11. Типові корозійні пошкодження зварних з'єднань елементів ферм головних балок: 1 – верхня полка; 2 – верхнє горизонтальне ребро; 3 – стінка; 4 – вертикальне ребро; 5 – нижнє горизонтальне ребро; 6 – нижня полка

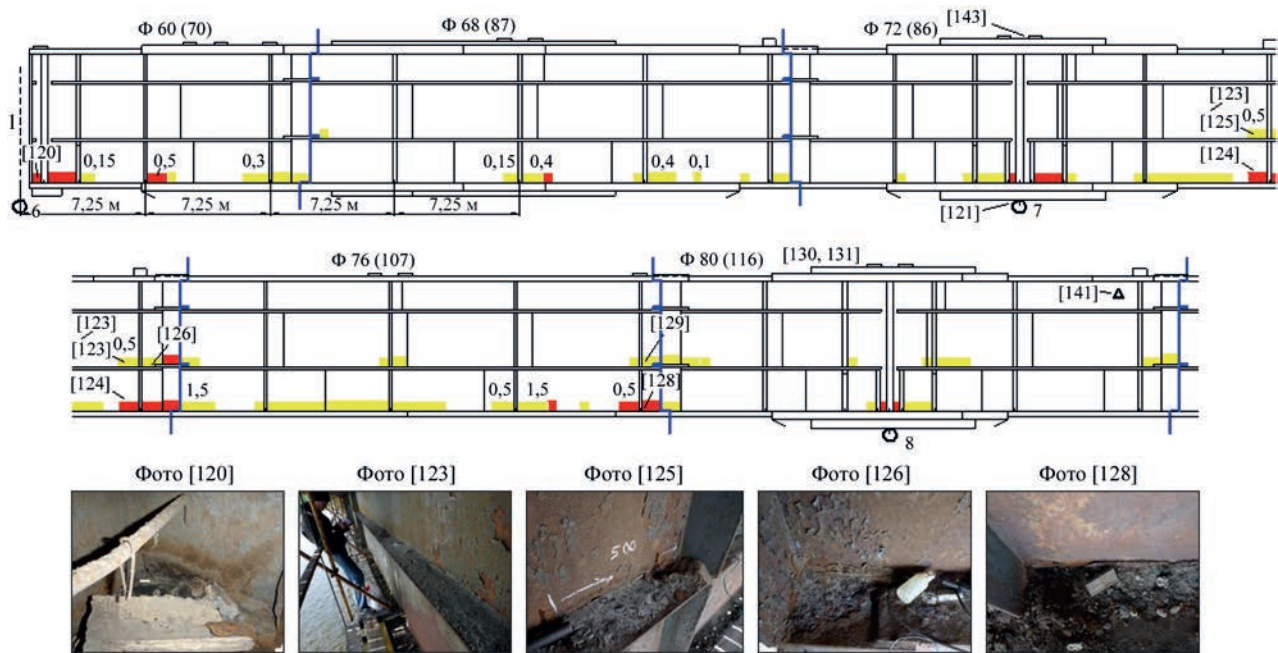


Рис. 12. Фрагмент зведених результатів контролю елементів балки № 1 п'ятипрогонової споруди, розташованої між 6–9 опорою

йних ушкоджень зварних вузлів головних балок мосту представлено на рис. 11.

Як приклад, на рис. 12, 13 представлено ділянки з виявленими корозійними пошкодженнями та розшарування головних балок прогонових споруд.

На приведених фрагментах (рис. 12, 13) застосовано наступні умовні позначення: Φ – ферма; ділянки, на яких втрата металу від корозії знаходиться в межах від 2 до 4 мм – жовтий колір, а у разі більше за 4 мм – червоний. Цифра зверху над кольором означає

приблизну довжину відповідної зони вздовж ферми. Окремий квадрат жовтий або червоний відповідає довжині приблизно 100 мм. Якщо зона відокремлюється конструктивними елементами, наприклад, вертикальними ребрами або зварними з'єднаннями листів, тоді цифра над кольором не позначена. Неметалеві вклучення – зелений колір. Границі ферм позначені синім кольором. Рухома та нерухома опори відповідно – $\circ$ 22 Δ 23. У квадратних дужках надані номери фотографій деяких ділянок. Ділянки, на

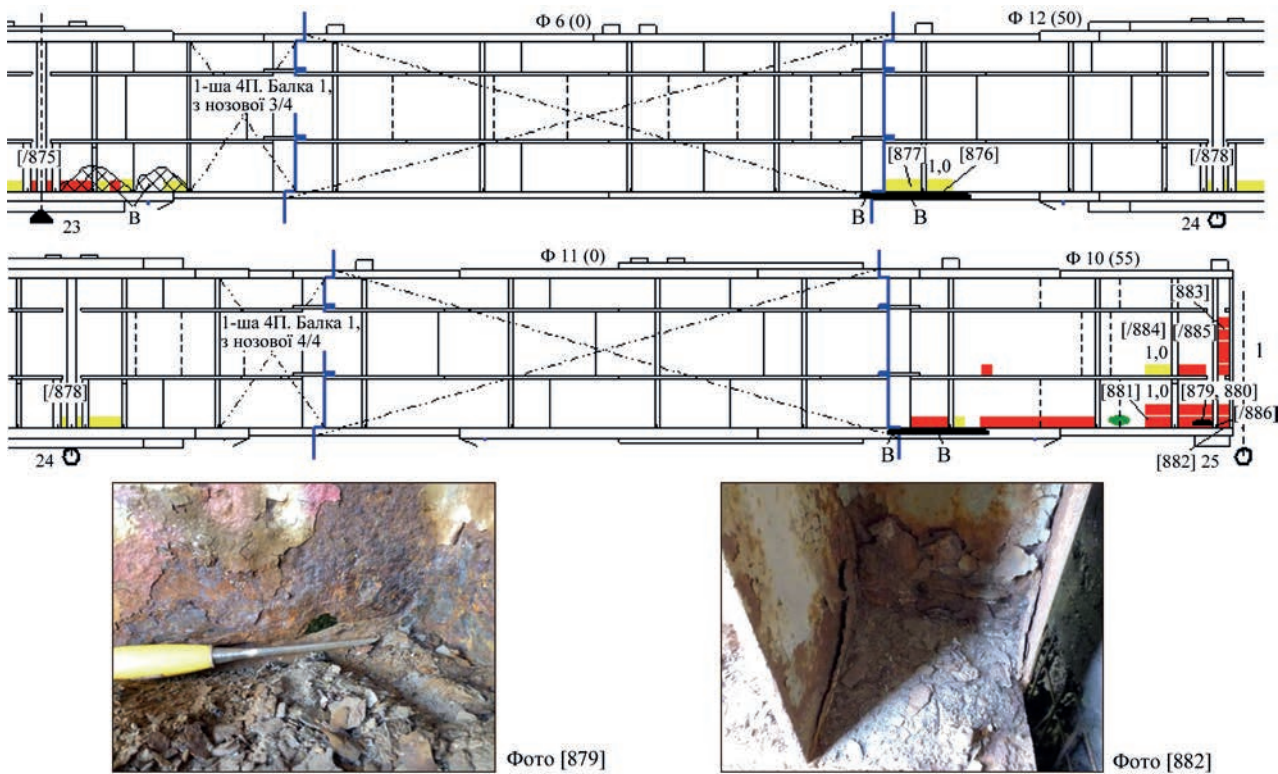


Рис. 13. Фрагмент зведених результатів контролю елементів балки № 1 чотирьохпрогонової споруди, розташованої між 21 – 25 опорою

яких не проводився вибірковий контроль, позначені пунктирним перехрестям. Чорним кольором нанесені дефекти згідно даних ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій ім. В.М. Шимановського», які були наведені у звіті, складеному за результатами обстеження мосту, у 2018 р.

За результатами виконаних вибіркових вимірювань товщини елементів ферм та проведеного аналізу [9] було визначено, що внаслідок протікання скрізь деформаційні шви залізобетонної плити дощової води та вологи, що утворилася внаслідок танення снігу (містить солі) на металеві конструкції головних балок, метал на деяких ділянках ферм зазнав локальних значних корозійних ушкоджень. У ряді випадків товщина металу за рахунок корозії на нижніх поясах, нижніх горизонтальних ребрах та в нижній частині стінок головних балок суттєво зменшилася (в окремих випадках на 40...50 %).

Найменша глибина корозійних пошкоджень спостерігалася біля деформаційних швів у фермах середніх головних балок № 2 та № 3, де було відсутнє сміття (рис. 14). Окрім ділянок головних балок № 2 та № 3, які розташовані біля деформаційних швів, інші елементи цих балок знаходяться у задовільному стані.

Найбільшу втрату товщини металу внаслідок корозії було виявлено у фермах крайніх головних балок № 1 та № 4 (рис. 14, 15). Основною причиною такого пошкодження було наявність на нижньому горизонтальному ребрі та нижньому поясі цих балок сміття, яке затримує вологу (рис. 8–13).

Максимальні корозійні пошкодження елементів було виявлено в фермах Ф10 та Ф15 чотирьохпрогонової споруди головної балки № 1 та фермах Ф1 і Ф3 чотирьохпрогонової споруди головної балки № 4. В цих фермах спостерігаються глибокі корозійні ураження (місцями наскрізні, рис. 13), які потребують першочергового ремонту.

Слід зазначити, що при виконанні роботи фахівцям Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона

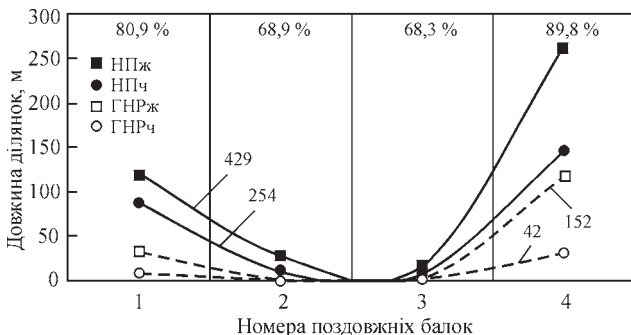


Рис. 14. Загальна довжина виявлених корозійних пошкоджень головних поздовжніх балок в вузлах зварювання наступних елементів: середня стінка ферми до нижнього горизонтального ребра жорсткості – ГНР(ж, ч); нижня стінка до нижньої полиці ферми – НП (ж, ч) (позначки «ж» та «ч» характеризують глибину корозійних уражень від 2,0 до 4,0 мм та більше 4,0 мм відповідно)

НАН України було надано обмежений доступ до контролю елементів поздовжніх головних балок в зв'язку з загальним незадовільним станом оглядових проходів так і зі зкупченням сміття на крайніх балках, що дозволило провести лише часткове обстеження.

Так, на рис. 16, а, б наведено залежність виявлених пошкоджених корозією ділянок обстежених споруд, де зверху графіка вказано відсоток виконаного контролю по спорудах.

Враховуючи обмежений доступ до елементів конструкцій, можна в певній мірі оцінити «очікувану» довжину пошкоджених ділянок споруд на інших балках. Як приклад, на рис. 17 приведена прогнозо-

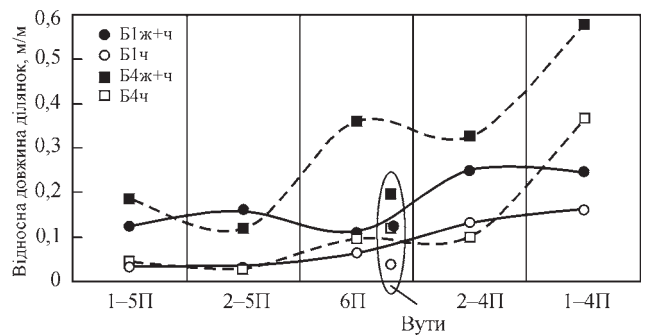


Рис. 15. Відносна довжина виявлених пошкоджених корозією ділянок в вузлі приварки нижньої стінки до нижньої полиці ферми для споруд 1-5П; 2-5П; 6П; 2-4П; 1-4П крайніх балок № 1 та № 4 до проконтрольованої довжини споруд (Б1ж+ч – загальна довжина пошкоджень з глибиною більше 2,0 мм балки № 1; Б1ч – загальна довжина пошкоджень з глибиною більше 4,0 мм балки № 1; Б4ж+ч – загальна довжина пошкоджень з глибиною більше 2,0 мм балки № 4; Б4ч – загальна довжина пошкоджень з глибиною більше 4,0 мм балки № 4)

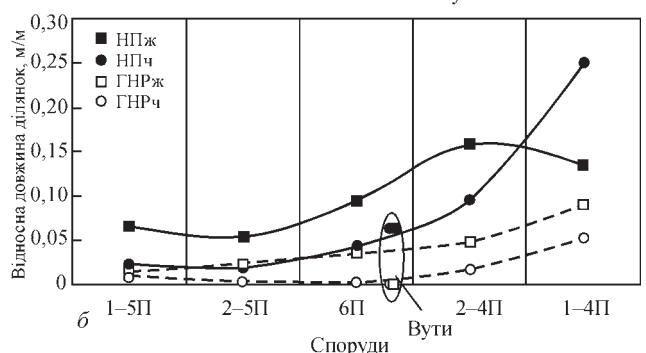
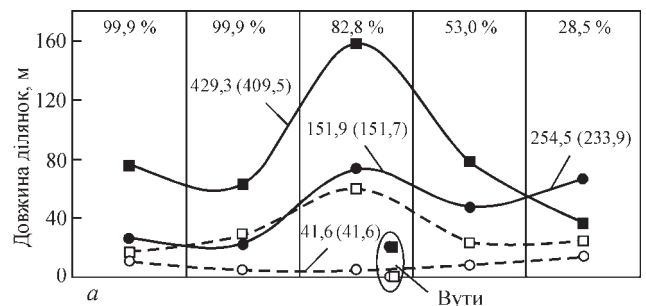


Рис. 16. Довжина виявлених пошкоджених корозією ділянок споруд та процент виконаного контролю (процент контролю вказано зверху) (а) та відносна довжина виявлених пошкоджених корозією ділянок споруд до проконтрольованої довжини (б). Цифрами вказана загальна довжина з урахуванням даних по вузах (в дужках – без вузів)

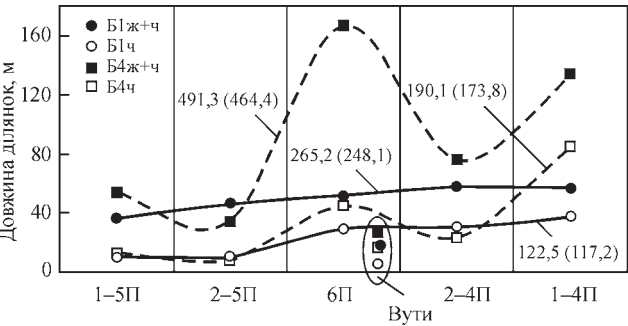


Рис. 17. Приклад прогнозування довжини пошкоджених корозією ділянок в вузлі приварки нижньої стінки до нижньої полиці ферми для споруд 1-5П; 2-5П; 6П; 2-4П; 1-4П крайніх балок № 1 та № 4 (позначення кривих як на рис. 15)

вана (очікувана) довжина пошкоджених корозією ділянок споруд в місцях приварки нижнього поясу до стінки поясу головних балок № 1 та № 2.

У даному випадку при оцінюванні очікуваної довжини корозійних пошкоджень балок Б1 та Б2 використовувалася лінійна екстраполяція між встановленими пошкодженими ділянками та проконтрольованою довжиною. Такий підхід дає лише приблизну оцінку можливих пошкоджень, але може бути корисним при плануванні майбутніх ремонтних робіт. Більш точна оцінка пошкоджень потребує інших підходів з використанням імовірних методів. Так, на рис. 18 приведені графіки розподілу виявлених пошкоджень ферм у вузлах приварки нижнього поясу до нижньої стінки між опорами для головних балок № 1 та № 4. З аналізу результатів цього графіка встановлено, що ділянки виявлених пошкоджень носять хаотичний характер. Єдиною схожою закономірністю є підвищення пошкоджень по границях споруд.

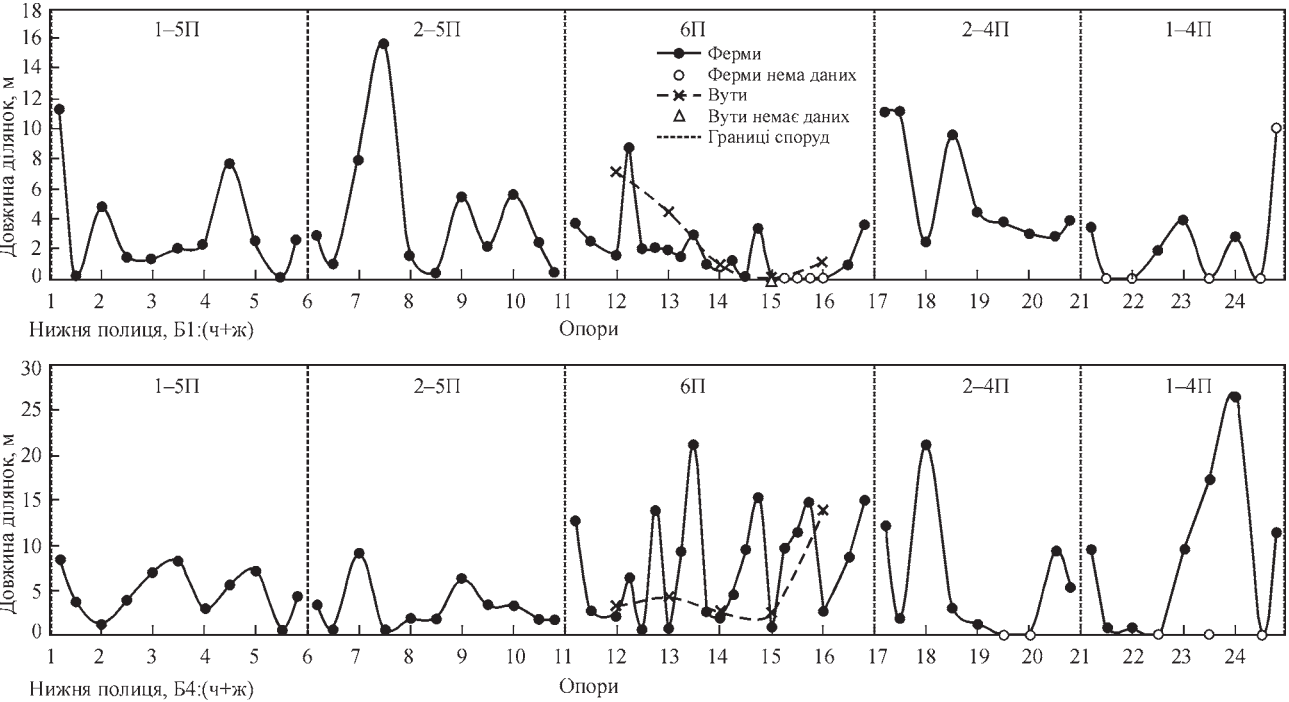


Рис. 18. Розподіл виявлених пошкоджених ділянок у зоні приварки нижнього поясу до стінки ферм між опорами для головних балок № 1 та № 2 (позначення як на рис. 15, 17)

Підсумовуючи результати обстеження головних балок мосту ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві можливо зробити наступні висновки.

1. Зварні з'єднання елементів ферм головних поздовжніх балок знаходяться у задовільному стані. В процесі тривалої експлуатації недопустимі дефекти та тріщини втоми в них не утворилися.

2. Внаслідок протікання скрізь деформаційні шви дощової води та води, що утворилася внаслідок танення снігу (містить солі) на металеві конструкції головних балок, метал кінцевих ділянок ферм, які примикають до деформаційних швів, зазнав локальних, але місцями значних корозійних ушкоджень. За рахунок корозії товщина металу в елементах конструкції, а саме нижніх поясах, нижніх горизонтальних ребрах та в нижній частині стінок головних балок суттєво зменшилася. В окремих випадках на 40...50 %.

3. Найменші корозійні пошкодження спостерігаються біля деформаційних швів в фермах середніх головних балок № 2 та № 3, більш інтенсивні – в фермах крайніх № 1 та № 4 головних балок, що обумовлено накопиченням на нижньому горизонтальному ребрі та нижньому поясі цих балок сміття, яке затримує вологу.

4. Локальні корозійні ураження утворилися на нижніх полицях, нижніх горизонтальних ребрах та частинах стінок ферм крайніх головних балок № 1 та № 4, що примикають до них. Аналогічні ділянки головних балок № 2 та № 3 знаходяться у задовільному стані.

5. Найбільш глибокі корозійні ураження (місцями наскрізні) спостерігали в фермах Ф10 та Ф15 го-

ловної балки № 1 та фермах Ф1 і Ф3 головної балки № 4. Ці ферми потребують першочергового ремонту.

6. Враховуючи існуючий на даний час технічний стан головних балок мосту ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві, за умови виконання робіт, спрямованих на відновлення їх початкової несної здатності, головні балки можуть бути використані при реконструкції (реставрації) мосту.

Список літератури

1. Anderson, W.E. (1969) *An engineer views brittle fracture history*. Boeing rept.
2. Biggs, W.D. (1960) *The brittle fracture of steel*. Mc. Donald and Evans.
3. (1953) Отчет о заводском изготовлении элементов пролетных строений Киевского городского моста на заводе им. Молотова в г. Днепропетровске. Библиотека ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, Киев.
4. (1953) Отчет о монтажной сварке пролетных строений Киевского городского моста им. Е.О. Патона НАН УССР через р. Днепр. Там же.
5. Лобанов Л.М., Кирьян В.И. (2013) Шестьдесят лет цельносварному мосту им. Е.О. Патона. *Автоматическая сварка*, **12**, 35–40.
6. Лобанов Л.М., Кирьян В.И., Шумицкий О.И. (2003) Пятьдесят лет мосту им. Е.О. Патона. Там же, **10-11**, 14–22.
7. Шимановський О.В., Котлубей Д.О., Шалінський В.В. (2018) Міст ім. Є.О. Патона – нинішній стан та перспективи. *Промислове будівництво та інженерні споруди*, **1**, 2–9.
8. Шимановський О.В., Котлубей Д.О., Шалінський В.В. (2018) Аварійна ситуація на мосту ім. Є. О. Патона та заходи щодо її вирішення. Там само, **4**, 30–33.
9. Позняков В.Д., Дядин В.П., Давидов Є.О., Дмитрієнко Р.І. (2021) Технічний стан металевих конструкцій го-

ловних балок моста ім. Є.О. Патона через р. Дніпро у м. Києві. Там само, **1**, 9–17.

10. (1989) *Пособие по проектированию усиления стальных конструкций (к СНиП II-23-81*)*. Укрниипроектстальконструкция. Москва, Стройиздат.

References

1. Anderson, W.E. (1969) *An engineer views brittle fracture history*. Boeing rept.
2. Biggs, W.D. (1960) *The brittle fracture of steel*. Mc. Donald and Evans.
3. (1953) *Report on prefabrication of span elements of Kiev city bridge at Dniepropetrovsk Molotov Plant*. Kiev, PWI library [in Russian].
4. (1953) Report on site welding of spans of Kiev E.O.Paton bridge across the Dnieper. *Ibid.* [in Russian].
5. Lobanov, L.M., Kyrian, V.I. (2013) The E.O. Paton all-welded bridge is sixty years old. *The Paton Welding J.*, **12**, 33–38.
6. Lobanov, L.M., Kirian, V.I., Shumitsky, O.I. (2003) Fifty years of the E.O. Paton bridge. *Ibid.*, **10-11**, 12–20.
7. Shimanovskiy, O.V., Kotlubei, D.O., Shalinskiy, V.V. (2018) The E.O.Paton bridge: Current state and prospects. *Promyslove Budivnytstvo ta Inzhenerni Sporudy*, **1**, 2–9 [in Ukrainian].
8. Shimanovskiy, O.V., Kotlubei, D.O., Shalinskiy, V.V. (2018) Emergency situation of the E.O.Paton bridge and measures for its solution. *Ibid.*, **4**, 30–33.
9. Poznyakov, V.D., Dyadin, V.P., Davydov, Ye.O., Dmytrienko, R.I. (2021) Technical state of metal structures of the main girders of E.O.Paton bridge across the Dnipro in Kiev. *Ibid.*, **1**, 9–17 [in Ukrainian].
10. (1989) *Textbook on design of reinforcement of steel structures (to SNiP II-23-81*)*. Ukrniiproektstalkonstruksiya. Moscow, Stojizdat [in Russian].

EVALUATION OF DAMAGE OF ALL-WELDED LONGITUDINAL MAIN BEAMS OF THE E.O. PATON BRIDGE ACROSS THE DNIPRO RIVER

V.D. Poznyakov, V.P. Dyadin, Ye.O. Davydov, R.I. Dmitrienko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Ukraine, Kyiv.

E-mail: office@paton.kiev.ua

The problem of the general evaluation of a technical condition of main longitudinal beams of the E.O. Paton bridge was considered based on the results of selective non-destructive testing of truss elements. It is shown that the main cause of damage to the elements of the main beams is the corrosion of the nodal welded joints in the places of debris accumulation. High quality welded butt joints made by automatic and semi-automatic submerged arc welding was noted. 10 Ref., 18 Fig.

Keywords: E.O. Paton bridge, main beams, welded joint, corrosion, non-destructive testing, technical diagnostics, automatic and semi-automatic welding, damage to welded joints

Надійшла до редакції 3.06.2021

НОВА КНИГА

Недосека А.Я., Недосека С.А.

Основы расчета и диагностики сварных конструкций. – К.: Издательство «ИНДПРОМ», 2020. – 886 с, 406 рис., 35 табл. – Библиогр.: 18 назв.

Изложены основные проблемы, связанные с обеспечением безопасности эксплуатации конструкций и сооружений, возникающие при расчете их прочности, при испытаниях и в процессе эксплуатации. Большое внимание уделено теории, методам и средствам диагностики и оценки состояния материала конструкций, его остаточному ресурсу. Изложены основные вопросы теории прогнозирования и принятия решений при оценке состояния конструкций. Освещены современные методы расчета и измерения температурных полей, напряжений и деформаций, показаны способы борьбы с вредными последствиями сварочных напряжений и деформаций, рассмотрены основы классической и квантовой механики разрушения.

Предназначена для студентов, аспирантов и преподавателей машиностроительных специальностей вузов, для специалистов, проходящих переподготовку на курсах повышения квалификации по направлению «Техническая диагностика», а также для инженеров предприятий и организаций, занимающихся контролем и диагностикой конструкций.

Замовлення на книгу прохання надсилати до редакції журналу.

Тел.: (044) 200-82-77, E-mail: journal@paton.kiev.ua



Welding in the World

Volume 65, issue 4–6, April–June 2021

<https://link.springer.com/journal/40194/volumes-and-issues/>

April 2021, issue 4

Аналіз механізму руйнування теплового моделювання CGHAZ AHSS DP780: на основі методу поверхні відгуку та квантово-генетичного алгоритму. *Tian Yan, Yong-huan Guo, Xi-ying Fan, Liang Zhang, Chuan-qi Huang & Jin-Yue Zhao*

Вплив поведінки переносу крапель дрітних дуг на мікроструктуру, механічні властивості та корозійну стійкість, компонент з Inconel (IN) 625 при 3D виробництві. *Rama Kishore Mookara, Saravanan Seman, R. Jayaganthan & Murugaiyan Amirthalingam*

Рекомендації щодо вимірювання залишкових напружень у зварних з'єднаннях за допомогою дифракції рентгенівських променів – результати випробування WG6-RR. *Th. Nitschke-Pagel*

Вплив форми ребра та щілини на втомні властивості ортотропних сталевих настилів. *Koichi Yokozeaki, Tomonori Tominaga, Chitoshi Miki*

Оцінка втоми зварних з'єднань з алюмінію, виконаних лазерним променем та тертям з переміщенням. *G. Mucci, J. Bernhard, F. Frendo*

Експериментальна оцінка втоми зв'язків між поздовжніми ребрами пластинчастого типу та нерозрізними поперечними ребрами в ортотропних сталевих настилах. *Koichi Yokozeaki, Tomonori Tominaga, Chitoshi Miki*

Дослідження на втомну міцність одноколінного шарніра, з'єданого клеєм з армованими наночастинками. *İsmail Saraç, Hamit Adin, Şemsettin Temiz*

Удосконалення поточних конструктивних концепцій для вдосконаленого врахування залишкових напружень у навантажених зварних швах. *Th. Nitschke-Pagel, J. Hensel*

Таблиця класів зварних сталевих деталей, отриманих з основної кривої конструкції методом пікової напруги. *M. Zanetti, V. Babini, G. Meneghetti*

Втомна міцність нерівномірно зварених пластичних з'єднань із пластичного чавуну зі сталлю. *G. Meneghetti, A. Campagnolo, S. Masaggia*

Контроль кристалізаційного розтріскування зварних швів Al шляхом регулювання співвідношення Zn / Mg. *Di Zhang, Xin Zhao, Linzhong Zhuang*

Вплив термопластичної морфології на механічні властивості при лазерному з'єднанні поліаміду 6 з алюмінієм. *Klaus Schrickner, Jean Pierre Bergmann, Lothar Spieß*

З'єднання композиту Cf / SiC із сплавом наповнювача Cu – Pd – V та прошарком Mo. *Wenwen Li, Hongliang Feng, Yaoyong Cheng*

EBSD-дослідження комбінованого з'єднання дуплексної нержавіючої сталі SAF 2205 із суперсплавом на основі нікелю IN X-750. *Ehsan Baharzadeh, Morteza Shamanian, Jerzy A. Szpunar*

Модель гілки нейронної мережі з вдосконаленою стратегією об'єднання та вибором функцій для розпізнавання дефектів зварного шва. *Hongquan Jiang, Qihang Hu, Hua Li*

Спрощений розподіл поверхневого джерела тепла для моделювання процесу GMAW на основі принципу EDACC. *O. Mokrov, M. S. Simon, U. Reisgen*

Механізм та оптимізація активуючих потоків для стабільності процесу та забезпечення зварюваності при гібридному лазерно-дуговому зварюванні сталі HSLA. *Shiwei Zhang, Yadong Wang, Zhuguo Li*

Моделювання та вимірювання TIG зварювання в аргонгелієвих сумішах з парами металів. *Junting Xiang, Keigo Tanaka, Anthony B. Murphy*

May 2021, issue 5

Напівпровідникова лазерна наплавка сплавом на основі Fe на кулястий графітовий чавун. *Pengcong Yang, Yulai Song, Liangwen Xie*

Ремонт зубів шестерні на основі 3D роботизованого виробництва способом GMAW. *Xinlei Li, Qinglin Han, Guangjun Zhang*

Оцінка хімічного складу наповнювачів з низькою температурою перетворень щодо залишкових напружень, мікроструктури та механічних властивостей зварних з'єднань сталі 410 AISI. *S. A. Hosseini, Kh. Gheisari, N. Enzinger*

Мікроструктурна еволюція та ліквідаційне розтріскування в частково розплавленій зоні осадженого металу-наповнювача ERNiCrFe-13, підданого TIG-рефузії. *X. Guo, P. He, S. B. Huo*

Воднева крихкість сталевих зварних з'єднань марки 91 під час теплової обробки після зварювання. *D. Sunilkumar, Hasan Shaikh, Shaju K. Albert*

Примусовий моніторинг якості зварювального процесу тертя з використанням аналітичного алгоритму. *P. Rabe, A. Schiebahn, U. Reisgen*

Термомеханічне моделювання металевої заклепки при фрикційній клепці аморфних термопластів. *Gonçalo Pina Cipriano, Willian S. de Carvalho, Sergio T. Amancio-Filho*

Огляд сучасних методів тестування LME та пропозиції щодо розробки стандартизованої процедури тестування. *C. DiGiovanni, E. Biro*

Експериментальна конструкція точкового зварювання листів із сплаву Ti6Al4V та можливо-го чисельного моделювання. *Fatih Bozkurt, Fatih Hayati Çakır*

Формованість та механічні властивості з'єднань, отриманих методом тертям з перемішуванням з повторним заповненням. *Yangfan Zou, Wenya Li, Huawei Tang*

Вплив параметрів зварювання на опір термокомпресійного мікрозварного з'єднання ізольованого мідного дроту. *Zhiyuan Cui, Yuanbo Li, Songming Guo*

Вплив зварювального струму на початкову геометрію, мікроструктуру та механічні властивості сталей TWIP при точковому зварюванні опором. *Sadettin Şahin, Fatih Hayat, Onur Cem Çölgeçen*

Лазерна попередня обробка поверхні металу для з'єднання металів та різномірних матеріалів. *Takayuki Uno, Masahiko Itakura, Muneharu Kutsuna*

Час очікування до NDT зварних морських марок сталі з урахуванням уповільненого водневого розтріскування. *Eugen Wilhelm, Tobias Mente, Michael Rhode*

Властивості шва, отриманого TIG зварюванням в вузький зазор литої корозійностійкої сталі Хейнса 282. *Michael Santella, X. Frank Chen, Jonathan Salkin*

Аналіз еволюції мікроструктури та кристалографічної текстури сталей API X-65 / UNS S32750 з нержавіючої сталі за допомогою аналізу EBSD. *Morteza Shamanian, Jalal Kangazian, Jerzy A. Szpunar*

Вплив теплової потужності на мікроструктуру, механічні та корозійні властивості електронно-променевих зварних листів циркалой-4. *Lord Jaykishan Nayak, Gour Gopal Roy*

Вплив фокусу та відхилення променів при порівнянні зварних швів на сталі 304, отриманих електронно-променевим та лазерним зварюванням. *Joris E. Hochanadel, Tate Patterson, David C. Tung*

June 2021, issue 6

З'єднання мідних нанопроволок електроосадженням срібного шару для високоефективного прозорого електрода. *He Zhang, Shang Wang, Yanhong Tian*

З'єднання композитних трубок Cu-SS за допомогою електромагнітного обтиску для різних профілів поверхні. *Deepak Kumar, Sachin D. Kore, Arup Nandy*

Мікроструктурний аналіз та механічна поведінка металу 3ТВ сталі API 5L X70, звареної методом GMAW. *Vinicius dos Santos Dagostini, Ariane Neves de Moura, Estéfano Aparecido Vieira*

Вплив зварювання TIG з активованим потоком (A-TIG) на механічні властивості та металургійну та корозійну оцінку сталі Inconel 625. *J. Sivakumar, M. Vasudevan, Nanda Naik Korra*

Теплова ефективність зварювання при холодному дровотому газовому зварюванні. *R. A. Ribeiro, P. D. C. Assunção, A. P. Gerlich*

Обмеження методики Шлірена для візуалізації потоку захисного газу в процесах дугового зварювання. *Mateus Barancelli Schwedersky, Álisson Fernandes da Rosa, Régis Henrique, Gonçalves e Silva*

Вплив ультразвукової вібрації на отвори для пробивання / проникнення при плазмовому дуговому зварюванні з керованою імпульсною формою хвилі. *Shuoshuo Tian, Lin Wang, Manabu Tanaka*

Вплив робочих параметрів на морфологію зварних швів при зварювальних операціях сталевих труб API 5L X70 методом SMAW. *Hadjer Bensiali, Lyes Bidi, Mohamed Salah Boulahlib*

Вплив теплової потужності зварювання TIG на мікроструктуру та механічні властивості литого сплаву магнію AZ91. *Abbas Assar, Bahram Nami, Iraj Khoubrou*

Техніко-економічне обґрунтування процесу зварювання кисневим паливним газом (OFW) в композитному гібридному з'єднанні AA2024-T3 та GF / PEI. *Jonas Frank Reis, L. F. B. Marques, E. C. Botelho*

Вплив деградації матеріалу на якість зварного шва при стиковому зварюванні поліамідів гарячим газом. *Max Bialaschik, Volker Schöppner, Michael Gehde*

Вплив параметрів пайки на мікроструктуру та механічні властивості композитних з'єднань Ti_2Si_3 / Ti_3Al , паяних сплавом наповнювача Ti – Zr – Cu – Ni. *Tongtong Zhang, Yongsheng He, Lin Geng*

Дослідження індукційної пайки мідно-сталевих труб з різною структурою. *Pengcheng Zhao, Liangyin Zhao, Xiuxiu Zhao*

Нерівномірне паяння TiAl / IN718 за допомогою високоентропійного металу TiZrNiCuCo: характеристика фази та фрактографія. *Dariush Kokabi, Ali Kaflou*

Дослідження дугової пайки для оцинкованих важких сталевих плит у суднобудуванні. *Philipp Andreazza, Andreas Gericke, Knuth-Michael Henkel*

Пайка графіту до алюмінієвого сплаву 6063 за допомогою металу-наповнювача Al-Cu-Si-Ni-Mg та пасти Ag-Cu-Ti. *Linlin Yuan, Wei Wang, Yuefeng Qi*

Пайка Ti-6Al-4V металом на основі міді. *Xu Liu, Botong Chai, Yuefeng Qi*

Паяння металевих скла Zr сплавом Ti з використанням попередньої ультразвукової наплавки. *Xingke Zhao, Jin Pan, Manduo Zhao*

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

(спогади В.О. Троїцького)

Я бував багато разів з Борисом Євгеновичем у різних відрядженнях – у Москві, Харцизьку, Донецьку, Вексі, Копенгагені, Лондоні та інших містах, виконував його доручення.



Борис Євгенович був другом, цікавим співрозмовником і в той же час жорстким прагматиком, був нетерплячим до невігластва. Саме завдяки його природній чарівності, а також розумінню проблем регулювання в силовій електротехніці я переїхав до Києва на його запрошення.

З благословення та за підтримки Бориса Євгеновича Патона в ІЕЗ було розвинено багато електротехнічних ідей (магнітна комутація, модуляція зварювального струму, резонансні джерела струму, плавне регулювання струму та напруги без силових напівпровідників в основних електричних ланцюгах і т.п.) і передові дефектоскопічні ідеї. Завдяки йому ІЕЗ був «меккою» не тільки зварювання та спеціальної електрометалургії, але й дефектоскопії!

Думаю, що мої спогади про довгі роки тісного спілкування з Борисом Євгеновичем доповнять портрет цього великого вченого, який зіграв важливу роль у розвитку науки, який був і залишиться назавжди головним дефектоскопістом країни. У мене з Борисом Євгеновичем склалися дуже теплі людські відносини. Нас поріднювала саме та обставина, що він був за освітою, як і я, електромеханіком. Борис Євгеновичу подобалися електротехнічні ідеї.

Було у нього багато і науково-фантастичних ідей, такі, як електростанції прибою (сила прибою, приливу та відливу), створення механічних акумуляторів для автомобілів та залізничного ру-

хомого складу, в яких накопичується енергія під час гальмування за рахунок її рекуперації і т.п. Тоді ще Ілона Маска з електромобілями не було, а ми вже обговорювали проблеми накопичення та витрати електроенергії при різних формах руху та їх рішення. Індивідуальний електротранспорт досі стримують світові нафтові магнати!

Ми обговорювали і багато інших електротехнічних ідей, наприклад, холодні джерела світла і т.п. Однак електродинаміку він приніс у жертву, «перекинувши» мене на іншу справу, з якою я не був знайомий. На прохання Бориса Євгеновича я був змушений зайнятися зовсім іншою наукою. Тоді понад п'ять років спеціалісти Інституту електрозварювання на чолі з його директором займалися пуском трубного цеху Харцизького трубного заводу (ХТЗ).

Наші успіхи з неруйнівного контролю якості зварних з'єднань при виробництві труб високого тиску для магістральних газопроводів на ХТЗ надихнуло Бориса Євгеновича поправити стан справ з дефектоскопією в інших галузях.

Мало кому відомо, що до 1970-го року поняття «дефектоскопія» в нашій країні відносилось до астрономії, оскільки основний фахівець з цієї професії – проф. Міхєєв М.М. був чл.-кор. відділення астрономії. Я неодноразово їздив в закордонні відрядження (Англію, Німеччину, Югославію та ін.) саме від цього відділення і звітував перед астрономами про результати поїздки.

Організації Міністерства приладобудування, які розробляли дефектоскопічне обладнання, знаходились у Кишиневі, Мінську, Москві, Свердловську, Ленінграді, Нальчику. Цей науковий напрям, на жаль, повільно розвивався в Україні. Ці та інші проблеми дефектоскопічного напрямку, несприятелі зварюванню, взявся виправляти Борис Євгенович. Для цього необхідно було підго-



тувати відповідні Постанови Кабінету Міністрів, ДКНТ СРСР і України, а також провести колосальну роботу з реалізації цих Постанов (№№ 142 і 457), створити Програму з розвитку в Україні дефектоскопічного напрямку, вигадати гідну назву для цієї професії тощо. Тому нашому колективу разом з відповідними НДІ різних відомств країни довелося готувати спочатку Постанови ДКНТ і КМ СРСР, а потім всі ці положення відтворювати в Україні через Постанови АН УРСР і КМ УРСР.

У 1984 р. в АН УРСР було затверджено Програму по ТДНК, яку виконували 26 НДІ різної відомчої приналежності. Ми почали періодично випускати збірник праць з ТДНК, на основі якого пізніше організували випуск журналу «Технічна діагностика та неруйнівний контроль». З подачі Бориса Євгеновича в ІЕЗ з'явилися нові дефектоскопічні напрямки, такі, як електрорентгенографія, електромагнітоакустичний УЗК, магнітографія.

Можливість появи зварних з'єднань низької якості, наявність специфічних зон термічного впливу, деградація структури металу дотепер приводять до того, що найвідповідальніші конструкції (укриття на ЧАЕС, літаки і т.п.) виготовляють майже без зварювання. Тому не випадково наш інститут під керівництвом Б.Є. Патона став провідною організацією з розвитку дефектоскопії. З часом наш авторитет піднявся до такого рівня, що ми й досі на безоплатній основі отримуємо професійні журнали США, Німеччини, Англії, Італії, Японії та ін.

Б.Є. Патон так розворушив тему дефектоскопії, що у 1984 р. було створено Наукову раду з назвою «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» при Президії АН УРСР. Ця наукова рада підготувала Програму, що дало поштовх на консолідацію та розвиток НК в УРСР. На основі цієї Програми в січневому номері 1987 р. «Вісник Академії наук Української РСР» було опубліковано основну статтю академіка Б.Є. Патона «Неруйнівний контроль і надійність технічних об'єктів». У назві цієї Програми та статті ще немає слів «технічна діагностика». Дані слова народжувалися у пошуках і з'явилися пізніше. Це особлива ідея Б.Є. Патона, який розумів, що дефектоскопія далеко не все, що необхідно. Потрібна ще діагностика. Багато розмов було про слово «технічна».

Протягом 1992-1993 рр. було сформовано нову Програму, яка вже мала назву «Технічна діагностика та неруйнівний контроль». Ця програма включала вже 263 проектів і 160 організацій-виконавців. Програма була затверджена ДКНТ і АН УРСР. Так, в переліку головних напрямків розвитку науки і техніки України з'явилася тема «Діагностичне забезпечення надійної та ефективної експлуатації енерго- і ресурсоемних машин» і,

починаючи з 1995 р., з'явилася тема «Неруйнівний контроль та технічна діагностика».

Б.Є. Патон очолював технічний комітет ТК-78 із стандартизації, який займався гармонізацією національної науково-технічної документації в області технічної діагностики та неруйнівного контролю та відповідності її міжнародним стандартам, які виробляються комітетом ТК-135 ISO. Так, нами введено більше 90 стандартів з різних методів НК.

З ініціативи Бориса Євгеновича у 1994 р. спільним наказом № 172/64/106/221 від 7 липня 1994 р. Міністерства освіти України, Національної академії наук України, Комітету України по нагляду за охороною праці та Державного комітету України по нагляду в атомній промисловості в структурі УТНКТД був створений Національний атестаційний комітет (НАК) України з неруйнівного контролю. Головним завданням НАК є організація системи сертифікації персоналу, яка відповідає міжнародним стандартам.

Пригадую як наші співробітники – Демидко В.Г. і Кір'янова Н.А. чергували біля воріт Кремля, звідки виходили депутати Верховної Ради СРСР, для того, щоб привести Бориса Євгеновича в Московський НДІ інтроскопії, де ми проводили численні наради з основними учасниками комісії Державного комітету з науки і техніки СРСР (ДКНТ), з відповідальними виконавцями підготовлених нами Постанов КМ і ДКНТ №№ 142 і 457.

Багато питань виконання і коригування Постанов вирішувалися телефонними дзвінками Бориса Євгеновича з кабінету академіка Ключєва В.В.

Завдяки Б.Є. Патону ми були першими в країні, хто створив власне республіканське науково-технічне товариство НК, яке об'єднало професіоналів. Одним з головних напрямків роботи



УТ НКТД є консолідація фахівців в області фізичних методів контролю якості зварних з'єднань, матеріалів і виробів.

Розповім кілька епізодів з нашої поїздки до Данії. Наш відділ багато років дружив з Данським товариством НК, данськими фірмами «Migatronik», «Force», «Jom». Почалася ця дружба з часів, коли я займався регульованими джерелами струму для зварювання та інших технологічних процесів. Ця діяльність була близька основному виробнику подібного обладнання в Данії – фірмі «Migatronik».

У нас була загальна програма з виробництва джерел струму, регульованих магнітною комутацією, основні патенти по якій належать Україні. Трохи пізніше, коли у нас активізувався дефектоскопічний напрям, ми подружилися і з академічною організацією Данії – інститутом «Force», який за своєю структурою нагадує ІЕЗ ім. Є.О. Патона. В інституті «Force» розташовувалася і штаб-квартира Данського товариства неруйнівного контролю.

Інститут «Jom» є аналогом міжнародного інституту зварювання (МІС). «Jom» – громадський інститут, яким керують англійці, проводить щорічні конференції. Конкуруючи з МІС, цей інститут об'єднував багато НДІ різних країн. Довгий час більшість заходів інституту «Jom» проходило за участю нашого відділу.

Борис Євгенович всіляко сприяв нашим контактам з данськими організаціями, підтримував наші тривалі відрядження до цієї країни, в тому числі і за участі технологів Дослідного заводу зварювального устаткування ІЕЗ. Так ми працювали багато років, поки особливі обставини, пов'язані з ЧАЕС, не змусили Бориса Євгеновича взяти особисту участь у черговій нашій поїздки в інститут «Jom», відвідати фірми «Migatronik» і «Force».

Борис Євгенович ніколи раніше не був на батьківщині своїх предків, що підігрівало його інтерес до цієї поїздки. Якщо минулі відрядження ми організовували самостійно по лінії Українського та Данського товариств НК, то цю поїздку міжакадемічного плану організував Білодід Р.М. саме як міждержавний візит.

У Данії існують кілька академій. Ми потрапили до Академії літератури, історії та пошти, в якій немає технічних НДІ. Проте, ми змогли побувати у всіх цікавих для нас організаціях і провели важливу для України роботу.

В інституті «Force» Борис Євгенович підписав всі необхідні папери про спільні роботи по запобіганню наслідків аварії на ЧАЕС та спільних заходах щодо вдосконалення діагностики устаткування, що експлуатується на АЕС.

На фірмі «Migatronik», яка виробляє зварювальне обладнання, ми підвели підсумки по спільному виробництву зварювальних джерел, регульованих магнітною комутацією за нашими патентами.

Особливо цікавою була наша участь в роботі шостої сесії інституту «Jom», де я виступив з доповіддю по наших спільних роботах з фірмами «Migatronik» і «Force».

З великим натхненням присутні вітали Бориса Євгеновича Патона. Всі ці дні ми жили на базі інституту «Jom». По місту нас возив на власному автомобілі співробітник інституту «Force», однокласник Бориса Євгеновича – Курт Патон. У Данії це дуже поширене прізвище.

З Данії ми відлітали так само непросто, оскільки наш літак через погані метеоумови змінив курс і був приземлений в аеропорту Хітроу (Англія), де ми очікували 9 год на відкриття аеропорту Бориспіль. Тут нас знайшов посол України в Англії С. Комісаренко і українці, які мешкають в Англії. З усією цією публікою Борис Євгенович дуже швидко знайшов спільну мову. В результаті були і пісні, і вірші, які прекрасно читав Борис Євгенович. Як виявилось, він добре знав і пам'ятав ранні ліричні вірші П.Г. Тичини.

Після цієї поїздки у нас активізувалися контакти з данськими науковими організаціями, в яких побував Борис Євгенович. В Україні мало хто знає про діяльність інституту «Jom». Правильна назва цієї міжнародної організації – Informational Institute of Welding (IIW). У 2019 р. ця організація проводила 20-ту конференцію на своїй базі в м. Helsingør, на якій свого часу працювали і ми з Борисом Євгеновичем.

Борис Євгенович гаряче підтримував створення міжнародної академії дефектоскопії (ANDTI), членом якої він був, установчі збори якого відбулися в м. Бреція (Італія) в Соборі Святого Павла. Не всі міжнародні наукові діячі були такими, як Борис Євгенович, здатними зрозуміти важливість створення ANDTI. Почалося цькування президента ANDTI проф. G. Nardony, яке він важко переносив.

До 2011 р. серйозно зміцніла опозиція проти ANDTI, яка дорікала академікам ANDTI в дублюванні діяльності EFNDT і ICNDT, і це було схоже на правду. Статuti цих організацій були дуже схожі. На збори в Угорщині в м. Егер приїхало досить багато академіків. На конференції була хороша виставка, на якій я зустрівся зі знаменитим Янишевим, постачальником АЕ обладнання в Україну, і багато чого дізнався про схему впровадження обладнання АЕ в Україні, якому Борис Євгенович надавав великого значення.

Напередодні будь-якого великого суспільного заходу зазвичай засідає Оргкомітет, на яко-

му планується регламент, обговорюється порядок проведення майбутніх зборів. Для цього і зібрався Оргкомітет ANDTI. Його відкрив президент G. Nardony з сумним повідомленням, що «погані» люди сильно критикують ANDTI, необхідність існування такої Академії. Роль науково-технічних товариств EFNDT (Європи) і ICNDT (всієї планети) не може замінити і конкурувати зі зборами вчених NDT. Приклад діяльності Бориса Євгеновича викликав інтерес у академіків ANDTI. Усі вони чули про цю людину та поважали його.

Борис Євгенович був членом багатьох академій наук і надавав великого значення фундаментальним академічним наукам, які тільки за деякий час дають практичні результати. Він був членом і ANDTI, знав G. Nardony. Тому, коли ми Борису Євгеновичу розповіли про нашу перемогу в Угорщині, він був щасливий. Борису Євгеновичу зрозуміло було все людське, в тому числі і причини, через які діячі EFNDT і ICNDT намагалися провалити ANDTI.

Борис Євгенович умів дружити з «сильними світу цього». Цей його дар приносив велику користь всій нашій команді. На фото відображено його контакт з Л.Д. Кучмою, якого він просив сприяти нам в проведенні робіт на «Південмаші». Б.Є. Патон і Л.Д. Кучма зіграли важливу роль в становленні дефектоскопії. Борис Євгенович це робив, розуміючи, що без НК обійтися неможливо, а Леонід Данилович довгі роки сприяв нам проводити конференції з дефектоскопії на базі під м. Дніпро, підтримував наші роботи з КБ «Південне».

Борис Євгенович дуже пишався цими досягненнями, в яких сконцентровані багаторічні роботи Інституту. Так, за допомогою тангенціального просвічування може бути визначено профіль

стінки труби, товщина ізоляції та її прилягання до труби. Цією технологією володіє тільки ІЕЗ.

Борис Євгенович придавав велике значення розвитку АЕС. Він з президентом Академії наук СРСР А.П. Александровим проводили великі наради на ЗАЕС, куди приїжджало багато фахівців різного профілю з усього СРСР, обговорювалися багато питань, в тому числі й неруйнівний контроль.

Свого часу на Харцизькому і Висунському трубних заводах Борис Євгенович був в камерах рентген-телевізійного контролю (РТК), який є остаточним в долі труби. У цих камерах стояли установки РТК. Тому особливою гордістю Бориса Євгеновича були наші досягнення в створенні мініатюрного портативного цифрового рентген-телевізійного обладнання на основі високочутливих ПЗС-матриць, флуоресцентних екранів і твердотільних мініатюрних R-перетворювачів, які значно менші ніж ті, що він бачив раніше.

Відсутність проміжних носіїв інформації (плівок, п/п пластин) підвищує продуктивність, дозволяє вести контроль в реальному часі і в кілька разів знижує вартість контролю. Борису Євгеновичу довелося перебувати в багатьох різних медичних центрах, багаторазово обстежуватися різними радіаційними методами, де він звернув увагу на відсутність там в останні роки плівкової радіографії. Я обіцяв йому, що цього ми доб'ємося і в зварювальній справі. Тому ми інтенсивно працюємо над безплівковою радіографією. Борис Євгенович допоміг нам придбати мініатюрний японський перетворювач і ми почали реалізувати для промисловості цифрові технології без плівки. Технології на основі твердотільних або оптоелектронних перетворювачів після комп'ютерної обробки цифрових зображень дають можливість отримати чутливість до 0,1% і проводити вивчення об'єкта в русі.



МІЖНАРОДНІ ТА ЄВРОПЕЙСЬКІ СТАНДАРТИ В ЗВАРЮВАЛЬНОМУ ВИРОБНИЦТВІ УКРАЇНИ

Н.О. Проценко, А.В. Чорний

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

Представлено інформацію щодо гармонізації міжнародних і європейських стандартів, актуальний перелік діючих стандартів в зварювальному виробництві.

З 1 січня 2019 р. переважна більшість стандартів Радянського Союзу «ГОСТ», розроблених до 1992 р., втратили силу в Україні.

Необхідність припинення дії на території України радянських ГОСТів визначена Програмою діяльності Кабінету Міністрів України.

У 2015 р. Національним органом по стандартизації (УкрНДНЦ) були видані відповідні накази про скасування ГОСТів з втратою чинності протягом 2016 – 2018 рр. і з повною відмовою від них, починаючи з 1 січня 2019 р. Всього повинні бути скасовані 12090 ГОСТів.

У той же час, з метою зниження ризиків для бізнесу Мінекономрозвитку і пропозицій зацікавлених сторін Національний орган по стандартизації прийняв ряд наказів, згідно з якими 1173 ГОСТи залишаються діяти до 1 січня 2022 р.

З переліком ГОСТів, які зараз залишаються в силі, можна ознайомитися на офіційному сайті ДП «УкрНДНЦ».

Продовження дії ГОСТів після 2022 р. неможливо в зв'язку із зобов'язаннями України щодо реформування сфери технічної стандартизації передбаченими Угодою про асоціацію з ЄС.

Застосовувані в Україні категорії стандартів та їх індекси:

- державні стандарти України (ДСТУ);

- державні стандарти України, за допомогою яких впроваджені стандарти ISO (ДСТУ ISO, ДСТУ ISO / IEC, ДСТУ ISO / IEC TR);

- державні стандарти України, за допомогою яких впроваджені стандарти IEC (ДСТУ IEC, ДСТУ IEC QC);

- державні стандарти України, за допомогою яких впроваджені європейські стандарти (ДСТУ EN, ДСТУ prEN, ДСТУ ENV, ДСТУ EN ISO).

- ISO – Міжнародна організація по стандартизації (165 країн), секретаріат знаходиться в Женеві (Швейцарія)

- IEC – Міжнародна електротехнічна комісія;

- ISO / IEC – спільний комітет міжнародних організацій ISO і IEC;

- ISO / TR, ISO / IEC TR – технічний звіт ISO або ISO / IEC;

- CEN – Європейський комітет зі стандартизації (48 членів), штаб-квартира в Брюсселі (Бельгія);

- CENELEC – Європейський комітет стандартизації з електротехніки

- ETSI – незалежна організація по стандартизації в телекомунікаційній промисловості (виробники обладнання та оператори мереж) в Європі, знаходиться в Вальбонн (Франція);

- EN – європейський стандарт;

- ENV – експериментальний європейський стандарт;

- prEN – проект європейського стандарту

Сталі

Стандарт	Назва
ДСТУ CEN ISO/TR 15608	Зварювання. Настанови щодо класифікації металевих матеріалів за групами
ДСТУ EN 10025-1	Вироби гарячекатані з конструкційної сталі. Частина 1. Загальні технічні умови постачання
ДСТУ EN 10025-2	Вироби гарячекатані з конструкційної сталі. Частина 2. Технічні умови постачання нелегованих конструкційних сталей
ДСТУ EN 10025-3	Вироби гарячекатані з конструкційної сталі. Частина 3. Технічні умови постачання зварюваних дрібнозернистих конструкційних сталей, підданих нормалізації або нормалізувальному прокатуванню
ДСТУ EN 10025-4	Вироби гарячекатані з конструкційної сталі. Частина 4. Технічні умови постачання термомеханічнооброблених зварюваних дрібнозернистих сталей
ДСТУ EN 10025-5	Вироби гарячекатані з конструкційної сталі. Частина 5. Технічні умови постачання конструкційних сталей з підвищеною тривкістю до атмосферної корозії
ДСТУ EN 10025-6	Вироби гарячекатані з конструкційної сталі. Частина 6. Технічні умови постачання плоских виробів з конструкційної сталі з високою границею плинності в загартованому та відпущеному стані
ДСТУ EN 10027-1	Сталь. Системи позначення. Частина 1. Назви сталі

ДСТУ EN 10027-2	Сталь. Системи позначення. Частина 2. Система нумерації
ДСТУ EN 10028-1	Вироби плоскі сталеві для використання під тиском. Частина 1. Загальні вимоги
ДСТУ EN 10028-2	Вироби плоскі сталеві для використання під тиском. Частина 2. Нелеговані та легировані сталі з точно визначеними властивостями за підвищених температур
ДСТУ EN 10028-3	Вироби плоскі сталеві для використання під тиском. Частина 3. Нормалізовані зварювані дрібнозернисті сталі
ДСТУ EN 10028-4	Вироби плоскі сталеві для використання під тиском. Частина 4. Сталі, що містять нікель з точно визначеними властивостями за низької температури
ДСТУ EN 10028-5	Вироби плоскі сталеві для використання під тиском. Частина 5. Зварювані термомеханічно оброблені дрібнозернисті сталі
ДСТУ CEN ISO/TR 20172	Зварювання. Системи групування матеріалів. Європейські матеріали
ДСТУ CEN ISO/TR 20173	Зварювання. Системи групування матеріалів. Американські матеріали
ДСТУ CEN ISO/TR 20174	Зварювання. Системи групування матеріалів. Японські матеріали
ДСТУ EN 10028-6	Вироби плоскі сталеві для використання під тиском. Частина 6. Зварювані загартовані та відпущені дрібнозернисті сталі
ДСТУ EN 10028-7	Вироби плоскі сталеві для використання під тиском. Частина 7. Нержавкі сталі
ДСТУ EN 10029	Листи сталеві гарячекатані завтовшки 3 мм і більше. Допуски на розміри, форму та масу
ДСТУ EN 10034	Двотаври сталеві нормальні та широкополічні з паралельними гранями полиць. Допуски на розміри й форму
ДСТУ EN 10051	Прокат листовий і штаба без покриву, отримані безперервним гарячим прокатуванням, з нелегованої та легированої сталі. Допуски на розміри й форму
ДСТУ EN 10088-1	Сталі нержавкі. Частина 1. Перелік нержавких сталей
ДСТУ EN 10088-2	Сталі нержавкі. Частина 2. Лист і стрічка з корозійнотривких сталей загальної призначеності. Технічні умови постачання
ДСТУ EN 10088-3	Сталі нержавкі. Частина 3. Напівготова продукція, заготовки, прутки, дріт, профілі та полірована продукція з корозійнотривких сталей загальної призначеності. Технічні умови постачання

Матеріали зварювальні

Стандарт	Назва
Електроди покриті	
ДСТУ EN ISO 2560	Матеріали зварювальні. Електроди покриті для ручного дугового зварювання нелегованих та дрібнозернистих сталей Класифікація
ДСТУ EN ISO 3581	Матеріали зварювальні. Електроди з покриттям для ручного дугового зварювання неіржавких та жароміцних сталей. Класифікація
ДСТУ EN ISO 3580	Зварювальні матеріали. Електроди з покриттям для ручного дугового зварювання жароміцних сталей. Класифікація
ДСТУ EN ISO 18275	Зварювальні матеріали. Електроди для ручного дугового зварювання жароміцних сталей. Класифікація
ДСТУ EN ISO 14172	Зварювальні матеріали. Електроди з покривом для ручного дугового зварювання нікелю та його сплавів. Класифікація
ДСТУ EN ISO 6848	Дугове зварювання та різання. Електроди вольфрамові неплавкі. Класифікація
ДСТУ EN 14700	Матеріали зварювальні. Зварювальні матеріали для наплавлення
EN ISO 1071	Матеріали зварювальні. Покриті електроди, дріт, присадні прутки і трубчасті електроди з покриттям для зварювання плавленням чавуну. Класифікація
ISO 17777	Зварювальні матеріали. Електроди з покривом для ручного дугового міді і мідних сплавів. Класифікація.
Дроти суцільного перерізу	
ДСТУ ISO 14341	Матеріали зварювальні. Електродні дроти та наплавлений метал у захисному газі плавким електродом нелегованих і дрібнозернистих сталей. Класифікація
ДСТУ EN ISO 14171	Зварювальні матеріали. Дроти електродні суцільні й порошкові та комбінації дріт електродний/флюс для дугового зварювання під флюсом нелегованих та дрібнозернистих сталей. Класифікація
ДСТУ EN ISO 14343	Зварювальні матеріали. Дроти та стрічки електродні, дроти та прутки для дугового зварювання нержавких і жароміцних сталей. Класифікація
ДСТУ EN ISO 18273	Матеріали зварювальні. Електроди, дріт та прутки для зварювання алюмінію та його сплавів. Класифікація
ДСТУ EN ISO 18274	Зварювальні матеріали. Дроти та стрічки електродні, дроти та прутки для зварювання плавленням нікелю та нікелевих сплавів. Класифікація
ДСТУ EN ISO 16834	Зварювальні матеріали. Дроти електродні, дроти, прутки та наплавлений метал для дугового зварювання високоміцних сталей у захисному газі. Класифікація

ДСТУ EN ISO 636	Зварювальні матеріали. Прутки, дріт та наплавлений метал для зварювання нелегованих і дрібнозернистих сталей вольфрамовим електродом в інертних газах. Класифікація
ДСТУ EN ISO 26304	Зварювальні матеріали. Дроти електродні суцільні, порошкові та комбінації дріт електродний/флюс для дугового зварювання під флюсом високоміцних сталей. Класифікація
ДСТУ EN ISO 24034	Зварювальні матеріали. Дроти електродні суцільні, дроти та прутки суцільні для зварювання плавленням титану та його сплавів. Класифікація
ДСТУ EN ISO 21952	Зварювальні матеріали. Дроти електродні, дроти, прутки та наплавлений метал для дугового зварювання жароміцних сталей у захисних газах. Класифікація
ДСТУ EN ISO 24598	Зварювальні матеріали. Дроти електродні суцільні й порошкові та комбінації дріт електродний/флюс для дугового зварювання під флюсом жароміцних сталей. Класифікація
EN ISO 1071	Матеріали зварювальні. Покриті електроди, дріт, присадні прутки і трубчасті електроди з покриттям для зварювання плавленням чавуну. Класифікація
Дроти порошкові	
ДСТУ EN ISO 17632	Зварювальні матеріали. Дроти порошкові для дугового зварювання нелегованих та дрібнозернистих сталей у захисному газі чи без захисного газу. Класифікація
ДСТУ EN ISO 17633	Зварювальні матеріали. Дроти та прутки порошкові для дугового зварювання нержавіжних і жароміцних сталей у захисному газі чи без захисного газу. Класифікація
ДСТУ EN ISO 17634	Зварювальні матеріали. Дроти порошкові для дугового зварювання жароміцних сталей у захисних газах. Класифікація
ДСТУ EN ISO 18276	Зварювальні матеріали. Дроти порошкові для дугового зварювання високоміцних сталей у захисних газах або без захисного газу. Класифікація
ДСТУ EN ISO 12153	Зварювальні матеріали. Дроти порошкові для дугового зварювання нікелю та його сплавів у захисному газі чи без захисного газу. Класифікація
EN ISO 1071	Матеріали зварювальні. Покриті електроди, дріт, присадні прутки і трубчасті електроди з покриттям для зварювання плавленням чавуну. Класифікація
Захист зони зварювання	
ДСТУ EN ISO 14174	Зварювальні матеріали. Флюси для дугового зварювання під флюсом. Класифікація
ДСТУ EN ISO 14175	Матеріали зварювальні. Захисні гази для дугового зварювання та різання

Випробування зварювальних матеріалів

Стандарт	Назва
ДСТУ EN ISO 15792-1	Матеріали зварювальні. Методи випробування. Частина 1. Методи випробування зразків із наплавленого металу зварного шва зі сталі, нікелю та нікелевих сплавів
ДСТУ EN ISO 15792-2	Матеріали зварювальні. Методи випробування. Частина 2. Готування зразків для випробування одно- та двосторонніх з'єднань зі сталі
ДСТУ EN ISO 15792-3	Матеріали зварювальні. Методи випробування. Частина 3. Класифікаційні випробування зварювальних матеріалів на зручність розташування шва та проплавлення кореня шва для кутових зварних швів
ДСТУ ISO 6847	Матеріали зварювальні. Наплавлення шару металу для хімічного аналізу
ДСТУ EN ISO 14372	Матеріали зварювальні. Визначення вологостійкості електродів для ручного дугового зварювання вимірюванням дифузійного водню
ДСТУ EN ISO 2401	Електроди покриті. Визначення коефіцієнта використання, переходу металу та коефіцієнта наплавлення
ДСТУ EN ISO 3690	Зварювання та споріднені процеси. Визначення вмісту водню в металі шва під час дугового зварювання
ДСТУ EN ISO 8249	Зварювання. Визначення феритної фази (FN) у металі зварного шва аустенітних і дуплексних феритно-аустенітних Cr-Ni нержавіжних сталей
ДСТУ EN ISO 14372	Матеріали зварювальні. Визначення вологостійкості електродів для ручного дугового зварювання вимірюванням дифузійного водню

Система менеджменту якості при виробництві та постачанні зварювальних матеріалів

Стандарт	Назва
ДСТУ EN 12074	Матеріали зварювальні. Вимоги до якості виготовлення, постачання і продажу зварювальних матеріалів для зварювання та споріднених процесів
ДСТУ EN 13479	Зварювальні матеріали. Загальні вимоги до зварювальних матеріалів та флюсів для зварювання плавленням металевих матеріалів
ДСТУ EN ISO 544	Матеріали зварювальні. Технічні умови постачання присадних матеріалів і флюсів. Тип продукції, розміри, допуски та маркування

ДСТУ EN ISO 14344	Зварювальні матеріали. Постачання зварювальних матеріалів та флюсів
ДСТУ EN 10204	Вироби металеві. Види документів контролю

Випробування неруйнівні

Стандарт	Назва
ДСТУ EN ISO 17635	Неруйнівний контроль зварних з'єднань. Загальні правила для металевих матеріалів
ДСТУ EN ISO 17636-1	Неруйнівний контроль зварних швів. Радіографічний контроль. Частина 1. Способи контролю рентгенівським і гамма-випромінюванням із застосуванням плівки
ДСТУ EN ISO 17636-2	Неруйнівний контроль зварних швів. Радіографічний контроль. Частина 2. Способи контролю рентгенівським і гамма-випромінюванням із застосуванням цифрових детекторів
ДСТУ EN ISO 10675-1	Неруйнівний контроль зварних швів. Рівні приймання для радіографічного контролю. Частина 1. Сталь, нікель, титан та їх сплави
ДСТУ EN ISO 10675-2	Неруйнівний контроль зварних швів. Рівні приймання для радіографічного контролю. Частина 2. Алюміній та його сплави
ДСТУ EN ISO 17637	Неруйнівний контроль зварних швів. Візуальний контроль з'єднань, виконаних зварюванням плавленням
ДСТУ EN ISO 17640	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Методи, рівні контролювання та оцінювання
ДСТУ EN ISO 13588	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Застосування автоматизованого методу фазованих решіток
ДСТУ EN ISO 10863	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Застосування дифракційно-часового методу (TOFD)
ДСТУ EN ISO 15626	Неруйнівний контроль зварних швів. Дифракційно-часовий метод (TOFD). Рівні приймання
ДСТУ EN ISO 16827	Неруйнівний контроль. Ультразвуковий контроль. Визначення характеристик і розмірів несучільностей
ДСТУ EN ISO 11666	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Рівні приймання
ДСТУ EN ISO 23279	Неруйнівний контроль зварних швів. Ультразвуковий контроль. Характеристика розривів у зварних швах
ДСТУ EN ISO 3452-1	Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 1. Загальні принципи
ДСТУ EN ISO 3452-2	Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 2. Випробування дефектоскопічних матеріалів
ДСТУ EN ISO 3452-3	Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 3. Контрольні випробувальні зразки
ДСТУ EN ISO 3452-4	Неруйнівний контроль. Контроль капілярний. Частина 4. Устаткування
ДСТУ EN ISO 3452-5	Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 5. Капілярний контроль при температурах понад 50 °C
ДСТУ EN ISO 3452-6	Неруйнівний контроль. Капілярний контроль. Частина 6. Капілярний контроль при температурах нижче 10 °C
ДСТУ EN ISO 23277	Неруйнівний контроль зварних швів. Капілярний контроль. Рівні приймання
ДСТУ EN ISO 17638	Неруйнівний контроль зварних швів. Магнітопорошковий контроль
ДСТУ EN ISO 9934-1	Неруйнівний контроль. Магнітопорошковий контроль. Частина 1. Загальні вимоги
ДСТУ EN ISO 9934-2	Неруйнівний контроль. Магнітопорошковий контроль. Частина 2. Засоби контролю
ДСТУ EN ISO 9934-3	Неруйнівний контроль. Магнітопорошковий контроль. Частина 3. Обладнання
ДСТУ EN ISO 23278	Неруйнівний контроль зварних швів. Магнітопорошковий контроль. Рівні приймання
ДСТУ EN ISO 3059	Неруйнівний контроль. Капілярний та магнітопорошковий контроль. Умови огляду
ДСТУ ISO 15549	Неруйнівний контроль. Вихрострумовий контроль. Загальні вимоги

Випробування руйнівні

Стандарт	Назва
ДСТУ EN ISO 4136	Випробування зварних з'єднань металевих матеріалів руйнівні. Випробування на поперечний розтяг
ДСТУ EN ISO 9016	Випробування зварних з'єднань металевих матеріалів руйнівні. Випробування на ударний згин. Розташування зразка для випробування, надрізу на зразках, протокол випробування
ДСТУ EN ISO 9017	Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Випробування на переламування
ДСТУ EN ISO 5178	Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Випробування на повздовжнє розтягування металу зварного шва в з'єднаннях, виконаних зварюванням плавленням

ДСТУ EN ISO 5173	Випробування зварних з'єднань металевих матеріалів руйнівні. Випробування на згин
ДСТУ EN ISO 9015-1	Випробування зварних з'єднань металевих матеріалів руйнівні. Випробування на твердість. Частина 1. Випробування на твердість зварних з'єднань, виконаних дуго-вим зварюванням
ДСТУ EN ISO 9015-2	Випробування зварних з'єднань металевих матеріалів руйнівні. Випробування на твердість. Частина 2. Випробування на мікротвердість зварних з'єднань
ДСТУ CEN ISO/TR 1606	Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Травлення для макро- та мікроскопічного дослідження
ДСТУ EN ISO 17639	Руйнівні випробування зварних з'єднань металевих матеріалів. Макроскопічне та мікроскопічне оцінювання зварних з'єднань
ДСТУ EN ISO 17641-1	Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Випробування на опірність утворенню гарячих тріщин. Дугове зварювання. Частина 1. Загальні положення
ДСТУ EN ISO 17641-2	Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Випробування на опірність утворенню гарячих тріщин. Дугове зварювання. Частина 2. Випробування на самозакріплених зразках
ДСТУ CEN ISO/TR 17641-3	Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Випробування на опірність утворенню гарячих тріщин. Дугове зварювання. Частина 3. Випробування під зовнішнім навантаженням
ДСТУ EN ISO 17642-1	Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Випробування на опірність утворенню холодних тріщин у зварних з'єднаннях. Дугове зварювання. Частина 1. Загальні положення
ДСТУ EN ISO 17642-2	Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Випробування на опірність утворенню холодних тріщин у зварних з'єднаннях. Дугове зварювання. Частина 2. Випробування на самозакріплених зразках
ДСТУ EN ISO 17642-3	Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Випробування на опірність утворенню холодних тріщин у зварних з'єднаннях. Дугове зварювання. Частина 3. Випробування під зовнішнім навантаженням
ДСТУ EN ISO 8249	Зварювання. Визначення феритної фази (FN) у металі зварного шва аустенітних і дуплексних феритно-аустенітних Cr-Ni нержавіжних сталей
ДСТУ EN ISO 9018	Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Випробування на розтягування хрестоподібних з'єднань і з'єднань внакладку
ДСТУ EN ISO 3690	Зварювання та споріднені процеси. Визначення вмісту водню в металі шва під час дугового зварювання
ДСТУ ISO 3651-1	Сталі корозійно-трьохфазні. Визначення тривкості до міжкристалічної корозії. Частина 1. Аустенітні та феритно-аустенітні (двофазні) сталі. Випробування на корозію у середовищі азотної кислоти визначенням втрати маси (випробування за Хью)
ДСТУ EN ISO 3651-2	Сталі корозійно-трьохфазні. Визначення тривкості до міжкристалічної корозії. Частина 2. Феритні, аустенітні та феритно-аустенітні (двофазні) сталі. Випробування на корозію у сірчано-кислотних середовищах
EN ISO 17655	Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Метод відбору зразків для вимірювання вмісту дельта-фериту.

Персонал зварювального виробництва

Стандарт	Назва
ДСТУ EN ISO 14731	Координація зварювальних робіт. Завдання та функції
ДСТУ EN ISO 9712	Неруйнівний контроль. Кваліфікація та сертифікація персоналу неруйнівного контролю
ДСТУ EN ISO 14732	Персонал зварювального виробництва. Атестаційне випробування операторів автоматичного зварювання плавленням та наладчиків контактного зварювання металевих матеріалів
ДСТУ EN ISO 9606-1	Кваліфікаційні випробування зварників. Зварювання плавленням. Частина 1. Сталі
ДСТУ EN ISO 9606-2	Кваліфікаційні випробування зварювальників. Зварювання плавленням. Частина 2. Алюміній і алюмінієві сплави
ДСТУ EN ISO 9606-3	Кваліфікаційні випробування зварювальників. Зварювання плавленням. Частина 3. Мідь і мідні сплави
ДСТУ EN ISO 9606-4	Кваліфікаційні випробування зварювальників. Зварювання плавленням. Частина 4. Нікель і нікелеві сплави
ДСТУ EN ISO 9606-5	Кваліфікаційні випробування зварювальників. Зварювання плавленням. Частина 5. Титан і титанові сплави, цирконій і цирконієві сплави
ДСТУ ISO 24394	Зварювання для аерокосмічного застосування. Атестаційне випробування зварювальників та операторів. Зварювання плавленням металевих складників

ДСТУ ISO 11745	Паяння для аерокосмічного застосування. Кваліфікаційні випробування для паяльщиків та операторів паяльного устаткування. Паяння металевих компонентів
ДСТУ EN ISO 15618-1	Кваліфікаційні випробування зварювальників для підводного зварювання. Частина 1. Зварювальники-підводники, що працюють у гіпербаричному мокрому середовищі
ДСТУ ISO 15618-2	Кваліфікаційні випробування зварювальників для підводного зварювання. Частина 2. Зварювальники-підводники та оператори зварювання, що працюють у гіпербаричному сухому середовищі
ДСТУ EN ISO 13585	Паяння. Кваліфікаційні випробування паяльщиків і операторів
ДСТУ EN 13067	Персонал, який виконує зварювання пластмас. Кваліфікаційні випробування зварників. Зварні термопластичні конструкції

Технологічна інструкція зі зварювання (WPS)

Стандарт	Назва
ДСТУ ISO 15609-1	Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Технологічна інструкція зі зварювання. Частина 1. Дугове зварювання
ДСТУ EN ISO 15609-2	Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Технологічна інструкція щодо зварювання. Частина 2. Газове зварювання
ДСТУ EN ISO 15609-3	Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Технологічна інструкція щодо зварювання. Частина 3. Електронно-променеве зварювання
ДСТУ EN ISO 15609-4	Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Технологічна інструкція щодо зварювання. Частина 4. Лазерне зварювання
ДСТУ EN ISO 15609-5	Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Технологічна інструкція щодо зварювання. Частина 5. Контактне зварювання
ДСТУ EN ISO 15609-6	Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Технологічна інструкція щодо зварювання. Частина 6. Гібридне лазерно-дугове зварювання

Атестація технології зварювання (WPQR), паяння (BPAR)

Стандарт	Назва
ДСТУ EN ISO 15607	Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Загальні правила
ДСТУ EN ISO 15610	Технічні умови та атестація технологічних процесів зварювання металевих матеріалів. Атестація на основі випробуваних зварювальних матеріалів
ДСТУ EN ISO 15611	Технічні умови та атестація технологічних процесів зварювання металевих матеріалів. Атестація на основі набутого зварювально-технічного досвіду
ДСТУ EN ISO 15612	Технічні умови та атестація технологічних процесів зварювання металевих матеріалів. Атестація через прийняття стандартної технологічної інструкції зі зварювання
ДСТУ EN ISO 15613	Технічні умови та атестація технологій зварювання металевих матеріалів. Атестація на основі довірливих випробувань
ДСТУ EN ISO 15614-1	Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 1. Дугове та газове зварювання сталей і дугове зварювання нікелю та нікелевих сплавів
ДСТУ EN ISO 15614-2	Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 2. Дугове зварювання алюмінію та алюмінієвих сплавів
ДСТУ EN ISO 15614-3	Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 3. Зварювання плавленням нелегованого та низьколегованого чавуну
ДСТУ EN ISO 15614-4	Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 4. Дугове зварювання дефектів алюмінієвих відливків
ДСТУ EN ISO 15614-5	Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 5. Дугове зварювання титану, цирконію та їх сплавів
ДСТУ EN ISO 15614-6	Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 6. Дугове і газове зварювання міді та її сплавів
ДСТУ EN ISO 15614-7	Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 7. Наплавлення
ДСТУ EN ISO 15614-8	Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 8. Зварювання труб із трубною плитою
ДСТУ EN ISO 15614-10	Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 10. Зварювання сухе гіпербаричне

ДСТУ ISO 15614-12	Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 12. Зварювання точкове, шовне та рельєфне
ДСТУ ISO 15614-13	Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 13. Зварювання опором встик та зварювання встик з оплавленням
ДСТУ ISO 15614-14	Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 14. Лазерно-дугове гібридне зварювання сталей, нікелю та нікелевих сплавів
ДСТУ EN 13134	Паяння твердим припоєм. Випробування процесу
ISO 11970	Технічні умови та атестація технології виробничого зварювання сталейних відливок

Підготування крайок під зварювання

Стандарт	Назва
ДСТУ EN ISO 9692-1	Зварювання та споріднені процеси. Рекомендації щодо підготування зварних з'єднань. Частина 1. Ручне дугове зварювання, зварювання в захисному газі, газове зварювання, TIG - зварювання та променеве зварювання сталей
ДСТУ EN ISO 9692-2	Зварювання та споріднені процеси. Рекомендації щодо підготування зварних з'єднань. Частина 2. Дугове зварювання сталей під флюсом
ДСТУ EN ISO 9692-3	Зварювання та споріднені процеси. Рекомендації щодо підготування зварних з'єднань. Частина 3. Дугове зварювання алюмінію та алюмінієвих сплавів в інертному газі плавким і вольфрамовим електродом
ДСТУ EN ISO 9692-4	Зварювання та споріднені процеси. Рекомендації щодо готування зварних з'єднань. Частина 4. Плаковані сталі
ДСТУ EN ISO 9013	Газове різання. Класифікація. Вимоги до геометричних розмірів та якості
ДСТУ EN 1708-1	Зварювання. Зварні з'єднання сталевих елементів Частина 1. Зварні з'єднання конструкційних елементів, що працюють під тиском
ДСТУ EN 1708-2	Зварювання. Зварні з'єднання сталевих елементів. Частина 2. Зварні з'єднання конструкційних елементів, на які не діє внутрішній тиск
ДСТУ EN 1708-3	Зварювання. Зварні з'єднання сталевих елементів. Частина 3. Зварні з'єднання з плакованих і промаслених, зморшкуватих конструкційних елементів, що працюють під тиском

Зварювання

Стандарт	Назва
ДСТУ ISO 2553	Зварювання та споріднені процеси. Умовні позначки на кресленнях. Зварні з'єднання
ДСТУ ISO 4063	Зварювання та споріднені процеси. Перелік й умовні позначки процесів
ДСТУ ISO 13918	Зварювання. Шпильки і керамічні втулки для дугового приварювання шпильок
ДСТУ ISO 6947	Зварювання та споріднені процеси. Робочі положення
ДСТУ EN ISO 13916	Зварювання. Настанова щодо вимірювання температури попереднього нагрівання, температури металу між проходами зварювання та температури підтримуваного попереднього нагрівання
ДСТУ EN ISO 15620	Зварювання. Зварювання тертям металевих матеріалів
ДСТУ EN ISO 17660-1	Зварювання. Зварювання арматурної сталі. Частина 1. Зварні з'єднання, що несуть навантаження
ДСТУ EN ISO 17660-2	Зварювання. Зварювання арматурної сталі. Частина 2. Зварні з'єднання, що не несуть навантаження
ДСТУ ISO/TR 17671-1	Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 1. Настави щодо дугового зварювання
ДСТУ ISO/TR 17671-2	Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 2. Дугове зварювання феритних сталей
ДСТУ ISO/TR 17671-3	Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 3. Дугове зварювання нержавіжних сталей
ДСТУ ISO/TR 17671-4	Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 4. Дугове зварювання алюмінію та його сплавів
ДСТУ ISO/TR 17671-5	Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 5. Зварювання плакованої сталі
ДСТУ ISO/TR 17671-6	Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 6. Зварювання лазерне.
ДСТУ ISO/TR 17671-7	Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 7. Електронно-променеве зварювання
ДСТУ EN ISO 14555	Зварювання. Дугове приварювання шпильок з металевих матеріалів

ДСТУ EN ISO 16432	Зварювання опором. Процедура рельєфного зварювання низьковуглецевих сталей без покриву та з покривом з використанням рельєфних проєкцій
ДСТУ EN ISO 16433	Зварювання опором. Процедура шовного зварювання низьковуглецевих сталей без покриву та з покривом
EN ISO 14373	Зварювання опором. Процедура точкового зварювання низьковуглецевих сталей без покриву та з покривом
ДСТУ ISO 16338	Зварювання в авіаційно-космічній промисловості. Точкове та шовне зварювання
ДСТУ EN ISO 13920	Зварювання. Загальні допуски для зварних конструкцій. Розміри лінійні та кутові. Форма та положення
ДСТУ ISO 17663	Зварювання. Вимоги до якості термічного оброблення в процесі зварювання та споріднених процесів
ДСТУ ISO/TR 581	Зварюваність. Металеві матеріали. Загальні положення
ДСТУ EN 1090-1	Виконання сталевих і алюмінієвих конструкцій. Частина 1. Вимоги до оцінки відповідності компонентів конструкцій
ДСТУ EN 1090-2	Виконання сталевих та алюмінієвих конструкцій. Частина 2. Технічні вимоги до сталевих конструкцій
ДСТУ EN 1090-3	Виконання сталевих і алюмінієвих конструкцій. Частина 3 Технічні вимоги до алюмінієвих конструкцій
ДСТУ EN 1090-4	Виконання сталевих та алюмінієвих конструкцій. Частина 4. Технічні вимоги до холодноформованих сталевих будівельних елементів та конструкцій для покрівель, стель, підлог і стін
ДСТУ EN ISO 17662	Зварювання. Калібрування, перевіряння й атестація устаткування для зварювання та споріднених процесів
ДСТУ ISO / TR 18491	Зварювання та споріднені процеси. Настанови щодо вимірювання енергії зварювання
ДСТУ EN 15085-1	Залізниця. Зварювання рейкового рухомого складу та його елементів. Частина 1. Загальні положення
ДСТУ EN 15085-2	Залізниця. Зварювання рейкового рухомого складу та його елементів. Частина 2. Вимоги щодо якості та сертифікації зварювальників
ДСТУ EN 15085-3	Залізниця. Зварювання рейкового рухомого складу та його елементів. Частина 3. Вимоги щодо проектування
ДСТУ EN 15085-4	Залізниця. Зварювання рейкового рухомого складу та його елементів. Частина 4. Технологічні вимоги
ДСТУ EN 15085-5	Залізниця. Зварювання рейкового рухомого складу та його елементів. Частина 5. Контролювання, випробування та документування

Рівні якості

Стандарт	Назва
ДСТУ ISO 5817	Зварювання. Зварні шви під час зварювання плавленням сталі, нікелю, титану та інших сплавів (крім променевого зварювання). Рівні якості залежно від дефектів
ДСТУ EN ISO 6520-1	Зварювання та споріднені процеси. Класифікація геометричних дефектів у металевих матеріалах. Частина 1. Зварювання плавленням
ДСТУ EN ISO 6520-2	Зварювання та споріднені процеси. Класифікація геометричних дефектів у металевих матеріалах. Частина 2. Зварювання тиском
ДСТУ EN ISO 10042	Зварювання. З'єднання з алюмінію та його сплавів, виконані дуговим зварюванням. Рівні якості залежно від дефектів
ДСТУ EN ISO 13919-1	Зварювання. З'єднання, виконані електронно-променевим та лазерним зварюванням. Настанова щодо оцінювання рівня якості залежно від дефектів. Частина 1. Сталь
ДСТУ EN ISO 13919-2	Зварювання. З'єднання, виконані електронно-променевим та лазерним зварюванням. Настанова щодо оцінювання рівня якості залежно від дефектів. Частина 2. Алюміній та його сплави

Вимоги до якості зварювання

Стандарт	Назва
ДСТУ ISO 3834-1	Вимоги до якості зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 1. Критерії для вибирання відповідного рівня вимог до якості
ДСТУ ISO 3834-2	Вимоги до якості зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 2. Всебічні вимоги до якості
ДСТУ ISO 3834-3	Вимоги до якості зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 3. Типові вимоги до якості
ДСТУ ISO 3834-4	Вимоги до якості зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 4. Елементарні вимоги до якості

ДСТУ ISO 3834-5	Вимоги до якості зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 5. Документи, вимоги яких потрібно виконувати для підтвердження відповідності ISO 3834-2, ISO 3834-3 чи ISO 3834-4
CEN EN ISO 3834-6	Вимоги до якості зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 6. Настанови щодо впровадження ISO 3834
ДСТУ EN ISO 14554-1	Вимоги до якості зварювання. Зварювання опором металевих матеріалів. Частина 1. Докладні вимоги щодо якості
ДСТУ EN ISO 14554-2	Вимоги до якості зварювання. Зварювання опором металевих матеріалів. Частина 2. Елементарні вимоги щодо якості

Захист від корозії сталевих конструкцій

Стандарт	Назва
ДСТУ ISO 8501-1	Підготовка сталевих поверхонь перед нанесенням фарб і подібної продукції. Візуальне оцінювання чистоти поверхні. Частина 1. Ступені іржавіння та ступені підготовки непофарбованих сталевих поверхонь і сталевих поверхонь після повного видалення попередніх покриттів
ДСТУ ISO 8501-2	Підготовка сталевих поверхонь перед нанесенням фарб і подібної продукції. Візуальне оцінювання чистоти поверхні. Частина 2. Ступінь підготовки попередньо пофарбованих сталевих поверхонь після локалізованого (місцевого) видалення попередніх покриттів
ДСТУ ISO 8501-3	Підготовка сталевих поверхонь перед нанесенням фарб і подібної продукції. Візуальне оцінювання чистоти поверхні. Частина 3. Ступінь підготовки зварних швів, ребер та інших ділянок, які мають дефекти поверхні
ДСТУ ISO 8501-4	Підготовка сталевих поверхонь перед нанесенням фарб і подібної продукції. Візуальне оцінювання чистоти поверхні. Частина 4. Вихідні стани поверхні, ступінь підготовки і ступінь іржавіння щодо водоструминного оброблення високим тиском
ДСТУ ISO 12944-1	Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами. Частина 1. Загальний вступ
ДСТУ ISO 12944-2	Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами. Частина 2. Класифікація середовищ
ДСТУ ISO 12944-3	Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами. Частина 3. Критерії проектування
ДСТУ ISO 12944-4	Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами. Частина 4. Типи поверхні та її готування
ДСТУ ISO 12944-5	Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами. Частина 5. Захисні лакофарбові системи
ДСТУ ISO 12944-6	Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами. Частина 6. Лабораторні методи випробувань
ДСТУ ISO 12944-7	Фарби та лаки. Захист від корозії сталевих конструкцій захисними лакофарбовими системами. Частина 7. Виконання та контролювання фарбувальних робіт
ДСТУ ISO 2808	Фарби та лаки. Визначення товщини плівки

Термінологія

Стандарт	Назва
ISO/TR 25901-1	Зварювання та споріднені процеси. Словник. Частина 1. Загальні терміни
ISO/TR 25901-2	Зварювання та споріднені процеси. Словник. Частина 2. Охорона здоров'я та безпека
ISO/TR 25901-3	Зварювання та споріднені процеси. Словник. Частина 3. Зварювальні процеси
ISO/TR 25901-4	Зварювання та споріднені процеси. Словник. Частина 4. Дугове зварювання

Декларації

Стандарт	Назва
ДСТУ ISO/IEC 17050-1	Оцінювання відповідності. Декларація постачальника про відповідність. Частина 1. Загальні вимоги
ДСТУ ISO/IEC 17050-2	Оцінювання відповідності. Декларація постачальника про відповідність. Частина 2. Підтверджувальна документація

Менеджмент ризиків

Стандарт	Назва
ДСТУ ISO 31000	Менеджмент ризиків. Принципи та настанови
ДСТУ IEC/ISO 31010	Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику

НАШІ ПРИВІТАННЯ

Колектив Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України та редколегія журналу «Автоматичне зварювання» щиро і сердечно вітають:

- *Сергія Володимировича Ахоніна з обранням у академіки НАН України;*
- *Сергія Юрійовича Максимова та Володимира Миколайовича Коржика з обранням у члени-кореспонденти НАН України.*

Бажаємо міцного здоров'я, щастя, нових досягнень на благо України.



С.В. Ахонін – 1961 р. народження, з відзнакою закінчив Київське відділення Московського фізико-технічного інституту; з 1985 р. працює в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона; пройшов шлях від стажера-дослідника до заступника директора з наукової роботи (2021), завідувач відділу «Металур-

гія та зварювання титанових сплавів». Захистив кандидатську дисертацію у 1990 р., докторську – у 2003 р., професор (2015), член-кореспондент НАН України (2015).

Ахонін С.В. є відомим вченим в галузі матеріалознавства та електрометалургії тугоплавких та хімічно активних металів, який створив визнану вітчизняною та світовою науковою спільнотою наукову школу з металургії титанових сплавів, запропонував підхід до розв'язання наукових проблем взаємодії рідкого металу з газовою фазою в умовах поверхневого нагріву концентрованими джерелами енергії та структуроутворення в сплавах на основі титану при кристалізації в процесах спеціальної електрометалургії та під дією термічного циклу зварювання, що мають велике теоретичне та практичне значення. Як керівник наукової школи С.В. Ахонін підготував одного доктора технічних наук та п'ятьох кандидатів технічних наук, викладає навчальні дисципліни «Термодинаміка і кінетика металургійних процесів» і «Особливості з'єднання сплавів на основі нікелю, титану, алюмінію» в аспірантурі ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України.

В роботах Ахоніна С.В. дістала подальший розвиток теорія кінетики процесів рафінування металевих розплавів у вакуумі від газів в частині спільного розгляду процесів масопереносу в розплаві і газовій фазі та реакції молізації на міжфазній поверхні. На основі виконаних досліджень він уперше отримав кінетичні рівняння десорбції водню, азоту, кисню і вуглецю з рідких тугоплавких та хімічно активних металів у вакуумі та визначив чисельні значення коефіцієнтів масопереносу та констант швидкості реакцій молізації азоту та водню для титану, ніобію, танталу.

Ахонін С.В. зробив значний внесок у розвиток теорії і практики електронно-променевої плавки тугоплавких та хімічно активних металів. Зокрема, він розробив математичні моделі процесів кристалізації та випаровування металу під час електронно-променевої плавки, за допомогою яких було досліджено вплив технологічних режимів плавки на хімічний склад та структуру зливку, що дало змогу оптимізувати технологічні процеси електронно-променевої плавки ніобію та танталу, підвищивши техніко-економічні показники цих процесів на 15 %. За результатами досліджень ним була розроблена технологія електронно-променевої плавки з проміжною ємністю сплавів на основі титану, яка дозволяє одержувати зливки із гарантованим хімічним складом як за складом легуючих елементів, так і за вмістом домішок. З метою зменшення собівартості і трудомісткості виплавки зливок титану з первинної сировини вперше у світі була розроблена і впроваджена в виробництво технологія переплаву недроблених блоків губчастого титану в спеціалізованій електронно-променевій установці, що забезпечує підвищення на 20 % техніко-економічних показників процесу плавки та дозволяє виплавляти зливки масою до 20 т.

Фундаментальні дослідження Ахоніна С.В. щодо поведінки в титані, в тому числі в рідкому стані, тугоплавких включень з підвищеним вмістом азоту, кисню та вуглецю дозволили встановити механізми та закономірності дифузійного розчинення цих включень та вирішити критично важливу для авіабудівної галузі проблему гарантованого видалення тугоплавких включень з злитків титанових сплавів шляхом їх плавлення в електронно-променевих установках з проміжною ємністю.

Ахонін С.В. приймає активну участь в реалізації спільних 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. Гуанджоу).

Ахонін С.В. опублікував 302 наукові праці, в тому числі 7 монографій (зі співавторами), отримав 18 авторських свідоцтв та патентів України.



С.Ю. Максимов – 1954 р. народження, закінчив Київський політехнічний інститут; з 1977 р. працює в ІЕЗ ім. Є.О. Патона; з 2001 р. – завідувач відділу «Фізико-механічних досліджень зварюваності конструкційних сталей»; заступник директора з наукової роботи (2021); захистив кандидатську у 1996 р., докторську – у 2007 р.

Максимов С.Ю. – відомий фахівець у галузях матеріалознавства та зварювання металів. Основний напрямок його наукової діяльності – дослідження фізико-металургійних процесів дугового зварювання конструкційних сталей у водному середовищі, розробка наукових основ утворення зварних з'єднань конструкційних сталей при нестационарній імпульсній дузі і алгоритмів адаптивного керування процесом зварювання, створення електродних матеріалів, обладнання і технології підводного дугового зварювання і різання.

Основний напрямок досліджень – розв'язання проблеми створення нероз'ємних з'єднань із високими міцностними і експлуатаційними властивостями шляхом керування металургійними процесами, що протікають в зварювальній ванні, плавленням і переносом електродного металу та регульованого тепловкладення в зону зварного з'єднання з використанням джерел зварювального струму та механізмів подачі електродного дроту з можливостями генерування вихідних імпульсів заданого характеру та зовнішнього електромагнітного впливу.

На основі виконаних досліджень вперше було визначено ефективність модифікування наплавленого металу при підводному зварюванні шляхом введення в рідкометалеву ванну елементів-модифікаторів (мікролегуючих компонентів та нанорозмірних порошків) та застосування фізичних впливів – імпульсного характеру горіння дуги та електромагнітного перемішування. Виконаний комплекс металургійних, металографічних та технологічних досліджень дозволив встановити відмінність механізмів впливу процесів модифікування в умовах зварювання у водному середовищі у порівнянні зі зварюванням на повітрі і визначити найбільш ефективні шляхи вирішення поставленої задачі.

С.Ю. Максимов – професор кафедри зварювання Івано-Франківського національного університету нафти і газу, запрошений професор Китайського інституту нафти, голова ДЕК на кафедрах зварювання Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова. Під його керівництвом захищено 2 кандидатські дисертації.

С.Ю. Максимов автор більш ніж 280 наукових праць, у тому числі 16 монографій, 2 підручників, 53 авторських свідоцтв та патентів.



В.М. Коржик – 1958 р. народження, закінчив Львівський політехнічний інститут; з 1986 р. працює в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона; з 2004 р. – завідувач відділу «Електро-термічних процесів обробки матеріалів». Захистив кандидатську у 1987 р., докторську – у 2000 р.

В.М. Коржик – широко відомий вчений у галузі матеріалознавства та плазово-дугових технологій з'єднання, обробки, отримання нових матеріалів і нанесення покриттів. Його роботи присвячені дослідженню фізичних явищ та закономірностей формування структури та властивостей матеріалів при взаємодії з ними дугової плазми.

Під його керівництвом створені і розвиваються такі нові наукові напрямки:

- наукові основи плазово-дугових і гібридних процесів отримання покриттів та модифікування поверхні;
- нові процеси плазово-дугової сферодизації металів і сплавів різних систем легування та їх сполук;
- наукові основи нових плазових, дугових і гібридних (плазово-дугових, лазерно-плазових) процесів зварювання металів, 3D друку;
- створення нових матеріалів для зварювання, наплавлення, нанесення покриттів, в тому числі із застосуванням нанорозмірних і ультрадисперсних модифікаторів;
- наукові основи нових процесів плазового і гібридного лазерно-плазового різання металів, плазового різання на прямій та зворотній полярностях із застосуванням різних типів плазмоутворюючих середовищ.

Коржик В.М. вперше в Україні започаткував фундаментальні і прикладні розробки по отриманню покриттів із аморфною та нанокристалічною структурою в умовах плазового і дугового напильовання. Розвинув теорію термічної взаємодії одиночних часток в запорошених плазових струменях та їхньої сукупності з основою, встановив закономірності процесів тепло- і масопереносу та протікання мікрометалургійних процесів при формуванні покриттів.

Провів комплексні дослідження фізичних та металургійних процесів при зварюванні металів дуговою плазмою та в умовах гібридного процесу при її поєднанні із дугою плавкого електроду. Під його керівництвом досліджені газодинамічні та теплові характеристики плазового потоку, електричні і енергетичні характеристики процесу плазового різання металів на прямій та зворотній полярності.

В.М. Коржик – науковий директор Китайсько-українського Інституту зварювання ім. Є.О. Патона (КНР), член Академічної Ради ключової лабораторії передових зварювальних технологій провінції Гуандун (КНР).

Результати наукової діяльності Коржика В.М. опубліковані в більш ніж 300 наукових працях, в тому числі в 17 монографіях, він є співавтором 66 авторських свідоцтв та патентів України, РФ і Китаю.

ДО 50-РІЧЧЯ ВІДДІЛУ «ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ ПАЯННЯ»

Відділ «Фізико-хімічні процеси паяння» № 29 заснований 15.06.1971 р. на базі неструктурної лабораторії, що входила до відділу електричних процесів ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Засновником і першим завідувачем відділу до 1987 р. був д-р техн. наук О.А. Росошинський. З 1987 по 2016 рр. відділом керував д-р техн. наук, член-кор. НАНУ В.Ф. Хорунов, а з початку 2016 р. по теперішній час завідувачем відділу є д-р техн. наук С.В. Максимова.

При створенні відділу тематику досліджень спрямовували на вирішення потреб електронної промисловості – «Процеси зварювання та паяння мікроз'єднань». Роботи виконували успішно і ряд з них був удостоєний високих урядових нагород: у 1981 р. робота з технології складання напівпровідникових приладів із застосуванням ультразвуку була удостоєна Державної премії СРСР (Росошинський О.А.)

У тому ж році була завершена розробка конструкції і технології зварювання-паяння безкорпусного випрямного діода середньої потужності, яка була удостоєна в 1982 р. Державної премії УРСР (Росошинський О.А., Лебіга В.А., Кісліцин В.М., Мусін А.Г., Шевченко В.П.).

З плином часу напрямки досліджень успішно розвивалися і постійно розширювалися. У 1970-х роках у відділі було створено кілька типів електролізно-водних газогенераторів для потреб мікрозварювання і мікропаяння, проводилися дослідження зі створення паяльних паст і технології їх виготовлення (Самойленко В.Г.). У відділі вирішували проблему економії срібловмістких припоїв, що мало важливе значення для всього СРСР. З'явився новий підхід до економії дорогоцінних металів (срібла) – розробка мідно-фосфорних припоїв. Зокрема, був створений процес термоекструзії непластичних фосфористих припоїв з отриманням прутків різних діаметрів (1...3 мм). У 1990 р. дана робота була удостоєна Премії Ради Міністрів СРСР (Росошинський О.А., Бондарчук О.П., Левадний Л.П.).



О.А. Росошинський – завідувач відділу з 1971 по 1987 р., професор, заслужений діяч науки і техніки України (2003), лауреат державних премій СРСР (1981), УРСР (1982), Премії Ради Міністрів (1990)

У 1987 р. відділ очолив д-р техн. наук Хорунов В.Ф., що сприяло

появі нових напрямків, які пов'язані з авіацією, ракетобудуванням, технологічними проблемами термоядерного синтезу, підводного флоту та ін. Наукові дослідження відділу охоплюють практично всі конструкційні матеріали, використовувані в промисловості, розроблені наукові основи, припої і технологія вакуумного паяння тонкостінних конструкцій з нержавіючих сталей різних класів. Особливо потрібно відзначити розроблений унікальний комплекс (конструкція, матеріали, обладнання) технологічного процесу виготовлення нового типу аеродинамічних поверхонь – гратчастих рулів сучасних ракет.

За роботу в галузі ракетобудування присуджена Державна премія УРСР (Хорунов В.Ф., Володимирська І.А., 1988 р.).

Великий обсяг досліджень проведено в області розробки припоїв і технології паяння високолегованих нікелевих сплавів. Під керівництвом Хорунова В.Ф. вперше детально досліджено потрібні системи сплавів (NiCr–Zr, Ni–Cr–Hf), побудовані проекції поверхонь солідусу і ліквідусу часткової діаграми стану Ni–Cr–Zr₂Ni₇ і встановлено межі існування окремих фаз.

Для вирішення проблеми паяння титанових сплавів, зокрема, інтерметалідних, вивчені фазовий склад і інтервали плавлення систем Ti–Zr–Mn, Ti–Zr–Fe, Ti–Zr–Co в широких межах концентрацій, вперше побудовані поверхні ліквідусу цих систем. На базі отриманих результатів досліджень створено припої, які дозволили отримати з'єднання за структурою та властивостями близькі до основного металу (Хорунов В.Ф., Максимова С.В., Воронов В.В.).

На основі фундаментальних досліджень системи KF–AlF₃–K₃SiF₇ розроблений реактивний флюс, який дозволяє проводити процес паяння алюмінію без введення припою: останній утворюється в процесі змочування флюсом поверхні алюмінію. Створені технологічні процеси паяння різних виробів з даним флюсом для використання в кріогеніці, авіації, автомобілебудуванні та інших галузях промисловості. Технологія



В.Ф. Хорунов – д-р техн. наук, завідувач відділу з 1987 по 2016 р., професор (1993), заслужений діяч науки і техніки України (2004), член-кор. НАНУ (2006), лауреат Державної премії УРСР (1988) і премії ім. Є.О. Патона (2008)



Лауреати премії ім. Є.О. Патона: Хорунов В.Ф., Максимова С.В., Сабадаш О.М.

паяння алюмінію з нержавіючої сталлю впроваджена на підприємстві «Кислородмаш» (Одеса). Для низькотемпературного флюсового паяння алюмінію вперше синтезований новий клас комплексних тетрафторборатів (Хорунов В.Ф., Сабадаш О.М., Максимова С.В.).

За цикл робіт в області паяння перспективних матеріалів на основі нікелю, титану і алюмінію співробітникам відділу Хорунову В.Ф., Максимовій С.В., Сабадашу О.М. була присуджена премія ім. Є.О. Патона НАН України (2008 р.).

Відділом виконано ряд спеціальних проектів. Так, було підготовлено і успішно здійснено експеримент (станція «Салют-7», космонавти Л. Кизим і В. Соловйов) з паяння на навколоземній орбіті (Хорунов В.Ф., Швець В.І.).

Проведені фундаментальні дослідження з вивчення фізико-металургійних особливостей формування нероз'ємних різномірних з'єднань та запропоновано шляхи попередження утворення крихких фаз, що забезпечує високі механічні властивості та довготривалу міцність паяним вузлам в жорстких умовах експлуатації: при високій температурі, нейтронному опроміненні і постійно діючих навантаженнях (Хорунов В.Ф., Максимова С.В.).

Досягнення відділу в області паяння отримали міжнародне визнання і були реалізовані при виконанні низки міжнародних проектів: «Токомак» – зі створення установки термоядерного синтезу; «Копернікус» (ЄС) – в галузі електроніки; паяння інтерметалідних сплавів γ -TiAl з Ліверморською національною лабораторією (США); зі створення технологічного процесу паяння нержавіючих сталей з Національною лабораторією «Сандія» (США).

Великий обсяг досліджень проведений співробітниками відділу в області розробки технології ремонту та виготовлення бурових доліт з алмазно-твердосплавними різцями, в результаті чого вдалося в кілька разів збільшити величину проходки свердловин (Хорунов В.Ф., Стефанів Б.В., Максимова С.В., Сабадаш О.М., Воронов В.В., Ковальчук П.В.). Результати розробки впроваджено на шахті ім. Засядька (Донецьк), НВП «Нафтогазекologia» (Полтава) та ПрАТ «НІКББІ».

З 2016 р. відділ очолює д-р техн. наук С.В. Максимова. Під її керівництвом виконана низка проектів зі створення технологічних процесів паяння перспективних різномірних матеріалів: молибден-нержавіюча сталь (вуглецеві матеріали), Ковар-титан, розроблені наукові основи з пічного реактивно-флюсового паяння алюмінієвих сплавів в контрольованому газовому середовищі, що впроваджено на підприємствах КП СПБ «Арсенал», ПАТ «РАДАР».

Наразі у відділі продовжуються роботи, що охоплюють фундаментальні та прикладні дослідження зі створення і розробки припоїв та прогресивних технологій паяння різних матеріалів, у тому числі жароміцних нікелевих сплавів авіаційного і морського призначення, перспективних інтерметалідних матеріалів нового покоління, сплавів з особливими властивостями, тугоплавких, вуглецевих, твердосплавних матеріалів, кольорових металів, алюмінієвих сплавів, сталей різних марок і різномірних матеріалів.

Результати досліджень з паяння опубліковані в підручнику «Паяння матеріалів» (Єрмолаєв Г.В., Квасницький В.В., Квасницький В.Ф., Максимова С.В., Хорунов В.Ф., Чигарев В.В., 2015), в монографіях «Машиностроение. Энциклопедия. Технология сварки, пайки и резки (Т. III-IV; Патон Б.Е., Хорунов В.Ф., Максимова С.В., Россошинский А.А., Сабадаш О.М., Кучук-Яценко В.С. та ін., 2006); «Основы пайки тонкостенных конструкций из высоколегированных сталей» (Хорунов В.Ф., 2008), «Физико-технические проблемы современного материаловедения» – Хорунов В.Ф., Максимова С.В. (в 2-х т. Т. 1. Ред. кол. И.К. Походня и др.; НАН Украины. Киев, Академперіодика, 2013).

Актуальність і наукова значимість досліджень і розробок, що виконує відділ останніми роками, підтверджують публікації в монографіях, видавництва яких знаходяться за межами України: WPL, Oxford Cambridge, «Advances in brazing. Science, technology and applications» (Хорунов В.Ф., Максимова С.В., Сабадаш О.М. 2013); London, UK, «Welding – Modern Topics» (Максимова С.В., 2021).

За час існування відділу підготовлено 18 кандидатів технічних наук, 2 доктора технічних наук.



Максимова С.В – д-р техн. наук, завідувач відділу з 2016 р., с.н.с., заслужений діяч науки і техніки України (2020), лауреат премії ім. Є.О. Патона (2008), нагороджена відзнакою «За наукові досягнення» НАНУ (2014); ювілейною грамотою НАНУ (2018), медаллю КНР «China Government Friendship Award» (2016), почесний професор машинобудівного науково-дослідного інституту (Чженчжоу, КНР)



МІЖНАРОДНА ОНЛАЙН-КОНФЕРЕНЦІЯ «ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ІНЖИНІРИНГ У ЗВАРЮВАННІ І СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСАХ – POLYWELD 2021»

У травні 2021 р. на кафедрі зварювального виробництва Інституту матеріалознавства та зварювання ім. Є.О. Патона Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» (ІМЗ ім. Є.О. Патона) відбулась міжнародна онлайн-конференція «Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні і споріднених процесах – PolyWeld 2021», що об'єднала у професійному спілкуванні спеціалістів із зварювання та споріднених технологій з таких країн світу, як Україна, Литва, Білорусь, Польща, Федеративна Республіка Німеччина, Нова Зеландія, Бразилія, Канада, Китайська Народна Республіка та ін.

Основним завданням міжнародної конференції PolyWeld, яка вже відбулася втретє, є висвітлення наукових та інженерних досягнень і набутих знань з метою їх подальшого впровадження для вирішення потреб промисловості, удосконалення наукової підготовки висококваліфікованих фахівців у галузі зварювального виробництва та споріднених процесів.

Організаторами конференції виступили кафедра зварювального виробництва ІМЗ ім. Є.О. Патона спільно з Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України та ТОВ «Науково-виробничий центр «ПЛАЗЕР».

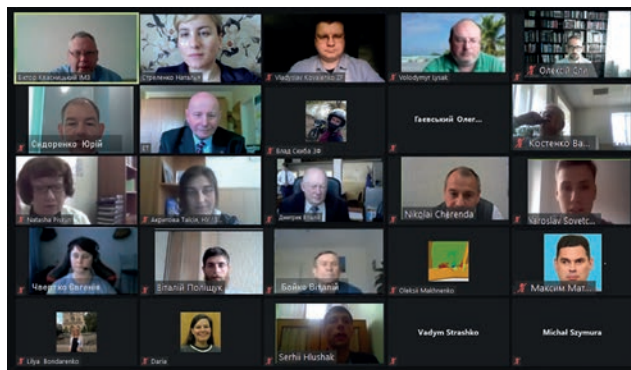
Партнерами конференції була низка сучасних інноваційних організацій, підприємств та університетів: Fronius Ukraine GmbH, Abicor Binzel, Orion Group, PlasmaTec, Ventservice, Łukasiewicz Instytut Spawalnictwa, Guangdong Academy of Sciences, КУІЗ ім. Є.О. Патона, УкрНДІАТ, НУК ім. адмірала Макарова.

В роботі конференції висвітлено значний ряд актуальних питань зварювання та споріднених процесів, зокрема: сучасні тенденції розвитку фізико-хімічної взаємодії при з'єднанні матеріалів, вплив структур-

ної будови і фазового складу на міцність, надійність і ресурс з'єднань, інноваційні та комп'ютерні технології у зварюванні та споріднених процесах, контроль якості нероз'ємних з'єднань, нанотехнології, обладнання та джерела живлення.

В процесі роботи конференції було підтверджено, що гарантоване забезпечення високої якості виробів і конструкцій можливе лише при комбінованому застосуванні сучасних матеріалів та інноваційних технологій, які ґрунтуються на передових підходах до проведення наукових досліджень, в тому числі розрахункових досліджень за допомогою сучасних комп'ютерних програмних комплексів, використання яких скорочує час та дозволяє суттєво зменшити вартість досліджень. В свою чергу успішна реалізація сучасних технологій неможлива без застосування нового прогресивного обладнання. Створення нових прогресивних технологій і обладнання повинно базуватися не лише на фундаментальних дослідженнях, а і на прикладних, технологічних. При цьому проблематика як фундаментальних, так і прикладних досліджень повинна формуватися на основі запитів підприємств з метою вирішення існуючих проблем і забезпечення підвищення продуктивності виробничих процесів, ресурсозбереження та продовження терміну експлуатації виробів і конструкцій, створення нових інноваційних та екологічних технологій, економного використання енергетичних, трудових ресурсів та матеріалів.

Доповідачами було відмічено, що у сучасному світі суттєво зростають вимоги та очікування студентів і роботодавців до вищої освіти. За таких умов основним завданням для університетів стає ефективне управління матеріальними, фінансовими, трудовими та інтелектуальними ресурсами, і відповідне забезпечення високої якості освіти і наукових досліджень. Лише ті університети, які здатні генерувати вагомні наукові результати в пріоритетних галузях економіки можуть стати фактичними лідерами в підготовці найбільш висококваліфікованих фахівців для сучасного ринку праці. Саме такі науково-освітні комплекси є найбільш привабливими для фінансування. Прикладом такого комплексу може бути створений в КПІ ім. Ігоря Сікорського Інститут матеріалознавства і зварювання імені Є.О. Патона, до складу якого увійшли кафедри інженерно-фізичного і зварювального факультетів, кафедра лазерної техніки та фізико-технічних тех-



нологій механіко-машинобудівного інституту. Саме тому основним завданням новоствореного Інституту матеріалознавства та зварювання є формування сучасного наукового світогляду інженерних і наукових кадрів шляхом тісного поєднання освітньої, наукової та виробничої підготовки. Такий підхід дозволить забезпечити нову якість підготовки фахівців відповідно до схеми «бакалавр – магістр – PhD». Однак така багаторівнева підготовка може бути ефективною лише за наявності тісної співпраці з інститутами Національної академії наук України, промисловими підприємствами-партнерами в рамках великих науково-технічних і науково-виробни-

чих проєктів. Проведення навчання в умовах, які максимально наближені до реального виробництва також дозволить істотно підвищити рівень і якість підготовки випускників, які будуть здатні швидко адаптуватись у будь-якій сфері діяльності як в науці, так і в промисловості.

Загалом в роботі конференції взяли участь більше 130 фахівців, які представили 50 доповідей. За результатами конференції PolyWeld-2021 видані матеріали конференції, з якими можна ознайомитись за посиланнями: <http://zv.kpi.ua/uk/polyweld>, <https://www.facebook.com/PolyWeldConference>.

Віктор Квасницький

МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ «СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ З'ЄДНАННЯ МАТЕРІАЛІВ»

31 травня – 2 червня 2021 р. в Києві в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона пройшла Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні технології з'єднання матеріалів», організована ІЕЗ ім. Є.О. Патона, Товариством зварників України, Науково-дослідним інститутом спеціального обладнання в провінції Чжецзян (Китай) та Міжнародною Асоціацією «Зварювання». До початку роботи конференції були видані праці (за темами пленарних доповідей) у вигляді спеціальних випусків журналів «Автоматичне зварювання», «The Paton Welding Journal» № 5, 2021 р. та збірки тез пленарних і стендових доповідей.



В роботі конференції взяли участь вчені, викладачі та інженерно-технічні фахівці НДІ, вузів, промислових і комерційних підприємств ряду міст України, а також зарубіжні учасники з Польщі та Словаччини. Всього понад 70 осіб.

Учасники конференції представляли ІЕЗ ім. Є.О. Патона, ТОВ «Патон Інтернейшнл», ТОВ «ТМ ВЕЛТЕК», ТОВ «Суми-Електрод», НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Дніпропетровський національний університет, НТУ «Харківський політехнічний інститут», ТОВ «ПЛАН-Т», ТОВ «Адитивні лазерні технології України», Інститут чорної металургії НАН України, ТОВ МНТЦ «ПАТОНСЕРТ», Інститут проблем ма-

теріалознавства ім. І.Ф. Францевича, ПрАТ «НВО «Червона Хвиля», Інститут зварювання в Глівіцах, Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, ДП «Міжнародний центр електронно-промислових технологій», Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України та інші.

На відкритті конференції було зачитано вітання директора ІЕЗ ім. Є.О. Патона академіка І.В. Кривцуна, в якому наголошено на важливості зустрічей вчених та фахівців, які сприяють підвищенню ефективності зварювального виробництва.

Заступник директора ІЕЗ ім. Є.О. Патона академік Л.М. Лобанов в доповіді «Сучасний стан і напрямки розвитку зварювального виробництва» зазначив, що базовим технологічним процесом з'єднання матеріалів залишається зварювання, яке в багатьох випадках не має альтернативних рішень для різних галузей промислового виробництва – машинобудування, суднобудування, енергетики, промислового і цивільного будівництва, газо- і нафтовидобувного виробництва та інших. Зварюванню піддаються практично будь-які метали і неметали в різних умовах – на землі, у морських глибинах і у космосі. Основою зварювального виробництва залишається зварювання плавленням. Лідируюче положення на ринку зварювального обладнання



Виступ акад. Л.М. Лобанова



Учасники знайомляться з продукцією видавництва ІЕЗ

і матеріалів займають апаратура і витратні матеріали для дугового зварювання. Характерною тенденцією світових ринків зварювальної техніки є безперервне збільшення частки обладнання і матеріалів для механізованих і автоматизованих способів зварювання.

На конференції в пленарному режимі було заслухано 26 доповідей з багатьох актуальних тем сучасного зварювального виробництва. Ряд доповідей увійшли, як вище зазначалося, в травневі випуски журналів «Автоматичне зварювання» та «The Paton Welding Journal».

Серед доповідей, що викликали найбільший інтерес у слухачів, відзначимо: В.Ю. Білоуса «Аргонодугове зварювання високоміцного економнолегованого псевдо β -титанового сплаву Ti-2,8Al-5,1Mo-4,9Fe»; І.М. Гречанюка «Сплави Ni(Co) CrAlYSi для захисних покриттів»; Д.В. Ковальчука «Технологія металевого 3D друку xBeam 3D Metal Printing на шляху до промислового впровадження»; В.М. Коржика «Розвиток та нові можливості плазмово-дугових технологій в з'єднанні та обробці матеріалів»; О.А. Мазура «Ринок зварювальних матеріалів у світі та в Україні».

На конференції були представлені 30 стендових доповідей, тези яких були опубліковані до початку роботи конференції. Тематика стендових доповідей охо-



Під час сесії стендових доповідей

плює широкий спектр питань для вирішення технологічних задач в області зварювального виробництва.

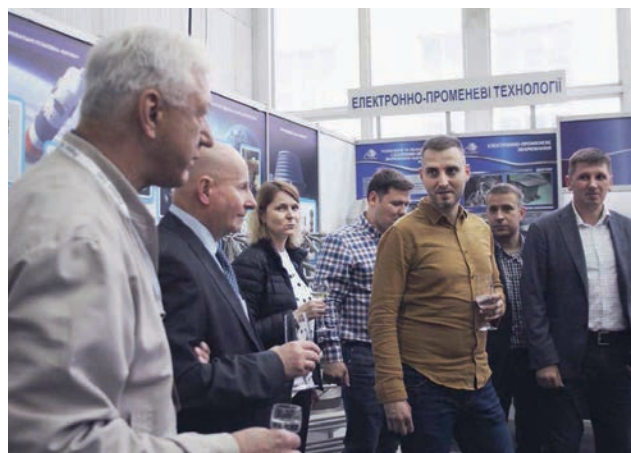
Під час конференції проведена виставка зварювального обладнання та технологій, зварювальних матеріалів, засобів неруйнівного контролю під назвою «Зварювання та споріднені технології» в демонстраційній залі ІЕЗ ім. Є.О. Патона за участю: ТОВ «Патон Інтернешнл», ТОВ «Велтек», ДКТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона, ТОВ «План-Т», ТОВ «Суми – Електрод», ПрАТ «Плазматек», КУІЗ ім. Є.О. Патона, ДП «МЦЕПТ ім. Є.О. Патона», ДП «НВЦ «Титан» ІЕЗ ім. Є.О. Патона, ПрАТ «НВО «Чер-



Зустрічі та обговорення



Стенд компанії «ОКО»



Обговорення з польськими та словацькими колегами



Художні вироби з титану. Автор Дмитро Кушнірук

вона хвиля», ТОВ «Елтехмаш», ТОВ «Ультракон Сервіс», Міжгалузовий учбово-атестаційний центр ІЕЗ ім. Є.О. Патона, Товариство зварників України, Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики.

Під час роботи конференції відбувся ряд двосторонніх переговорів, спрямованих на кооперацію і подальшу співпрацю, виконання спільних проектів. Учасники конференції мали можливість познайомитись з унікальними виробами з титану художника-зварника Дмитра Кушнірука.

По завершенню конференції учасники відвідали ТОВ «Фроніус Україна» і ТОВ «Патон Інтернешнл».

Відвідування ТОВ «Фроніус Україна». Учасники заходу відвідали одне з провідних підприємств в світі в галузі зварювальної техніки, фотоелектрики та технології зарядки акумуляторів – корпорацію «Fronius», яка має представництво та виробничі потужності в Україні (Київська обл., Броварський р-н, с. Княжичі). Для учасників конференції співробітниками компанії була організована екскурсія підприємством та зроблена презентація сучасних можливостей корпорації «Fronius» в області зварювальних процесів та технологій.

Одна з головних тем презентації була про Центр виготовлення прототипів: від попереднього проектування до зварювання передсерійних деталей. У даному Центрі можливе попереднє проектування зварних виробів, пошук можливих оптимальних рішень, проведення зварювальних тестів та документація даних (підбір зварювальних процесів та параметрів зварювання, виготовлення прототипів, виготовлення невеликих партій виробів) та точне вимірювання компонентів (оптичне 3D-вимірювання, перевірка на деформацію та відхилення). Основні технології зварювання – це процеси Cold Metal Transfer (CMT), Pulse Multi Control (PMC) и Low Spatter Control (LSC). Обов'язковою умовою є наявність сучасного джерела живлення «Fronius» TPSi. Використання цих спеціальних процесів зварювання гарантує



Відвідування ТОВ «Фроніус Україна»

надзвичайно низький тепловий вплив, мінімальне утворення бризок, забезпечення стабільності дуги та швидкості зварювання. Якість зварних швів обумовлюють не лише процеси зварювання та надійне закріплення, але й правильна обробка та очищення поверхонь деталей. Для очищення поверхонь компанія Fronius використовує систему ACERIOS, що ретельно очищує область зварювання з використання технології гарячої плазми.

Після проведення запланованих заходів учасники конференції отримали відповіді на всі питання від працівників компанії «Fronius», які їх цікавили.

Відвідування ТОВ «Патон Інтернешнл» (в минулому ДЗЗУ ім. Є.О. Патона). Завод компанії є єдиним заводом в Україні, що здатний виготовляти зварювальне устаткування з струмом від 150 А для побутових споживачів до 10000 А для гігантів української та світової промисловості. Завод активно розвивається. На ньому організовано виробництво зварювальних електродів і найближчим часом планується вийти на виробництво 600 т електродів в місяць. Причому значна частина електродів поставляється на експорт.

Відвідувачі підприємства мали можливість познайомитися з різними етапами виробництва обладнання, з напрямками подальших шляхів його вдосконалення, забезпечення високої якості продукції. У продовженні екскурсії вони відвідали цех виробництва зварювальних електродів. Загальне враження, що продукція заводу забезпечує високу надійність, широку функціональність, а часто і унікальні технічні характеристики, що дозволяють успішно конкурувати з продукцією провідних світових виробників.

По закінченню конференції її учасники висловили загальну думку про необхідність регулярних зустрічей фахівців зварювального виробництва по всім питанням зварювання та споріднених технологій в форматах конференцій або семінарів в ІЕЗ ім. Є.О. Патона.

Олександр Зельніченко,
Володимир Ліподаєв