

З А В Т О М А Т И Ч Н Е 10 С В А Р Ю В А Н Н Я 2020

Автоматическая сварка

Automatic Welding

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

Кучук-Яценко С.І., Качинський В.С., Коваль М.П. Розробка технології та обладнання для пресового зварювання трубчастих деталей в умовах виробництва з метою економії ресурсу та підвищення надійності високонавантажених виробів.....	3
Лобанов Л.М., Пашчин М.О., Миходуй О.Л., Черкашин О.В., Тимошенко О.М., Кондратенко І.П., Соломійчук Т.Г. Вплив обробки імпульсним електромагнітним полем на напружено-деформований стан кільцевих зварних з'єднань алюмінієвого сплаву АМг6.....	8
Аджамський С.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В. Вплив технологічних параметрів SLM-процесу на пористість металовиробів.....	14
Стороженко М.С., Уманський О.П., Шелудько В.Є., Губін Ю.В., Курінна Т.В. Розробка технологій і матеріалів для електроіскрового нанесення покриттів з метою підвищення терміну експлуатації і надійності деталей технологічного і енергетичного обладнання та інструментів.....	21

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

Бабінець А.А., Рябцев І.О., Лентюгов І.П., Рябцев І.І., Кайда Т.В., Богайчук І.Л. Вплив амплітуди і частоти коливань електродного дроту при дуговому наплавленні на формування і структуру наплавленого металу і проплавлення основного металу.....	26
Студент М.М., Войтович А.А., Сірак Я.Я., Гвоздецький В.М. Розробка нових електродних матеріалів, методів відновлення і захисту тонкостінних деталей обладнання, які експлуатуються в умовах абразивного та газоабразивного зношування.....	34
Максимова С.В., Писарев А.М., Ковальчук П.В., Воронов В.В. Вплив сурми на структуру і механічні властивості доєвтектичних мідно-фосфористих сплавів.....	38
Кораб М.Г., Юрженко М.В., Ващук А.В., Менжерес М.Г. Механізоване зварювання нагрітим повітрям ламінованих ПВХ тканин.....	43

ХРОНІКА

Міжнародні конференції з математичного моделювання в зварюванні та неруйнівного контролю.....	49
Міжнародна конференція «Сучасне зварювальне виробництво» і Міжнародний ярмарок «ExpoWelding».....	56
Пам'яті В.М. Сидорця.....	57
Пам'яті І.В. Пентегова.....	58

ІНФОРМАЦІЯ

Зменшення обсягів додаткової обробки на 70 %: Імпульсне зварювання за допомогою Fronius TransSteel Pulse.....	59
Новий роботизований зварювальний комплекс Fronius.....	61
Welding in the World №№ 8, 9, 10, 11, 2020.....	62

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Kuchuk-Yatsenko S.I., Kachynsky V.S., Koval M.P. Development of technology and equipment for press welding of tubular parts under the conditions of production for the purpose of saving resources and increase in the reliability of high-loaded products.....	3
Lobanov L.M., Pashchin M.O., Mykhoduy O.L., Cherkashin O.V., Timoshenko O.M., Kondratenko I.P., Solomiychuk T.G. Influence of pulsed electromagnetic field treatment on stressed and deformed state of circumferential welded joints of aluminum AMg6 alloy.....	8
Adjamskiy S.V., Kononenko G.A., Podolskiy R.V. Influence of technological parameters of SLM-process on porosity of metal products.....	14
Storozhenko M.S., Umansky O.P., Sheludko V.E., Gubin Yu.V., Kurinna T.V. Development of technologies and materials for electric spark coating with the aim of increasing service life and reliability of parts of technological and power equipment and tools.....	21

INDUSTRIAL

Babinets A.A., Ryabtsev I.O., Lentyugov I.P., Ryabtsev I.I., Kayda T.V., Bogaychuk I.L. Influence of amplitude and frequency of oscillations of electrode wire in arc surfacing on the formation and structure of the deposited metal and penetration of basic metal.....	26
Student M.M., Voytovych A.A., Sirak Ya.Ya., Gvozdetsky V.M. Development of new electrode materials, methods of restoration and protection of thin-walled parts of equipment, which are operated in the conditions of gas abrasive wear.....	34
Maksymova S.V., Pisarev A.N., Kovalchuk P.V., Voronov V.V. Influence of antimony on structure and mechanical properties of pre-eutectic copper-phosphoric alloys.....	38
Korab M.G., Iurzhenko M.V., Vashchuk A.V., Menzheres M.G. Mechanized welding of laminated PVC fabrics with heated air.....	43

NEWS

International conferences on mathematical modeling in welding and non-destructive testing.....	49
International conference «Cutting-edge welding engineering – modernity of the future» and the international fair «ExpoWelding».....	56
In memory of V.M. Sydorets.....	57
In memory of I.V. Pentegov.....	58

INFORMATION

Up to 70 % less rework: pulse welding with Fronius TransSteel Pulse.....	59
New robotic welding complex Fronius.....	61
Welding in the World №№ 8, 9, 10, 11, 2020.....	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:
С.І. Кучук-Яценко (головний редактор),
В.М. Ліподаєв (штатний заст. гол. ред)
О.М. Берднікова, Ю.С. Борисов,
В.В. Книш, В.М. Коржик, І.В. Кривцун,
Ю.М. Ланкін, Л.М. Лобанов,
С.Ю. Максимов, М.О. Пашин,
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. Піларчик, 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 6302, 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 бандероллю.
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).
Журнал «Автоматичне зварювання» перевидається
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:
S.I. Kuchuk-Yatsenko (Editor-in-Chief),
V.M. Lipodaev (Staff Deputy Editor-in-Chief)
O.M. Berdnikova, Yu.S. Borisov,
V.V. Knysh, V.M. Korzhyk, I.V. Krivtsun,
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 Kasymyr Malevych Str.
Tel.: (38044) 200 6302, 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.
\$180, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.
\$150, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).
«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.

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРЕСОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТРУБЧАСТИХ ДЕТАЛЕЙ В УМОВАХ ВИРОБНИЦТВА З МЕТОЮ ЕКОНОМІЇ РЕСУРСУ ТА ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВИСОКОНАВАНТАЖЕНИХ ВИРОБІВ

С.І. Кучук-Яценко, В.С. Качинський, М.П. Коваль

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

Заміна застарілих технологій при виробництві трубчастих деталей є актуальним завданням. В роботі наведено матеріали виконаних досліджень по пресовому зварюванню високонавантажених сталевих трубчастих деталей діаметром до 120 мм з товщиною стінки до 6 мм, розробленню системи керування, проведених металографічних та механічних досліджень по визначенню властивостей зварних з'єднань. Показано основні технологічні переваги пресового зварювання високонавантажених виробів. Бібліогр. 7, табл. 3, рис. 6.

Ключові слова: високонавантажені сталеві трубчасті деталі, пресове зварювання магнітокерованою дугою, система управління зварювальним процесом, технологічні параметри процесу зварювання

Останнім часом на підприємствах промисловості України значно підвищилися обсяги виконання робіт з виготовлення латунних деталей діаметром від 40 до 120 мм. Для вирішення завдань, що стоять перед промисловістю України, пропонується наступне. Замінити старі існуючі технології робіт по застосуванню дорогої латуні та прецизійних пресів на 350 т, які використовуються у виробництві трубчастих деталей, новою технологією з використанням зварних сталевих трубчастих заготовок. Це дозволить значно заощадити ресурс шляхом заміни латуні, яка має значно вищу вартість, на більш дешеві сталеві заготовки, збільшити продуктивність і поліпшити умови праці, знизити витрати електроенергії, знизити собівартість продукції.

Спосіб зварювання застосовується в промисловості переважно для з'єднання деталей трубчастого перетину з товщиною стінки до 4 мм діаметром до 100 мм, які використовуються в автомобільній промисловості, при цьому використовуються захисні гази [1–4], а також можливий процес ПЗМД, без використання захисного газу [5, 6].

На початку виконання досліджень були вирішені проблеми відпрацювання конструкції і технології виготовлення зварних сталевих трубчастих деталей, які потребують вирішення цілого комплексу питань щодо функціонування високонавантажених трубчастих деталей. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження, спрямовані на вирішення принципових питань виробництва зварних сталевих деталей, розроблена техноло-

гія, що забезпечує масове виробництво сталевих трубчастих деталей на заводах галузі.

Основою технологічної системи стало використання промислового комп'ютера, який працює під управлінням ОС WINDOWS10 та спеціально розробленого програмного забезпечення. Програмне забезпечення розроблено з урахуванням накопиченого досвіду та останніх досягнень у галузі обчислювальної техніки стосовно накопичення та обробки інформації. У побудові системи управління та реєстрації параметрів зварювання використані загальнодоступні елементи та прилади, що значно спрощує налагодження технологічних параметрів управління системою та процесом зварювання.

В основу системи управління зварювальної машини для реалізації процесу ПЗМД покладено процеси сканування датчиків системи, обробка отриманих даних та формування файлів даних та зведеного файлу денного рапорту, у якому фіксуються наступні параметри:

- час зварювання по етапам нагрівання T1, T2, T3, T4, T5, T6;

- струм зварювальної дуги по етапам нагрівання, I2, I3, I4, I5;

- напруга зварювальної дуги на трьох етапах нагрівання деталей U2, U3, U4 (U1 – напруга етапу збудження та початку сталого руху дуги (розгін дуги) під дією магнітного поля по кромках деталей не враховується, тому що до початку сталого руху дуги приймає значення від режиму короткого замикання до режиму холодного ходу джерела живлення зварювальної дуги);

Кучук-Яценко С.І. – <https://orcid.org/0000-0002-1166-0253>, Качинський В.С. – <https://orcid.org/0000-0001-9695-6434>,

Коваль М.П. – <https://orcid.org/0000-0003-2066-3365>

© С.І. Кучук-Яценко, В.С. Качинський, М.П. Коваль, 2020

- загальна кількість витраченої на нагрівання деталей енергії E_a ;
- швидкість осадки V_{oc} (тут і далі мається на увазі початкова швидкість зближення рухомої частини зварювальної машини з нерухомою частиною, тобто експериментально встановлено, що це середня швидкість зустрічного руху на 1,5 мм дугового зазору перед контактом зварюваних деталей);
- величина осадки S_{oc} (величина спільної деформації деталей);
- тиск осадки P_{oc} (максимальне значення падіння тиску в гідравлічній системі зварювальної машини під час виконання осадка);

Відхилення цих параметрів за межі допусків залежить від багатьох причин, у зв'язку з цим необхідно розробити алгоритми:

- керування для дворівневої системи, які забезпечують коригування режиму зварювання з метою стабілізації процесу й, відповідно, необхідної якості зварного стику;
- оцінки якості зварного стику;
- оцінки технічного стану зварювальних машин і умов їх експлуатації;
- формування рекомендацій з коригування параметрів технологічного процесу.

Існуючий контроль якості, при якому порівнюють отримані дані з еталонними, є логічною функцією – показники якості перебувають у допуску при одночасному знаходженні в допуску всіх

контрольованих параметрів. При такому контролі не враховується:

- значимість впливу кожного з параметрів на показник якості;
- невизначеність межі допусків параметрів процесу для різних виробів;
- можливе посилення впливу на якість зварювання сукупності певної комбінації відхилень.

Розроблено алгоритм контролю якості зварювання на основі аналізу параметрів процесу на трьох етапах його здійснення.

1. Нагрівання трубчастих деталей. Період формування температурного поля на торцях деталей, що зварюються.

2. Форсування. Етап забезпечення захисного середовища в дуговому проміжку.

3. Осадка. Формування з'єднання у твердій фазі.

Висновок про якість отриманого зварного з'єднання з певним ступенем імовірності здійснюється на підставі логічних правил, які складені за результатами досліджень технологічних особливостей процесу ПЗМД.

Для контролю процесу зварювання використовуються наступні параметри:

час зварювання по етапам (Т1–Т6); величина струму на етапах нагрівання (12–15);

значення напруги на етапах існування дуги (U2–U4); швидкості та величини осадка (V_{oc} та L_{oc}); тиск в гідравлічній системі під час виконання осадка P_{oc} ; енергія, що витрачена на нагрівання деталей E_a .

Розроблення схеми управління машини для ПЗМД зварювання К-872 виконувалось шляхом заміни застарілого обладнання та модернізації і вдосконалення програмного забезпечення керуючого модуля. Для забезпечення реалізації алгоритму контролю якості було виконано модернізацію шафи керування та проведено часткову заміну виконавчих пристроїв системи управління. Використано сучасну ПЕОМ, яка пристосована для використання в промислових умовах.

Реєстрація параметрів перебігу процесу зварювання на модернізованій машині К-872 відбувалась за схемою, яка наведена на рис. 1.

Відповідність комп'ютерної оцінки контролю якості з реальним станом речей є забезпечення вищевказаної системи реальними вихідними даними. У випадку виконання ПЗМД такими даними є струм та напруга зварювальної дуги, спільне розташування зварюваних труб, тиск у гідравлічній системі під час виконання осадки.

Отримання даних від датчиків системи реєстрації відбувається наступним чином. Вхід нормуючого вхідного підсилювача 8 підключено безпосередньо до клем, які розташовані на затискних пристроях. В підсилювачі падіння напруги

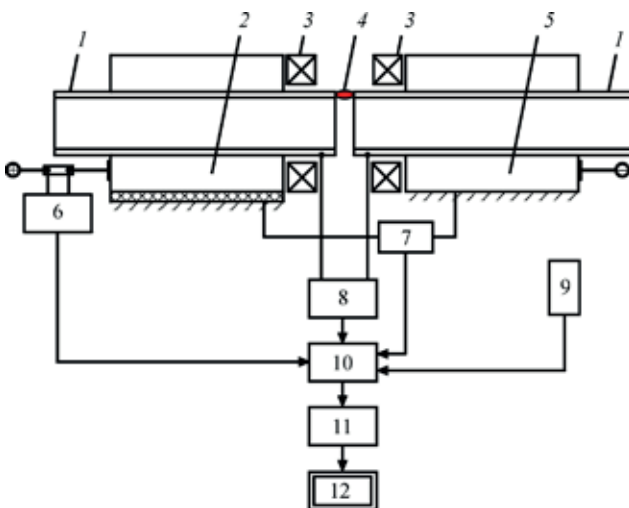


Рис. 1. Блок-схема макету контролю якості зварюваних з'єднань: 1 – зварювані труби; 2 – рухомий затискний пристрій; 3 – елементи магнітної системи; 4 – стовп електричної дуги, яка рухається по кромках зварюваних труб; 5 – нерухомий затискний пристрій; 6 – датчик струму з інструментальним підсилювачем сигналу; 7 – датчик положення рухомої частини зварювальної установки; 8 – датчик падіння напруги на зварювальній дузі; 9 – датчик вимірювання абсолютного тиску гідравлічної системи, вбудований в штокову порожнину циліндру осадка зварювальної машини; 10 – нормуючий інструментальний підсилювач (з ФНЧ $F_{\text{зп}} = 100$ Гц); 11 – приймач аналогово-цифровий перетворювач (АЦП); 12 – персональна електронно-обчислювальна машина



Рис. 2. Зварне з'єднання трубчастих деталей 102×6 мм зварювальної дуги, яке виникає під час початку процесу і складає величину в межах 20...30 В постійного струму, нормується до вихідної напруги 2...3 В. Для подальшої обробки та аналізу похідний сигнал падіння зварювальної напруги з виходу підсилювача 8 надсилається на вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Під час початку роботи програмного забезпечення АЦП налаштовується таким чином, що частота опитування аналогових входів складає 10 точок опитування на одне читання даних з виходу АЦП. Досягається більш точне передавання даних до програми контролю.

Доопрацювання програмного забезпечення управляючого комплексу виконувалось шляхом змінення функціональних параметрів існуючих програмних модулів. Це дозволило розширити часові та параметричні межі роботи виконавчих пристроїв при виконанні настроювання параметрів процесу ПЗМД. Програмне забезпечення виконує формування бази даних, яка, в свою чергу, дозволяє виконувати аналіз отриманих в процесі зварювання даних за весь час роботи устаткування, що значно спрощує пошук оптимальних параметрів режиму зварювання [7].

На хід процесу нагрівання в процесі зварювання впливають різні фактори, що викликає необхідність проведення контролю якості зварних з'єднань. На процес формування з'єднань впливають наступні фактори:

- стан торцевих поверхонь (температура поверхні, наявність мікронерівностей, оксидних плівок і інших забруднень);
- розподіл температури в торцях деталей;
- величина і характер пластичної деформації торців під час осадки.

Були виконані експериментальні зварювання, розроблена дослідно-промислова технологія та виконані дослідження зразків зварних з'єднань трубчастих деталей діаметром 102×6 мм сталі марки сталь 35 + сталь 20 (рис. 2).

Хімічний склад зварювальних сталей приведено в табл. 1. Механічні властивості зварних з'єднань трубчастих деталей приведено в табл. 2. По-

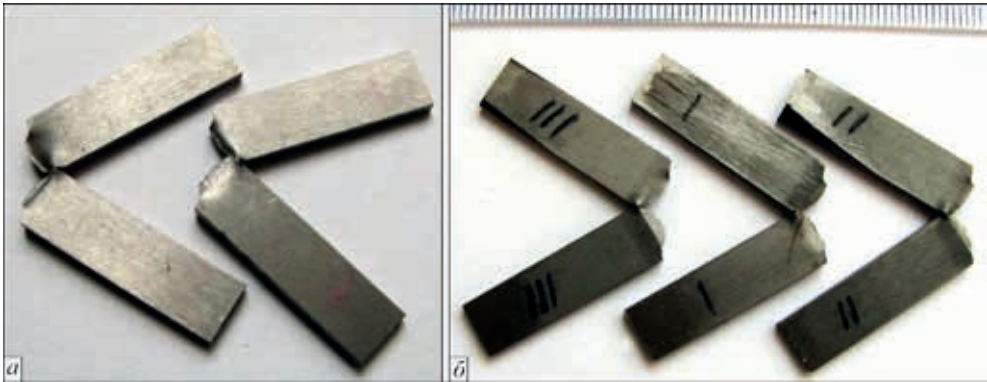


Рис. 3. Зовнішній вигляд зруйнованих зразків: а – основний метал; б – зварне з'єднання

Таблиця 1. Хімічний склад зварювальних сталей, мас. %

Сталь	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al
20	0,19	0,30	0,50	0,005	0,004	0,16	0,12	0,08	0,05	0,01
35	0,39	0,32	0,68	0,004	0,024	0,08	0,03	0,04	0,05	0,01

Таблиця 2. Результати проведених випробувань на розрив і ударну в'язкість основного металу труби і зварного з'єднання

Сталі	Розмір труб, мм	σ_b , МПа		KCV^{20} , Дж/см ²	
		Основний метал	Зварне з'єднання	Основний метал	Зварне з'єднання
20 + 35	102×6,0	508...525 516,5	510...524 517,5	67...84 75...5	78...81 79...5
20 + 35	42×3,5	508...525 516,5	516...527 522,5	67...84 75,5	88...85 86

Таблиця 3. Порівняльні показники витрат електроенергії при зварюванні одного стику труб при дуговому зварюванні РДЗ і ПЗМД

Розмір труби, мм	Метод зварювання	Витрата електроенергії на 1 стик, кВт/год
102×6,0	РДЗ	0,98
	ПЗМД	0,042

рівняльні показники витрат електроенергії при зварюванні одного стику труб при ручному дуговому зварюванні РДЗ та ПЗМД приведені в табл. 3.

На рис. 3 показані зразки основного металу і зварного з'єднання після випробувань на ударну в'язкість.

У місці з'єднання деталей дефектів не спостерігається (рис. 4), знеуглецьована смужка металу на кордоні з'єднання відсутня. Спостерігається спряженість кордонів металів сталі 20 та сталі 35 по лінії зварного з'єднання (рис. 4).

Структура металу сталі 20 у лінії з'єднання феритно-перлітна. Кількість фериту значно переважає. Ферит виділяється уздовж колишніх зерен аустеніту (полігональний). Основна маса – це пластинчастий ферит з упорядкованою і неупорядкованою другою фазою (рис. 5, 6). Бал зерна на ділянці перегріву (крупного зерна) поблизу лінії з'єднання відповідає № 6 по ГОСТ 5639–82, в міру віддалення від лінії з'єднання зерно подрібнюється до № 8, 9 за шкалою ГОСТ.

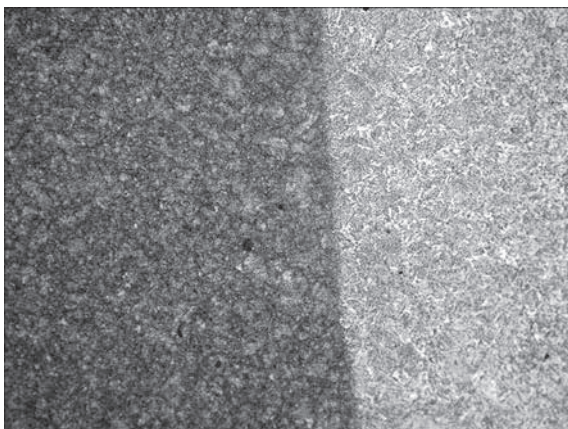


Рис. 4. Загальний вид з'єднання сталь 35 + сталь 20 (×25)

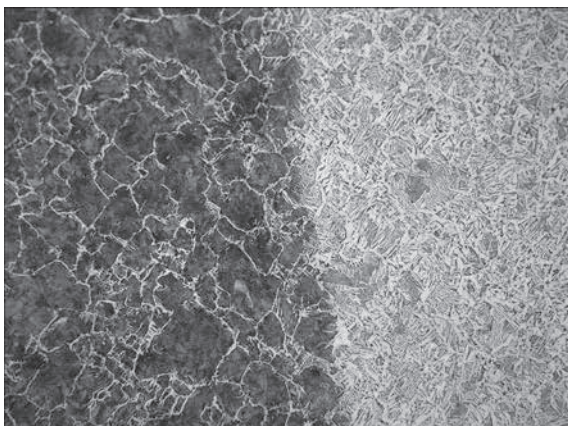


Рис. 5. Мікроструктура (×100) металу з'єднання сталь 35 + сталь 20

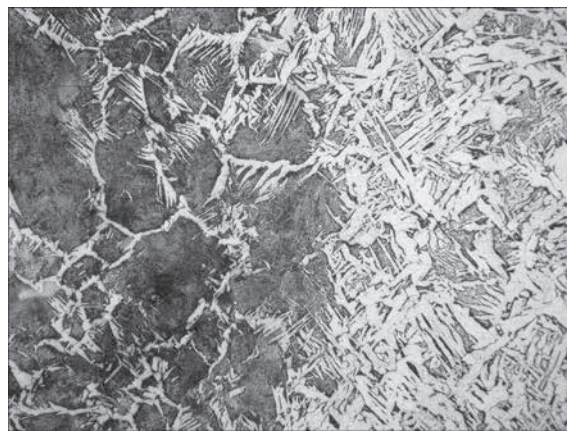


Рис. 6. Мікроструктура (×400) металу з'єднання сталь 35 + сталь 20

На ділянці повної перекристалізації структура дрібнозерниста, бал зерна № 10, структура феритно-перлітна.

Структура основного металу феритно-перлітна, бал зерна № 8 по ГОСТ5639–82. Ширина ділянок ЗТВ:

- ділянка великого зерна (ділянка перегріву) – 2300 мкм;
- ділянка дрібного зерна (ділянка повної перекристалізації) – 2000 мкм;
- ділянка неповної перекристалізації – 1500 мкм;
- ширина ЗТВ – 5000 мкм.

Структура металу сталі 35 у лінії з'єднання перлітно-феритна. Кількість перліту значно переважає (рис. 5, 6). На ділянці перегріву в структурі ЗТВ є перлітні зерна, облямовані феритною сіткою уздовж кордонів колишніх зерен аустеніту. Дуже незначна кількість фериту (рис. 6). Бал зерна на ділянці перегріву у лінії з'єднання відповідає № 5 (ГОСТ5639–82), в міру віддалення від стику зерно подрібнюється до 8 балів.

Ділянка дрібного зерна відрізняється подрібненою структурою (феритно-перлітною), бал зерна № 10.

Дефектів в ЗТВ і основному металі не виявлено. Ширина ділянок ЗТВ:

- ділянка великого зерна (ділянка перегріву) – 1500 мкм;
- ділянка дрібного зерна (ділянка повної перекристалізації) – 2400 мкм;
- ділянка неповної перекристалізації – 2000 мкм;
- ширина ЗТВ – 6000 мкм.

Результати вимірювання твердості у напрямку ОМ сталь 20–ЗТВ–ЛЗ–ЗТВ–ОМ сталь 35, при навантаженні 100 г з кроком 100; 200; 500 мкм.

Крок 500 – ОМ –1760, сталь 20: ЗТВ – 1560, 1510, 1570; крок 200–1760, 1760, 1690, 1690, 1690, 1810, 1810, 1720, 1640, 1640, 1760, 1870, 1850, 1870, 1870, 1870, 1870, 1870, 1930, 1930; крок 100–2130, 1930, 1930; крок 50–1930.

ЛЗ – 2060, 1930, 1930, 1930.

Сталь 35. ЗТВ: крок 100 – 2060, 2280, 2300; крок 200 – 2280, 2260, 2450, 2360, 2600, 2540, 2240, 2160, 2130, 1990, 1990, 2130, 2130, 2130, 2130, 1910, 1890, 1810, 1810; крок 500 – 1930, 1930, 1990, 2060.

Крок 500 – ОМ – 1920, 1810.

Як видно з наведеної таблиці, для зварювання одного стику при ПЗМД витрачається майже в 22 рази менше електроенергії, ніж при РДЗ. Ця економія досягається за рахунок скорочення часу зварювання одного стику з'єднання. Крім цього, при дуговому зварюванні багато електроенергії витрачається на розплавлення більш значної за розмірами ванни рідкого металу.

Основні технічні переваги розробленої дослідно-промислової технології зварювання високонавантажених трубчастих деталей:

- відносно невеликий час зварювання;
- висока продуктивність, особливо при масовому виробництві;
- низькі витрати енергії і матеріалів;
- концентрований нагрів торців зварюваних деталей;
- мінімальні припуски на оплавлення і осадку;
- відсутність жорстких вимог до чистоти бічних і поверхонь, що зварюються;
- відсутність проблем з допусками попередньої підготовки;
- високі пластичні властивості зварних з'єднань;
- відносно невелике розбризкування металу;
- відсутність бризок металу на внутрішній поверхні труб, що зварюються;
- можливість контролю і реєстрації основних технологічних параметрів в процесі зварювання.

Висновки

1. Визначено оптимальні умови, що дозволяють стійко переміщати дугу у вузькому зазорі для досягнення відносно рівномірного нагріву зварюваних торців трубчастих деталей.

2. Розроблено спосіб управління, що дозволяє переміщати дугу по всій зварюваній площі поперечного перерізу труб і формувати на ній рівномірно розподілений розплав.

3. Визначено основні умови для формування зварного з'єднання високонавантажених трубчастих деталей.

4. Розроблено та апробовано дослідно-промислову технологію ПЗМД високонавантажених трубчастих деталей діаметром до 120 мм з товщиною стінки до 6 мм.

Список літератури/References

1. Hagan, D., Riley, N. (1979) MIAB welding. Part 2. Fabrication of the Fiesta rear axle. *Metal Construction*, **12**, 625, 627–629,
2. Ganovski, F.J. (1974) *The magnetarc welding process*. Weld. Met. Fab, **5**, 206–213
3. Kenji Takagi, Hirokazu Otsuka, Fumiho Abakida et al. (1987) *Establishment of optimum welding conditions of magnetically impelled arc butt welding and application to field operation*, International Institute of Welding, III-880–1987.
4. Edson, D.A. (1982) *Magnetically Impelled Arc Butt Welding of Thick Wall Tubes*, International Institute of Welding, III-726–82, July 1982.
5. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Kachinsky, V.S., Ignatenko, V.Yu., et al. (2010) Magnetically-impelled arc butt welding of pipes of steel X70. *The Paton Welding J.* **7**, 29–31
6. Kachynskyi, V.S., Kuchuk-Yatsenko, S.I., Koval, M.P. (2020) Press magnetically-impelled arc welding of high-strength steel tubular parts of hydraulic cylinders. *Ibid*, **1**, 43–48
7. Koval, M.P., Kuchuk-Yatsenko, S.I., Kachynskyi, V.S. (2020) System of control, registration of parameters and monitoring in the process of press welding of pipes using magnetically-impelled arc, *Ibid.*, **6**, 36–40

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR PRESS WELDING OF TUBULAR PARTS UNDER THE CONDITIONS OF PRODUCTION FOR THE PURPOSE OF SAVING RESOURCES AND INCREASE IN THE RELIABILITY OF HIGH-LOADED PRODUCTS

S.I. Kuchuk-Yatsenko, V.S. Kachynsky, M.P. Koval

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Replacement of outdated technologies in the production of tubular parts is an urgent task. The paper presents the materials of carried out investigations on press welding of high-load steel tubular parts with a diameter of up to 120 mm with a wall thickness of up to 6 mm, development of control system, metallographic and mechanical examinations on determination of the properties of welded joints. The main technological advantages of press welding of high-loaded products are shown. 7 Ref., 3 Tabl., 6 Fig.

Keywords: high-loaded steel tubular parts, magnetically-impelled press arc welding, control system of welding process, technological parameters of welding process

Надійшла до редакції
30.09.2020

ВПЛИВ ОБРОБКИ ІМПУЛЬСНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПОЛЕМ НА НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНІЙ СТАН КІЛЬЦЕВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ АМг6

Л.М. Лобанов¹, М.О. Пашин¹, О.Л. Миходуй¹, О.В. Черкашин¹, О.М. Тимошенко¹,
І.П. Кондратенко², Т.Г. Соломійчук¹

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

²Інститут електродинаміки НАН України. 03057, м. Київ, просп. Перемоги, 56

У теперішній час спостерігається підвищений інтерес до технологій обробки імпульсним електромагнітним полем з метою покращення механічних характеристик металів, сплавів і зварних з'єднань. На базі обробки імпульсним електромагнітним полем можуть бути розроблені ефективні методи оптимізації напружено-деформованого стану виробів із алюмінієвих сплавів з метою подовження їх ресурсу для застосування в авіа ракетній, суднобудівній та інших галузях промисловості. Метою роботи є дослідження впливу обробки імпульсним електромагнітним полем на напружено-деформований стан кільцевих зварних з'єднань алюмінієвого сплаву АМг6. Розроблено оригінальну експериментальну методику дослідження кінетики сили електродинамічного тиску при обробці імпульсним електромагнітним полем металевих матеріалів. Показано, що в результаті обробки імпульсним електромагнітним полем на однаковому режимі значення P зростало при застосуванні екрану, що обумовлено збільшенням активного додаткового об'єму електропровідного середовища. Встановлено, що використання екрану при обробці імпульсним електромагнітним полем сприяє зниженню рівня залишкових зварювальних напружень розтягування та підвищенню точності кільцевих зварних з'єднань. Бібліогр. 8, табл. 3, рис. 8.

Ключові слова: імпульсна електромагнітна обробка, алюмінієвий сплав, кільцеві зварні з'єднання, напружено-деформований стан, залишкові зварні з'єднання, додатковий екран

Розвиток сучасної промисловості викликає необхідність дослідження прогресивних енергозберігаючих технологій підвищення експлуатаційних властивостей металевих конструкцій. Перспективною в цьому відношенні є розробка методів обробки металевих матеріалів і зварних з'єднань, заснованих на впливі імпульсного електромагнітного поля (ІЕМП). Такими є електродинамічна обробка (ЕДО) і обробка прямою дією імпульсного електромагнітного поля (ОІЕМП). Переваги ЕДО наведено у [1], а до її недоліків, на відміну від ОІЕМП, відноситься необхідність контактної взаємодії з поверхнею металу, що обробляється.

У теперішній час спостерігається підвищений інтерес до технологій ОІЕМП у різних галузях металообробки [2], таких як формування, обтиснення, зварювання, калібрування та ін. У роботі [3] розглянуто розрахунки і конструкції індукторних систем для правління жолоблень автомобільних кузовних конструкцій при ОІЕМП.

Базуючись на результатах [2, 3] слід зазначити, що ІЕМП є дієвим інструментом впливу на формування та механічні характеристики металів і сплавів [4], а також зварних з'єднань [5]. На базі ОІЕМП можуть бути розроблені ефективні технології керування напружено-деформованим станом

тонколистових металевих матеріалів, до яких належать алюмінієві сплави, які застосовуються у авіа ракетній та суднобудівній промисловості, що є актуальним для сучасного виробництва.

Метою даної роботи є дослідження впливу ОІЕМ на залишковий напружений стан зварних з'єднань із неферромагнітних матеріалів на прикладі алюмінієвого сплаву АМг6.

Методика, апаратура та зразки для досліджень. Як відомо, протікання по провідникам індуктора імпульсу електричного струму (ІЕС) в наближеному електропровідному середовищі збуджують вихрові струми. Як доведено в [6], незалежно від того, як розташовано індуктор по відношенню до площини електропровідного середовища, контури індукovanого струму розташовуються паралельно площині поверхні (середовища). Внаслідок взаємодії індукванних струмів з імпульсним магнітним полем, яке збудило ці струми, виникає електродинамічна сила, яка має три просторові складові, але лише одна – нормальна складова електродинамічної сили виявляється набагато більшою за тангенціальні складові. Ця сила здійснює активне навантаження на ділянку з тиском силою P і як наслідок, змінює напружений стан матеріалу, що обробляється. За умови, що щіль-

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Пашин М.О. – <https://orcid.org/0000-0002-2201-5137>,

Миходуй О.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>, Черкашин О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-7596-7780>,

Тимошенко О.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9163-1067>, Кондратенко І.П. – <https://orcid.org/0000-0003-1914-1383>,

Соломійчук Т.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-3038-8291>

© Л.М. Лобанов, М.О. Пашин, О.Л. Миходуй, О.В. Черкашин, О.М. Тимошенко, І.П. Кондратенко, Соломійчук Т.Г., 2020

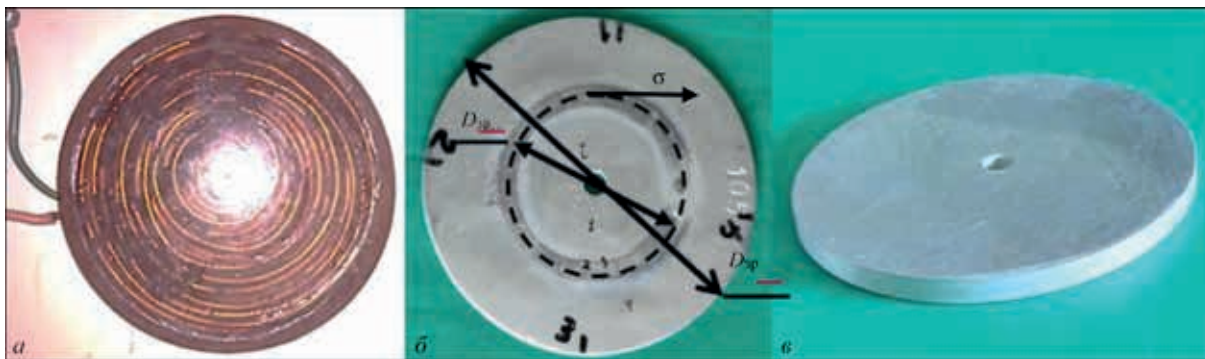


Рис. 1. Зовнішній вигляд: а – плоский багатовитковий індуктор; б – зразок кільцевого зварного з’єднання зі сплаву АМг6 товщиною $\delta = 1,0$ мм, де $D_{zp} = 90$ мм та $D_{zv} = 45$ мм відповідно діаметри зразка і зварного шва; σ – нормальна компонента залишкових напружень; в – екран, що проводить струм, діаметром 90 мм і товщиною 5 мм

Таблиця 1. Характеристики плоского індуктора для ОІЕМП

Індуктивність * L , мкГн при частоті f , кГц 1,0	Зовнішній діаметр d_{ind} , мм	Внутрішній діаметр d_{ind} , мм	Висота h_{ind} , мм	Матеріал обмотки	Діаметр обмотки, мм	Кількість витків n
121	95	5	14	Дріт, мідь марки М1	1,0	50

Примітка. *Значення індуктивності визначені при величині повітряного проміжку 0,1 мм між індуктором і зразком зі сплаву АМг6 товщиною $\delta = 5$ мм.

Таблиця 2. Режими наплавлення методом ТІГ кільцевих «холостих» валиків на зразках сплаву АМг6 для ОІЕМП

Товщина δ , мм	Виліт дуги, мм	Витрати аргону, л/хв	Діаметр W-електроду, мм	Швидкість зварювання v_{zv} , м/год	Зварний струм I_{zv} , А
1,0	1,5	10	1,6	13,4	39

ність j індукovanого електричного струму досягає у металі, що обробляється, значення $j \geq 1$ кА/мм², створюються умови для реалізації електропластичного ефекту (ЕПЕ) [4]. Це сприяє інтенсифікації пластичного деформування матеріалу і як наслідок, керованій зміні його напружено стану. Механізм ЕПЕ діє згідно теорії електрон-дислокаційної взаємодії, за якої при $j \geq 1$ кА/мм² у матеріалі створюються умови для взаємодії електронів провідності із дислокаціями, наслідком чого є прорив останніми структурних бар'єрів, їх розмноження і просування.

Для генерації ІЕМП використовували плоский багатовитковий індуктор (рис. 1, а), а для реалізації зарядного і розрядного циклів ІЕМП – джерело живлення на базі конденсаторної системи загальною ємністю $C = 5140$ мкФ, зарядною напругою U до 800 В і запасеною енергією $E_z \sim 1,6$ кДж. Характеристики індуктора представлено в табл. 1.

Для оцінки ефективності ОІЕМП використовували плоскі зразки у формі диску товщиною і діаметром відповідно $\delta = 1,0$ та $D_{zp} = 90$ мм із алюмінієвого сплаву АМг6. Кільцеві зварні з’єднання імітували автоматичним наплавленням методом ТІГ у середовищі Аг на поверхні дисків «холостих» валиків на режимі (табл. 2) вздовж лінії кола діаметром $D_{zv} = 45$ мм. Методом електронної спекл-інтерферометрії [1] проводили оцінювання нормальної компоненти σ (рис. 1, б) залишкового напруженого стану зварних з’єднань та вертикальних переміщень крайків дисків до та після ОІЕМП. При обробці використовували екран, що проводить струм, у ви-

гляді диску зі сплаву АМг6 діаметром і товщиною відповідно 90 і 5,0 мм (рис. 1, в).

Параметри ІЕС вивчали із використанням вимірювального цифрового приладу на базі безіндукційного шунта, призначеного для реєстрації амплітудного значення однополярних ІЕС. Крім величини амплітуди струму прилад вимірював тривалість імпульсу і кількість ІЕС від початку роботи. Реєстрацію часового розподілу сили P здійснювали із застосуванням датчику прискорень Kistler 8042 [7]. Зовнішній вигляд апаратурного комплексу для реєстрації часових розподілів ІЕС – I та P наведено на рис. 2.

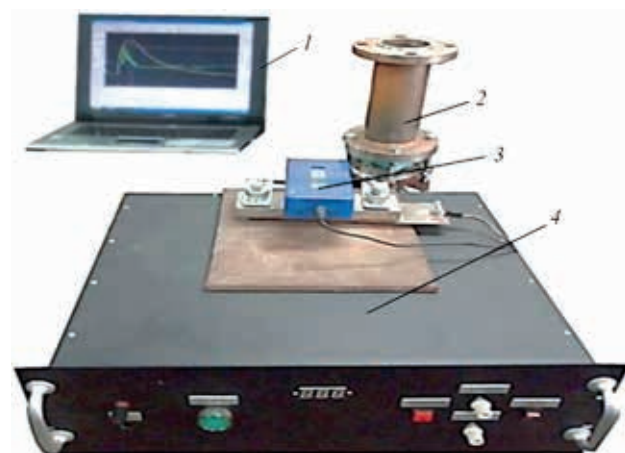


Рис. 2. Зовнішній вигляд апаратурного комплексу для реєстрації часових розподілів ІЕС – I та P при ОІЕМП металевих матеріалів: 1 – пристрій обробки і візуалізації результатів вимірювань; 2 – пристрій фіксації індуктора для ОІЕМП і реєстрації значень сили P ; 3 – цифровий прилад реєстрації значень амплітуди і тривалості ІЕС; 4 – джерело живлення для ОІЕМП

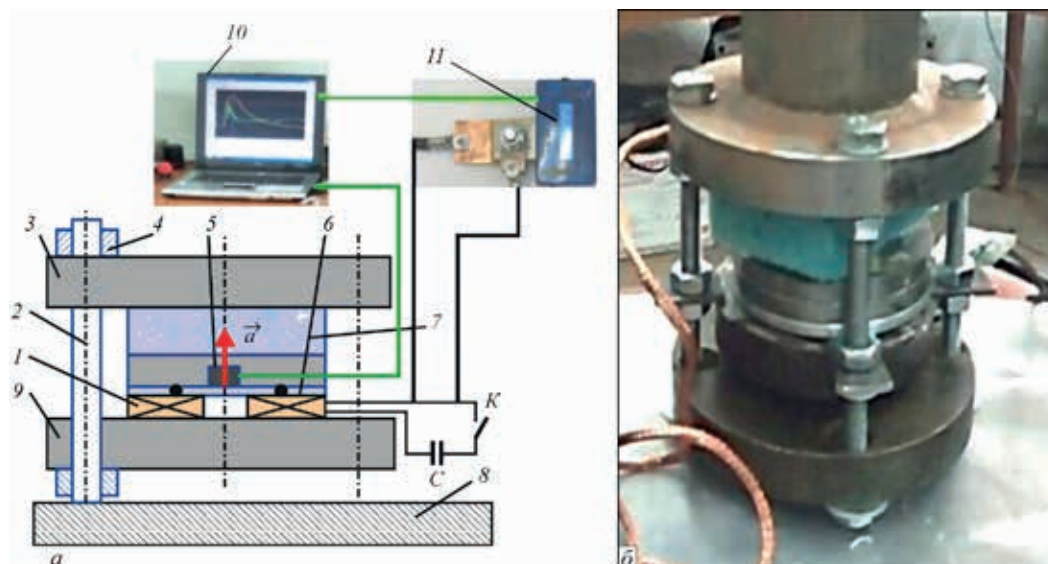


Рис. 3. Пристрій для реєстрації часових розподілів ІЕС і P у складі апаратурного комплексу для ОІЕМП (рис. 2): а – конструктивна схема, де 1 – індуктор; 2 – шпилька; 3 – верхня плита; 4 – гайка притискання; 5 – датчик прискорень; 6 – зразок-імітатор зварного з’єднання; 7 – демпфер тиску; 8 – базова опора; 9 – нижня плита; 10 – система реєстрації і обробки отриманих даних; 11 – цифровий прилад обробки даних; С – джерело живлення; К – ключ запуску розрядного циклу; а – вектор прискорення; б – зовнішній вигляд пристрою

Конструктивну схему і зовнішній вигляд пристрою 2 (рис. 2) наведено відповідно на рис. 3. Схема реєстрації параметрів ІЕМП працює наступним чином. Замикання розрядного контуру ключем К розпочинає перехідний процес розряду ємнісного накопичувача на активно-індуктивне навантаження. Параметри джерела живлення і його електрична схема забезпечують аперіодичний тип перехідного процесу з однополярними імпульсами струму, параметри яких реєструються цифровим приладом 11. Розрядний струм при проходженні через індуктор 1 збуджує ІЕМП. У зразку металу 6, що розташовується над індуктором, при взаємодії із ІЕМП наводяться вихрові струми, результатом взаємодії яких із ІЕМП є формування електродинамічної сили P , яка викликає відштовхування зразка скінченної маси m від індуктора (який є жорстко зафіксований) із прискоренням a . Часовий розподіл a реєструється датчиком прискорень 5, який закріплено на зразку. Зверху на збірку «датчик-зразок» встановлено демпфер тиску 7 зі шпаристого пружного матеріалу, що практично не перешкоджає вільному прискоренню збірки. Система вимірювання зафіксована гайками притискання 4 і шпильками 2 між верхньою 3 і нижньою 9 плитами, які змонтовані на базовій опорі 8. Сила P розраховується апаратно як результат множення маси на прискорення. Умови фіксації зразків, які забезпечували їх прискорення, задавали силовою схемою, наведеною на рис. 3, а.

Реєстрацію часових розподілів ІЕС – I та P після поодинокого розряду конденсатора виконували при зарядній напрузі $U = 200 \dots 800$ В в умовах прискорення зразків товщиною $\delta = 1,0$ мм без екрану, що проводить струм (рис. 1, в) та із його застосуванням – $\delta = 1 + 5$ мм.

Після реєстрації $I(t)$ і $P(t)$ проводили ОІЕМП зразків, схему якої (із застосуванням екрану) наведено на рис. 4. Для забезпечення умов обробки демпфер і датчик прискорень було видалено. Елементами кріплення 5 і 6 була забезпечена жорстка фіксація зразка 4 та екрану 9 між нижньою 7 і верхньою 2 плитами, які розміщено на базовій опорі 8. При розряді конденсатора виникала сила відштовхування P , яка здійснювала тиск на зразок.

Виконували ОІЕМП зразків товщиною $\delta = 1,0$ мм та збірки зразка $\delta = 1,0$ мм зі струмопровідним екраном $\delta = 5,0$ мм ($\Sigma\delta = 6$ мм). Обробку проводили серією із восьми ІЕС на режимі при зростанні значень U у наступній послідовності: $U_1 = 200$ В, $U_2 = 400$ В, $U_3 = 600$ В, $U_4 - U_8 = 800$ В. ІЕС при $U_1 - U_3$ сприяли поступовому виходу на номінальний режим, а ІЕС при

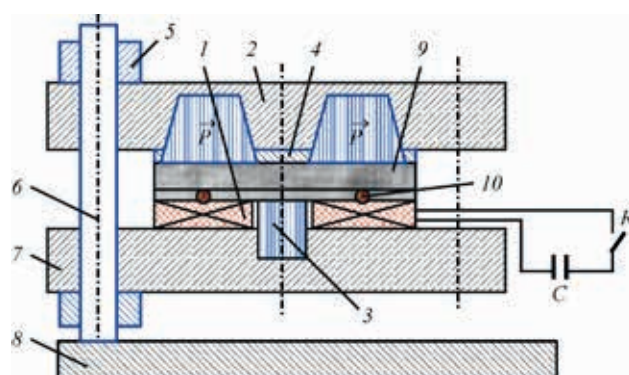


Рис. 4. Конструктивна схема ОІЕМП металевих матеріалів: 1 – індуктор; 2 – верхня плита; 3 – вісь кріплення індуктора; 4 – зразок зварного з’єднання сплаву АМг6 $\delta = 1,0$ мм; 5 – гайка притискання; 6 – шпилька; 7 – нижня плита; 8 – базова опора; 9 – струмопровідний екран (рис. 1, в); 10 – зразок-імітатор зварного з’єднання; P – епюра розподілу електродинамічної сили по поверхні зразка; С – джерело ІЕМП; К – ключ запуску розрядного циклу

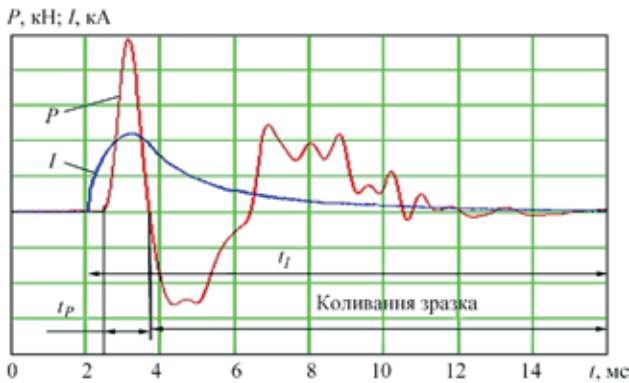


Рис. 5. Часові розподіли сили електродинамічного тиску P і сили струму I при ОІЕМП зразків сплаву АМГ6 $\delta = 1,0$ мм без екрану при напрузі заряду $U = 800$ В, де t_1 та t_r відповідно періоди часу дії P та I

$U_4 - U_8$ – генерація ІЕМП для обробки зразків. Вибір кількості ІЕС при напрузі 800 В базується на даних [4].

Результати експериментів та їх обговорення. Часові розподіли осцилограм $I(t)$ і сили $P(t)$ при ОІЕМП диску $\delta = 1,0$ мм без екрану наведено на рис. 5. Слід зазначити, що тиск P , який визначає зміну напруженого стану зразків, діє за період першої напівхвилі сили. Подальші загасаючі коливання P , що є наслідком контакту зразків із демпфером 7 (рис. 3) і які відображені на рис. 5, не враховували при оцінці амплітудних значень сили. Це пов'язано з тим, що загасаючі коливання мають місце тільки при реєстрації значень P і виключені при умовах жорсткої фіксації зразків (рис. 4), за якої виконували їх ОІЕМП з метою впливу на напружено-деформований стан зварних з'єднань. При виключенні можливості руху зразка в умовах його закріплення дія сили P ініціює релаксацію напружень в металі.

Амплітудно-частотні характеристики сили тиску P і сили струму I наведено у табл. 3, згідно даних якої у дослідженому діапазоні режимів обробки часовий період t_1 дії ІЕС забезпечував тривалість імпульсу струму, що відповідає частоті, за якої глибина проникнення струму у сплав АМГ6 досягала значення, більшого за 10 мм. Тобто, при обробці зразків товщиною $\delta = 1,0 \dots 6,0$ мм імпульсами такої тривалості ІЕМП виявляється і на зворотній стороні зразка. Загасання індукowanego струму відбувається згідно розв'язку нестационарної задачі для розподілу векторів електромагнітного поля [8]. В будь-якому разі за вибраних параметрах індуктора товщина зразка, що обробляється імпульсним електромагнітним полем,

буде мало впливати на перебіг перехідного процесу розряду ємнісного накопичувача. Електромагнітна сила P зі збільшенням товщини буде зростати, оскільки визначається як інтегральна величина в певному об'ємі, що підтверджують дані табл. 3 і залежності $P = f(I)$ при варіації δ , які наведено на рис. 6. При зростанні δ до 6,0 мм внаслідок застосування екрану (крива 2) значення P підвищуються до двох разів у порівнянні із ОІЕМП без екрану зразків $\delta = 1,0$ мм (крива 1). Зниження сили тиску P при зменшенні товщини δ диска обумовлено поверхневим ефектом, тобто нерівномірним розподілом густини індукowanych струмів по глибині та зменшенням активного об'єму електропровідного середовища, яке є електромагнітним навантаженням індуктора. Для ефективної обробки тонких зразків, таким чином, необхідно зменшувати тривалість струмового імпульсу. Такий шлях, очевидно, вимагає зміни параметрів розрядних контурів, що не є доцільним. В роботі запропоновано найпростіший і ефективний шлях у вигляді встановлення додаткових шарів спорідненого матеріалу, за якого еквівалентна товщина буде оптимальною з точки зору досягнення найбільшого значення сили P електромагнітного тиску.

Ефективність впливу ОІЕМП на залишкову формозміну зразків, оброблених за наведених вище умов, підтверджують дані, наведені на рис. 7, а–в. Значення вертикальних переміщень крайків дисків f (рис. 7, а) реєстрували згідно методики [1] у точках № 1–4 (рис. 7, в) із фіксованою кутовою відстанню l_a у 90° між сусідніми точками. Виконання ОІЕМП без екрану (рис. 7, з, крива 2) та з його застосуванням (крива 3) дозволяє зменшити значення переміщень

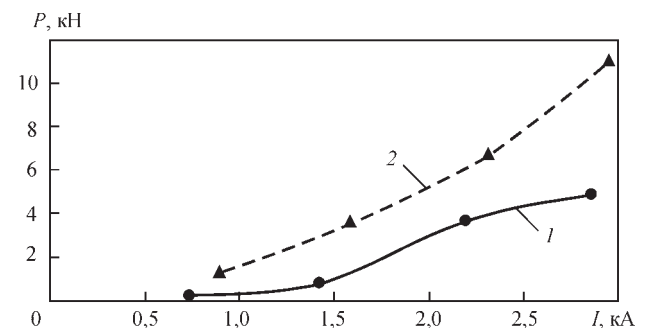


Рис. 6. Вплив амплітудних значень ІЕС – I на силу тиску P при ОІЕМП зразків кільцевих зварних з'єднань $\delta = 1,0$ мм зі сплаву АМГ6: 1 – ОІЕМП без екрану; 2 – ОІЕМП з екраном

Таблиця 3. Амплітудно-частотні характеристики P та I при ОІЕМП зразків сплаву АМГ6 за різних значень U та δ

Номер	Характеристики ОІЕМП зразків	U , В	δ , мм	P , кН	t_p , мс	I , кА	t_l , мс
1	Без екрану (БЕ)	200	1,0	0,234	0,3	0,733	8,8
2	БЕ	400	1,0	0,812	0,28	1,427	10,8
3	БЕ	600	1,0	3,694	0,48	2,199	11,9
4	БЕ	800	1,0	4,871	0,48	2,864	12,6
5	З екраном (ЗЕ)	200	1,0+5,0	1,267	1,36	0,82	7,7
6	ЗЕ	400	1,0+5,0	3,589	1,2	1,593	9,4
7	ЗЕ	600	1,0+5,0	6,690	1,2	2,316	10,0
8	ЗЕ	800	1,0+5,0	10,999	1,0	2,952	10,58

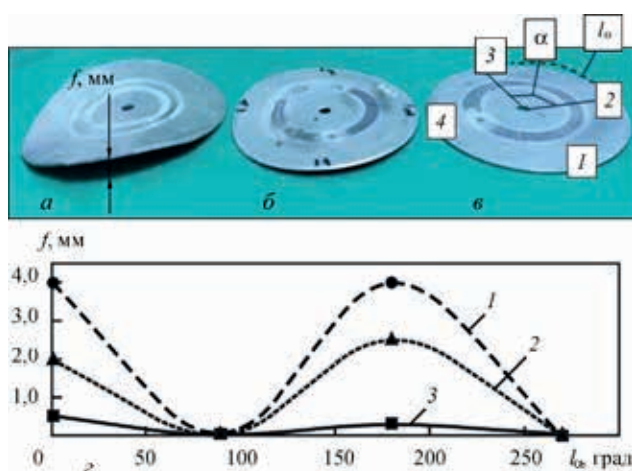


Рис. 7. Залишкові формозміни зразків кільцевих зварних з'єднань зі сплаву АМгб: а – зовнішній вигляд (ЗВ) диска без обробки, де f – переміщення крайків диска; б – ЗВ після ОІЕМП без екрану; в – ЗВ після ОІЕМП з екраном, де 1–4 – номер точки вимірювання переміщень, α та l_0 – відповідно кут і кутів відстань між точками 2–3; z – вертикальні переміщення f крайків диска, де крива 1 – без ОІЕМП; 2 – після ОІЕМП без екрану; 3 – після ОІЕМП із застосуванням екрану

f крайків дисків відповідно до двох і восьми разів у порівнянні зі зразками, які не були піддані ОІЕМП.

На рис. 8 наведено результати впливу ОІЕМП на нормальну компоненту σ залишкових напружень у центрі зварного шва (ЗШ) і у зоні навколо шва (ЗНШ) на відстані 10 мм від лінії шва. Враховуючи вигин дисків (рис. 7), наслідком якого є невідновленість епюр залишкових напружень, в якості оцінки впливу ОІЕМП на напружений стан визначали пікові значення σ в ЗШ і в ЗНШ в зразках у вихідному стані та за заданих умов обробки. Можна бачити, що в цілому ОІЕМП позитивно впливає на залишковий напружений стан кільцевих зварних з'єднань зі сплаву АМгб товщиною $\delta = 1$ мм.

Хоча початкові (до ОІЕМП) значення σ при обробці без екрану (рис. 8, а) та з екраном (рис. 8, б) відрізняються, що пов'язано із малою жорсткістю дисків, можна бачити, що застосування екрану позитивно впливає на релаксацію напружень при ОІЕМП. Це підтверджує порівняння між собою діаграм а, б та в, г. Так, обробка без та із застосу-

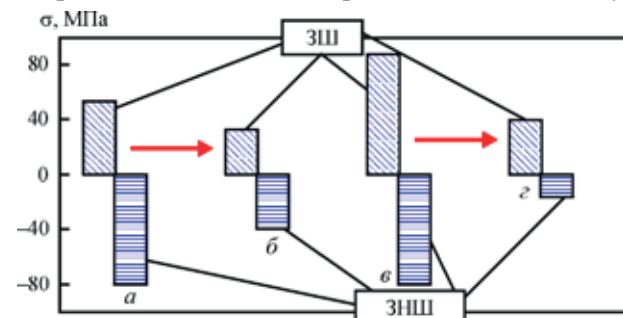


Рис. 8. Вплив ОІЕМП на нормальну компоненту σ залишкових напружень у зварних швах (ЗШ) і в зоні навколо шва (ЗНШ) кільцевих зварних з'єднань зразків зі сплаву АМгб товщиною $\delta = 1$ мм: а – пікові значення σ зразків у вихідному стані; б – σ після ОІЕМП без застосування екрану; в – σ зразків у вихідному стані; г – σ після ОІЕМП із застосуванням екрану

ванням екрану призвела до зменшення початкових значень σ в активній зоні розтягування (ЗШ) відповідно на 36 і 56 %, а в реактивній стискування (ЗНШ) – на 50 і 80 %. Отримані результати пояснюються впливом поля на міжзеренні кордони і локальними розігрівом зерен [3], але потребують більш детального дослідження еволюції тонкої структури неферромагнітних матеріалів під дією ІЕМП.

Враховуючи наведене, слід зазначити, що ОІЕМП може бути ефективним засобом як підвищення точності виготовлення елементів тонколистових зварних конструкцій із алюмінієвих сплавів, так і керування їх залишковими напруженими станами. До переваг ОІЕМП перед загальною термічною обробкою слід віднести її значно меншу енергоємність та відсутність потреби у спеціальному обладнанні. Відомо, що локальна термообробка (ЛТО) алюмінієвих сплавів не є ефективною через високу теплопровідність останніх, а застосування ОІЕМП, яка характеризується в основному нетермічним механізмом впливу, є більш дієвим.

Для застосування ОІЕМП у промисловому виробництві, зокрема у авіа- і «білому» суднобудуванні доцільно визначити декілька напрямків, що дозволяють підвищити ефективність обробки:

- оптимізація електрофізичних параметрів ОІЕМП, що забезпечать максимальну ефективність впливу складових поля на напружено-деформований стан і структуру неферромагнітних матеріалів;
- розробка і виготовлення індукторних систем підвищеної міцності і термічної стійкості;
- розробка і виготовлення енергоефективних імпульсних джерел живлення із оптимальними характеристиками зарядного і розрядного циклів;
- розробка технологій ОІЕМП для регулювання напружено-деформованими станами зварних, наплавлених та напилених конструкцій із провідних матеріалів.

Висновки

1. На базі застосування датчика прискорень розроблено експериментальну методику дослідження кінетики сили електродинамічного тиску на зразки кільцевих зварних з'єднань при їх обробці імпульсним магнітним полем (ОІЕМП).

2. Встановлено, що зменшення сили тиску імпульсного електромагнітного поля при зменшенні товщини зразків кільцевих зварних з'єднань зі сплаву АМгб обумовлено нерівномірним розподілом густини індуктованих струмів по глибині та зменшенням активного об'єму електропровідного середовища, яке є електромагнітним навантаженням індуктора.

3. Запропоновано метод підвищення ефективності ОІЕМП формуванням додаткових шарів спорідненого матеріалу шляхом встановлення екрану, що проводить струм, за якого еквівалентна товщина буде оптимальною для досягнення найбільшого значення сили електромагнітного тиску.

4. Встановлено, що виконання ОІЕМП без екрану, що проводить струм та із його застосуванням

дозволяє зменшити значення вертикальних переміщень зразків кільцевих зварних з'єднань відповідно до двох і восьми разів у порівнянні із зразками, які не були піддані обробці.

5. Встановлено, що ОІЕМП без та із застосуванням екрану призводить до зменшення початкових зварювальних напружень розтягування відповідно на 36 та 56 %, а стискування – на 50 і 80 %, що пояснюється впливом поля на міжзеренні кордони і локальними розігрівом зерен та потребує додаткових досліджень.

6. Сформульовано напрямки підвищення ефективності ОІЕМП для скорішого застосування її у промисловому виробництві, зокрема: оптимізація електрофізичних параметрів ОІЕМП, розробка прогресивних індукторних систем, імпульсних джерел живлення та технологій регулювання напружено-деформованими станами зварних, наплавлених та напилених конструкцій.

Робота виконана у рамках комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу та безпечної експлуатації конструкцій, споруд і машин» у 2016–2020 рр.

Список літератури

1. Lobanov, L.M., Pashchin, M.O., Cherkashyn, O.V. et al. (2019) Prospects for application of electromagnetic fields in welding and related processes. *The Paton Welding J.*, **8**, 29–36.
2. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Хименко Л.Т. (2003) *Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий*. Т. 1. 2-е изд. перераб. и доп. Батыгин Ю.В. (ред.). Харьков, МОСТ–Торнадо.
3. Туренко А.Н., Батыгин Ю.В., Гнатов А.В. (2009) Импульсные магнитные поля для прогрессивных технологий. Т. 3. *Теория и эксперимент притяжения тонкостенных металлов импульсными магнитными полями*. Харьков, ХНАДУ.
4. Стрижало В.А., Новогрудский Л.С., Воробьев Е.В. (2008) *Прочность материалов при криогенных температурах с учетом воздействия электромагнитных полей*. Киев, ИПП.

5. Lobanov, L.M., Kondratenko, I.P., Pashchin, N.A. et al. (2016) Comparison of influence of pulsed effects of magnetic and electric fields on stressed state of welded joints of aluminium alloy AMg6. *The Paton Welding J.*, **10**, 8–13.
6. Васецкий Ю.М., Дзюба К.К. (2017) Аналитический метод расчета квазистационарного трехмерного электромагнитного поля тока, протекающего по контуру произвольной конфигурации вблизи электропроводного тела. *Технічна електродинаміка*, **5**, 7–17. Doi: <https://doi.org/10.15407/techned2017.05.007>
7. Kistler Instrumente AG. *Quartz Accelerometer 8042* (Passport).
8. Ращепкин А.П., Кондратенко И.П., Карлов О.М., Кришук Р.С. (2019) Электромагнитное поле индуктора з Ш-подобним осердям для магнітно-імпульсної обробки матеріалів. *Технічна електродинаміка*, **6**, 5–12. Doi: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.005>

References

1. Lobanov, L.M., Pashchin, M.O., Cherkashyn, O.V. et al. (2019) Prospects for application of electromagnetic fields in welding and related processes. *The Paton Welding J.*, **8**, 29–36.
2. Batygin, Yu.V., Lavinsky, V.I., Khimenko, L.T. (2003) *Pulsed magnetic fields for advanced technologies*. Vol.1. 2nd Ed. Ed. by Yu.V. Batygin. Kharkov, MOST-Tornado [in Russian].
3. Turenko, A.N., Batygin, Yu.V., Gnatov, A.V. (2009) *Pulsed magnetic fields for advanced technologies*. Vol.3: Theory and experiment of attraction of thin-walled metals by pulsed magnetic fields: Monography. Kharkov, KhNADU [in Russian].
4. Strizhalo, V.A., Novogrudsky, L.S., Vorobiov, E.V. (2008) *Strength of materials at cryogenic temperatures taking into account electromagnetic fields*. Kiev, IPS [in Russian].
5. Lobanov, L.M., Kondratenko, I.P., Pashchin, N.A. et al. (2016) Comparison of influence of pulsed effects of magnetic and electric fields on stressed state of welded joints of aluminium alloy AMg6. *The Paton Welding J.*, **10**, 8–13.
6. Vasetsky, Yu.M., Dzyuba, K.K. (2017) Analytical calculation method of quasi-stationary 3D electromagnetic field of current passed on contour of arbitrary configuration near conductive body. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **5**, 7–17 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.05.007>.
7. Kistler Instrumente AG. *Quartz Accelerometer 8042* (Passport).
8. Rashchepkin, A.P., Kondratenko, I.P., Karlov, O.M., Kryshchuk, R.S. (2019) Electromagnetic field of inductor with E core for magnetic-pulsed treatment of materials. *Tekhnichna Elektrodynamika*, **6**, 5–12 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.005>

INFLUENCE OF PULSED ELECTROMAGNETIC FIELD TREATMENT ON STRESSED AND DEFORMED STATE OF CIRCUMFERENTIAL WELDED JOINTS OF ALUMINUM AMg6 ALLOY

L.M. Lobanov¹, M.O. Pashchin¹, O.L. Mykhoduy¹, O.V. Cherkashin¹, O.M. Timoshenko¹, I.P. Kondratenko², T.G. Solomiychuk¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine, 03057, Kyiv, Peremohy Ave., 56

At present a growing interest in pulsed electromagnetic field treatment technologies is observed to improve the mechanical properties of metals, alloys and welded joints. Based on the pulsed electromagnetic field treatment, effective methods can be developed to optimize the stress-strain state of aluminum alloy products in order to extend their life for the use in aircraft, shipbuilding and other industries. The aim of the work is to study the influence of pulsed electromagnetic field treatment on the stress-strain state of circumferential welded joints of aluminum AMg6 alloy. An original experimental procedure was developed to study the kinetics of the electrodynamic pressure force during treatment of metallic materials with a pulsed electromagnetic field. It is shown that as a result of treatment with a pulsed electromagnetic field in the same conditions, the value of P increased with the use of the screen, which is predetermined by the increase in the active additional volume of the electric conductive medium. It was established that the use of the screen during treatment by a pulsed electromagnetic field helps to reduce the level of residual tensile welding stresses and improve the accuracy of circumferential welded joints. 8 Ref., 3 Tabl., 8 Fig.

Keywords: pulsed electromagnetic treatment, aluminum alloy, circumferential welded joints, stress-strain state, residual welded joints, additional screen

Надійшла до редакції 01.10.2020

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ SLM-ПРОЦЕСУ НА ПОРИСТІСТЬ МЕТАЛОВИРОБІВ

С.В. Аджамський^{1,2}, Г.А. Кононенко^{2,3}, Р.В. Подольський^{3,4}

¹Дніпровський національний університет ім. О. Гончара. 49000, м. Дніпро, просп. Гагарина, 72. E-mail: pk_dnu@i.ua

²LLC «Additive Laser Technology of Ukraine». 49000, м. Дніпро, вул. Рибинська, 144. E-mail: info@alt-print.com

³Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України. 49000, м. Дніпро, пл. Академіка Стародубова, 1.

E-mail: office.isi@nas.gov.ua

⁴Національна металургійна академія України, 49000, м. Дніпро, просп. Гагарина, 4,

E-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

Селективне лазерне плавлення – один з сучасних методів виготовлення деталей та вузлів складної геометрії, які складно або неможливо відтворити в умовах традиційного виробництва. Проблема даного виробництва полягає в тому, що якість продукції залежить від безлічі факторів, які можна розділити на основні групи: обладнання, матеріал, процес, деталь, фінішна обробка. В роботі досліджували вплив питомої щільності енергії сканування жароміцного сплаву Inconel 718 на 3D-принтері українського виробництва Alfa-150 (ALT Ukraine). Показано вплив параметрів SLM-технології на якість кінцевої продукції та виконано аналіз впливу факторів технології на якість готової продукції. В результаті металографічних досліджень встановлено, що при відстані між проходами лазера, при якому розрахункове перекриття одиничного треку складає 25 %, створюються умови глибокого проплавлення, утворюються великі витягнуті пори в корені треку, що формуються при схлопуванні лунки (так звана замкова щілина). При розрахунковому перекритті одиничного треку 17 % утворюється невелика кількість дрібних округлих пор, при розрахунковому перекритті 0...8 % формується структура з мінімальною кількістю пор. При відстані між проходами лазера, що перевищує ширину одиничного треку при даному поєднанні потужності і швидкості сканування лазера, спостерігаються випадки неповного сплаву сусідніх треків, утворюються пори з гострими краями, які є концентраторами напружень – найбільш небезпечними з точки зору надійності виробу. Таким чином встановлено раціональне перекриття треків при вибіркового лазерного плавленні, яке становить від 0 до 8 % від ширини одиничного треку при конкретних параметрах процесу. Бібліогр. 21, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: селективне лазерне плавлення, технологічні фактори, система якості, Inconel 718, титома щільність енергії

Сучасний метод адитивного виробництва, званий селективне лазерне плавлення (SLM), дозволяє виготовляти 3D-вироби пошарово [1]. Підготовка до друку починається з 3D-моделювання об'єкта, побудованого в CAD системі в форматі STL, в результаті отримуємо елемент, розбитий на воксельну структуру [2] з певним набором параметрів, придатних для друку. При цифровій обробці модель розділяється на шари товщиною від 20 до 100 мкм і формуються вектори руху лазерного променя.

Процес виготовлення починається з нанесення шару металевих порошків, необхідного для друку одного шару, на металеву підкладку, яка кріпиться до опорної конструкції і переміщається у вертикальному напрямку по осі Z. Процес друку відбувається всередині камери з інертним газом (зазвичай використовується аргон або азот), в якій підтримується строго контрольована атмосфера. Це дає можливість друку також порошком алюмінієвих і титанових сплавів, тому що кисень в камері не проникає, що дозволяє уникнути окислення використовуваного матеріалу. Кожен 2D-шар об'єкта спікається разом, копіюючи форму цифрового STL креслення. Металевий порошок роз-

плавляється при впливі лазерного променя, що направляється уздовж осей X і Y двома поверхнями, що відбивають промінь з високою швидкістю. Потужність лазерного випромінювача зазвичай знаходиться в діапазоні 200...1000 Вт.

За допомогою процесу SLM можуть бути отримані зразки зі складною геометрією, які неможливо або складно виготовити іншими традиційними способами виробництва [3].

При реалізації SLM-технології металеві порошки в шарі швидко розплавляються [4] і тверднуть в ванні розплаву (швидкості охолодження від 10^3 до 10^8 K/c) з короткочасним нерівноважним переходом фаз і формується високодисперсна мікроструктура [5, 6]. Це призводить до деяких істотних відмінностей в механічних властивостях між виробами, виготовленими методами лиття, кування та SLM [7, 8]. Мікроструктура під час звичайного виробничого процесу, такого як лиття і деформація, має більші зерна з високою ліквідацією через низьку швидкість охолодження під час твердіння, значні дефекти усадочного походження через великий обсяг розплаву, що кристалізується. Крім того, в литих і деформованих сплавах управління мікроструктурою ускладнено, в той

Аджамський С.В. – <https://orsid.org/0000-0002-6095-8646>, Кононенко Г.А. – <https://orsid.org/0000-0001-7446-4105>,

Подольський Р.В. – <https://orsid.org/0000-0001-7446-4105>

© С.В. Аджамський Г.А. Кононенко, Р.В. Подольський, 2020

час як його легше контролювати в SLM-процесі шляхом зміни параметрів виготовлення [9].

Конфігурація ванни розплаву однієї доріжки являє собою дугу, така форма є наслідком розподілу енергії лазерного променя по Гаусу. Форму і перекриття ванн розплаву видно в мікроструктурі матеріалу, отриманого за допомогою селективного лазерного плавлення. Невеликі дендритні і комірчасті структури з розміром структурних елементів в кілька мікрметрів виявляються в межах кожного треку.

Однак поверхня цих зразків в порівнянні з процесами точного кування і механічного оброблення показує велику шорсткість поверхні (R_a) – близько 10...20 мкм. У деяких галузях, таких як медицина, високе значення R_a може демонструвати хороші біологічні властивості. Наприклад, імплантат Ti-6Al-4V, отриманий за допомогою процесу SLM з високим значенням R_a , може бути кращим для росту кістки. У зубному протезі зі сплаву Co-Cr, отриманому методом SLM з високим значенням R_a , може підвищуватися адгезія між металом і керамікою. У всьому світі значення R_a складають від 6 до 11 мкм і мають тенденцію до зменшення.

Таким чином, технологія SLM дозволяє забезпечувати високу якість виробів (точність і унікальність геометрії, високий комплекс механічних властивостей, висока щільність, однорідність мікроструктури і хімічного складу), і широкий спектр використовуваних матеріалів дозволяє їй знайти застосування в таких галузях як медична і стоматологічна, машинобудівна, автомобільна і аерокосмічна.

Необхідність системного підходу до управління якістю продукції впливає з різноманіття і взаємозв'язку зовнішніх і внутрішніх факторів, що впливають на якість, з безперервності його формування та забезпечення. Якість виробів, виготовлених за допомогою SLM-технології залежить від багатьох факторів, які можна розділити на основні групи: обладнання, матеріал, процес, деталь, фінішна обробка (рис. 1).

На якість кінцевих виробів істотно впливають параметри самого процесу SLM. До основних з них відносяться потужність лазера, швидкість і траскторія сканування лазерного променя [10–14], відстань між треками сканування, товщина шару порошкового матеріалу.

Якість виробу, включаючи кінцеву щільність металу і шорсткість поверхні, в першу чергу, залежить від характеристик ванни розплаву (форма і розмір), які в значній мірі управляються зміною питомої щільності енергії лазерного променя, що є по суті мірою енергії, що підводиться в процесі друку [15, 16]. Управління питомою щільністю енергії може бути досягнуто зміною відповідних параметрів, що контролюються. Потужність лазера P (Вт), швидкість сканування V (мм/с), відстань між треками (перекриття ванни розплаву) d (мм) і товщина шару t (мм) є найбільш важливими параметрами і пов'язані з питомою щільністю енергії лазера як:

$$E = P/(Vdt).$$

Рациональні режими процесу повинні стабільно забезпечувати позитивний результат. Рівень потужності та швидкості сканування променю лазера за певної товщини шару порошку для певного

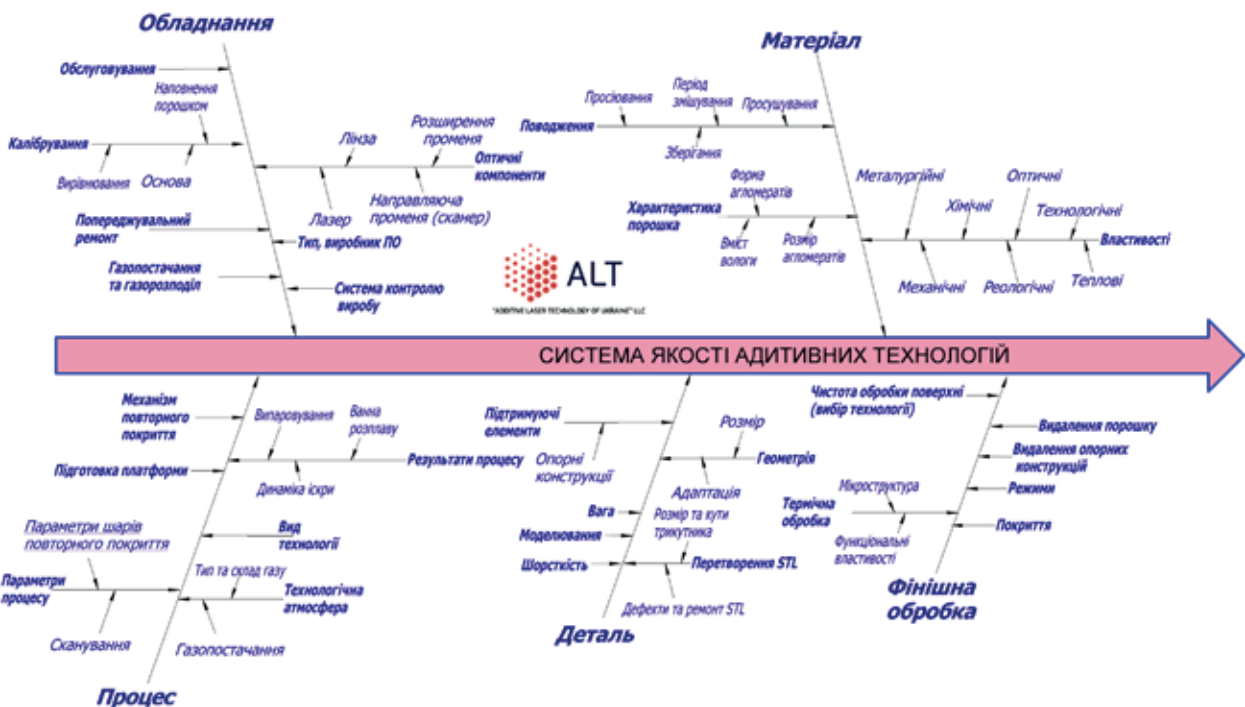


Рис. 1. Фактори, що впливають на якість металовиробу при селективному лазерному плавленні

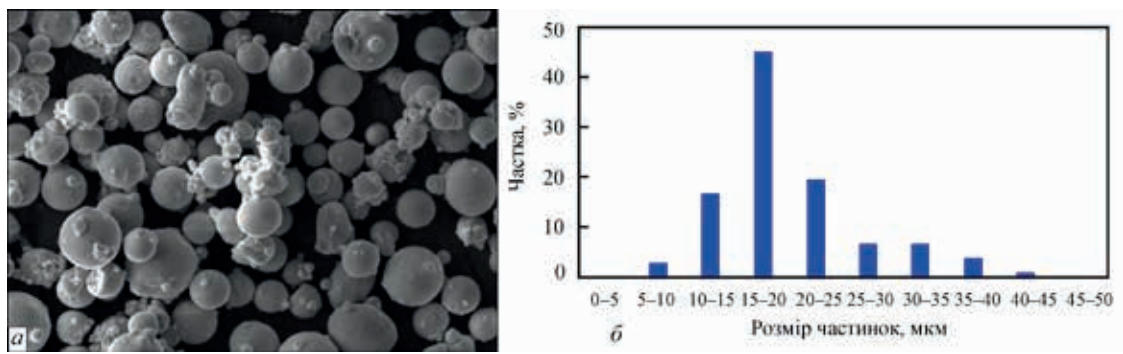


Рис. 2. Частинки вихідного матеріалу INCONEL 718 при збільшенні 500 (а) та результати гранулометричного аналізу (б)

Таблиця 1. Фактичний хімічний склад Inconel 718

Хімічний елемент	Ni	Cr	Mo	Nb	Mn	Co	Cu	Al	Ti	Si	C	Fe
Вміст, мас. %	52,5	19,5	3	5,1	0,2	0,7	0,6	0,8	0,2	0,2	0,08	Залишок

матеріалу та устаткування (рис. 1) мають забезпечувати формування стабільного треку.

Відстань між проходами лазера по суті регламентує величину перекриття сусідніх треків. Часто досліджують вплив відстані між проходами лазера, не враховуючи розмірів треків [17]. Такі результати мають вузьку сферу застосування, не мають загального характеру, оскільки в залежності від потужності та швидкості сканування променю лазера геометричні параметри ванни розплаву змінюються. Відомий підхід і при оцінюванні перекриття треків. Разом з тим не існує єдиної думки щодо раціональної величини перекриття сусідніх треків. Зазвичай науковці тримаються думки, що це значення знаходиться в діапазоні 30...50 % [18, 19]. Інші вважають, що відстань між проходами лазера має бути близькою до ширини треку для забезпечення мінімальної пористості [20].

Мета роботи: визначити раціональні режими SLM-процесу при використанні металевого порошку жароміцного сплаву Inconel 718 на устаткуванні «ALT-Україна» при товщині робочого шару 50 мкм.

Матеріал та методика досліджень. Матеріалом для виготовлення зразків був порошок сплаву Inconel 718 виробника H. C. Starck марки AMPERPRINT 0181.074 з розміром частинок 45 + 15 мкм.

Вихідний матеріал був досліджений за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ-106 (рис. 2, а) для визначення форми і розмірів частинок. На рис. 2, б наведено результати аналізу.

Виготовлялися зразки розміром 10×10×5 мм з жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718 при товщині шару 50 мкм, фактичний хімічний склад готового виробу представлено в табл. 1. Контроль хімічного складу проводився за допомогою прецизійного аналізатору «EXPERT 4L». Вирощування зразків проводилося в середовищі аргону, на установці «ALFA-150» виробництва LLC «Additive

Laser Technology of Ukraine». В якості стратегії побудови твердого тіла використовувався зігзагоподібний (кінець попереднього поруч з початком наступного треку) процес друку з обертом на 67° наступного шару відносно попереднього (рис. 3). Дослідження мікроструктури проводилося за допомогою оптичного мікроскопа AXIOVERT 200M MAT. Металографічні дослідження мікроструктури металу виконувалися після травлення $\text{CuSO}_4 + \text{HCl}$ в площині, паралельній напрямку вирощування зразка (X-Z).

В процесі виготовлення зразка змінювали параметри процесу перекриття треків між границями ванн розплаву, отриманому за допомогою процесу SLM.

При розрахунку використовувалась програма Microsoft Office модуль Excel.

Результати досліджень. На прикладі жароміцного сплаву Inconel 718 були проведені дослідження впливу потужності і швидкості друку на геометричні розміри ванни розплаву одиничного треку [21].

За результатами експерименту було встановлено режими, що забезпечують формування ванни розплаву оптимальної геометрії: глибина зони плавлення повинна перевищувати товщину шару приблизно в півтора–два рази, співвідношення

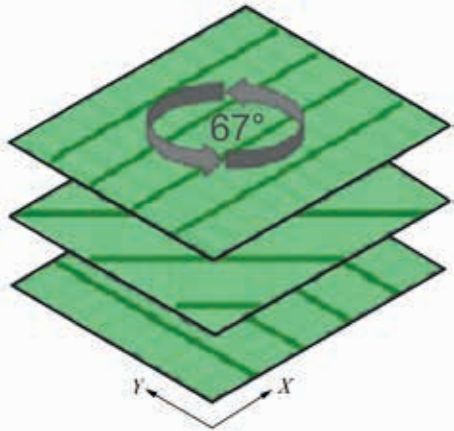


Рис. 3. Схема сканування для відтворення твердого тіла

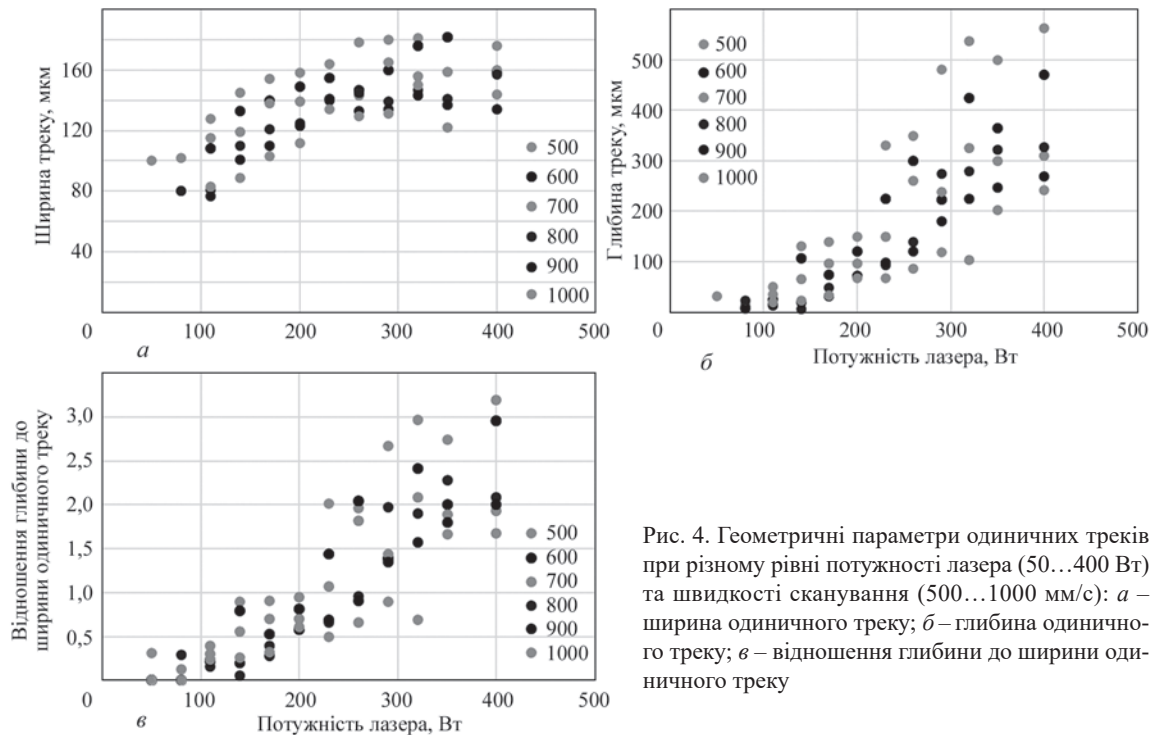


Рис. 4. Геометричні параметри одиничних треків при різному рівні потужності лазера (50...400 Вт) та швидкості сканування (500...1000 мм/с): *a* – ширина одиничного треку; *б* – глибина одиничного треку; *в* – відношення глибини до ширини одиничного треку

глибини до ширини треку повинно бути на рівні від 1,0 до 1,5.

Як видно з рис. 4, при збільшенні потужності більше 200...230 Вт ширина одиничного треку перестає монотонно збільшуватись (рис. 4, *a*), в той же час глибина треку при збільшенні потужності більше 200...230 Вт для менших швидкостей сканування починає різко збільшуватись (рис. 4, *б*). Це, в свою чергу призводить до зміни відношення глибини одиничного треку до його ширини (рис. 4, *в*), тобто процес виходить за межі раціональних режимів робочого вікна.

Якщо крок сканування занадто малий, хоча безперервність матеріалу між сусідніми треками буде збільшена, і утворення пор буде менше, вторинний переплав збільшує тенденцію до утворення грубозернистої структури. Якщо крок сканування занадто великий, то перекриття між двома треками буде недостатнім та не буде зв'язку між сусідніми треками. Це генерує велику кількість

пор, тим самим зменшуючи щільність (рис. 5). Але збільшення інтервалу між проходами променю збільшує площу переплавки, тим самим збільшуючи коефіцієнт використання лазера і швидкість виробництва.

Для подальших досліджень впливу величини перекриття треків було обрано один з режимів, який за результатами попередніх досліджень було визначено як раціональний: $P = 180$ Вт, $V = 800$ мм/с. Ширина ванни одиничного треку при таких параметрах процесу 120 мкм. В рамках експерименту виготовили зразки $10 \times 10 \times 5$ мм, для яких змінювали відстань між проходами променю лазера від 90 до 130 мкм, що має забезпечувати перекриття від 25 до 0 % і можлива відсутність перекриття в разі, коли відстань між треками перевищує ширину треку.

В результаті металографічних досліджень встановлено (табл. 2), що при перекритті 25 % створюються умови глибокого проплавлення, утворюються великі витягнуті пори в корені треку, що формуються при схлопуванні лунки (так звана замкова щілина).

При перекритті 17 % утворюється невелика кількість дрібних округлих пор, утворення яких ймовірно пов'язано із захопленням газу металом розплаву в процесі кристалізації, при перекритті 0...8 % формується структура з мінімальною кількістю пор. При відстані між треками, що перевищує ширину одиничного треку при даному поєднанні потужності і швидкості сканування лазера, спостерігаються випадки неповного сплаву сусідніх треків, утворюються

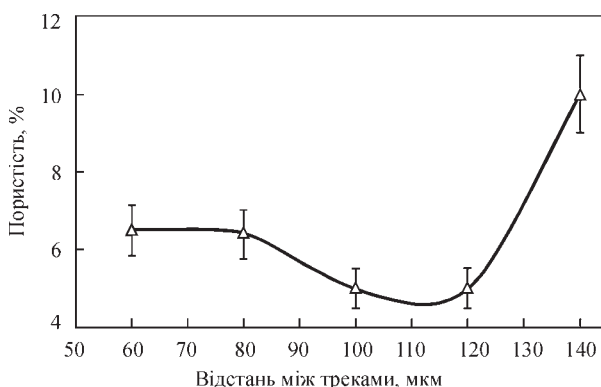


Рис. 5. Вплив відстані між треками на пористість сплаву Inconel 625 [21]

Таблиця 2. Мікроструктура дослідних зразків в залежності від відстані між скануванням променю лазера

Відстань між треками, мм (розрахункове перекриття, %)	Мікроструктура дослідного зразка (травлено $\text{CuSO}_4 + \text{HCl}$)	Мікроструктура дослідного зразка в полірованому стані	Пористість зразків, %
0,09 (25)			1,75
0,10 (17)			0,48
0,11 (8)			0,02
0,12 (0)			0,02
0,13 (-8)			0,87

пори з гострими краями, які є концентратора-ми напружень і найбільш небезпечними з точки зору надійності виробу. Таким чином встановлено оптимальне перекриття треків при вибірко-вому лазерному плавленні, яке становить від 0 до 8 % від ширини одиничного треку при кон-кретних параметрах процесу.

Висновки

Показано вплив параметрів SLM-техноло-гії на якість кінцевої продукції та виконано ана-ліз впливу факторів технології на якість готової продукції.

Встановлений раціональний інтервал значень перекриття треків при вибірко-вому лазерному

плавленні, який становить від 0 до 8 % від шири-
ни одиничного треку при конкретних параметрах
процесу, що забезпечує мінімальну пористість
об'ємних зразків.

Список літератури/References

1. Kruth, J.-P., Leu, M.-C., Nakagawa, T. (1998) Progress in additive manufacturing and rapid prototyping. *CIRP Ann.-Manuf. Technol.*, 47, 2, 525–540.
2. Аджамський С.В., Кононенко А.А., Подольський Р.В. (2020) Симуляція впливу остаточних напружень і параметрів SLM-технології на формування обла-
сти границі изделия из жаропрочного никелевого спла-
ва INCONEL 718. *International scientific and technical conference information technologies in metallurgy and machine building, Dnipro, 17–19 March, 2020*, 4–6.
Adzhamskij, S.V., Kononenko, A.A., Podolskij, R.V. (2020) Simulation of effect of residual stresses and parameters of SLM technology on formation of boundary product areas from high-temperature nickel alloy Inconel 718. In: *Proc. of Int. Sci.- and Techn. Conf. on Information Technologies in Metallurgy and Machine Building (Ukraine, Dnipro, 17–19 March)*, 4–6. DOI: 10.34185/1991–7848.itmm.2020.01.00.
3. Mahoney, M.W. (1989) Superplastic Properties of Alloy 718. «Superalloy 718 Metallurgy and Applications». Loria E.A. (eds.), *TMS*, 391–405.
4. Аджамський С.В., Кононенко А.А., Подольський Р.В. (2020) Двумерное моделирование нестационарного тем-
пературного поля единичного трека из жаропрочного сплава INCONEL 718. *Матеріали Всеукраїнської науко-
во-методичної конференції «Проблеми математичного моделювання»*, 1, 42–45 Режим доступу: https://www.dstu.dp.ua/uni/downloads/material_konf_traven_%202020.pdf.
Adzhamskij, S.V., Kononenko, A.A., Podolskij, R.V. (2020) 2D modeling of nonstationary temperature field of unit track from high-temperature nickel alloy Inconel 718. In: *Proc. of All-Ukrainian Sci.-Method. Conf. on Problems of Mathematical Modeling*, 1, 42–45 [in Ukrainian]. https://www.dstu.dp.ua/uni/downloads/material_konf_traven_%202020.pdf
5. Shifeng, W., Shuai, L., Qingsong, W. et al. (2014) Effect of molten pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melting parts. *J. Mater. Process. Technol.*, 214, 11, 2660–2667, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.06.002>
6. Loh, L.-E., Chua, C.-K., Yeong, W.-Y. et al. (2015) Numerical investigation and an effective modelling on the Selective Laser Melting (SLM) process with aluminium alloy 6061. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 80, Jan., 288–300, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.014>
7. Jia, Q., Gu, D. (2014) Selective laser melting additive manu-
facturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, mi-
crostructure and properties. *J. Alloys Compd.*, 585, Feb., 713–
721. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.09.171>
8. Campanelli S.L., Contuzzi N., Angelastro A. et al. (2010) Capabilities and Performances of the Selective Laser Melting process. *New trends in Technologies: Devices, Computer, Communication and Industrial Systems*, Nov., 233–252.
9. Williams, C.B., Mistree F., Rosen D.W. (2005) Towards the design of a layerbased additive manufacturing process for the realization of metal parts of designed mesostructured. *Proc. 16th Solid Free. Fabr. Symp.*, pp. 217–230.
10. Аджамський С.В., Кононенко А.А., Подольський Р.В. (2020) SLM-технології в деталях і з'єднаннях авіаційно-космічного призначення. *11 Всеукраїнська конфе-
ренція молодих вчених «Молоді вчені – 2020»*, 1, 6–9.
Adzhamskij, S.V., Kononenko, A.A., Podolskij, R.V. (2020) SLM technologies in parts and assemblies of aerospace purpose. In: *Proc. of 11th All-Ukrainian Conf. of Young Scientists -2020*, 1, 6–9 [in Russian].
11. Аджамський С.В., Кононенко А.А., Подольський Р.В. (2020) Исследование влияния режимов SLM-процес-
са на качество в области контура изделий. *Міжнародна конференція «Університетська наука-2020»*, 1, 157–158. Режим доступу: http://eir.pstu.edu/bitstream/handle/123456789/17421/%D0%A3%D0%BA%D0%B0%D1%8F%20%D0%BD%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%B0_2020_%D0%A2_1.pdf
Adzhamskij, S.V., Kononenko, A.A., Podolskij, R.V. (2020) Study of modes of SLM process on quality in field of product contour. In: *Proc. of Int. Conf. on University's Science 2020*, 1, 157–158. http://eir.pstu.edu/bitstream/handle/123456789/17421/%D0%A3%D0%BA%D0%B0%D1%8F%20%D0%BD%D0%B0%D1%83%D0%BA%D0%B0_2020_%D0%A2_1.pdf
12. Аджамський С.В., Кононенко А.А., Подольський Р.В. (2020) Разработка технологии изготовления изделий для авиационно-космической техники методом выборочного лазерного плавления. *Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні»*. Режим доступу: https://foundry.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/06/conferenziya_2020.pdf#page=29
13. Adzhamskii, S.V., Kononenko, A.A. (2019) Investigation of deep penetration conditions when making samples from high-temperature alloy Inconel 718 by the method of selec-
tive laser melting. *The Paton Welding J.*, 6, 54–58.
14. Аджамський С.В. (2019) Реализация SLM-технологии для изготовления образцов из жаропрочного сплава INCONEL 718, применяемого в авиационно-космиче-
ской технике. *Авиационно-космическая техника и техно-
логия*, 2, 154.
Adzhamskij, S.V. (2019) Realization of SLM technology for producing of samples from high-temperature nickel alloy Inconel 718, used in aerospace engineering. *Aviats.-Kosmich. Tekhnika i Tekhnologiya*, 2, 154 [in Russian]. doi: 10.32620/akt.2019.2.09
15. Dilip, J.J.S., Zhang, S., Teng, C. et al. (2017) Influence of processing parameters on the evolution of melt pool, poros-
ity, and microstructures in Ti-6Al-4V alloy parts fabricated by selective laser melting. *Progress in Additive Manufac-
turing*, 2, 157–167.
16. Gu, H., Gong, H., Pal, D. et al (2013) Influences of ener-
gy density on porosity and microstructure of selective laser
melted 17–4PH stainless steel. *Google Scholar*.
17. Kasperovich G., Haubrich J., Gussone J., Requena G. (2016) Correlation between porosity and processing pa-
rameters in Ti-6Al-4V produced by selective laser melting. *Materials & Design*, 105, May, 160–170 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.070>
18. Pupoa, Y., Delgado, J., Serenóa, L., Ciurana*, J. (2013) Scanning space analysis in Selective Laser Melting for Co-CrMo powder. *Procedia Engineering*, 63, 370–378. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.228
19. Zhichao, Dong, Yabo, Liu, Weibin, Wen et al. (2019) Effect of Hatch Spacing on Melt Pool and As-built Quality During Selective Laser Melting of Stainless Steel: Modeling and Ex-
perimental Approaches. *Materials*, 12, 1, 50. DOI: 10.3390/ma12010050
20. Yadroitsev, I. et al. (2007) Strategy of manufacturing com-
ponents with designed internal structure by selective la-
ser melting of metallic powder. *Applied surface Science*, 254, 4, p. 980–983. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apusc.2007.08.046>
21. Adzhams'kij, S.V., Kononenko, G.A. (2020) Regularities of influence of SLM process parameters on the formation of single layer from the high temperature nickel alloy Inconel 718. *The Paton Welding J.*, 1, 32–38

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF SLM-PROCESS ON POROSITY OF METAL PRODUCTS

S.V. Adjamskiy^{1,2}, G.A. Kononenko^{2,3}, R.V. Podolskiy^{3,4}

¹Oles Honchar Dnipro National University, 49000 Ukraine, Dnipro Gagarina Ave. E-mail: dsit@dnue.edu.ua

² LLC «Additive Laser Technology of Ukraine» 49000 Ukraine Dnipro Rybin'ska Str., 144. E-mail: info@alt-print.com

³Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, 49050 Ukraine Dnipro sq. Academician Starodubov, 1.

E-mail: office.isi@nas.gov.ua

⁴National Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarin Ave., 4, 49000, Dnipro, Ukraine. E-mail: kaf.tom@metal.nmetau.edu.ua

Selective laser melting is one of the modern methods of manufacturing parts and assemblies of complex geometry, which are difficult or impossible to reproduce in the conditions of traditional production. The problem of this production is that product quality depends on many factors, which can be divided into such main groups as equipment, material, process, part, finishing. The influence of the specific energy density of scanning the heat-resistant alloy Inconel 718 on the 3D printer Alfa - 150 (ALT Ukraine) of the Ukrainian production was investigated. The influence of SLM - technology parameters on the quality of final products is shown and the analysis of the influence of technology factors on the quality of finished products is performed. As a result of metallographic examinations, it was found that the distance between the laser passes, at which the estimated overlap of a single track is 25%, the conditions of deep penetration are created, large elongated pores are formed at the root of the track, which are formed by collapsing holes (so-called keyhole). At the estimated overlap of a single track of 17% a small number of small rounded pores is formed. At the calculated overlap of 0... 8%, a structure with a minimum number of pores is formed. When the distance between the passages of the laser exceeds the width of a single track at a given combination of power and laser scanning speed, the cases of partial fusion of adjacent tracks are observed, pores with sharp edges are formed, which are stress concentrators – the most dangerous in terms of product reliability. Thus, a rational overlap of tracks during selective laser melting, which ranges from 0 to 8% of the width of a single track at specific process parameters. 21 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Keywords: selective laser melting, technological factors, quality system, Inconel 718, specific energy density

Надійшла до редакції
27.08.2020

WORLD TRADE FAIR FOR WELDING ENGINEERING —
JOINING, CUTTING, SURFACING

LET'S JOIN
THE WORLD!

13. – 17. September, 2021

REGISTER NOW!

www.schweissen-schneiden.com

SCHWEISSEN
& SCHNEIDEN
No. 1
IN THE WORLD

DVS GERMAN WELDING
SOCIETY

MESSE
ESSEN

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЙ І МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ З МЕТОЮ ПІДВИЩЕННЯ ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ І НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГІЧНОГО І ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ІНСТРУМЕНТІВ

М.С. Стороженко, О.П. Уманський, В.Є. Шелудько, Ю.В. Губін, Т.В. Курінна

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України. 03068, м. Київ, вул. Кржижановського 3.

E-mail: storozhenkomary@ukr.net

Встановлено, що технологія електроіскрового легування є перспективним методом зміцнення та відновлення деталей та технологічного та енергетичного обладнання: валів насосів та електродвигунів, робочих коліс, корпусів насосів, центрифуг, ін. Для підвищення ефективності запропонованої технології створено ряд електродних матеріалів $\text{FeNiSi-Cr}_3\text{C}_2$, $\text{WC-TiC-Mo}_2\text{C-Co-Cr}$ та $\text{WC-TiC-Co-Cr-Ni-Al}$, TiC-(Fe-Cr-Si-Al) , NiCrBCuC-WC , FeNiCrBSiC-TiB_2 та FeNiCrBSiC-CrB_2 , які пройшли апробацію на промислових підприємствах України. Виявлено, що застосування розроблених електродів дозволяє одночасно підвищити технологічність процесу електроіскрового легування та збільшити ресурс деталей технологічного обладнання в 2,0...2,5 рази. Бібліогр. 10, рис. 4.

Ключові слова: електроіскрове зміцнення, покриття, зносостійкість, самофлюсівний сплав, диборід титану

Однією з основних причин зниження ресурсу експлуатації машин та механізмів є зношування деталей вузлів тертя. До 85 % дефектів та пошкоджень машин та промислового обладнання обумовлено інтенсивним зносом поверхневого шару деталей, який найбільшою мірою сприймає вплив навколишнього середовища і контактні навантаження при терті [1]. Передчасний вихід з ладу машин та механізмів внаслідок зносу в ряді випадків може призвести до масштабних катастроф техногенного характеру. Наприклад, внаслідок ерозійно-корозійного зносу технологічного обладнання магістральних трубопроводів та підприємств нафтопереробної промисловості відбуваються масштабні витoki нафтопродуктів, що чинять загрозу життю та здоров'ю людей [2]. Тому підвищення надійності та довговічності деталей машин і механізмів є актуальною науковою задачею, розв'язання якої нерозривно пов'язано зі збільшенням зносостійкості робочих поверхонь відповідальних деталей машин та механізмів.

Проект Р8.1 «Розробка технологій і матеріалів для електроіскрового нанесення покриттів з метою підвищення терміну експлуатації і надійності деталей технологічного і енергетичного обладнання та інструментів», що виконувався протягом 2016–2020 рр. в рамках цільової комплексної програми наукових досліджень «Надійність і довговічність матеріалів, конструкцій, обладнання та споруд» (Ресурс-2) НАН України, спрямовано на подовження ресурсу роботи деталей промислового обладнання та інструментів шляхом відновлення/підвищення

зносостійкості їх робочих поверхонь методом електроіскрового легування (ЕІЛ). Основні переваги методу: можливість локального нанесення покриттів з будь-яких струмопровідних матеріалів; висока міцність зчеплення легованого шару з матеріалом основи; простота проведення процесу; його низька енергоємність; невисока вартість обладнання. Серед недоліків методу – відносно низька продуктивність, підвищити яку можна застосуванням нових електродних матеріалів і сучасного технологічного обладнання.

Для ЕІЛ традиційно застосовують чисті метали (Mo, Cr), металеві сплави (Fe–Cr, Fe–C, Ni–Cr, Ni–Mo), графіт (ЕГ-2, ЕГ-4) та тверді сплави (WC–Co та WC–TiC–Co) [3]. При використанні електродів із чистих металів та металевих сплавів не вдається отримати покриття з необхідними високими експлуатаційними характеристиками. Тому для нанесення зносостійких покриттів на промислових підприємствах найбільш широко застосовуються електроіскрові покриття з твердих сплавів на основі карбіду вольфраму. Але вони не завжди задовольняють вимогам технологічності нанесення ЕІЛ-покриттів у зв'язку з їх високою ерозійною стійкістю та, відповідно, низьким коефіцієнтом масопереносу, а через дефіцитність вольфраму постає необхідність розробки безвольфрамових ЕІЛ-покриттів. Тому в даний час розвиток технології нанесення електроіскрових покриттів пов'язаний з розробкою безвольфрамових композиційних електродних матеріалів системи «тугоплавка сполука–металевий сплав» [4].

© М.С. Стороженко, О.П. Уманський, В.Є. Шелудько, Ю.В. Губін, Т.В. Курінна, 2020

В Інституті проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України розроблено ряд електродних композиційних матеріалів на основі та карбідів/боридів титану, молібдену, хрому і вольфраму та серійних самофлюсівних сплавів: $\text{FeNiSi-Cr}_3\text{C}_2$, $\text{WC-TiC-Mo}_2\text{C-Co-Cr}$ та $\text{WC-TiC-Co-Cr-Ni-Al}$, TiC-(Fe-Cr-Si-Al) , NiCrBCuC-WC , FeNiCrBSiC-TiB_2 та FeNiCrBSiC-CrB_2 [5–10]. В рамках проекту Р8.1 проведено дослідження кінетики масопереносу при електроіскровому легуванні сталі 45 для виявлення оптимальних складів розроблених електродів з точки зору забезпечення технологічності процесів електроерозійного зміцнення/відновлення робочих поверхонь деталей. Вивчено особливості формування структури та рельєфу поверхні ЕІЛ-покриттів з розроблених електродних матеріалів залежно від співвідношення тугоплавкої та металевої складових електродів, а також визначено їх зносостійкість в умовах тертя ковзання без мастила та абразивного зношування.

Зокрема, встановлено, що ЕІЛ-покриття на основі серійного самофлюсівного сплаву FeNiCrBSiC з добавками 20 % TiB_2 (FTB20) та 20 % CrB_2 (FCB20) формуються шляхом розплавлення металевої складової електроду з одночасним руйнуванням та подрібненням включень боридів та карбоборидів хрому з наступним відділенням частинок електроду та їх перенесенням на поверхню катода (сталі), де вони

приварюються до поверхні внаслідок мікрометалургійних процесів. При цьому не відбувається перемішування матеріалів електроду та сталевий підкладки. За рахунок подрібнення боридів та карбоборидів титану/хрому від 20...30 мкм до розмірів менше 1 мкм на поверхні сталі формуються наноструктуровані ЕІЛ-покриття (рис. 1). Поверхня ЕІЛ-покриттів $\text{FeNiCrBSiC-20 \%TiB}_2$ та $\text{FeNiCrBSiC-20 \%CrB}_2$ має рівномірний рельєф по всій поверхні зразків. В умовах тертя ковзання без мастила ЕІЛ-покриття з розроблених електродних матеріалів FTB20 та FCB20 мають в 2...3 рази вищу зносостійкість порівняно з покриттями з серійних електродів WC-6 %Co (рис. 2) [10].

За результатами роботи розроблено технічні умови ТУУ 25.9–05416930–049–014:2019 «Електроди FeNiCrBSiC-TiB_2 для електроіскрового зміцнення деталей триботехнічного призначення». При дослідно-виробничій перевірці в умовах КП «Київський метрополітен» виявлено, що нанесення електроіскрових покриттів з розробленого композиційного матеріалу FTB20 на робочі поверхні валу-шестерні Л-20877А ескалятора типу ЛТ-2 забезпечує подовження ресурсу його роботи в 2,0...2,5 рази (150...160 тис. км) (Акт випробувань від 12.04.2019). В результаті дослідно-виробничої перевірки на підприємстві «ТРІЗ» встановлено, що нанесення ЕІЛ-покриттів з розробленого композиційного ма-

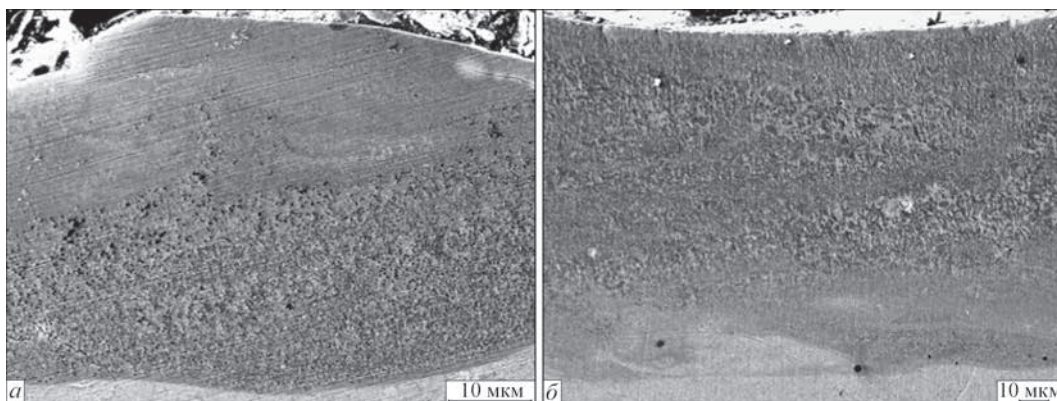


Рис. 1. Структура ЕІЛ-покриттів з розроблених електродів FTB20 (а) та FCB20 (б)

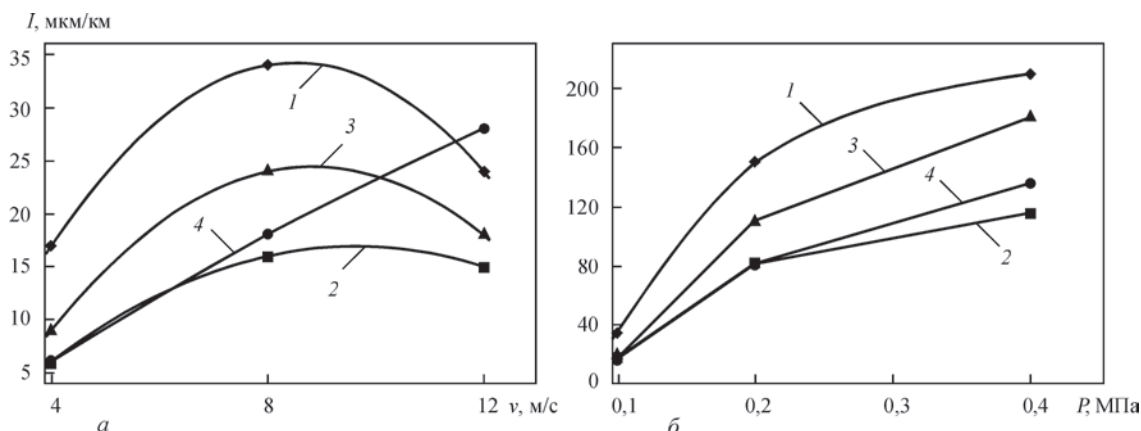


Рис. 2. Залежність інтенсивності зношування ЕІЛ-покриттів FeNiCrBSiC (1), FTB20 (2), FCB20 (3) і WC-6 % Co (4) від швидкості (а) та навантаження (б)

теріалу ФХТБ20 на робочі поверхні торцевих ущільнень марки ЦВС-30.50.01.200 для паливних насосів СЦЛ-20–24 електродами з композиційного матеріалу FTV20 системи FeNiCrBSiC–TiB (установка ALIER52: тривалість імпульсу 170 мкс; амплітудне значення струму імпульсу 200 А; енергія імпульсу 0,6 Дж) забезпечує подовження ресурсу роботи вузла ущільнення в 2,0...2,5 рази.

Процес електроерозійного зміцнення і відновлення деталей технологічного обладнання і інструментів з використанням розроблених електродних матеріалів NiBCuSi–WC, FeNiSi–Cr₃C₃, WC–TiC–Mo₂C–Co–Cr та WC–TiC–Co–Cr–Ni–Al, TiC–(Fe–Cr–Si–Al) було застосовано на підприємствах «ТРІЗ» (м. Суми) та АТ «НВП Електромаш» (м. Суми). В результаті аналізу пошкоджень деталей на даних підприємствах встановлено, що серед найбільш поширених видів зносу належать каверни на поверхні лопаток робочих коліс відцентрових компресорів, корозійно-абразивний знос підшипникових шийок вала ротора насоса ЦНС-180 і ротора електродвигунів. Деталі цих агрегатів виготовляються із високоміцних сталей, їх робочі поверхні зміцнюються різними видами хіміко-термічної обробки. Однак експлуатація цих деталей відбувається в умовах тертя без мастила при питомих навантаженнях до 20 МПа, що призводить до їх інтенсивного зношування. Електроіскрове

зміцнення крупногабаритних деталей (електродвигунів, робочих коліс, корпусів насосів, центрифуг) з використанням розроблених електродів дозволило підвищити їх зносостійкість та ресурс роботи в 2,0...2,5 рази. Зокрема, електроіскрова обробка робочих поверхонь валів (рис. 3, а) електродами FeNiSi–Cr₃C на установці ЕІЛ-8А дозволила збільшити максимальну товщину ЕІЛ-покривтів порівняно з використанням електродів WC-6 %Co (BK6) з 0,2 до 1,6 мм. Електродний матеріал NiBCuSi–WC був використаний на НВП «Електромаш» (м. Суми) для локального зміцнення та відновлення на установках «Елітрон-22А» і «Елітрон-52А» лемешів плугів (рис. 3, б) і посадочних місць промислових вентиляторів зі значними локальними пошкодженнями та зносом поверхні.

Крім того, на підприємстві «ТРІЗ» розроблено ряд технологічних процесів зміцнення деталей для компресорів з використанням графіту в якості електроду для ЕІЛ. Одним з найбільш відповідальних вузлів, що забезпечують герметичність компресорного агрегату, його безпечну і безвідмовну роботу, є вузол ущільнення. Дві третини всіх відмов компресорів відбуваються внаслідок порушення працездатності ущільнень. Тому в рамках виконання проекту Р8.1 було розроблено технологію зміцнення термооброблених втулок зі сталі 38Х2МЮА після



Рис. 3. Зміцнення деталей методом ЕІЛ з застосуванням розроблених електродів: шийка ротора електродвигуна з боку півмуфти (а) та леміш плуга (б)



Рис. 4. Зовнішній вигляд захисної втулки вузла ущільнення після ЕІЛ (а) і кільце плаваючого ущільнення відцентрового компресора (б)

посадки на вал шляхом електроіскрової обробки графітом. Аналогічно зміцнювали контактні торцеві поверхні ущільнювачів плаваючих кілець і відповідних деталей корпусу і кришки (рис. 4). Процес електроіскрової обробки проводили на установці «Елітрон-22А» при енергії розряду 0,5 Дж; глибина зміцненого шару складала 30...50 мкм, мікротвердість HV 900–1100. Після чого, з метою зниження шорсткості і коефіцієнта тертя, проводилося легування контактних поверхонь сріблом при енергії розряду 0,05 Дж.

На базі установки ЭИЛВ-8 було створено макет механізованої установки (ЭИЛВ-8М) для зміцнення деталей обертання. Згідно рекомендацій співробітників Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича на підприємстві «ТРІЗ» виготовлено оснастку для механізації процесу ЕІЛ малогабаритних циліндричних деталей (деталей паливних насосів, робочих коліс компресорів і шийок вала ротора електродвигунів), в результаті чого вдалося суттєво підвищити продуктивність праці.

Таким чином, застосування запропонованих в рамках проекту технологічних рішень та розроблених електродів дозволяє підвищити технологічність процесу електроіскрового легування, знизити затрати праці та збільшити ресурс деталей енергетичного та технологічного обладнання в 2,0...2,5 рази. Розроблені електроіскрові покриття пройшли випробування на промислових підприємствах України (ООО «ТРІЗ» (м. Суми), НВП «Електромаш» (м. Суми), КП «Київський метрополітен», що підтверджується позитивними актами дослідно-виробничої перевірки.

Робота виконана у рамках комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу та безпечної експлуатації конструкцій, споруд і машин» у 2016–2020 рр.

Список літератури

1. Holmberg K., Matthews A. (2009) *Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Application in Surface Engineering*. Switzerland, Elsevir.
2. Wu. X. (2004) Erosion-corrosion of various oil-refining materials in naphthenic acid. *Wear*, 256, 133–144.
3. Верхотуров А. Д., Подчерняева И. А., Прядко Л. Ф., Егоров Ф. Ф. (1988) *Электродные материалы для электроискрового легирования*. Москва, Наука.
4. Бовкун Г. А., Ткаченко Ю. Г. Юрченко Д. З. (1983) Безвольфрамовые электродные материалы для электроискрового легирования металлических поверхностей. *Электрофиз. обработка материалов*, 5, 27–29.
5. Тарельник В. Б., Паустовский А. В., Ткаченко Ю. Г. и др. Электродные материалы, композиционные и многослойные электроискровые покрытия из сплавов систем Ni–

Cr, WC–Co и металлов. *Порошковая металлургия*, 9/10, 100–115.

6. Paustovskii A. V., Tkachenko Yu. G., Khristov V. G. et al. (2016) Materials for the Electrospark Strengthening and Reconditioning of Worn Metal Surfaces. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 1, 14–22.
7. Тарельник В. Б., Паустовский А. В., Ткаченко Ю. Г. (2017) Электроискровые покрытия на стальной основе и контактной поверхности для оптимизации рабочих характеристик баббитовых подшипников скольжения. *Электронная обработка материалов*, 1, 37–46.
8. Тарельник В. Б., Паустовский А. В., Ткаченко Ю. Г. и др. (2017) Электроискровое легирование графитом стальных поверхностей: технология, свойства, применение. *Электронная обработка материалов*. 4. 1–10.
9. Ткаченко Ю. Г., Юрченко Д. З., Тимофеева И. И., Бритун В. Ф. (2018) Влияние состава электродов из стальных системы TiC–(FeCr–Al–Si) на формирование, фазовый состав и свойства износ- и жаростойких электроискровых покрытий на стали. *Порошковая металлургия*, 7/8, 119–129.
10. Уманський О. П., Стороженко М. С., Тарельник В. Б. та ін. (2020) Особливості формування електроіскрових покриттів системи NiFeCrBSiC–MeB2 на сталі. *Порошкова металургія*, 1/2, 86–95.

References

1. Holmberg, K., Matthews, A. (2009) *Coatings Tribology: Properties, Mechanisms, Techniques and Application in Surface Engineering*. Switzerland, Elsevir.
2. Wu, X. (2004) Erosion-corrosion of various oil-refining materials in naphthenic acid. *Wear*, 256, 133–144.
3. Verkhoturov, A. D., Podchernyaeva, I. A., Pryadko, L. F., Egorov, F. F. (1988) *Electrode materials for electrospark alloying*. Moscow, Nauka [in Russian].
4. Bovkun, G. A., Tkachenko, Yu. G., Yurchenko, D. Z. (1983) Tungsten-free electrode materials for electrospark alloying of metallic surfaces. *Elektrofiz. Obrabotka Materialov*, 5, 27–29 [in Russian].
5. Tarelnik, V. B., Paustovskii, A. V., Tkachenko, Yu. G. et al. (2016) Electrode materials, composite and multilayer electrospark coatings from alloys of Ni–Cr, WC–Co systems and metals. *Poroshk. Metallurgiya*, 9/10, 100–115 [in Russian].
6. Paustovskii, A. V., Tkachenko, Yu. G., Khristov, V. G. et al. (2016) Materials for the electrospark strengthening and reconditioning of worn metal surfaces. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 1, 14–22.
7. Tarelnik, V. B., Paustovskii, A. V., Tkachenko, Yu. G. (2017) Electrospark coatings on steel base and contact surface for optimization of service characteristics of whitemetal sliding bearings. *Electron. Obrabotka Materialov*, 1, 37–46 [in Russian].
8. Tarelnik, V. B., Paustovskii, A. V., Tkachenko, Yu. G. et al. (2017) Electrospark alloying of steel surfaces by graphite: Technology, properties, application. *Ibid.*, 4. 1–10 [in Russian].
9. Tkachenko, Yu. G., Yurchenko, D. Z., Timofeeva, I. I., Britun, V. F. (2018) Effect of composition of electrodes from alloys of TiC–(FeCr–Al–Si) system on formation, phase composition and properties of wear- and heat-resistant electrospark coatings on steel. *Poroshk. Metallurgiya*, 7/8, 119–129 [in Russian].
10. Umanskii, O. P., Storozhenko, M. S., Tarelnik, V. B. et al. (2020) Peculiarities of formation of electrospark coatings of NiFeCrBSiC–MeB2 on steel. *Ibid.*, 1/2, 86–95 [in Russian].

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES AND MATERIALS FOR ELECTRIC SPARK COATING WITH THE AIM OF INCREASING SERVICE LIFE AND RELIABILITY OF PARTS OF TECHNOLOGICAL AND POWER EQUIPMENT AND TOOLS

M. S. Storozhenko, O. P. Umansky, V. E. Sheludko, Yu. V. Gubin, T. V. Kurinna

Frantsevich Institute for Problems of Materials Science of the NAS of Ukraine 3, Krzhyzhanovsky Str., 03150, Kyiv, Ukraine
E-mail: storozhenkomary@ukr.net

It was established that the technology of electrospark alloying is a promising method of strengthening and restoration of parts and such technological and power equipment as shafts of pumps and electric motors, impellers, pump housings, centrifuges, etc. To increase the efficiency of the proposed technology, a number of electrode materials like FeNiSi – Cr₃C₅, WC – TiC – Mo₂C – Co – Cr and WC – TiC – Co – Cr – Ni – Al, TiC – (Fe – Cr – Si – Al), NiCrBCuC – WC, FeNiCrBSiC – TiB₂ and FeNiCrBSiC – CrB₂ were created, which were tested at industrial enterprises of Ukraine. It was revealed that application of the developed electrodes provides a simultaneous increase in the manufacturability of the process of electrospark alloying with an increase in the life of parts of technological equipment by 2.0...2.5 times. 10 Ref., 4 Fig.

Keywords: electrospark hardening, coating, wear resistance, self-flux alloy, titanium diboride

Надійшла до редакції 28.09.2020

4th International Interdisciplinary Conference Advances in Metallurgical Processes and Materials Ukraine, Odesa, May 19-21, 2021



Dear Colleagues, Readers, Friends!

Be sure that all together we will overcome COVID-19 and very soon you can again embrace your friends and shake hands with colleagues!

Consequently, we invite you to Odesa on May 19 – 21, 2021 for the 4th International Interdisciplinary Conference «Advances in Metallurgical Processes and Materials».

The previous three conferences were successfully held in 2007 in Dnepropetrovsk, 2015 – in Kyiv and 2018 – in Lviv.

The wide international participation of the experts from all over the world: from Japan, South Korea, China, India to the USA, Australia and South Africa and almost all European countries has demonstrated the high professional interest of metallurgists and material scientists in the interdisciplinary scientific forums as our AdMet.

The main topics of the conference

- Thermodynamics of metallurgical processes
- innovative technologies including additives in metallurgy, welding and casting
- steelmaking and ladle treatment
- casting and solidification of the metals and alloys
- ecology and CO₂-free metallurgy
- new steels and alloys, metal composites, nanomaterials
- modeling in metallurgy and metallurgical science
- automatic control and more ...

We are waiting for your abstract in English
until December 1, 2020 on
info@admet2021.com.ua

Follow the further information at
<http://www.admet2021.com.ua>

*Possible changes to be displayed
at the Conference site.*



From the International Organizing Committee,
Professors Volodymyr Shatokha (NMetAU, Dnipro),
Ganna Stovpchenko and Lev Medovar
(E.O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv).



ВПЛИВ АМПЛІТУДИ І ЧАСТОТИ КОЛИВАНЬ ЕЛЕКТРОДНОГО ДРОТУ ПРИ ДУГОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ НА ФОРМУВАННЯ І СТРУКТУРУ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ І ПРОПЛАВЛЕННЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛУ

А.А. Бабінець, І.О. Рябцев, І.П. Лентюгов, І.І. Рябцев, Т.В. Кайда, І.Л. Богайчук

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

Вивчено вплив амплітуди і частоти коливань електродного дроту при дуговому наплавленні на формування наплавлених валиків, характер проплавлення основного металу, а також на структурну і хімічну неоднорідність в зоні з'єднання наплавленого і основного металів. Встановлено, що при збільшенні частоти коливань електродного дроту, при однаковій амплітуді коливань і швидкості наплавлення відбувається поліпшення формування наплавленого металу і перемішування шарів в наплавленому металі; утворення більш дисперсної структури; зменшення ширини перехідної зони; більш рівномірний розподіл легуючих елементів; більш рівномірне проплавлення і «згладжування» межі сплавлення наплавленого і основного металів. При цьому зазначені закономірності практично не змінюються при збільшенні амплітуди коливань. Встановлено, що найкраще формування наплавленого металу відбувається при максимальній частоті $N = 45 \text{ хв}^{-1}$ та амплітуді $A = 25 \text{ мм}$ коливань електродного дроту і швидкості наплавлення $V_{\text{н}} = 7 \text{ м/год}$. Бібліогр. 8, рис. 10, табл. 2.

Ключові слова: дугове наплавлення, коливання електродного дроту, амплітуда і частота коливань, проплавлення основного металу, формування наплавленого металу, структура наплавленого металу, неоднорідність структури

Велике проплавлення основного металу – один з головних недоліків дугового наплавлення. Для зменшення проплавлення основного металу і отримання широких і відносно невисоких валиків дугове наплавлення пропонується виконувати з коливаннями електродного дроту або стрічки [1–6]. У цих роботах висновки про позитивний вплив коливань електродного дроту або стрічки на величину і характер проплавлення основного металу оцінювали, в основному, на поперечних шліфах наплавлених валиків, не досліджувався також вплив коливань електродного дроту на структурну неоднорідність наплавленого металу.

Однак, якщо враховувати факт безпосереднього впливу дуги на основний метал в процесі поперечних коливань електродного дроту і її переміщення в поздовжньому напрямку, слід очікувати, що характер проплавлення в поздовжньому і поперечному перетинах наплавлених валиків може змінюватися. Цей факт необхідно враховувати при розробці технологій наплавлення деталей, які експлуатуються не тільки в умовах різних видів зношування, але й циклічних навантажень, тому що нерівномірне проплавлення може привести до зниження їх стійкості, а також втомної довговічності при циклічних механічних та термічних навантаженнях [7, 8].

Аналіз показує, що в цьому випадку, якщо не враховувати електричні показники режиму наплавлення, основний вплив на проплавлення основного металу, формування і структуру наплавлених валиків

надають амплітуда і частота коливань електродного дроту або стрічки, а також швидкість наплавлення. Ці три характеристики взаємопов'язані, і при зміні однієї з них, для отримання якісних наплавлених валиків, необхідно коригувати дві інших.

Таким чином, метою експериментів було дослідження впливу частоти і амплітуди коливань електродного дроту при дуговому наплавленні, а також швидкості наплавлення на формування наплавленого металу, глибину і характер проплавлення основного металу, його частку в наплавленому металі і на структуру наплавленого металу. Дослідження проводилися на поздовжніх і поперечних шліфах наплавлених валиків.

У якості модельного використовувався порошковий дріт типу ПП-Нп-30Х20МН діаметром 2,6 мм. Наплавлення виконувалося під флюсом АН-26П. Режими наплавлення: струм 280...320 А; напруга 30...32 В; швидкість наплавлення 7 і 10 м/год; частота коливань $N = 18; 28; 32$ та 45 хв^{-1} ; амплітуда коливань $A = 25$ та 40 мм . Всього для досліджень було наплавлено 8 зразків.

З наплавлених валиків (рис. 1, 2) були обрізані початок і кратерна частина. З решти були вирізані поздовжні і поперечні макрошліфи для визначення розмірів валиків, проплавлення основного металу і його частки в наплавленому металі γ_0 (ЧОМ) (табл. 1), а також для дослідження макро- і мікро-структури наплавлених валиків.

$$\gamma_0 = \frac{F_0}{F_0 + F_{\text{н}}} \cdot 100\%,$$

Бабінець А.А. – <https://orsid.org/0000-0003-4432-8879>, Рябцев І.О. – <https://orsid.org/0000-0001-7180-7782>,

Лентюгов І.П. – <https://orsid.org/0000-0001-8474-6819>, Рябцев І.І. – <https://orsid.org/0000-0001-7550-1887>

© А.А. Бабінець, І.О. Рябцев, І.П. Лентюгов, І.І. Рябцев, Т.В. Кайда, І.Л. Богайчук, 2020

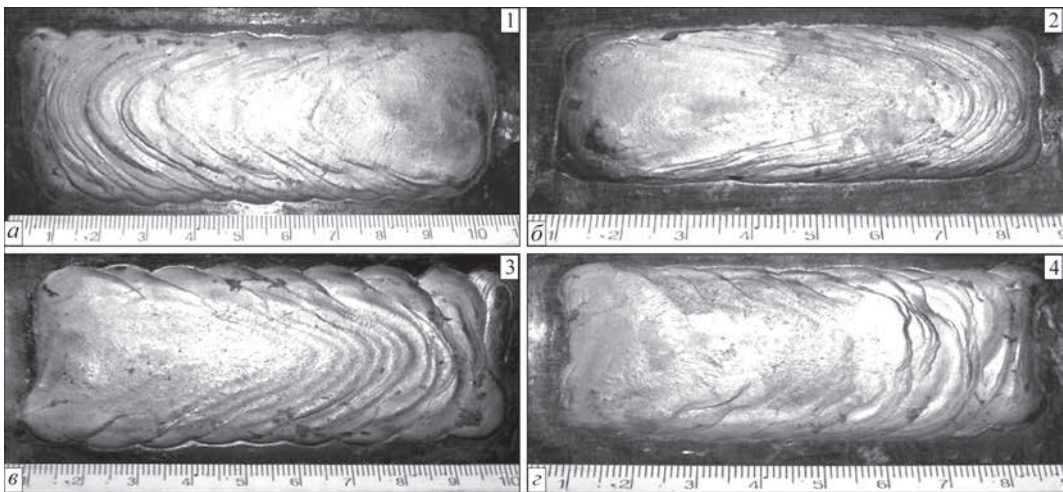


Рис. 1. Зовнішній вигляд валиків, наплавлених на швидкості $V_n = 7$ м/год; а – зразок 1: $A = 25$ мм; $N = 28$ хв⁻¹; б – зразок 2: $A = 25$ мм; $N = 45$ хв⁻¹; в – зразок 3: $A = 40$ мм; $N = 18$ хв⁻¹; г – зразок 4: $A = 40$ мм; $N = 32$ хв⁻¹ (нумерацію зразків див. табл. 1).

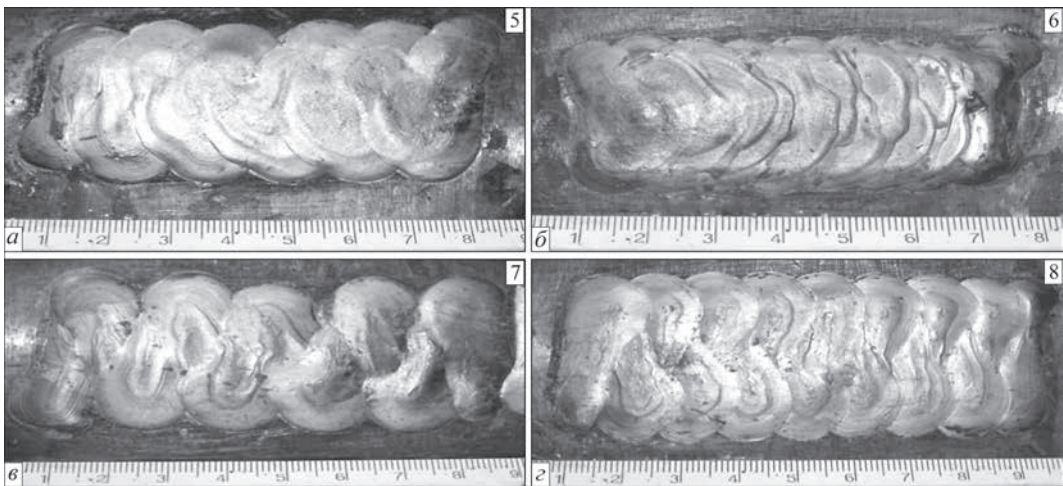


Рис. 2. Зовнішній вигляд валиків, наплавлених на швидкості $V_n = 10$ м/год; а – зразок 5: $A = 25$ мм; $N = 28$ хв⁻¹; б – зразок 6: $A = 25$ мм; $N = 45$ хв⁻¹; в – зразок 7: $A = 40$ мм; $N = 18$ хв⁻¹; г – зразок 8: $A = 40$ мм; $N = 32$ хв⁻¹ (нумерацію зразків див. табл. 1).

де F_o та F_n – площі перетину розплавленого основного і наплавленого металів, відповідно.

Мінімальна ЧОМ на рівні 37...39 % відзначена в зразках №№ 1 та 2, глибина проплавлення – 1,6...1,7 мм. Менша величина проплавлення 1,4...1,5 мм відзначена в зразках №№ 7 та 8, однак ЧОМ у цих зразках знаходиться на рівні 49...50 % (табл. 1).

За сукупною оцінкою розмірів наплавлених валиків, глибині проплавлення і ЧОМ оптимальним був визнаний наступний режим: швидкість наплав-

лення 7 м/год, амплітуда коливань електродного дроту $A = 25$ мм, частота його коливань $N = 45$ хв⁻¹ (табл. 1, зразок 2).

На рис. 3, а, б, д, е наведено фото макрошліфів, вирізаних поперек, а на рис. 3, в, г, ж, з – уздовж поздовжньої осі валиків, наплавлених на швидкості 7 м/год. Відповідно, на рис. 4, а, б, д, е наведено фото макрошліфів, вирізаних поперек, а на рис. 4, в, г, ж, з – уздовж поздовжньої осі валиків, наплавлених на швидкості 10 м/год.

Таблиця 1. Вплив режиму наплавлення на геометричні розміри валиків

Номер зразка	Коливання		Швидкість наплавлення, м/год	Розміри валиків, мм			ЧОМ, %
	Амплітуда A , мм	Частота N , хв ⁻¹		Ширина	Висота	Глибина проплавлення	
1	25	28	7	38,8	3,4	1,7	39
2*	25	45	7	36,4	2,95	1,6	37
3	40	18	7	46,8	2,05	1,8	54
4	40	32	7	47,0	1,8	1,5	50
5	25	28	10	37,5	1,9	1,8	55
6	25	45	10	35,8	2,7	1,5	52
7	40	18	10	42,6	2,1	1,5	50
8	40	32	10	44,7	1,5	1,4	49

*Зразок, наплавлений на режимі, який забезпечує оптимальний результат.

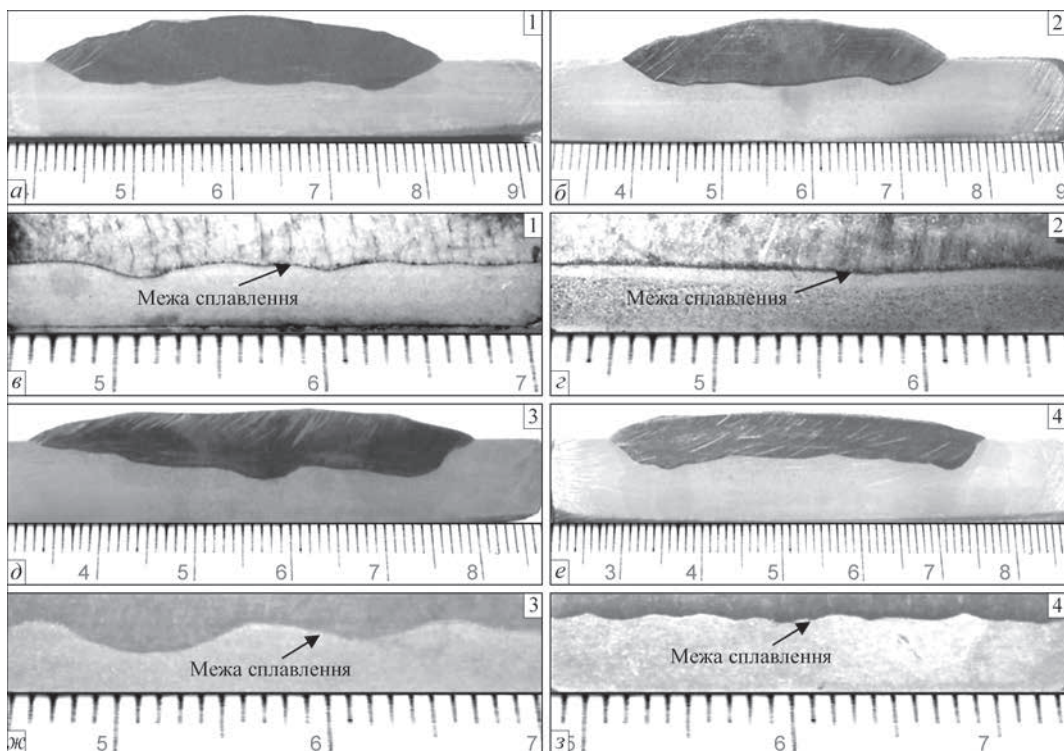


Рис. 3. Поперечні (а, б, д, е) та поздовжні (в, з, ж, з) макрошліфи зразків, наплавлених на швидкості 7 м/год: а, в – зразок 1: $A = 25$ мм; $N = 28$ хв⁻¹; б, з – зразок 2: $A = 25$ мм; $N = 45$ хв⁻¹; д, ж – зразок 3: $A = 40$ мм; $N = 18$ хв⁻¹; е, з – зразок 4: $A = 40$ мм; $N = 32$ хв⁻¹ (нумерацію зразків див. табл. 1).

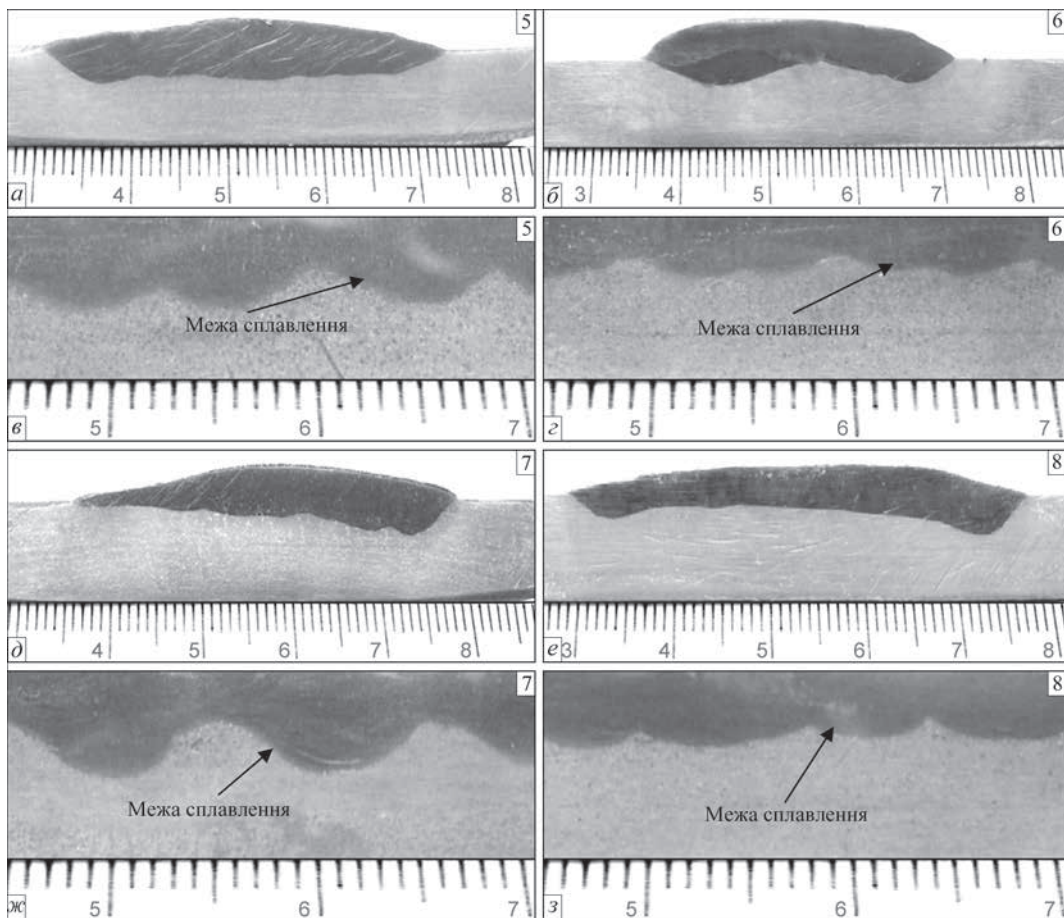


Рис. 4. Поперечні (а, б, д, е) та поздовжні (в, з, ж, з) макрошліфи зразків, наплавлених на швидкості 10 м/год: а, в – зразок 5: $A = 25$ мм; $N = 28$ хв⁻¹; б, з – зразок 6: $A = 25$ мм; $N = 45$ хв⁻¹; д, ж – зразок 7: $A = 40$ мм; $N = 18$ хв⁻¹; е, з – зразок 8: $A = 40$ мм; $N = 32$ хв⁻¹ (нумерацію зразків див. табл. 1).

Якщо аналізувати поздовжні макрошліфи, то при швидкості наплавлення 7 м/год підвищення частоти коливання електродного дроту сприяє отриманню більш рівномірного проплавлення і більш плавної межі сплавлення наплавленого і основного металів (рис. 3, з, з). При цьому найбільш рівна межа сплавлення досягається при амплітуді коливань 25 мм і максимальній частоті 45 хв⁻¹ (рис. 3, з; табл. 1, зразок 2).

Макрошліфи поперечних перетинів валиків, наплавлених на швидкості 7 м/год з різними показниками коливань, мало відрізняються один від іншого. Варто тільки відзначити макрошліф рис. 3, е (зразок 4), який характеризується мінімальним проплавленням – 1,5 мм.

При збільшенні швидкості наплавлення до 10 м/год отримати рівномірне проплавлення уздовж наплавлених валиків не вдалося ні при одній частоті і амплітуді коливань електродного дроту (рис. 4, в, з, ж, з). При цьому при напавленні на більш високій швидкості (10 м/год), підвищення частоти коливання електродного дроту також сприяє отриманню більш рівномірного проплавлення і більшої «плавності» лінії сплавлення (рис. 4, з, з). Проте цей вплив менше, ніж при швидкості наплавлення 7 м/год.

Як і на швидкості 7 м/год, нерівномірне проплавлення спостерігається і на макрошліфах, вирізаних поперек валиків, наплавлених на швидкості 10 м/год (рис. 4, б, д, е: зразки 6, 7, 8).

Напавлений метал зразка 1 ($V_n = 7$ м/год; $A = 25$ мм; $N = 28$ хв⁻¹) має дендритну мікроструктуру

(рис. 5, а). У приповерхневих шарах наплавленого металу переважає комірчаста кристалізація, із середнім діаметром комірок 60...80 мкм. Твердість матричної основи становить $HV1 = 5420...6060$ МПа (мартенсит, остаточний аустеніт, карбіди). По межах кристалітів відбувається виділення ланцюжків частинок глобулярної форми (рис. 5, б).

Кристалізація наплавленого металу зразка 2 ($V_n = 7$ м/год; $A = 25$ мм; $N = 45$ хв⁻¹) – дендритно-комірчаста з переважанням комірчастої (рис. 5, в), із середнім діаметром комірок 30...40 мкм. У лінії сплавлення з основним металом кристалізація набуває дендритний характер. Ширина кристалітів в цій області становить 70...90 мкм. Твердість матричної основи $HV1 = 4880...5480$ МПа. По межах кристалітів, як і в зразку № 1, виділяється надлишкова фаза у вигляді глобулярних дисперсних частинок (рис. 5, з). Ширина ЗТВ становить 3600 мкм.

Мікроструктура наплавленого металу зразка 3 ($V_n = 7$ м/год; $A = 40$ мм; $N = 18$ хв⁻¹) – дендритно-комірчаста з переважанням комірчастої (рис. 6, а, б). Середній діаметр комірок – 50...60 мкм. Твердість матричної основи $HV1 = 6060...6130$ МПа. У лінії сплавлення з боку наплавленого металу спостерігається мартенситна гряда. Мартенсит в цій зоні утворюється у вигляді великих голок. Ширина кристалітів у лінії сплавлення 70...80 мкм. Ширина ЗТВ – 2100 мкм.

Напавлений метал зразка 4 ($V_n = 7$ м/год; $A = 40$ мм; $N = 32$ хв⁻¹) також має дендритно-комірчасту структуру, з переважанням на поверх-

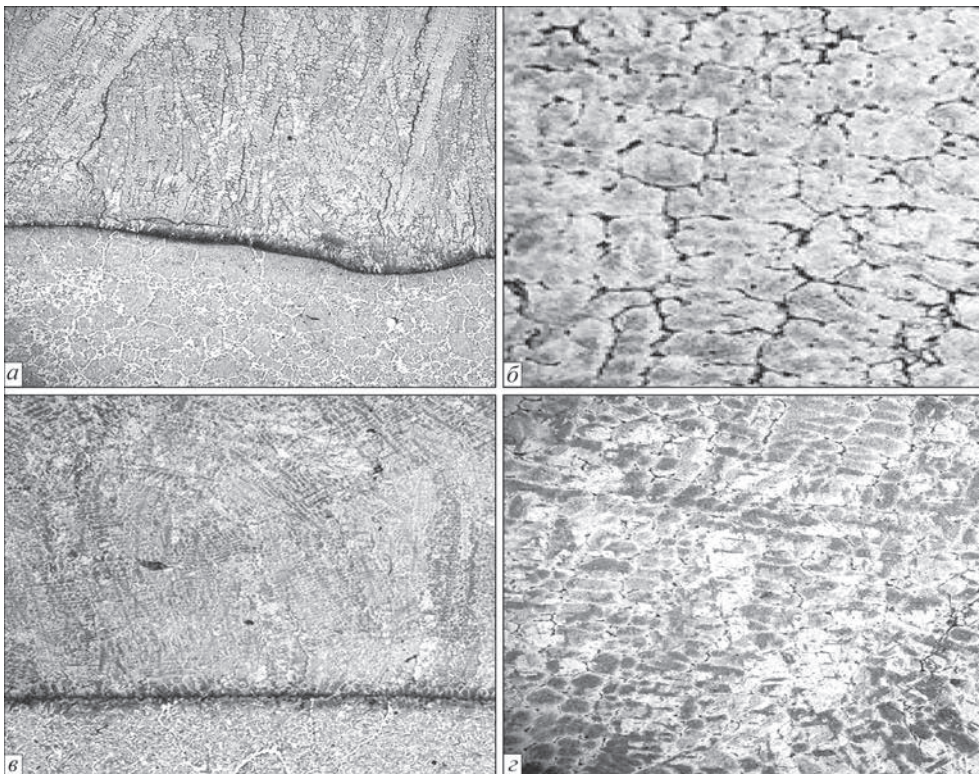


Рис. 5. Мікроструктура наплавленого металу зразків 1 (а, б) і 2 (в, з): а, в – зона сплавлення, $\times 20$; б, з – напавлений метал, $\times 100$. Травлення електролітичне в хромовій кислоті. $U_{xx} = 20$ В; $t = 3...5$ с (нумерацію зразків див. табл. 1).

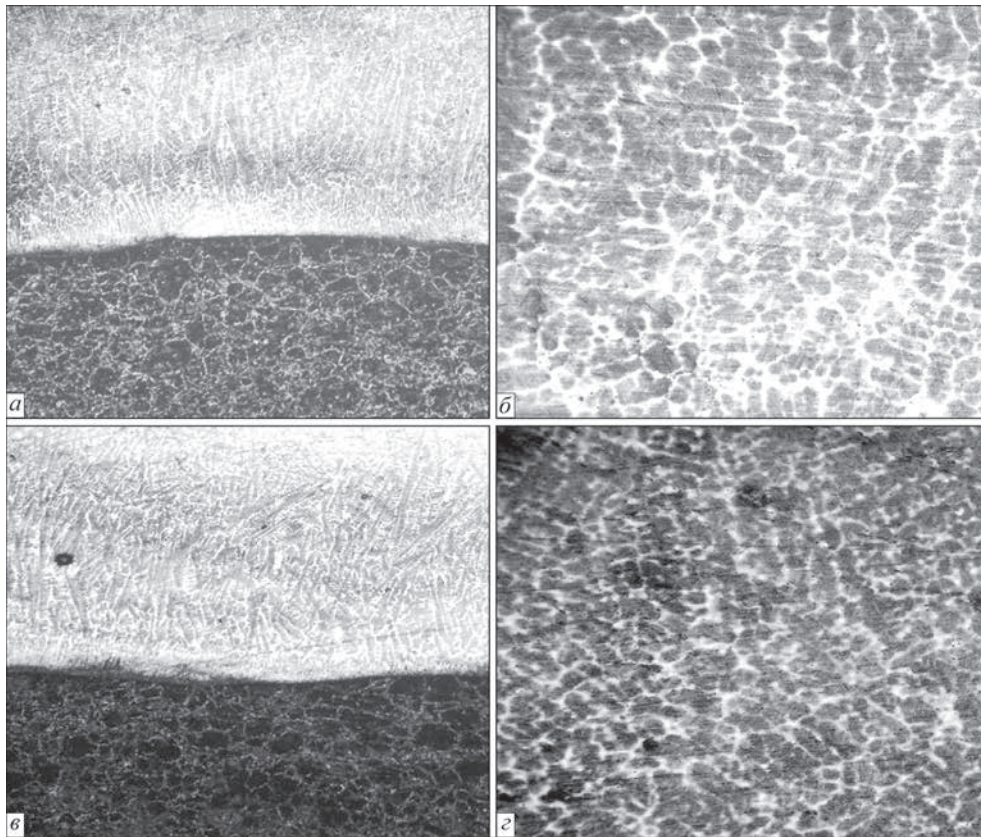


Рис. 6. Мікроструктура наплавленого металу зразків 3 (а, б) і 4 (в, г): а, в – зона сплавлення, $\times 20$; б, г – наплавлений метал, $\times 100$. Травлення електролітичне в хромовій кислоті. $U_{xx} = 20$ В; $t = 3 \dots 5$ с (нумерацію зразків див. табл. 1).

ні комірчастої форми. Діаметр комірок становить $40 \dots 50$ мкм (рис. 6, б, в). У лінії сплавлення – дендритна структура, ширина кристалітів в цій області – $60 \dots 80$ мкм. Твердість всередині кристалічної основи в даному зразку нижче, ніж у зразку 3 і становить $HV1 = 5140 \dots 5420$ МПа. Ширина ЗТВ – 1800 мкм.

Дослідження мікроструктури зразка 5 ($V_n = 10$ м/год; $A = 25$ мм; $N = 28$ хв $^{-1}$), показали, що вона має дендритну структуру (рис. 7, а, б). У приповерхневих шарах наплавленого металу переважає комірчаста кристалізація, із середнім діаметром комірок $60 \dots 80$ мкм. Твердість матричної основи становить $HV1 = 6860$ МПа. По межах кристалітів відбувається виділення частинок глобулярної форми. Діаметр комірок у верхній частині наплавленого металу $15 \dots 20$ мкм; ширина кристалітів $h_{кріст} = 15 \dots 25$ мкм, ЗТВ – 1200 мкм. По межах кристалітів спостерігаються виділення інтерметалідів або карбідів.

Мікроструктура зразка 6 ($V_n = 10$ м/год; $A = 25$ мм; $N = 45$ хв $^{-1}$) наведена на рис. 7, в, г. Вона також має дендритну структуру, з комірчастою кристалізацією в приповерхневих шарах. Діаметр комірок $25 \dots 35$ мкм; ширина кристалітів $h_{кріст} = 25 \dots 50$ мкм, ЗТВ – $800 \dots 900$ мкм. По межах кристалітів і комірок присутні виділення інтерметалідів або карбідів. Мікротвердість $HV1 = 6810$ МПа в світлому шарі та $HV1 = 6340$ МПа в темному шарі.

Дослідження мікроструктури зразка 7 ($V_n = 10$ м/год; $A = 40$ мм; $N = 18$ хв $^{-1}$), показали, що вона має дендритно-комірчасту структуру (рис. 8, а, б). Діаметр комірок $40 \dots 60$ мкм; ширина кристалітів $h_{кріст} = 40 \dots 60$ мкм, ЗТВ – $1000 \dots 1200$ мкм. Мікротвердість – $HV1 = 6420$ МПа. Є виділення по границях кристалітів та комірок, але їх набагато менше, ніж в зразках 5 та 6, наведених на рис. 7.

Мікроструктура наплавленого металу зразка 8 ($V_n = 10$ м/год; $A = 40$ мм; $N = 32$ хв $^{-1}$) дендритно-комірчаста (рис. 8, в, г). Діаметр комірок $15 \dots 30$ мкм; ширина кристалітів $h_{кріст} = 30 \dots 40$ мкм, ЗТВ – $600 \dots 800$ мкм. Виявлено хімічну неоднорідність по всій поверхні наплавленого металу. Є виділення по границях кристалітів і комірок. Мікротвердість в світлому шарі – $HV1 = 6060 \dots 6130$ МПа; в ділянці неоднорідності – $HV1 = 4840$ МПа.

Методами мікрорентгеноспектрального, рентгеноструктурного та металографічного аналізів досліджена хімічна і структурна неоднорідність наплавленого металу. Запис лінійного розподілу легуючих елементів проводили на відстані $600 \dots 700$ мкм від поверхні наплавленого шару. На (рис. 9, а–г), в якості прикладу, наведено криві розподілу Fe та Cr в перехідній зоні зразків 1 і 2.

Порівняльний аналіз показав, що протяжність перехідної зони зменшується при збільшенні частоти коливань. Так, при частоті коливань 28 хв $^{-1}$ ширина

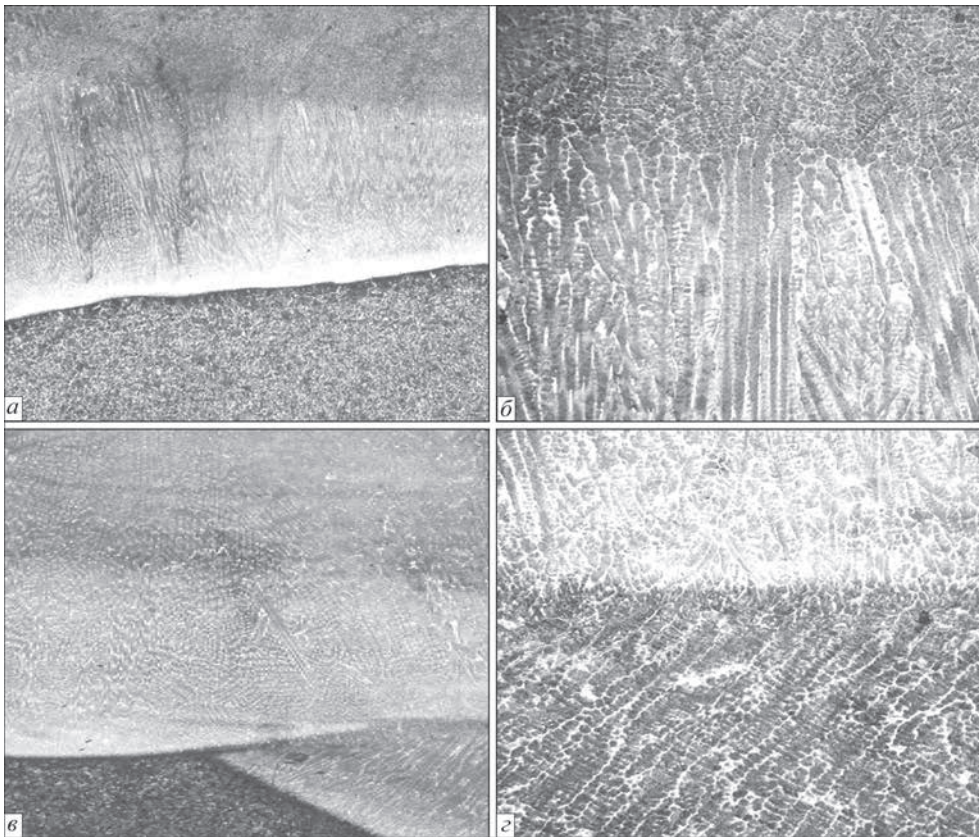


Рис. 7. Мікроструктура наплавленого металу зразків 5 (а, б) і 6 (в, г): а, в – зона сплавлення, $\times 20$; б, г – наплавлений метал, $\times 100$. Травлення електролітичне в хромовій кислоті. $U_{xx} = 20$ В; $t = 3 \dots 5$ с (нумерацію зразків див. табл. 1).

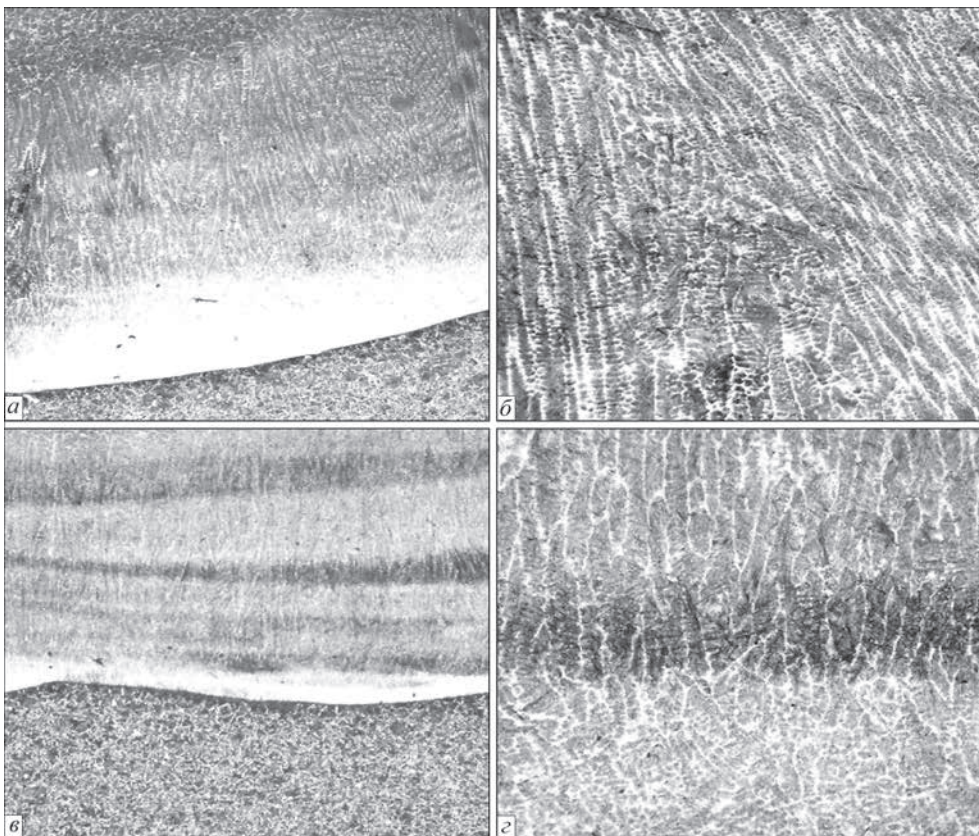


Рис. 8. Мікроструктура наплавленого металу зразків 7 (а, б) і 8 (в, г): а, в – зона сплавлення, $\times 20$; б, г – наплавлений метал, $\times 100$. Травлення електролітичне в хромовій кислоті. $U_{xx} = 20$ В; $t = 3 \dots 5$ с (нумерацію зразків див. табл. 1).

перехідної зони складає близько $35 \dots 40$ мкм, а при частоті $45 \text{ хв}^{-1} - 20 \dots 25$ мкм (табл. 2, зразки 1 і 2). Ана-

логічні результати отримано при аналізі мікроструктури наплавлених валиків зразків 1–8 (див. вище).

Таблиця 2. Вплив режиму наплавлення з коливаннями дроту на мікроструктуру та мікронеоднорідність наплавленого металу зразків 1–8 (див. табл. 1)

Номер зразка	Режими наплавлення			Параметри мікроструктурного стану			Хімічна мікронеоднорідність по Cr та Mo			
	V_n , м/ч	A , мм	N , мин ⁻¹	$D_{\text{комірки}}$, мкм	Ширина перехідної зони, мкм	Мікротвердість HV_1 , МПа	$Cr_{\text{max}}/Cr_{\text{min}}$		$Mo_{\text{max}}/Mo_{\text{min}}$	
1	7	25	28	60...80/90...120	35...40	5420...6060	4,5/3,4	1,32	0,32/0,25	1,28
2*	7	25	45	30...40/70...90	20...25	5420...5480	4,8/3,9	1,23	0,40/0,33	1,21
3	7	40	18	50...60/70...80	30...35	6060...6130	3,4/2,3	1,47	0,42/0,32	1,31
4	7	40	32	40...50/60...80	15...20	5140...5400	3,1/2,2	1,41	0,35/0,28	1,25
5	10	25	28	25...35/25...50	35...40	6800	4,2/3,1	1,35	0,41/0,30	1,36
6	10	25	45	15...20/15...25	20...25	6700...6800	4,6/3,2	1,44	0,38/0,30	1,26
7	10	40	18	40...60/40...60	30...35	6400...6300	3,8/2,9	1,31	0,42/0,34	1,23
8	10	40	32	15...30/30...40	15...20	6340...6810	3,5/2,4	1,46	0,34/0,28	1,21

*Зразок, наплавлений на оптимальному режимі.

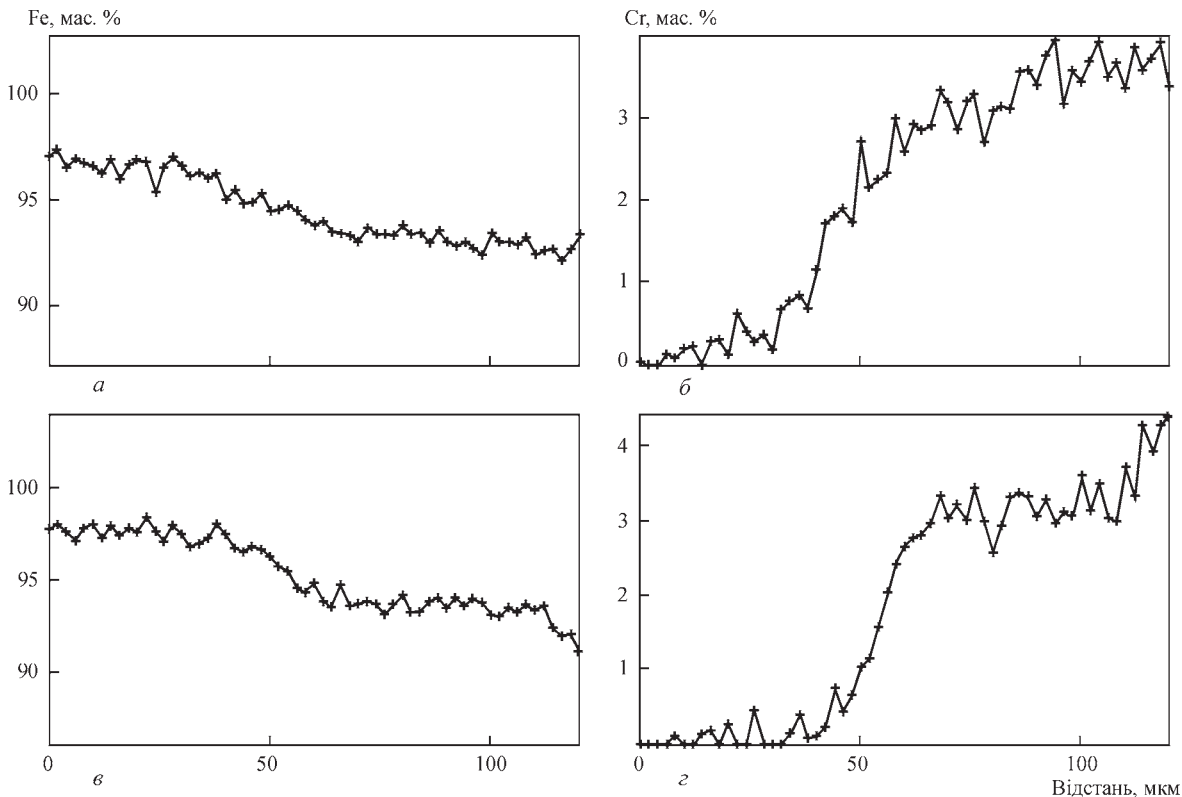


Рис. 9. Розподіл Fe (а, в) та Cr (б, г) у перехідній зоні зразка 1 (а, б) і зразка 2 (в, г).

Зона сплавлення має плавний концентраційний перехід, хімічна мікронеоднорідність наплавленого металу відносно незначна і становить по хрому – $Cr_{\text{max}}/Cr_{\text{min}} = 1,20...1,46$; по молібдену $Mo_{\text{max}}/Mo_{\text{min}} = 1,21...1,31$. Підвищення частоти коливань електродного дроту сприяє отриманню дисперсної структури, більш рівномірному розподілу легуючих елементів, більш «згладженої» лінії сплавлення наплавленого і основного металів, а також поліпшенню перемішування шарів у наплавленому металі. Твердість матричної основи становить 5140...6060 МПа. В наплавлених зразках виявлено карбіди типу Cr_7C_3 , Fe_3C та інтерметаліди типу $Mo_5Cr_6Fe_{18}$ (рис. 10).

При підвищенні швидкості наплавлення до 10 м/год спостерігається приблизно така ж картина (табл. 2, зразки 5–8). В цьому випадку збіль-

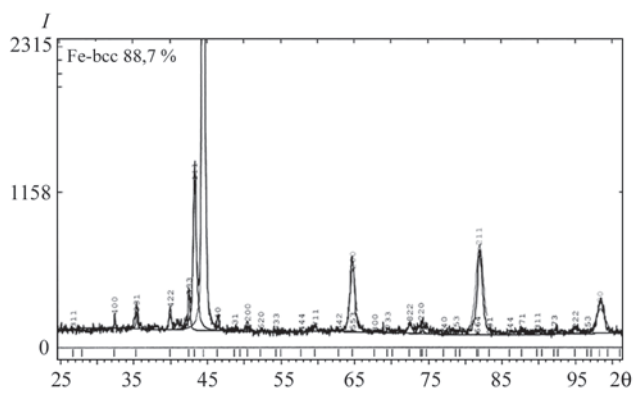


Рис. 10. Фазовий склад наплавленого металу зразка 2: Fe-bcc – 88,39 %; Fe-fcc – 8,11 %; Fe_3Mo_3C – 3,00 %; Cr_7C_3 – залишок
знижує ширину перехідної зони, хімічна неоднорідність наплавленого металу становить по хрому $Cr_{\text{max}}/Cr_{\text{min}} = 1,31...1,46$; по мо-

лібдену – $Mo_{\max}/Mo_{\min} = 1,21 \dots 1,36$. Твердість матричної основи в цьому випадку дещо вища і складає 6340...6810 МПа.

Висновки

1. При збільшенні частоти коливань електродного дроту при однаковій амплітуді і швидкості наплавлення відбувається:

- поліпшення формування наплавленого металу;
- поліпшення перемішування шарів у наплавленому металі; утворення більш дисперсної структури;
- зменшення ширини перехідної зони;
- більш рівномірний розподіл легуючих елементів;
- більш рівномірний характер проплавлення і «згладжування» межі сплавлення наплавленого і основного металів.

При цьому слід зазначити, що ці закономірності практично не змінюються при збільшенні амплітуди коливань.

2. Встановлено, що найкраще формування наплавленого металу, найбільш плавне і рівномірне проплавлення спостерігається при частоті коливань електродного дроту $N = 45 \text{ хв}^{-1}$, амплітуді коливань електродного дроту $A = 25 \text{ мм}$ і швидкості наплавлення $V_{\text{н}} = 7 \text{ м/год}$.

Робота виконана у рамках комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу та безпечної експлуатації конструкцій, споруд і машин» у 2016–2020 рр.

Список літератури

1. Данильченко Б. В., Шимановский В. П., Ворончук А. П., Терпило В. Н. (1989) Наплавка быстроизнашивающихся деталей самозащитными порошковыми лентами. *Автоматическая сварка*, **5**, 38–41.
2. Жудра А. П., Ворончук А. П., Фомакин А. А., Великий С. И. (2009) Новое оборудование для наплавки конусов и чаш засыпных аппаратов. *Там же*, **9**, 57–59.
3. Жудра А. П., Кривчиков С. Ю., Петров В. В. (2010) Технология широкослойной наплавки крупногабаритных коленчатых валов. *Там же*, **2**, 41–45.

4. Гулаков С. В., Бурлака В. В. (2010) Механизм колебания электрода для формирования наплаваемых валков сложной формы. *Вестник Приазовского государственного технического университета. Технические науки*, **20**, 181–186.
5. Спиридонов Н. В., Кудина А. В., Кураш В. В. (2013) Электродуговая наплавка металлоповерхностей колеблющимся электродом в среде защитного газа. *Наука и техника*, **4**, 3–8.
6. Голобородько Ж. Г., Драган С. В., Симутенков И. В. (2013) Автоматическая наплавка под флюсом конструкционных сталей с поперечными высокочастотными перемещениями электрода. *Автоматическая сварка*, **6**, 35–38.
7. Бабинцев А. А., Рябцев И. А., Кондратьев И. А. и др. (2014) Исследование термической стойкости наплавленного металла, предназначенного для восстановления прокатных валков. *Там же*, **5**, 17–21.
8. Рябцев И. А., Бабинцев А. А. (2015) Усталостная долговечность многослойных наплавленных образцов. *Сварочное производство*, **4**, 15–19.

References

1. Danilchenko, B.V., Shimanovsky, V.P., Voronchuk, A.P., Terpilko, V.N. (1989) Hard-facing of rapidly wearing parts by self-shielded flux-cored strips. *Avtomatich. Svarka*, **5**, 38–41 [in Russian].
2. Zhudra, A.P., Voronchuk, A.P., Fomakin, A.A., Veliky, S.I. (2009) New equipment for hard-facing of charging device bells and cups. *The Paton Welding J.*, **9**, 44–46.
3. Zhudra, A.P., Krivchikov, S.Yu., Petrov, V.V. (2010) Technology for wide-layer hard-facing of crankshafts. *Ibid.*, **2**, 32–35.
4. Gulakov, S.V., Burlaka, V.V. (2010) Mechanism of electrode oscillation for formation of deposited beads of complex shape. *Vestnik Priazov. GTU. Tekhnicheskie Nauki*, **20**, 181–186 [in Russian].
5. Spiridonov, N.V., Kudina, A.V., Kurash, V.V. (2013) Electric arc shielded-gas hard-facing of metal surfaces with oscillating electrode. *Nauka i Tekhnika*, **4**, 3–8 [in Russian].
6. Goloborodko, Zh.G., Dragan, S.V., Simutenkov, I.V. (2013) Automatic submerged-arc surfacing of structural steels with transverse high-frequency movements of electrode. *The Paton Welding J.*, **6**, 34–37.
7. Babinets, A.A., Ryabtsev, I.A., Kondratiev, I.A. et al. (2014) Investigation of thermal resistance of deposited metal designed for restoration of mill rolls. *Ibid.*, **5**, 16–20.
8. Ryabtsev, I.A., Babinets, A.A. (2015) Fatigue life of multilayer deposited specimens. *Svarochn. Proizvodstvo*, **4**, 15–19 [in Russian].

INFLUENCE OF AMPLITUDE AND FREQUENCY OF OSCILLATIONS OF ELECTRODE WIRE IN ARC SURFACING ON THE FORMATION AND STRUCTURE OF THE DEPOSITED METAL AND PENETRATION OF BASIC METAL

A.A. Babinets, I.O. Ryabtsev, I.P. Lentuygov, I.I. Ryabtsev, T.V. Kayda, I.L. Bogaychuk

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 influence of the amplitude and frequency of oscillations of the electrode wire during arc surfacing on the formation of deposited beads, nature of the base metal penetration, as well as structural and chemical heterogeneity in the area of the joint of deposited and base metals were studied. It was established that with an increase in the frequency of oscillations of the electrode wire, at the same amplitude of oscillations and the rate of surfacing, an improvement in the formation of the deposited metal and mixing of the layers in the deposited metal; formation of a more dispersed structure; reducing the width of the transition zone; more uniform distribution of alloying elements; more uniform melting and «smoothing» of the fusion boundary of the deposited and base metals occur. The mentioned regularities almost do not change with an increase in the amplitude of oscillations. It was established that the best formation of the deposited metal occurs at the maximum frequency $N = 45 \text{ min}^{-1}$ and the amplitude $A = 25 \text{ mm}$ of oscillations of the electrode wire and the surfacing rate $V_s = 7 \text{ m/h}$. 8 Ref., 2 Tabl., 10 Fig.

Keywords: arc surfacing, electrode wire oscillations, amplitude and frequency of oscillations, base metal penetration, deposited metal formation, deposited metal structure, structure heterogeneity

Надійшла до редакції 09.09.2020

РОЗРОБКА НОВИХ ЕЛЕКТРОДНИХ МАТЕРІАЛІВ, МЕТОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ І ЗАХИСТУ ТОНКОСТІННИХ ДЕТАЛЕЙ ОБЛАДНАННЯ, ЯКІ ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ В УМОВАХ АБРАЗИВНОГО ТА ГАЗОАБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ

М. М. Студент, А.А. Войтович, Я.Я. Сірак, В.М. Гвоздецький

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.
E-mail: rminasu@ipm.lviv.ua

Широкий спектр деталей та устаткування підприємств хімічної, нафтової, сільськогосподарської, машинобудівної, транспортної, енергетичної та інших галузей промисловості експлуатуються в умовах абразивного зношування. В Україні для захисту від абразивного зношування та відновлення зношених поверхонь наплавленням широко використовують електродугове наплавлення порошковими дротами системи Fe–Cr–B–C. Такі порошкові дроти мають низьку вартість, а наплавлений метал – задовільну зносостійкість. Однак основним недоліком шарів, наплавлених такими порошковими дротами, є дендрити першого та другого порядку з голкоподібною морфологією. Гострі вершини твердої фази виконують роль концентраторів напружень, від яких за удару розпочинається розтріскування наплавленого металу з подальшим його викришуванням. Відомо, що формування округлених зміцнювальних фаз зменшує концентрацію напружень у наплавленому шарі і як наслідок підвищує зносостійкість. В даній роботі запропоновано диспергування структурних складових в наплавленому металі наплавленням за дії на наплавлений метал механічної вібрації, що особливо доцільно застосовувати для виготовлення наплавленням біметалевих зносостійких пластин, а для великогабаритних деталей запропоновано диспергування структурних складових в наплавленому металі модифікуванням шихти порошковими дротами системи Fe–Cr–B–C додаванням до неї порошку алюмінієво-магнієвої лігатури ПАМ-4. Бібліогр. 5, табл. 2, рис. 5

Ключові слова: наплавлення, біметалеві листи, зносостійкість, боридні включення

Матеріали та методики досліджень. Для формування наплавленого металу використано порошкові дроти (ПД) діаметром 3,2 мм. Їх оболонка виготовлена з низьковуглецевої сталі 08кп, заповнена порошковою шихтою на основі феросплавів. Для дослідження обрано ПД, які у наплавленому металі мають феритну або аустенітну матрицю. Хімічний склад ПД (табл. 1) містить високу кількість хрому, бору, що позитивно впливає на зносостійкість наплавленого металу, оскільки у структурі виділяються тверді боридні включення.

Додавання порошку алюміній-магнієвої лігатури ПАМ-4 у шихту ПД під час наплавлення утворює у зварювальній ванні дисперсний оксид магнію, що впливає на диспергування структурних складових, а також зміцнення наплавленого шару.

Методики досліджень. Наплавлений ПД метал формували за допомогою підвісної головки АБС (джерело живлення – генератор ПСО 500). Для захисту від атмосферного впливу застосовано флюс ОСЦ 45. Формування наплавленого металу

із ПД виконали на металеву підкладку зі сталі СтЗсп, розміром 150×300 мм у два шари. Вібраційну обробку [1–5] ванни розплавленого металу у зоні горіння електричної дуги проведено за наступних режимів: частота коливань – 100 Гц, амплітуда – 0, 70, 300 мкм за горизонтальної вібрації. Мікроструктуру наплавлених шарів досліджували на поперечному мікрошліфі із використанням електронного мікроскопа EVO 40 XVP. Вимірювання твердості виконували на мікротвердомірі ПМТ-3 з вагою наважки 200 г. Зносостійкість наплавлених шарів досліджено за різних умов зношування. Абразивне зношування незакріпленим абразивом оцінювали згідно ГОСТ 23.208-79 (рис. 1). Просушений кварцовий пісок з розміром часточок 200...1000 мкм безперервно подавали у зону контакту гумового диску і зразка. Швидкість обертання диску становила 25 м/с, а сила його притискання до зразка 2,4 кН.

Для оцінювання зношування закріпленим абразивом (рис. 2) використали абразивний круг СМ-2 на керамічній зв'язці. Лінійна швидкість тертя

Таблиця 1. Хімічний склад шихти використаних порошкових дротів, мас. %

Марка ПД	C	B	Cr	Ti	Mn	Al	Mg	Si	Fe
X10P3Г2С (феритна матриця)	0,08	3,5	10,0	–	2,0	–	–	1,0	Решта
80Х20Р3Т (аустенітна матриця)	0,8	3,0	20,0	1,0	–	–	–		
80Х20Р3Т + 1 % ПАМ (аустенітна матриця)	0,8	3,0	20,0	1,0	–	1,0	0,3		

Студент М. М. – <https://orcid.org/0000-0002-5992-5898>, Сірак Я.Я. – <https://orcid.org/0000-0001-8748-8456>

© М. М. Студент, А.А. Войтович, Я.Я. Сірак, В.М. Гвоздецький, 2020

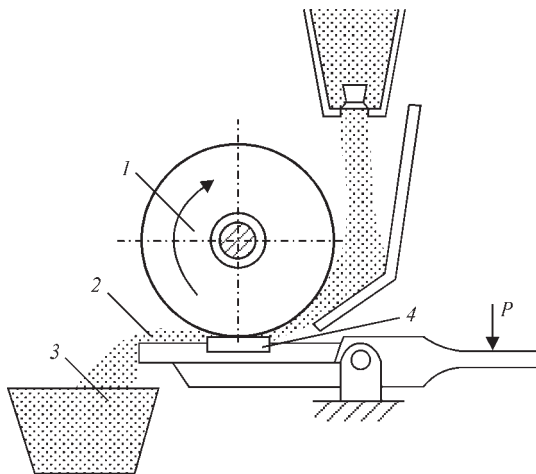


Рис. 1. Схема установки для дослідження абразивного зношування незакріпленим абразивом: 1 – гумовий диск; 2 – пісок; 3 – смість для збирання абразиву; 4 – зразок

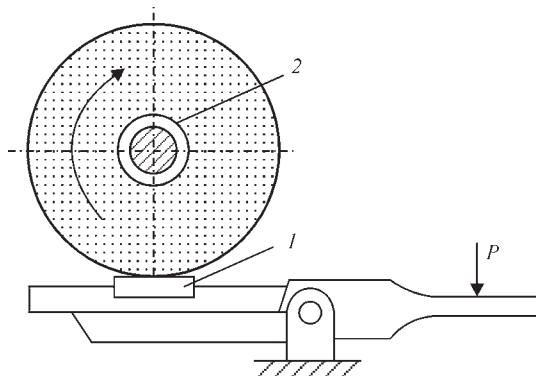


Рис. 2. Схема установки для дослідження зношування зразків жорстко закріпленим абразивом: 1 – зразок; 2 – абразивний круг

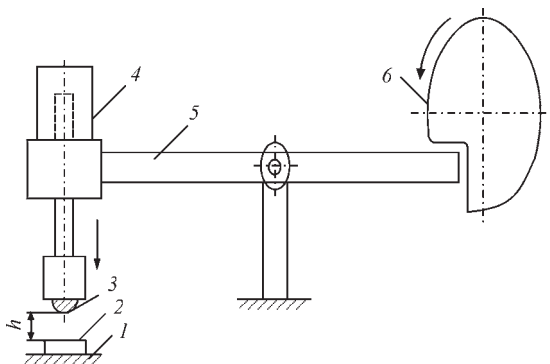


Рис. 3. Схема установки для дослідження ударного зношування зразків: 1 – основа; 2 – зразок; 3 – інтензор; 4 – наважка; 5 – коромисло; 6 – ексцентрик; h – відстань від зразка 10 мм

при цьому становила 0,4 м/с, навантаження в зоні лінійного контакту 1,5 кН.

Ударне зношування (рис. 3) оцінили за сили удару 12 кДж кулькою діаметром 25 мм зі сталі ШХ 15, яка падала на досліджувану поверхню з частотою 40 с⁻¹. Тривалість експерименту 3600 с. Втрату маси зразків визначали з точністю до $2 \cdot 10^{-4}$ г на електронній вазі.

Структура наплавленого металу. Фазовим аналізом встановлено, що наплавлений без вібрації метал із ПД Х10Р3Г2С складається із феритної матриці, легованої хромом, та боридних включень $(\text{FeCr})\text{B}$, $(\text{FeCr})_2\text{B}$. Із літератури відомо, що фаза $(\text{FeCr})_2\text{B}$ містить меншу кількість хрому та бору, ніж фаза $(\text{FeCr})\text{B}$ і характеризується меншою твердістю, проте значно більшою пластичністю. Місце розташування включень $(\text{FeCr})\text{B}$, $(\text{FeCr})_2\text{B}$ у структурі наплавленого металу ідентифікували мікроспектральним аналізом на шліфах. Виявили, що включення боридів типу $(\text{FeCr})\text{B}$ крупні та темніші, бориди типу $(\text{FeCr})_2\text{B}$ значно дрібніші та світліші (рис. 4).

У вихідному металі з ПД Х10Р3Г2С середній розмір включень боридів $(\text{FeCr})\text{B}$, $(\text{FeCr})_2\text{B}$ у структурі на гребені валиків змінювався від 20 до 75 мкм, а в зоні їх перекривання – від 50 до 150 мкм. За горизонтальної вібрації амплітудою 300 мкм середній розмір боридів $(\text{FeCr})\text{B}$, $(\text{FeCr})_2\text{B}$ зменшився до 5...10 мкм. Отримані результати дають підстави стверджувати, що горизонтальна вібрація істотно диспергує структурні складові металу, наплавленого ПД Х10Р3Г2С. Перевірено це також на структурі металу, наплавленого дротом ПД 80Х20Р3Т за амплітуди коливань підкладки 70, 200 та 300 мкм. Виявлено, що і у цьому випадку структурні складові наплавленого металу (боридні включення) суттєво подрібнювалися зі зростанням амплітуди вібрації під час наплавлення. Зокрема, боридні включення $(\text{FeCr})\text{B}$, $(\text{FeCr})_2\text{B}$ максимально подрібнилися за вібрації амплітудою 300 мкм. Середній розмір включень при цьому 1...5 мкм. Наплавлення із застосуванням вібрації великогабаритних деталей складної форми суттєво ускладнюється або стає неможливим. У

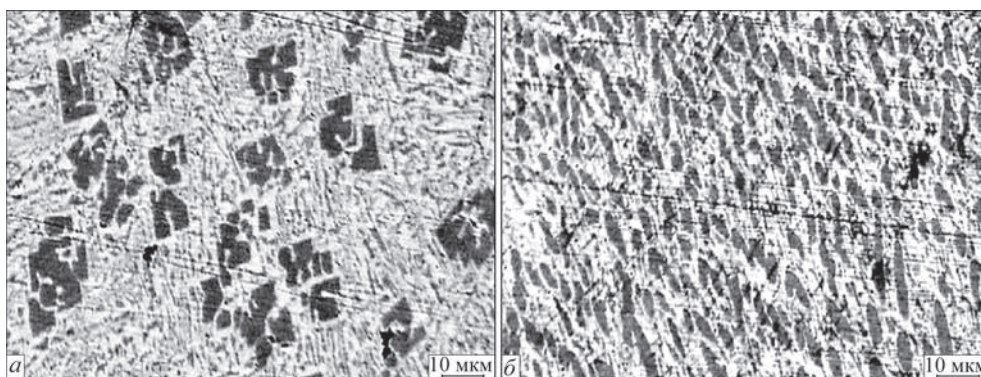


Рис. 4. Мікροструктура на гребенях валиків металу, наплавленого ПД Х10Р3Г2С: а – без вібрації; б – з вібрацією амплітудою 300 мкм

цьому випадку запропонували впливати на мікроструктуру наплавленого металу, додаючи до шихти ПД 80Х20РЗТ до 2 мас. % порошку ПАМ-4. Завдяки цьому виникають передумови для окиснення магнію, розташованого в порожнинах шихти ПД, з утворенням дисперсних часточок оксиду магнію, які стають центрами кристалізації і росту кількості зерен з розплаву наплавленого металу.

У металі, наплавленому ПД 80Х20РЗТ без додавання ПАМ, голкоподібні крупні бориди $(\text{FeCr})\text{B}$ та дрібні $(\text{FeCr})_2\text{B}$ розташовані на фоні аустенітної матриці. Порівняли мікроструктуру металу, наплавленого ПД 80Х20РЗТ базового складу і з додаванням до шихти порошку ПАМ, та встановили, що легування магнієм сприяє подрібненню боридів та їх глобулізації.

Спектральним та фазовим аналізами встановлено, що з додаванням до шихти ПД порошку ПАМ в мікроструктурі наплавленого металу переважали бориди типу $(\text{FeCr})_2\text{B}$. У металі, наплавленому ПД 80Х20РЗТ базового складу, розмір боридів становив 30...120 мкм, а в наплавленому ПД з додаванням ПАМ-4 їх діаметр зменшився, в середньому, у 8 разів.

Зносостійкість наплавлених шарів. Встановлено, що шари, наплавлені в умовах механічної вібрації, мають підвищену абразивну зносостійкість. Зокрема, абразивна зносостійкість наплавленого шару закріпленим абразивом зросла в 2,5 рази, незакріпленим – в 2,3 рази, в умовах циклічного ударного навантаження – у 2,8 разів. Підвищення зносостійкості шарів, наплавлених в умовах механічної вібрації, зумовлено суттєвим зменшенням розміру дисперсних зміцнювальних фаз (боридів) та зміною їх фазового складу. Зокрема, зі зменшення середнього розміру боридних включень від 75 до 5 мкм зросла його мікротвердість – від $HV\ 700$ до $HV\ 9300$. Зі збільшенням вмісту фази $(\text{FeCr})_2\text{B}$ у наплавленому шарі підвищується модуль Юнга та опір крихкому руйнуванню, що також вплинуло на зростання зносостійкості наплавленого шару (табл. 2).

Таблиця 2. Відносна зносостійкість наплавленого металу з ПД Х10РЗГ2С в умовах абразивного зношування у відношенні наплавленого металу без вібрації

Умови наплавлення	Без вібрації	Горизонтальна вібрація	
Амплітуда механічних коливань, мкм	–	70	300
Середній розмір боридів, мкм	75	10	5
Закріпленим абразивом	1	1,4	2,5
Незакріпленим абразивом	1	1,5	2,3
За умов ударних навантажень	1	2,4	2,8
Співвідношення фаз $(\text{FeCr})\text{B}/(\text{FeCr})_2\text{B}$	4/1	2,5/4	1/5

Накладання вібрації під час наплавлення металу з ПД 80Х20РЗТ, як і для металу, наплавленого ПД Х10РЗГ2С, також веде до суттєвого зменшення середнього розміру боридних включень, і, як наслідок, зростає його зносостійкість. Зокрема, із зменшенням середнього розміру боридних включень від 70 до 5 мкм за умов зношування закріпленим та незакріпленим абразивом зносостійкість наплавленого металу зростає у 1,7 разів, а при зношуванні під дією циклічних ударних навантажень – вдвічі.

Додавання до шихти ПД 80Х20РЗТ 1 мас. % ПАМ-4 сприяє підвищенню зносостійкості наплавленого металу в 1,6 рази за умов зношування закріпленим та незакріпленим абразивом; за зношування під дією циклічних ударних навантажень зносостійкість підвищилася у 1,8 разів порівняно з металом, наплавленим ПД базового складу. Це зростання зумовлено підвищенням твердості наплавленого шару, як через диспергування зміцнювальної боридної фази, так і завдяки додатковому виділенню дрібнодисперсних складно-легованих нітридів у структурі наплавленого шару.

Як приклад застосування процесу наплавлення ПД, було виконано роботи з відновлення млинового вентилятора ВМ 100/1200 для Бурштинської ТЕС. В системі пилоприготування котельних станцій, які працюють на твердому паливі, важливими складовими є млинові вентилятори. Вони здійснюють пневматичне транспортування вугільного пилу (фракцією менше 100 мкм) з температурою вищою за 320 К від циклонів до живильників пилу, і далі – в топку парогенераторів. Тому в ході експлуатації описаних елементів котельних станцій спостерігається інтенсивний і нерівномірний знос їх робочих лопастей, дисків та стінок камер. Нерівномірний знос лопастей веде до зниження потужності вентиляторів і димовтягачів, розбалансування роторів, сприяє вібрації підшипників, і, в кінцевому підсумку, руйнує підшипникові вузли. Час безперервної роботи димовтягачів у деяких випадках лише 2...3 тижні.

Виготовлення нового млинового колеса вимагає значно більших витрат, ніж наплавлення захисних покриттів. Основним шляхом продовження експлуатації млинового колеса є його ремонт або заміна. Ремонт пропонується для відновлення геометричних розмірів.

Основний метод нанесення захисного покриття – півавтоматичне наплавлення. Це наплавлення дозволяє наносити покриття навіть у важкодоступних місцях. Для ремонту та зміцнення млинового вентилятора ВМ 100/1200 застосовували ПД 80Х20РЗТМg, який був розроблений на базі ПД 80Х20РЗТ з додаванням до шихти 1 мас. % алюмінієво-магнієвої лігатури ПАМ-4 (рис. 5).

Дослідно-промислова перевірка експлуатації млинових вентиляторів, захищених наплавленим



Рис. 5. Зношена (а) та наплавлена (б) лопатка колеса млинового вентилятора, відновлені колеса млинового вентилятора ВМ 100/1200 (в)

шаром із дроту ПП-Нп-80Х20РЗТ, модифікованим алюмінієво-магнієвою лігатурою, проведена Фізико-механічним інститутом спільно із ДП «Львівське конструкторське бюро» на Бурштинській ТЕС, показала, що ресурс зміцнених робочих коліс вентиляторів ВМ 100/1200 зріс у 2,5 рази.

Висновки

1. Встановлено, що вібрація деталі під час її наплавлення зумовлює диспергування структури наплавленого металу, внаслідок чого середній розмір окремих боридних включень зменшується від 50...150 до 5...10 мкм.

2. Механічна вібрація сприяє перерозподілу фаз під час наплавлення, через що мікротвердість наплавленого металу зростає від HV 600 до HV 870 та рівномірніше розподіляється на поверхні наплавленого металу. Наплавлені шари, отримані за горизонтальної вібрації, виявили підвищену (у 2,3...2,5 рази) абразивну зносостійкість за тертя закріпленим та незакріпленим абразивом порівняно зі шаром, наплавленим без вібрації.

3. Встановлено, що вібрація під час наплавлення шарів підвищує (у 1,8 рази) їх стійкість за циклічного ударного навантаження. Основним чинником впливу на ударне зношування наплавленого

металу стає його здатність пластично деформуватися і, відповідно, релаксувати напруження.

4. Виявлено, що додавання до шихти ПД базової системи Fe–Cr–B–C порошку ПАМ-4 (до 1 мас. %) сприяє подрібненню включень боридів у наплавленому металі (до 7 разів) та підвищення абразивної зносостійкості в 1,6...1,8 рази.

Робота виконана у рамках комплексної програми НАН України «Проблеми ресурсу та безпечної експлуатації конструкцій, споруд і машин» у 2016–2020 рр.

Список літератури/References

1. Kuskov, Y.M., Zhdanov, V.A., Ryabtsev, I.O. et al. (2020) Methods for Increasing the Corrosion Resistance of Coatings Deposited under a Flux Layer from High-Chromium Powder Wires. *Materials Science*, 55, 5, 710–715.
2. Student, M., Vojtovych, A., Pokhmurska, H. et al. (2019) Mechanical characteristics and wear resistance of the cladding layers obtained by melting of cored wires with simultaneous vibration of substrate. *Strojnicky Casopis*, 69, 1, 109–122.
3. Pokhmurs'ka, H.V., Student, M.M., Lanets', O.S., Vojtovych, A.A. (2015) Influence of Vibration in the Course of Surfacing of a Protective Layer on Its Microstructure and Impact-Abrasive Wear. *Materials Science*, 51, 3, 412–417.
4. Vojtovych, A.A., Pokhmurs'ka, H.V., Student, M.M., Student, O.Z. (2016) Microstructure and abrasive-wear resistance of the vibration-deposited metal of core wires of the basic Fe–Cr–B system. *Ibid*, 52, 3, 365–370.
5. Pokhmurs'ka, H.V., Student, M.M., Dzyubyk, A.R. et al. (2017) Corrosion resistance of the metal vibration deposited from flux-core wires based on the Fe–Cr–B system. *Ibid*, 52, 5, 694–699.

DEVELOPMENT OF NEW ELECTRODE MATERIALS, METHODS OF RESTORATION AND PROTECTION OF THIN-WALLED PARTS OF EQUIPMENT, WHICH ARE OPERATED IN THE CONDITIONS OF GAS ABRASIVE WEAR

M. M. Student, A.A. Vojtovych, Ya.Ya. Sirak, V.M. Gvozdetsky

G.V. Karpenko Physical-Mechanical Institute of the NAS of Ukraine 5 Naukova Str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: pminasu@ipm.lviv.ua

A wide range of parts and equipment of chemical, oil, agricultural, machine-building, transport, energy and other industries are operated in abrasive conditions. In Ukraine, electric arc surfacing with flux-cored wires of the Fe – Cr – B – C system is widely used to protect against abrasive wear and restore worn surfaces by surfacing. Such flux-cored wires have a low cost and the deposited metal has a satisfactory wear resistance. However, the main disadvantage of the layers, deposited with such flux-cored wires are dendrites of the first and second order with acicular morphology. Sharp peaks of the solid phase act as stress concentrators, from which after impact the cracking of the deposited metal begins, followed by its chipping. It is known that the formation of rounded reinforcing phases reduces the concentration of stresses in the deposited layer and, as a consequence, increases wear resistance. This paper proposes the dispersion of structural components in the deposited metal by surfacing under the action of mechanical vibration on the deposited metal, which is especially useful for manufacture of surfacing bimetallic wear plates, and for large-sized parts a dispersion of structural components in the deposited metal Fe – B – C is proposed by adding the powder of aluminum-magnesium master alloy PAM-4 to it. 5 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Key words: surfacing, bimetallic sheets, wear resistance, boride inclusions

Надійшла до редакції 28.09.2020

ВПЛИВ СУРМИ НА СТРУКТУРУ І МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ДОВЕКТИЧНИХ МІДНО-ФОСФОРИСТИХ СПЛАВІВ

С.В. Максимова, А.М. Писарєв, П.В. Ковальчук, В.В. Воронов

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

Представлено результати досліджень доєвтектичних сплавів системи Cu–P–Sb. З використанням високотемпературного диференційного термічного аналізу визначено температурний інтервал плавлення. Встановлено, що легування сурмою мідно-фосфористого доєвтектичного сплаву забезпечує зниження температури солідусу і ліквідусу. На основі експериментальних та літературних даних побудовані поверхні ліквідусу і солідусу потрійних сплавів. Мікрорентгеноспектральним аналізом визначено хімічний склад і кількість структурних складових сплаву Cu-6,29P-1,97Sb. Показано вплив сурми на технологічні і механічні властивості, а також морфологію литих потрійних доєвтектичних мідно-фосфористих сплавів. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 6.

Ключові слова: мідно-фосфористі доєвтектичні сплави, сурма, температура солідусу і ліквідусу, мікроструктура, межа міцності на розтяг

У сучасному машинобудуванні широко застосовуються сплави на основі міді, які відрізняються хімічним складом, фізичними та механічними властивостями. Для їх з'єднання часто використовують паяння, що дозволяє зберегти вихідну структуру основного металу і забезпечує задані механічні характеристики. В якості припоїв використовують сплави системи мідь–срібло, які характеризуються прийнятним температурним інтервалом плавлення, достатньою пластичністю і міцністю [1]. До недоліку срібних припоїв відноситься їх висока вартість, що підвищує кінцеву ціну виробів. Економічна недоцільність використання даних припоїв часто сприяє розширенню застосування більш дешевих припоїв на основі системи мідь–фосфор. В даний час сплави на мідно-фосфористій основі евтектичного і доєвтектичного складу є більш пер-

спективними замінниками срібномістких припоїв [1–4]. Вони мають порівняно низьку температуру плавлення [5] і хороші фізико-технологічні властивості (рис. 1, а, б).

Для міді фосфор є хорошим розкислювачем (за лишковий вміст кисню близький до нуля), внаслідок утворення фосфідів міді підвищується твердість бінарних сплавів. Фосфор істотно знижує температуру плавлення, покращує текучість і зносостійкість припою. Однак сплави евтектичного складу надзвичайно крихкі (рис. 1, б). З метою збереження високих пластичних властивостей і зниження температури плавлення припоїв системи мідь–фосфор, що містять 3...6 мас.% фосфору, використовують додаткове легування іншими елементами: сріблом, цинком, оловом, сурмою [4].

Досвід останніх десятиліть показав, що в багатьох випадках такі припої можна застосовувати

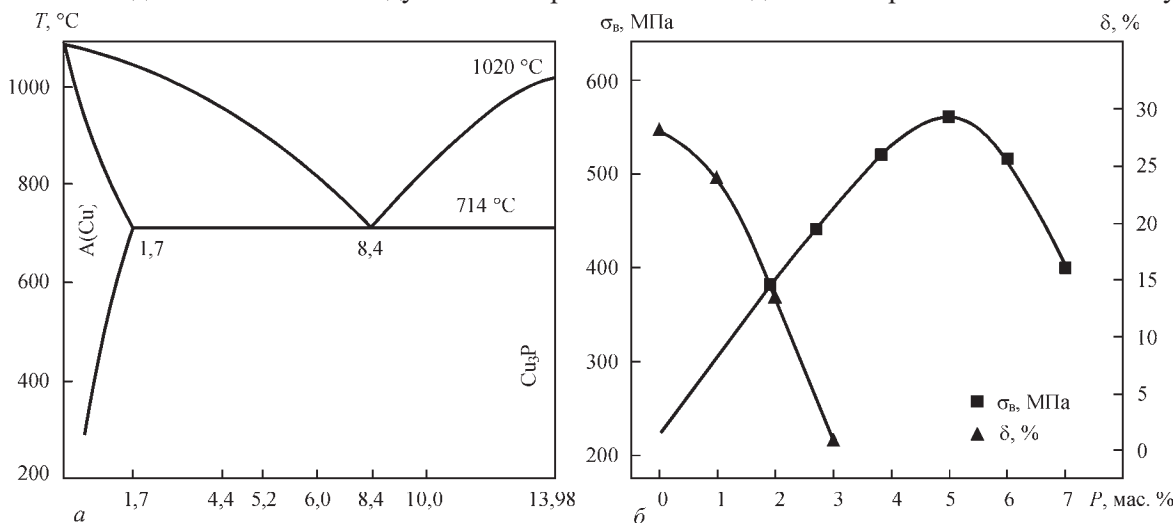


Рис. 1. Часткова діаграма стану системи Cu–P (а) і механічні властивості подвійних сплавів (б) [5, 6]

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

Воронов В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-0410-1154>

© С.В. Максимова, А.М. Писарєв, П.В. Ковальчук, В.В. Воронов, 2020

для паяння більшості кольорових металів і сплавів. Одним з елементів, що знижують температуру плавлення сплавів системи мідь–фосфор, є сурма. Можна припустити, що сурма, перебуваючи в одній групі періодичної таблиці Менделєєва з фосфором, може позитивно впливати на температуру плавлення і фазовий склад припою потрібної системи Cu–P–Sb.

У даній роботі представлено результати досліджень впливу сурми як одного з депресантів мідно-фосфористих припоїв, на температуру солідусу і ліквідусу, структуру і механічні властивості доєвтектичних сплавів системи мідь–фосфор.

Матеріали та методи досліджень. Експериментальні припої виплавляли в графітовому тиглі в лабораторній печі опору. Як шихту використовували фосфористу мідь МФ10 з вмістом 10,18 мас.% фосфору, мідь М1, сурму Су00. Концентрацію фосфору варіювали в межах від 3 до 6 %, сурми від 2 до 6 %. Після розплавлення компонентів сплав витримували до повного розчинення складових елементів. Для проведення хімічного аналізу і проведення металографічних досліджень експериментальних припоїв використовували литі заготовки.

Температуру плавлення експериментальних сплавів визначали з використанням установки високотемпературного диференційного термічного аналізу в середовищі гелію.

Металографічні дослідження проводили з використанням оптичної (Neophot 32) та електронної растрової мікроскопії (TescanMira 3 LMU). Розподіл хімічних елементів визначали методом локального мікрорентгеноспектрального аналізу з використанням енергодисперсійного спектрометра Oxford Instruments X-max 80 mm² із застосуванням програмного пакету INCA. Локальність мікрорентгеноспектральних вимірювань не перевищувала 1 мкм, зйомку мікроструктур проводили в зворотно-відображених електронах (BSE), що дозволяє досліджувати мікрошліфи без хімічного травлення.

Для проведення механічних випробувань використовували експериментальні припої в литому ста-

ні. З отриманих злитків виготовляли зразки МІ2–6К за ГОСТ1497–73.

Результати досліджень та їх аналіз. Подвійні системи Cu–P, Cu–Sb вже добре вивчені і їх діаграми стану наведені в літературі [5]. Вони являють собою діаграми евтектичного типу. Евтектики утворюються між твердими розчинами і хімічними сполуками. Це дозволяє припустити, що в потрібній системі теж існує евтектична складова. Фосфор і сурма значно впливають на температуру плавлення мідних сплавів. При температурі 200 °С в міді розчиняється до 2 мас. % сурми. Тому легування мідних сплавів сурмою в даному концентраційному інтервалі не повинно викликати утворення додаткових фаз. У бінарних діаграмах спостерігаються круті лінії ліквідусу поблизу точок евтектичних перетворень [5].

У бінарній системі фосфор–сурма сполук сурми з фосфором не виявлено, але при охолодженні нижче 612 °С насичений розплав розпадається на тверду і газову фази [7]. У твердому стані фосфор і сурма не погіршують механічних властивостей міді [8, 9].

Відомо позитивний вплив сурми та фосфору на поверхневий натяг міді і температуру плавлення [9]. Введення цих елементів в мідь зменшує поверхневий натяг (рис. 2, а) і знижує температуру плавлення (рис. 2, б).

Високотемпературним диференційним термічним аналізом досліджуваних сплавів встановлено, що при додаванні в доєвтектичний сплав системи мідь–фосфор сурми спостерігається зниження температури солідусу і ліквідусу (табл. 1).

Так, збільшення кількості сурми з 1,5 до 5,64 мас.% при вмісті фосфору > 5,0 мас.% призводить до зниження температури солідусу з 655 до 620 °С. Температура ліквідусу при цьому теж знижується з 680 до 660 °С. Фактично, збільшення вмісту фосфору і сурми призводить до значного зниження температури солідусу і деякого зменшення температури ліквідусу в порівнянні з попередніми сплавами.

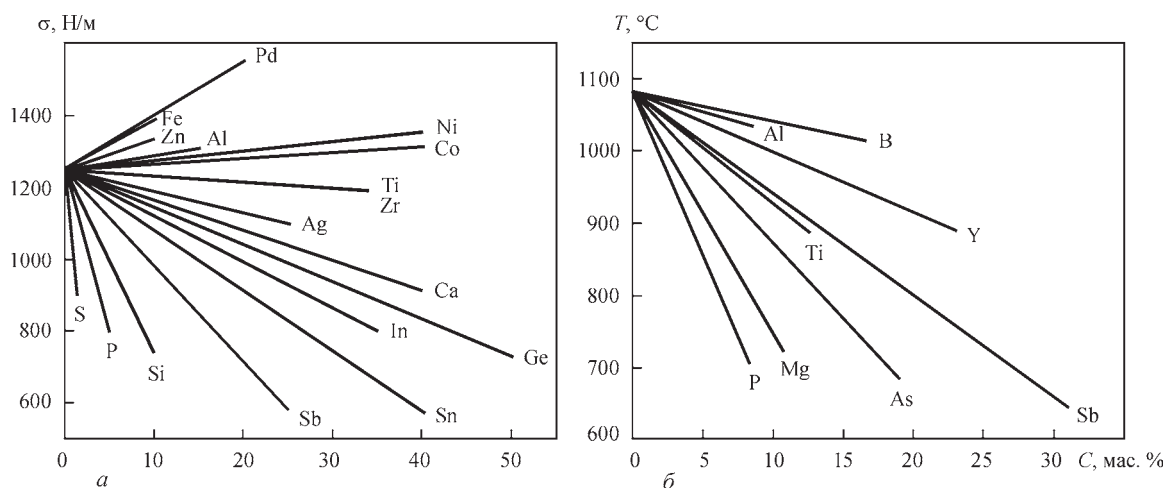


Рис. 2. Вплив хімічних елементів складу C на поверхневий натяг (а) і температуру плавлення міді (б) [8, 9]

На базі отриманих результатів високотемпературного диференційного термічного аналізу, літературних даних діаграм стану бінарних сплавів і з використанням математичних методів обробки даних побудовані поверхні ліквідусу (рис. 3, *a*) і солідусу (рис. 3, *б*) експериментальних сплавів.

Дані поверхні дозволяють скоротити кількість експериментів при виборі конкретного хімічного складу припою, який найбільш повно відповідає поставленим вимогам і заданим температурним інтервалам кристалізації. Вони добре корелюють з результатами, що отримані за допомогою регресійних моделей [10].

Дослідження розтікання по міді мідно-фосфористих припоїв, які леговані сурмою, показали, що одночасне підвищення концентрації фосфору і сурми призводить до збільшення площі розтікання (див. табл. 1). Максимальною площею розтікання характеризується доєвтектичний сплав, який містить понад 5 % сурми і більше 6 % фосфору.

Результатами мікрорентгеноспектрального аналізу встановлено, що мікроструктура литих сплавів, які містять 2 % сурми, утворена наступними фазами:

первинними дендритами α -твердого розчину фосфору і сурми в міді; фосфідом міді (Cu_3P) у вигляді темних включень і стрижневидною евтектикою, що складається з твердого розчину і фосфіду міді ($\alpha\text{-Cu} + \text{Cu}_3\text{P}$), яка виділяється в міждендритних ділянках (рис. 4, табл. 2).

Концентрація сурми в фосфіді міді перевищує її концентрацію в твердому розчині (див. табл. 2).

Таблиця 1. Фізико-технологічні властивості експериментальних сплавів системи Cu-P , що леговані сурмою

Номер сплаву	Вміст елементів, мас.%			Температура плавлення, °C			Площа розтікання, мм ²
	Cu	Sb	P	T_s	T_L	ΔT	
1	Основа	5,87	3,61	625	665	45	218,75
2		4,96	4,37	620	690	70	364,6
3		3,87	5,2	685	700	15	364,6
4		4,97	3,31	650	715	65	218,75
5		2,97	4,14	690	780	90	218,75
6		3,70	3,0	640	710	70	291,6
7		3,75	4,44	630	700	70	291,6
8		1,50	5,05	655	680	25	364,6
9		2,97	5,2	655	670	15	364,6
10		5,64	6,78	620	660	40	372,4

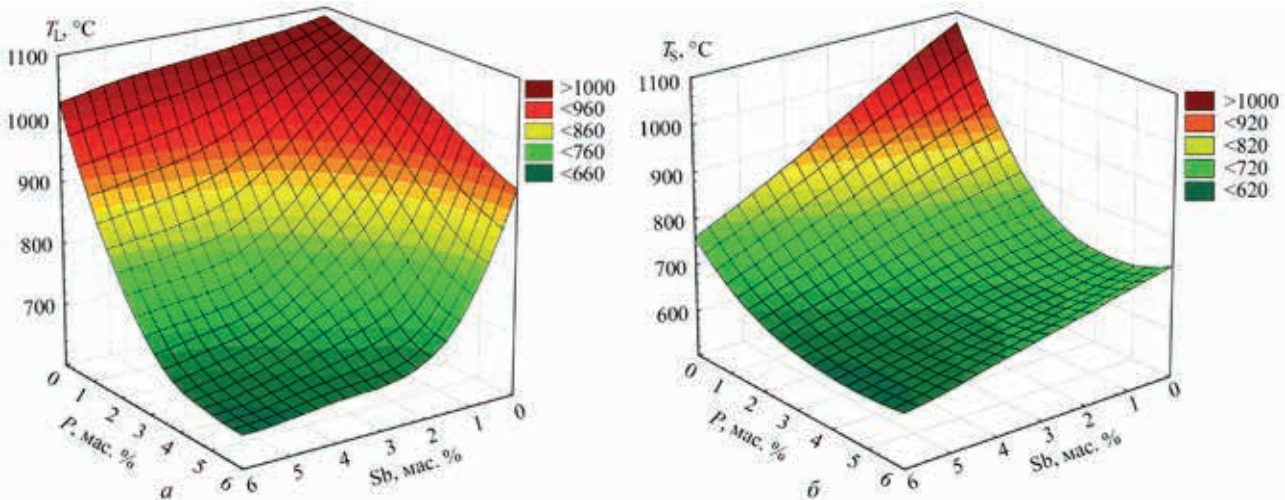


Рис. 3. Поверхні ліквідусу (*a*) і солідусу (*б*) сплавів системи Cu-P-Sb

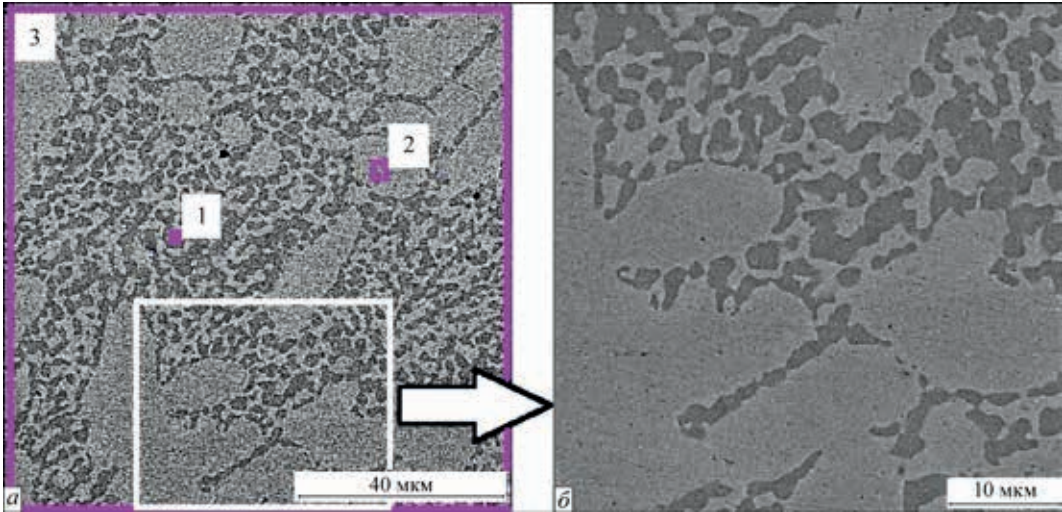


Рис. 4. Фази, в яких визначали хімічний склад (*a*) і мікроструктура (*б*) потрійного сплаву Cu-6,29P-1,97Sb

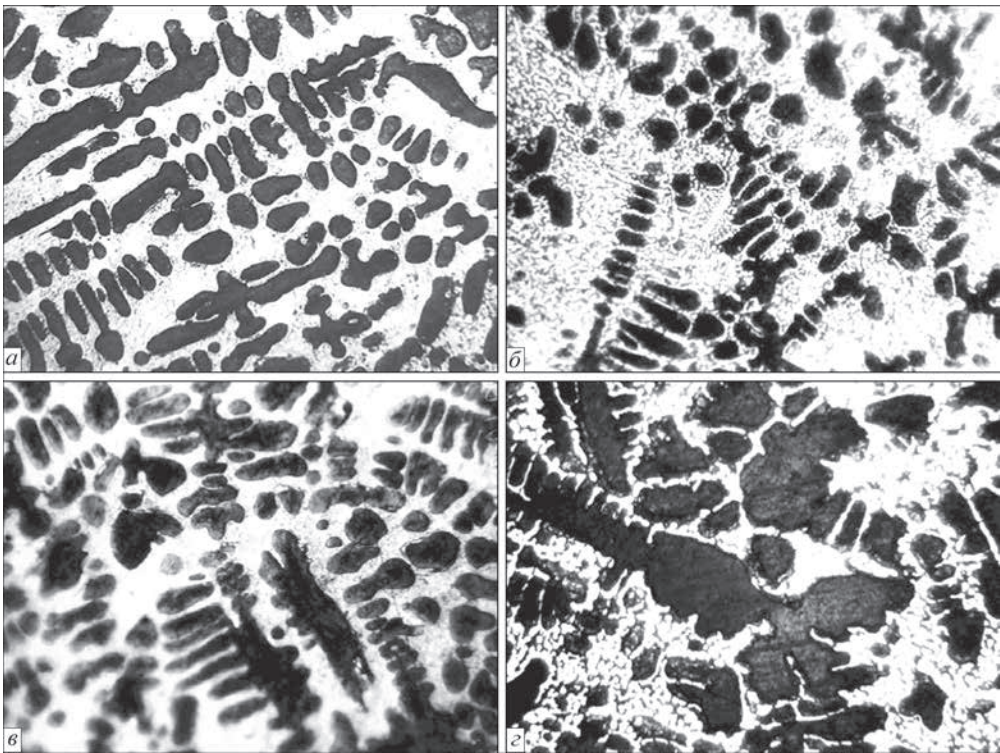


Рис. 5. Мікроструктура сплаву Cu–P–Sb при різному вмісті сурми: а – 0; б – 3; в – 4; з – 5 % і постійному вмісті фосфору 5 % мас. ($\times 500$, оптичний мікроскоп)

Таблиця 2. Хімічний склад структурних складових потрійного сплаву Cu-6,29P-1.97Sb, мас. %

Номер спектра	P	Cu	Sb
1	13,87	84,93	1,20
2	0,92	98,54	0,54
3	6,29	91,74	1,97

При дослідженні структури за допомогою оптичної мікроскопії виявлено, що в сплавах системи мідь–фосфор при постійному вмісті фосфору (5 %) зі збільшенням концентрації сурми морфологічні особливості зберігаються, але спостерігається збільшення частки твердого розчину на основі міді α -Cu і збільшення розмірів дендритів, що характерно для доєвтектичних сплавів (рис. 5).

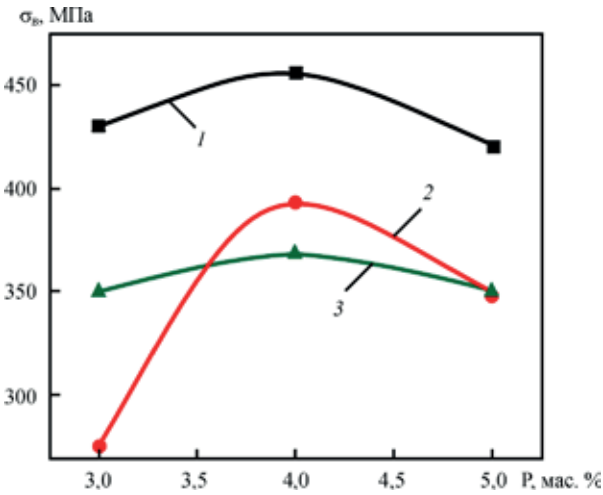


Рис. 6. Межа міцності експериментальних сплавів системи Cu–P–Sb в залежності від ступеня легування фосфором і сурмою: 1 – Sb = 3%; 2–4; 3–5

Механічні випробування припоїв при кімнатній температурі показали, що при концентрації фосфору 4 мас.% спостерігаються максимальні значення межі міцності на розтяг (σ_y) потрійних сплавів Cu–P–Sb, які містять 3, 4 і 5 мас.% сурми. Слід зазначити, що подальше збільшення кількості сурми в доєвтектичному мідно-фосфористому сплаві, який містить до 5 % фосфору, призводить до зниження межі міцності (рис. 6).

Отримані результати досліджень показують, що прийнятними характеристиками міцності характеризуються доєвтектичні сплави мідь–фосфор, в яких концентрація сурми не перевищує 3 мас.%. У свою чергу, зниження вмісту фосфору (≤ 3 мас.%) і сурми (≤ 2 мас.%) сприяє значному зростанню температури паяння і погіршенню розтікання припоїв.

Припої системи Cu–P–Sb успішно випробувані при паянні ряду виробів і окремих вузлів з міді і її сплавів в електротехнічній промисловості, а також різномірних матеріалів, зокрема, мідного сплаву з прецизійним сплавом 29НК. Дані припої забезпечують хороші експлуатаційні характеристики паяним конструкціям з корозійно-стійких мідно-нікелевих сплавів (мельхіорів), що застосовуються в морському суднобудуванні.

Висновки

Досліджено доєвтектичні сплави системи мідь–фосфор–сурма. Високотемпературним диференціальним термічним аналізом показано, що збільшення кількості сурми з 1,5 до 5,64 мас.% при вмісті фосфору $> 5,0$ мас.% призводить до зниження темпера-

тури солідусу і ліквідусу, відповідно, з 655 до 620 °C та з 680 до 660 °C. На базі експериментальних і літературних даних побудовані поверхні ліквідусу і солідусу доєвтектичних сплавів системи Cu–P–Sb.

Локальним мікрорентгеноспектральним аналізом встановлено, що основною структурною складовою доєвтектичних сплавів системи мідь–фосфор–сурма є первинні дендрити твердого розчину мідь–фосфор–сурма. У міждендритних областях виділяється стрижневидна евтектика, яка утворена фосфідом міді і твердим розчином на основі міді.

При постійній концентрації фосфору 4 мас.% в литих мідних сплавах, що леговані сурмою від 3 до 5 мас.% спостерігається максимальна міцність на розтяг. При подальшому збільшенні кількості сурми в доєвтектичному міднофосфористому сплаві, що містить до 5 % фосфору, відбувається зниження міцності, тому її концентрацію необхідно обмежувати.

Список літератури

1. Петрунин И. Е. (2003) *Справочник по пайке*. Москва, Машиностроение.
2. Pashkov, I.N., Ilina, I.I., Shapiro, A.E. (2006) Properties and applications of Cu-based silver free brazing filler metals made by rapid solidification technique. *Proceedings of the 3rd International Brazing and Soldering Conference, San Antonio, Texas, USA*, pp 157–166.
3. Pashkov, I., Pashkov, A. (2012) Change in phase morphology and composition during the spreading of liquid alloy, which is actively interacting with base metal surface. *Proceedings of the 5th International Brazing and Soldering Conference, Las Vegas, Nevada, USA*, pp. 240–243.
4. Boutilier, J., Brown, N., Klidas, N. et al. (2018) Strength of Steel, Copper, and Brass Lap Joints Brazed by Silver-Based and Silver-Free Filler Metals. *Proceedings of the 7th International Brazing and Soldering Conference, New Orleans, USA*, pp. 360–366.
5. Дриц М. Е. (1979) *Двойные и многокомпонентные системы на основе меди*. Москва, Наука.
6. Воздвиженский В. Н., Грачев В. А., Спасский В. В. (1984) *Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении*. Москва, Машиностроение.

7. Лякишев Н. П. (1999) *Диаграммы состояния двойных металлических систем*. Справочник: в 3 т. Т. 3. Кн. 1. Москва, Машиностроение.
8. Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В. (1974) *Промышленные цветные металлы и сплавы*. Москва, Металлургия.
9. Сучков Д. И. (1967) *Медь и ее сплавы*. Москва, Металлургия.
10. Писарев А. Н., Дорошенко Л. К., Сафронова Е. А. (1992) Медный угол плавкости системы медь–фосфор–сурьма. *Физическая химия и технология фосфидов фосфорсодержащих сплавов*. В 2-х частях. Часть 2. Алма-Ата, Гылым, 18–22.

References

1. Petrunin, I.E. (2003) *Handbook on brazing*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Pashkov, I.N., Ilina, I.I., Shapiro, A.E. (2006) Properties and applications of Cu-based silver free brazing filler metals made by rapid solidification technique. *In: Proc. of the 3rd Int. Brazing and Soldering Conf.* (San Antonio, Texas, USA), 157–166.
3. Pashkov, I., Pashkov, A. (2012) Change in phase morphology and composition during the spreading of liquid alloy, which is actively interacting with base metal surface. *In: Proc. of the 5th Int. Brazing and Soldering Conf.* (Las Vegas, Nevada, USA), 240–243.
4. Boutilier, J., Brown, N., Klidas, N., Alexandrov, B.T., Shapiro, A.E. (2018) Strength of steel, copper, and brass lap joints brazed by silver-based and silver-free filler metals. *In: Proc. of the 7th Int. Brazing and Soldering Conf.* (New Orleans, USA), 360–366.
5. Drits, M.E. (1979) *Binary and multicomponent systems based on copper* (Reference). Moscow, Nauka [in Russian].
6. Vozdvizhensky, V.N., Grachev, V.A., Spassky, V.V. (1984) *Casting alloys and their melting technology in mechanical engineering*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
7. Lyakishev, N.P. (1999) *State diagrams of binary metal systems*. In: Refer. book: 3 vol.. V.3. Book.1. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
8. Smiryagin, A.P., Smiryagina, N.A., Belova, A.V. (1974) *Industrial nonferrous metals and alloys*. Moscow. Metallurgiya [in Russian].
9. Suchkov, D.I. (1967) *Copper and its alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
10. Pisarev, A.N., Doroshenko, L.K., Safronova, E.A. (1992) *Copper fusibility angle of the copper-phosphorus-antimony system*. In: *Physical chemistry and technology of phosphides of phosphorus-containing alloys*. In: 2 parts. Pt 2. Alma-Ata «Gylym», 18–22 [in Russian].

INFLUENCE OF ANTIMONY ON STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF PRE-EUTECTIC COPPER-PHOSPHORIC ALLOYS

S. V. Maksymova, A. N. Pisarev, P. V. Kovalchuk, V. V. Voronov

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

The results of investigations of pre-eutectic alloys of the Cu – P – Sb system are presented. The melting temperature interval was determined using high-temperature differential thermal analysis. It was found that antimony alloying of copper-phosphorus pre-eutectic alloy provides a decrease in the temperature of solidus and liquidus. On the basis of experimental and literature data, the surfaces of liquidus and solidus of ternary alloys were constructed. Using micro-X-ray spectral analysis, the chemical composition and a number of structural components of the Cu - 6.29P - 1.97Sb alloy were determined. The influence of antimony on technological and mechanical properties, as well as morphology of cast ternary pre-eutectic copper-phosphorous alloys is shown. 10 Ref., 2 Tabl., 6 Fig.

Key words: copper-phosphorous pre-eutectic alloys, antimony, temperature of solidus and liquidus, microstructure, strength

Надійшла до редакції
30.09.2020

МЕХАНІЗОВАНЕ ЗВАРЮВАННЯ НАГРІТИМ ПОВІТРЯМ ЛАМІНОВАНИХ ПВХ ТКАНИН

М.Г. Кораб, М.В. Юрженко, А.В. Ващук, М.Г. Менжерес

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

Технічні ламіновані тканини, які використовують для виготовлення тентових та надувних виробів різного призначення, виготовляють з двостороннім ПВХ покриттям. Найбільш поширеним на практиці способом ручного та механізованого зварювання ламінованих тканин з ПВХ покриттям є зварювання нагрітим повітрям. В даній роботі особливості зварювання нагрітим повітрям напусткових швів ламінованої ПВХ тканини досліджували на виготовленій експериментальній установці. Встановлено геометричні розміри і форму одержаних експериментальних швів з ламінованої тканини Unisol 950 (питома вага 950 г/м²). У ході роботи досліджено механічну міцність швів, отриманих за експериментального зварювання, а також проведено випробування швів на відрив. Встановлено діапазон швидкості зварювання, у межах якого формуються зварні з'єднання ламінованої тканини із суцільним проваром. Показано, що щільний провар по усій площині зварного з'єднання досягається за формування в процесі зварювання під притискним роликом рівномірного за діаметром валика розплавленого ПВХ. Характер протікання теплових процесів в зоні зварювання оцінювали за геометричними параметрами валика розплаву. Визначено оптимальні параметри процесу зварювання стикових швів ламінованих тканин, з'єднаних стрічкою з обох боків та візуальні критерії якісного формування з'єднання, а також розроблено принципи ручного керування процесом теплового зварювання нагрітим повітрям у реальному часі. Бібліогр. 4, рис. 10.

Ключові слова: зварні з'єднання, ламінована ПВХ тканина, зварювання нагрітим повітрям

Ламіновані тканини – окремий вид термопластичних композиційних матеріалів (ТКМ), які широко застосовуються в різних галузях народного господарства: для виготовлення широкого асортименту споживацьких товарів, а також численних виробів технічного призначення, таких як тенти, архітектурні накриття, надувні вироби. Їх отримують обробкою тканих волокнистих основ різними полімерними композиціями: розплавами, розчинами, дисперсіями, пастами. Таким чином, ламіновані тканини являють собою текстильні полотна, головною характеристикою яких є характер переплетення ниток, тобто певний порядок чергування перекриттів повздовжніх (основних) ниток з поперечними (кутковими). Такі тканини мають велику анізотропію механічних та електричних характеристик, що створює технологічні складності під час їхнього зварювання. Одним із основних способів з'єднання полімерних ламінованих тканин є зварювання за допомогою нагрітого повітря.

Значну частину ламінованих тканин виготовляють з використанням пластифікованого полівінілхлориду (ПВХ) як покриття. Полівінілхлорид (поліхлорвініл) – прозорий термопластичний полімер, продукт полімеризації вінілхлориду (хлористого етилену). На сьогодні ПВХ є другим полімером за споживанням після поліетилену із річним світовим об'ємом виробництва більше 25 млн.т. Чистий полівінілхлорид – жорсткий матеріал, який стає еластичним лише після нагрівання до температури 70...75 °С. Однак

еластичності ПВХ можливо досягти за кімнатних температур додавання спеціальних пластифікаторів, а саме ефірів різноманітних спиртів та ди-карбонових кислот. В якості термостабілізаторів пластифікованого ПВХ використовують солі олова, барію, кадмію та кальцію (3...5 мас.ч.). Головне їх призначення – стабілізація матеріалу за рахунок зв'язування хлористого водню (HCl), який утворюється в процесі термоокислювальної деструкції ПВХ за підвищених температур експлуатації [1].

Технічні ламіновані тканини, які використовують для виготовлення тентових та надувних виробів різного призначення, виготовляють з двостороннім ПВХ покриттям. Такі тканини мають підвищену еластичність та високу міцність, їх покриття герметичне для повітря та стійке до впливу сонячного світла, атмосфери та води. Більшість технічних ПВХ тканин виготовляють за допомогою SOL-технології (від англійського solution-розчин). За цією технологією відбувається каландрування тканинної основи розчином пластифікованого ПВХ у легкому органічному розчиннику. Для покращення зчеплення ПВХ покриття з полотном на тканину одночасно з каландруванням наносять два тонких шари полімерного клею – адгезиву. Таким чином, ламінована ПВХ тканина має п'ятишарову структуру (рис. 1). На ринку представлена продукція провідних світових виробників, зокрема, тканини для надувних човнів: Valmex, Plastel (Чехія), Heytex (Німеччина), Unisol

Кораб М.Г. – <https://orcid.org/0000-0001-8030-1468>, Юрженко М.В. – <http://orcid.org/0000-0002-5535-731X>, Ващук А.В. – <http://orcid.org/0000-0002-4524-4311>

© М.Г. Кораб, М.В. Юрженко, А.В. Ващук, М.Г. Менжерес, 2020

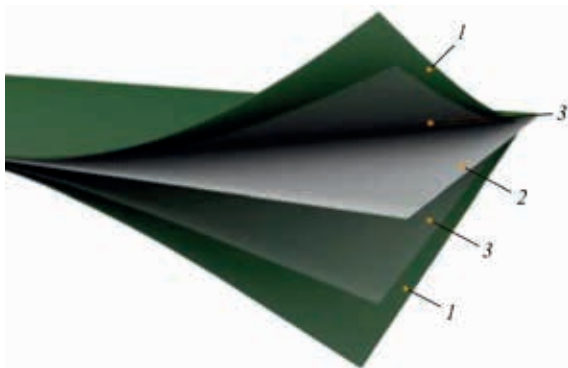


Рис. 1. Схема будови ламінованої ПВХ тканини: 1 – зовнішній та внутрішній шари ПВХ; 2 – поліестерова тканина основа; 3 – шари полімерного адгезиву

Boat (Південна Корея) та інші [2]. В Україні спеціальні ламіновані ПВХ тканини не виробляються.

Тканини, ламіновані пластифікованим термопластичним ПВХ придатні до зварювання нагрітим інструментом (клином) та нагрітим повітрям, а також високочастотного [3]. Високочастотне зварювання вимагає складного та вартісного обладнання, яке призначене для з'єднання за один цикл невеликих прямолінійних або локальних швів. Нагрітий клин застосовують, як правило, для з'єднання товстих полімерних плівок та тканин з товстим полімерним покриттям при виготовленні гідроізоляції та великих ємностей. Найбільш поширеним на практиці способом зварювання ламінованих тканин з ПВХ покриттям є зварювання нагрітим повітрям. У цьому випадку нагрів деталей, що зварюються, здійснюється струменем нагрітого повітря з температурою 250...400 °С, а для формування зварного з'єднання застосовують притискні ролики різних конструкцій. Зварювання нагрітим повітрям може виконуватись із додаванням присадкового матеріалу та без нього, в ручному та механізованому режимі. Спосіб зварювання нагрітим повітрям є універсальним та гнучким, дає можливість зварювати матеріали широкого діапазону товщини, виконувати шви складної конфігурації та різного розташування у просторі, не вимагає складного обладнання. Основним елементом будь-якого обладнання для зварювання нагрітим повітрям є спеціальний апарат-нагрівач – фен, який комплектується відповідними насадками [4].

Схема процесу напускового зварювання ламінованих тканин в ручному або механізованому режимі показана на рис. 2. За напускового зварювання сопло нагрівального апарату контактує безпосередньо з поверхнею тканини. Це призводить до руйнування та деструкції ПВХ покриття тканини та налипання розплавленого полімера на поверхню сопла, що не дозволяє отримувати якісне з'єднання для тканин малої товщини по всій площині напускового шва. Таким чином, для зварювання тканин з тонким шаром ПВХ покриття доцільно використовувати напівавтомати для зварювання елемен-

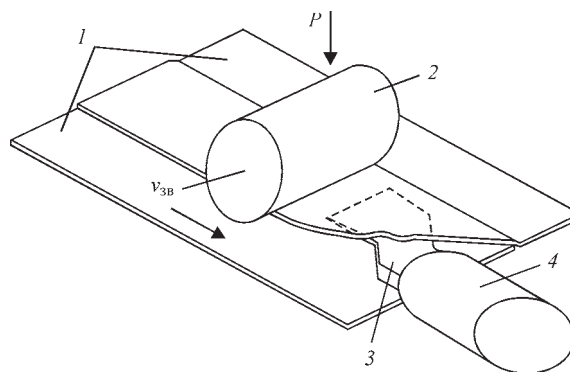


Рис. 2. Схема напускового зварювання тканин з ПВХ покриттям за допомогою гарячого повітря: 1 – тканини, що зварюються; 2 – притискний ролик; 3 – сопло для напускового зварювання; 4 – нагрівальний апарат гарячого повітря

тів тканин встик стрічкою. В даному випадку немає контакту поверхні тканини з соплом нагрівального апарату, нагрівання зони зварювання відбувається виключно струменем гарячого повітря.

Практичний досвід доводить, що під час виробництва тентових та надувних виробів необхідну якість забезпечує застосування стикових швів ламінованої тканини, з'єднаних стрічкою з обох боків. При цьому зовнішня стрічка шва забезпечує основну міцність з'єднання, а внутрішня стрічка є допоміжною та забезпечує нормальне формування та герметичність з'єднання. Тому внутрішню стрічку не приварюють окремо, а змащують клеєм та використовують як підкладку для з'єднання ламінованої тканини. При тепловому зварюванні зовнішньої стрічки прошарок клею активується, отже внутрішня приєднується до стику.

У даній роботі було виготовлено експериментальну установку для зварювання нагрітим повітрям стикових швів ламінованих ПВХ тканин, в якій використовували перероблений візок з електромеханічним приводом від напівавтомату Leister для переміщення вздовж стику тканин фену та притискного ролика. Схема технологічного процесу зварювання ламінованих ПВХ тканин стрічкою за допомогою нагрітого повітря представлена на рис. 3. Стик двох деталей з ламінованої ткани-

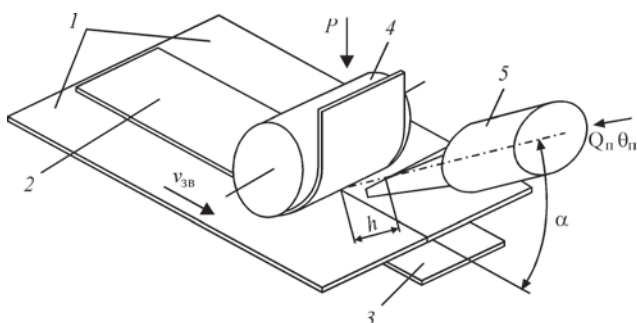


Рис. 3. Схема зварювання стрічкою встик штучної шкіри за допомогою гарячого повітря: 1 – ламіновані тканини, що зварюються; 2 – з'єднувальна стрічка з ламінованої тканини; 3 – підкладна стрічка з ламінованої тканини; 4 – притискний ролик; 5 – нагрівальний апарат гарячого повітря з соплом

ни 1 поміщали на тверду поверхню разом з підкладною стрічкою 3 з того ж матеріалу або з ПВХ плівки, покритої тонким шаром поліуретанового клею. З'єднання здійснювали за допомогою стрічки 2, вирізаної з тієї ж ламінованої тканини, що і деталі. Формування зварного з'єднання здійснювали за допомогою ролика з гумовим покриттям 4, що притискався до стрічки та деталей з ламінованої тканини із зусиллям P та переміщувався вздовж лінії зварювання зі швидкістю $v_{зв}$. Варто зазначити, що ширина ролика на 2...3 мм більше ширини стрічки для зварювання.

Нагрівання зони зварювання проводили за допомогою гарячого повітря, що подається з нагрівача – електронагрівального фену 5 через плоске сопло, ширина якого дорівнювала ширині стрічки для зварювання. Головні параметри нагрівача – температура нагрітого повітря θ_n та витрата повітря Q_n . На характер нагрівання штучної шкіри в зоні зварювання впливали кут розташування сопла нагрівача α та відстань від сопла до тканини h . Сопло було розташоване паралельно площині з'єднання, а торець сопла – паралельно осі ролика.

Ширина основної стрічки з ламінованої ПВХ тканини для зварювання та підкладної стрічки однакова та становила 38...40 мм. Варто зазначити, що в якості підкладної стрічки можна використовувати також ПВХ тканини з меншою питомою вагою. Під час теплового зварювання відбувається нагрівання підкладочної стрічки до температури 70...80 °C. При нагріванні адгезійна спроможність прошарку поліуретанового клею суттєво збільшується та відбувається прилипання стрічки до нижньої частини зварного з'єднання. Це забезпечує герметизацію з'єднання та його додаткову міцність.

Для дослідження процесу зварювання нагрітим повітрям ламінованої тканини Unisol 950 товщиною 0,8 мм та питомою вагою 950 г/м² одержували прямі експериментальні шви довжиною 1,0...1,5 м. Зварювання виконували на горизонтальному столі з поздовжнім пазом шириною 40 мм та глибиною 0,8 мм для укладання підкладної стрічки. На візок був встановлений апарат нагрівання повітря Leister Triak-S з плоским соплом шириною 40 мм та притискний ролик з термостійким гумовим покриттям шириною 42 мм та діаметром 30 мм. Нагрівач Triak-S мав сталу величину потоку нагрітого повітря – 230 л/хв, температура повітря контролювалась за допомогою регулятора в корпусі апарату. Швидкість переміщення візка змінювалась регулятором його електроприводу. Навантаження на притискний ролик регулювали укладанням на візок мірних вантажів.

Визначено, що оптимальна відстань від сопла нагрівача до зони зварювання складає 7...8 мм. У цьому випадку забезпечується достатній візуальний огляд нагрітої тканини під роликом

та не відбувається надлишковий перегрів тканини біля зварного з'єднання. Навантаження на притискний ролик, що забезпечувало нормальне формування зварного з'єднання, складало 5...6 кг (1,25...1,5 кг/см). Проведені також експериментальні зварювання швів ламінованої тканини Unisol 950 з різними значеннями температури нагрітого повітря та швидкості зварювання.

Для визначення міцності експериментальних швів було проведено випробування на одновісний розтяг смуг ламінованої тканини шириною 50 мм, вирізаних із зразків у поперечному напрямку зі швом, розташованим всередині смуги. Випробування показали, що міцність якісних швів дорівнює міцності основного матеріалу та складає 290...310 кг, що відповідає задекларованій міцності ламінованої тканини Unisol 950 у поперечному напрямку (напряму утка). Руйнування смуг з ламінованої тканини, що випробували на розтяг, відбувалось по основному матеріалу. Основним дефектом, що зменшував міцність зварних швів, були непровари. З'єднання з непроварами під час випробування на розтяг руйнувались по шву за менших величин навантаження.

Оцінити якість зварних з'єднань ламінованої тканини можливо, також, без проведення складних механічних випробувань шляхом застосування експрес-методу випробування швів на відрив з'єднувальної стрічки. Приварена стрічка з торця шва відривається від стику на невелику довжину за допомогою ножа та плоскогубців, край шва затискається у лещата, стрічку утримують плоскогубцями із широкими губками та відривають від шва на усю його довжину. У випадку якісного з'єднання стрічки та основного матеріалу покриття сплавляються, при відриві стрічки від шва оголюється її корд, або корд основної ламінованої тканини, а шар сплавленого ПВХ залишається з протилежного боку.

При випробуванні на відрив зварного шва з повним проваром відбувається, як правило, відрив з'єднувальної стрічки з повним оголенням корду (рис. 4). На зварному з'єднанні залишається рівномірний шар сплавленого ПВХ зі слідами

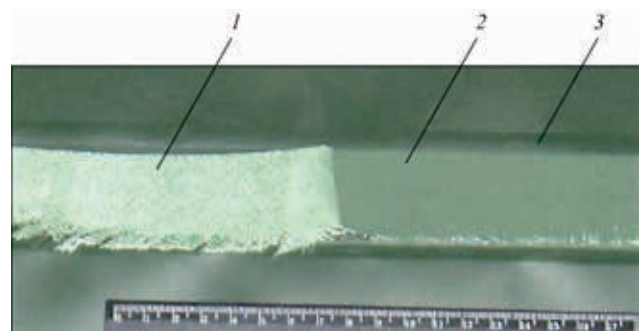


Рис. 4. Якісний зварний шов ламінованої тканини Unisol 950 після випробування на відрив з'єднувальної стрічки: 1 – відірвана стрічка з оголеним кордом; 2 – зварний шов; 3 – зона термічного впливу біля шва

від ниток корду. Адгезія корду стрічки до шару ПВХ настільки велика, що з одного боку стрічки спостерігається руйнування корду при відриві. Нижня підкладочна стрічка функціонально має допоміжну роль у зварному з'єднанні, при відриві вона, як правило, відділяється від шва по клейовому шару без руйнування ПВХ покриття ламінованої тканини.

Головними чинниками, що впливають на теплові процеси в зоні зварювання тканин і, отже, на якість шва, є температура нагрітого повітря та швидкість зварювання. Зі збільшенням температури повітря зростає швидкість зварювання, отже продуктивність праці, але, з другого боку, зростає вірогідність перегріву зони зварювання. При перегріві розплавляється не тонкий прошарок ПВХ на покритті тканин, а усе покриття, особливо зона термічного впливу біля шва. При зварюванні відбувається видалення великої кількості розплаву ПВХ з під з'єднувальної стрічки, він прилипає до ролика та при затвердінні утворює гострі виступи. У перегрітому шві деформуються та тоншають усі шари ПВХ покриття на штучній шкірі. Такі шви не задовольняють вимогам як по міцності і герметичності, так і по зовнішньому вигляду.

При зниженні температури нагрітого повітря зростає вірогідність недостатнього прогріву зони зварювання. В цьому випадку ПВХ покриття штучної шкіри, як правило, розплавляється тільки в центральній частині зварного шва. При випробуванні такого шва на відрив стрічки (рис. 5), корд оголюється тільки у вузькій смузі біля осі з'єднання, а по краях шва спостерігаються смуги суцільного непровару.

За результатами вивчення експериментальних швів, зварених з різними параметрами режиму, були визначені співвідношення температури нагрітого повітря $\theta_{\text{п}}$ і швидкості зварювання $v_{\text{зв}}$, при яких зовні спостерігається нормальне формування зварного з'єднання. При зварюванні на температурах нагрітого повітря менше 400 °С та малих швидкостях зварювання можливо утворення локальних ділянок недостатнього прогріву тканини та формування локальних непроварів (рис. 6). Такі ділянки неможливо визначити

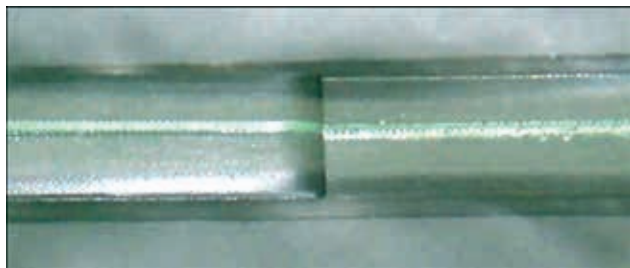


Рис. 5. Зварний шов ламінованої тканини Unisol 950, виготовлений з недостатнім нагрівом зони зварювання

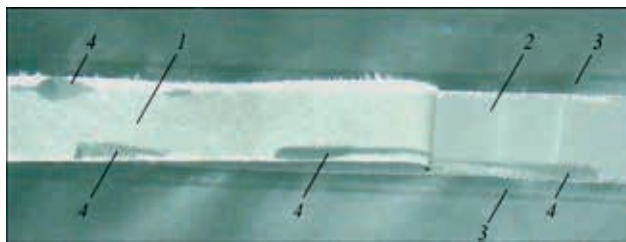


Рис. 6. Зварний шов ламінованої тканини Unisol 950 з локальними непроварами по шву після випробування на відрив з'єднувальної стрічки: 1 – відірвана стрічка з оголеним кордом; 2 – зварний шов; 3 – зона термічного впливу біля шва; 4 – ділянки непровару на стрічці та на шві

візуально, оглядаючи зварний шов тканин зовні. В процесі експлуатації виробу з локальними непроварами всередині швів можлива раптова його руйнація в режимі екстремальних навантажень. Для гарантії отримання якісних швів слід обирати режими із середніми значеннями температури повітря на виході з нагрівача на рівні 420...450 °С та відповідними величинами швидкості зварювання. Окремими чинниками, які впливають на формування провару в з'єднаннях штучної шкіри, є нерівномірний прогрів зони зварювання по ширині шва та нерівномірний тиск на штучну шкіру по ширині притискного ролика. В цьому випадку формується поздовжній непровар з одного із боків шва (рис. 7).

Вісь обертання притискного ролика повинна бути точно паралельна площині зварного з'єднання. При відхиленні від паралельності зростає тиск ролика на один край шва і зменшується тиск на протилежний. Як наслідок, в зоні збільшеного тиску відбувається видалення розплаву ПВХ з під стрічки та формування надмірного грату. З протилежного краю шва величина тиску виявляється недостатньою, розплавлені прошарки ПВХ не з'єднуються між собою та формується непровар. При зміщенні сопла апарату нагрітого повітря вбік, або при відхиленні осі сопла від осей симетрії, з одного із боків притискного ролика виникає зона недостатнього прогріву та також формується непровар.

Критерієм оцінки якості зварного з'єднання ламінованої тканини може слугувати відсутність суцільних та локальних непроварів у шві. Якіс-

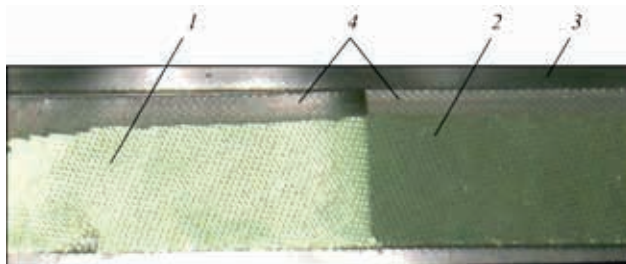


Рис. 7. Зварний шов ламінованої тканини Unisol 950 з непроваром біля краю шва після випробування на відрив з'єднувальної стрічки: 1 – відірвана стрічка з оголеним кордом; 2 – зварний шов; 3 – зона термічного впливу біля шва; 4 – зона непровару на шві та на стрічці

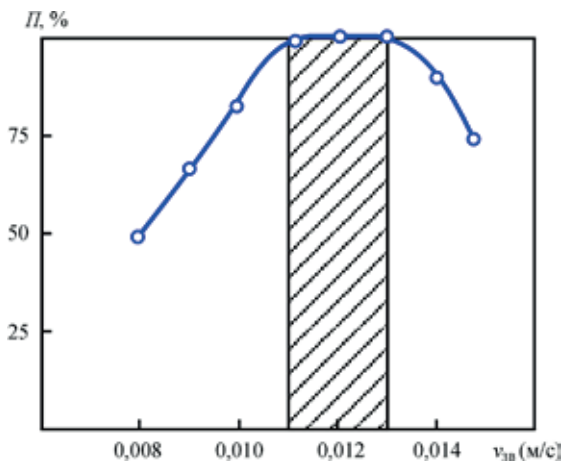


Рис. 8. Залежність щільності провару зварного з'єднання ламінованої тканини від швидкості зварювання

ний шов повинен мати 100 %-ий провар, що виявляється як суцільний відрив корду з'єднувальної стрічки від ПВХ шва. Шви, отримані при експериментальних зварюваннях на різних режимах, випробували на відрив стрічки, а потім визначали відсоток непроварених зон на одиницю площини шва. Аналіз результатів досліджень показав, що існує діапазон швидкості зварювання у межах 0,07...0,12 м/с, у якому формуються зварні з'єднання ламінованої тканини із суцільним проваром – 100 % величина щільності провару P (рис. 8). Цим швидкостям відповідають середні значення температури нагрітого повітря на виході з сопла нагрівача – 420...450 °С.

Слід зазначити, що під час зварювання можливо виникнення різних збурень процесу, зміщення деталей з ламінованої тканини або зварювальних інструментів, що викликає появу дефектних ділянок зварного шва. Проблемою є, також, забезпечення нормального формування з'єднання на початку та на завершенні зварного шва. Тому виникає необхідність розробки спеціальної методики контролю процесу зварювання та коригування його параметрів в реальному часі в процесі зварювання. Експе-

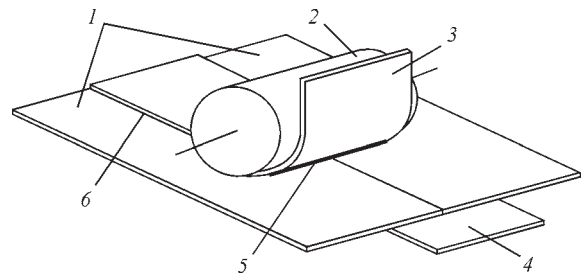


Рис. 9. Схема оптимального процесу зварювання нагрітим повітрям ламінованої тканини: 1 – ламінована тканина, що зварюються; 2 – притискний ролик; 3 – з'єднувальна стрічка з ламінованої тканини; 4 – підкладна стрічка з ламінованої тканини; 5 – розплавлений ПВХ, що утворюється в процесі зварювання; 6 – грат ПВХ з боків зварного з'єднання

риментально встановлено, що суцільний, щільний провар по усій площині зварного з'єднання досягається при формуванні в процесі зварювання під притискним роликом рівномірного за діаметром валика розплавленого ПВХ (рис. 9).

Геометричні параметри валика розплаву є інформативними показниками, за якими легко оцінювати характер протікання теплових процесів в зоні зварювання та, при необхідності, їх коригувати. При достатньому освітленні простору під роликом, за параметрами валика розплаву можливо спостерігати візуально. Наявність валика засвідчує, що відбулось розплавлення ПВХ покриття ламінованої тканини, діаметр валика пропорційний величині прогріву та кількості розплавленого ПВХ покриття, відсутність валика в якійсь зоні шва є свідченням того, що формується непровар.

Регулювання теплових процесів в зоні зварювання можливо зміною температури нагрітого повітря, швидкості зварювання або зміною орієнтації сопла нагрівача. Зміна температури нагрітого повітря – досить інерційний процес, що триває десятки секунд, тому температуру повітря встановлюють перед зварюванням і в подальшому вона залишається незмінною. На рис. 10 показані схеми типових порушень, що виникають в про-

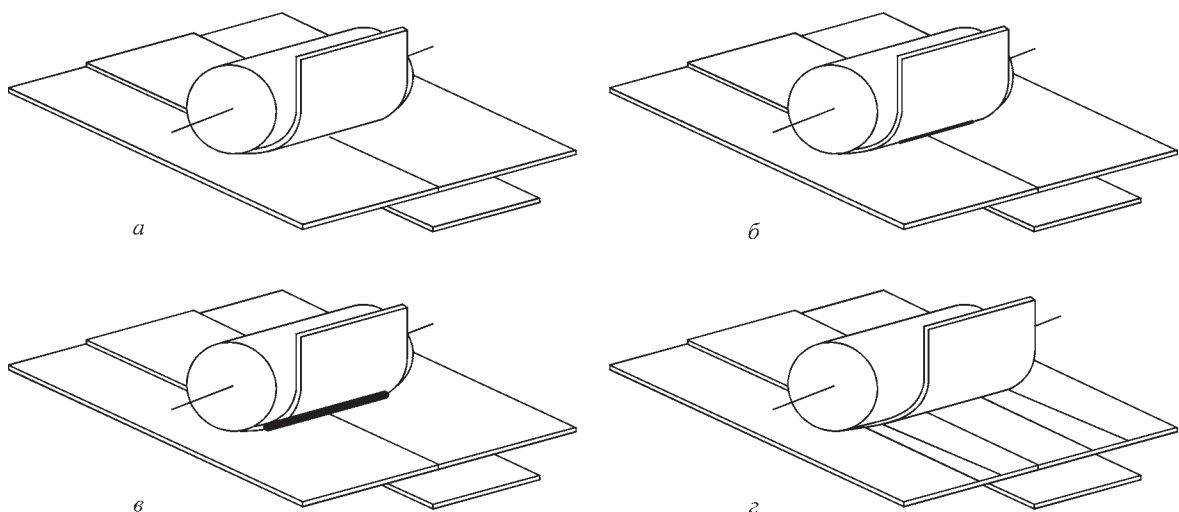


Рис. 10. Схеми можливих порушень оптимального процесу зварювання штучної шкіри нагрітим повітрям (опис див. у тексті)

цесі зварювання ламінованої тканини нагрітим повітрям.

При відсутності або фрагментарній появі невеликого з діаметром валика розплаву під роликом (рис. 10, а, б) температура в зоні зварювання нижче необхідної. Слід плавно зменшити швидкість зварювання до появи рівномірного валика розплаву по усій ширині шва.

При формуванні під роликом валика розплаву великого діаметру та витисканні частини розплаву з під стрічки (рис. 10, в) зона зварювання перегріта та формується занадто велика кількість розплаву ПВХ. Слід плавно зменшити швидкість зварювання, спостерігаючи за розмірами валика розплаву та не допускаючи його зникнення та виникнення непровару.

Відсутність валика розплаву з одного із боків ролика свідчить про нерівномірність прогріву зони зварювання по ширині шва. В цьому випадку слід за допомогою гвинтового механізму перемістити нагрівач таким чином, щоб сопло зсунулось в бік непрогрітої ділянки. В процесі зварювання може відбуватись зсув з'єднувальної стрічки осі шва вбік (рис. 10, г). Це свідчить, як правило, про неправильну орієнтацію осі обертання ролика та відхилення її у горизонтальній або вертикальній площинах, розташування притискного ролика слід відрегулювати.

Корекцію режиму нагрівання тканин, що зварюються зручно здійснювати зміною швидкості зварювання, регулюванням електричних параметрів приводу зварювальної установки.

Висновки

MECHANIZED WELDING OF LAMINATED PVC FABRICS WITH HEATED AIR

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

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

E-mail: korab_nikolay@ukr.net

Technical laminated fabrics, which are used for the manufacture of awnings and inflatable products for different purposes, are manufactured with double-sided PVC coating. The most widespread practical method of manual and mechanized welding of laminated fabrics with PVC coating is hot air welding. In this work, the features of hot air welding of the overlapped welds of laminated PVC fabric were investigated in the manufactured experimental installation. The geometric dimensions and shape of the produced experimental welds from laminated fabric Unisol 950 (specific weight is 950 g/m²) were established. In the course of the work the mechanical strength of the welds produced by experimental welding was investigated, as well as tear test of the welds was carried out. The range of welding speed was set, within which welded joints of the laminated fabric are formed with uninterrupted penetration. It was shown that a dense penetration along the entire plane of the welded joint is achieved by forming a bead uniform as to its diameter of the molten PVC in the welding process under the pressure roller. The nature of running thermal processes in the welding zone was evaluated by the geometric parameters of the melt bead. The optimal parameters of the welding process of butt welds of laminated fabrics, joined by the tape on both sides and visual criteria for a quality joint formation were determined, as well as the principles of manual control of the hot air welding process in real time was developed. 4 Ref., 10 Fig.

Keywords: welded joints, laminated PVC fabric, hot air welding

Виготовлено експериментальну установку, в якій використовували візок з електромеханічним приводом для переміщення вздовж стику тканин нагрівача повітря з притискним роликом для зварювання стикових швів ламінованої тканини, з'єднаних стрічкою з обох боків. Проведено експериментальне дослідження процесу теплового зварювання ламінованих ПВХ тканин встик зовнішньою стрічкою за допомогою нагрітого повітря. Визначено оптимальні параметри процесу зварювання, візуальні критерії якісного формування з'єднання ламінованої тканини та розроблено принципи ручного керування процесом теплового зварювання нагрітим повітрям у реальному часі.

Список літератури

1. *Свойства поливинилхлорида. Полимерные материалы.* Режим доступу: <http://www.polymerbranch.com/catalogp/view>.
2. *«Мембрана» – интернет магазин ламінованих тканин.* Режим доступу: <https://www.tentmarket.com.ua/>.
3. Зайцев К.И., Мацюк Л.Н., Богдасhevский А.В.и др. (1988) *Сварка полимерных материалов.* Справочник. Зайцев К.И., Мацюк Л.Н. (ред.). Москва, Машиностроение.
4. *Ручной сварочный аппарат Leister triac S. LEISTER.* Режим доступу <http://leister-club.ru/>.

References

1. *Properties of polyvinylchloride. Polymer materials* [in Russian]. <http://www.polymerbranch.com/catalogp/view>.
2. *Membrana – internet magazine of laminated tissues* [in Russian]. <https://www.tentmarket.com.ua/>.
3. Zajtsev, K.I., Matsyuk, L.N., Bogdashevsky, A.V. et al. (1988) *Welding of polymer materials.* In: Refer. book. Ed. by K.I. Zajtsev, L.N. Matsyuk. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
4. *Manual welding machine Leister triac S. LEISTER.* <http://leister-club.ru/>.

Надійшла до редакції
07.08.2020

МІЖНАРОДНІ КОНФЕРЕНЦІЇ З МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В ЗВАРЮВАННІ ТА НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

14-18 вересня 2020 р. в м. Одесі в готелі «Аркадія» були проведені X Міжнародна конференція «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах» (MMITWRP) і XXIII Міжнародна конференція «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану» (NDTMTC), які були організовані Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України та Міжнародною Асоціацією «Зварювання». До організації проведення конференції NDTMTC долучилось також Українське товариство неруйнівного контролю і технічної діагностики. Інформаційну підтримку в проведенні конференцій надали журнали «Автоматичне зварювання», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль» і «Biuletyn Instytutu Spawalnictwa».

Перед оргкомітетом стояло складне завдання – організація і проведення конференцій в непростих умовах епідемії, обмеження спілкування та пересування на транспорті, закриття кордонів України. В цих умовах вирішальними стали бажання вчених та фахівців в обміні думками та отриманими за останній час результатами та підтримка спонсорів конференцій MMITWRP та NDTMTC відповідно ТОВ «Зовнішньоекономічне представництво Китайсько-українського інституту зварювання ім. Є.О. Патона» та ПрАТ «Український науково-дослідний інститут неруйнівного контролю». А колектив готелю «Аркадія» створив умови для комфорту та безпеки учасників конференцій, надавши просторі конференц-зали, необхідну кількість медичних масок та дезінфікуючих розчинів.

X Міжнародна конференція «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах». В роботі конференції, яка була організована у вигляді сесій пленарних та стендових доповідей, взяло участь тридцять вчених і фахівців з України та Китаю, а також із заочною участю – фахівці з Великої Британії. Відкрив конференцію керівник Програмного комітету MMITWRP академік НАН України І.В. Кривцун, який у своєму виступі зупинився на проблемах, можливостях і задачах математичного моделювання та теоретичного аналізу фізичних процесів в галузі зварювання та споріднених процесів.

Відзначимо деякі з доповідей, які дають уявлення про коло питань, які обговорювались під час проведення конференції:

– «Анодні процеси в зварювальних дугах», Кривцун І.В., ІЕЗ ім. Є.О. Патона;

– «Прогнозування загальних деформацій великогабаритних циліндричних конструкцій на основі методу функції усадки», Махненко О.В., Великоіваненко О.А., Розинка Г.П. та ін., ІЕЗ ім. Є.О. Патона;

– «Теплопередача випромінюванням в середовищах з неекстенсивною ентропією», Драган Г.С., Кутаров В.В., Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова;

– «Чисельний аналіз особливостей граничного стану зварних трубопровідних елементів в умовах ультрамалоциклового навантаження»,



Учасники конференцій MMITWRP та NDTMTC



Виступ акад. І.В. Кривцуна при відкритті конференції ММІТWRP

Міленін О.С., Великоіваненко О.А., Розинка Г.П. та ін., ІЕЗ ім. Є.О. Патона;

– «Побудова регресійних моделей визначення механічних властивостей основного матеріалу та ЗТВ, призначених для ЕШЗ сталей. Математичне моделювання процесів релаксації залишкових напружень в зварних з'єднаннях в результаті післязварювальної термообробки», Єгорова С.В., Махненко О.В., Саприкіна Г.Ю. та ін., ІЕЗ ім. Є.О. Патона;

– «Верифікація результатів математичного прогнозування процесу лазерно-плазмового різання вуглецевої сталі», ¹Хаскін В.Ю., ^{1,2}Коржик В.М., ¹Ілляшенко Є.В., ¹Пелешенко С.І., ³Перепічай А.О., ¹Китайсько-український інститут зварювання ім. Є.О. Патона, Гуанчжоу, КНР; ²ІЕЗ ім. Є.О. Патона; ³НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського»;

– «Вплив нерегулярного циклічного навантаження на опір втоми тонколистових зварних з'єднань термічно зміцнених алюмінієвих сплавів», Книш В.В., Мотруніч С.І., Ключков І.М. та ін., ІЕЗ ім. Є.О. Патона;

– «Вплив деформації крапель розплавленого металу на їх рух та нагрів при ЕШП», ¹Кривцун І.В., ¹Сидорець В.М., ²Сибир А.В. та ін., ¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона; ²Національна металургійна академія України, Дніпро;

– «Прогнозування кінетики температурних полів та пружно-деформованого стану різнорідних виробів, отриманих методами пошарового формування», Міленін О.С., Великоіваненко О.А., Розинка Г.П. та ін., ІЕЗ ім. Є.О. Патона;

– «Comparative analysis of the results of computer simulation of heat transfer, hydrodynamic and electromagnetic processes in the metal being welded by means of different software tools», O. Semenov, I. Krivtsun, G. Likhoshva, et al., E.O. Paton Electric Welding Institute;

– «Іонізаційні процеси в сильно неідеальній плазмі», Колесніков К.В., Драган Г.С., Одеський національний університет ім. І.І. Мечникова;

– «Prediction of residual stresses after welding of duplex steel taking into account phase transfor-

mation», ¹J. Ren, ²O. Kostenevych, ¹Liverpool John Moores University, UK; ²E.O. Paton Electric Welding Institute;

– «Моделювання НДС та несучої здатності зварних трансформуваних конструкцій в процесі розкриття та експлуатації», Лобанов Л.М., Махненко О.В., Кандава С.М., та ін., ІЕЗ ім. Є.О. Патона;

– «Моделювання електромагнітних та теплових полів процесу індукційного нагріву зварних з'єднань високоміцних рельсових сталей», Губатюк Р.С., Мужиченко О.Ф., Римар С.В. та ін., ІЕЗ ім. Є.О. Патона;

– «Аналітична оцінка локальних внутрішніх напружень та мікродеформацій в металі зварних з'єднань при зварюванні під водою», Берднікова О.М., Максимов С.Ю., Прилипко О.О. та ін., ІЕЗ ім. Є.О. Патона;

– «Структурні критерії міцності та тріщиностійкості зварних з'єднань легованих середньо вуглецевих сталей», Берднікова О.М., Позняков В.Д., Гайворонський О.А. та ін., ІЕЗ ім. Є.О. Патона.

Під час конференції був проведений круглий стіл «Роль математичного моделювання у вдосконаленні зварювальних та споріднених процесів»; модератор – академік НАН України І.В. Кривцун. У своєму виступі І.В. Кривцун зазначив, що однією з ключових проблем сучасного промислового виробництва є вдосконалення існуючих і розробка нових високоефективних технологій з'єднання і обробки металевих матеріалів. До них відносяться, наприклад, такі технологічні процеси, як зварювання плавленням, наплавлення, напилення покриттів, термообробка поверхні, дугове рафінування сталей, 3D технології. На сучасному етапі розвитку зварювальних та споріднених технологій розв'язання даної проблеми неможливо без детального дослідження сукупності фізичних явищ (теплових, дифузійних, газо-, гідродинамічних, електромагнітних, оптичних та ін.), що протікають при зварюванні різними джерелами теплової енергії. Це газорозрядна, перш за все дугова, плазма, електромагнітне, зокрема лазерне випромінювання або їх комбінація. Експериментальне дослідження фізичної природи такої багатофакторної взаємодії пов'язане зі значними труднощами, зумовленими високими значеннями температури плазми і поверхні оброблюваного матеріалу в зоні впливу джерела тепла, малими геометричними розмірами зазначеної зони, високими швидкостями протікання досліджуваних процесів і низки інших обставин. Тому в останні десятиліття все більшу увагу фахівців привертають методи теоретичного дослідження, включаючи розробку математичних моделей та їх чисельне

розв'язання, в т. ч. використовуючи пакети прикладних програм для комплексного комп'ютерного моделювання фізичних процесів при зварюванні та обробці матеріалів. Такий підхід дозволяє істотно скоротити витрати, пов'язані з проведенням великої кількості дорогих натурних експериментів, оскільки дає можливість досить швидко і відносно дешево проводити якісний і кількісний аналіз процесів, що протікають в даній системі, для широкого діапазону умов і параметрів режиму зварювання або обробки, характеристик і властивостей матеріалу, що оброблюється.

Крім того І.В. Кривцун зупинився на тих тенденціях, які відбуваються в області математичного моделювання в зварюванні та споріднених процесах в останні роки. Зокрема він зазначив, що постійно зростає кількість дослідників, які використовують стандартні пакети прикладних програм для інтегрування рівнянь математичної фізики, у зв'язку з чим актуальною є проблема верифікації отриманих результатів.

Збірку праць конференції MMITWRP-2020 буде видано до кінця поточного року. Ця збірка, а також збірки попередніх дев'яти міжнародних конференцій MMITWRP можна замовити в редакції журналу «Автоматичне зварювання» або отримати в електронному вигляді у відкритому доступі на сайті Видавничого Дому «Патон» <https://patonpublishinghouse.com/ukr/proceedings/mmw>.

Наступна, XI Міжнародна конференція «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах», запланована до проведення в м. Одесі у вересні 2022 р.

XXIII Міжнародна конференція «Неруйнівний контроль та моніторинг технічного стану».

Конференцію відкрив вітальним словом академік НАН України Кривцун І.В. Він відзначив значну роль неруйнівного контролю та моніторингу технічного стану в промисловості, будівництві та на транспорті в сучасній Україні. З привітаннями також виступили Луценко Т.М. (заст. директора ПрАТ «УкрНДІНК», м. Київ), Ткаченко А.А. (директор «INTROSKOP NDT SRL», м. Кишинів, Республіка Молдова), Мешков С.М. (директор НТЦ «Термоконтроль» Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків).



Виступ акад. І.В. Кривцуна при відкритті конференції NDTMTC

спубліка Молдова), Мешков С.М. (директор НТЦ «Термоконтроль» Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків).

В пленарних засіданнях конференції взяли участь 40 учених та спеціалістів з України та Республіки Молдова. На них було заслухано 20 доповідей. Ще 21-у стендову доповідь було представлено авторами, які з різних причин не змогли приїхати в Одесу. В цілому на конференцію подали доповіді або брали участь в роботі без доповіді представники 26-и підприємств та організацій з 15-и міст. Тези доповідей, що були подані на конференцію, видано окремою збіркою. Її співавторами стали 75 фахівців.

Одночасно працювала виставка засобів та матеріалів неруйнівного контролю та технічної діагностики, на якій 8 провідних підприємств України демонстрували свої найкращі розробки останніх років та пропонували передові технології і обладнання від своїх закордонних партнерів з усього світу.

ПЛЕНАРНІ ДОПОВІДІ. Ветерани-дефектоскопісти пам'ятають «Всесоюзний науково-дослідний інститут неруйнівного контролю НВО «Волна» з м. Кишинєва. Колись це був головний інститут з розробки ультразвукових дефектоскопів та автоматизованих систем контролю. В його розбудову вніс вклад і акад. Патон Б.Є. У 1990-х роках в ньому утворилось кілька приватних фірм, які успішно працюють в Молдові та Росії. До речі, Луценко Г.Г. та Луценко Т.М., спонсори нашої конференції, починали свою трудову діяльність саме там. Сьогодні, після реорганізацій та акціонування, це «INTROSKOP NDT SRL», а його директор д.т.н. Ткаченко А.А. виступив з розгорнутою доповіддю «Розвиток методів і засобів ультразвукового контролю при виробництві електрозварних труб великого діаметру». В доповіді розглянуті значущі операції технологічного потоку виробництва електрозварних труб великого діаметру для магістральних трубопроводів, включаючи важливі контрольні операції, та представлені установки ультразвукового контролю зварного шва та кінців труб на різних стадіях потоку. Було досліджено та розроблено методи підвищення інформативності автоматизованого УЗК зварного шва, що включають способи забезпечення управління положенням строб-імпульсу при наявності поперечних зміщень шва та зміни кута вводу ультразвукових коливань в метал стінки труби; способи стеження за зварним швом; ефективні способи реєстрації сигналів від дефекту в умовах наявності різного роду завад, що співпадають за часом із зонами контролю; визначення виду виявлених дефектів комбінованим способом.



Чотири рази протягом конференції виходив на трибуну к.т.н. Мешков С.М., директор НТЦ «Термоконтроль» ХНУРЕ, представник відомої Харківської школи теплового неруйнівного контролю д.т.н., проф. Стороженка В.О. В своїй першій доповіді «Досвід НТЦ «Термоконтроль» в області теплового неруйнівного контролю» він розповів про дослідження і розробки технологій теплового неруйнівного контролю. За 40 років свого існування колектив НТЦ впровадив десятки технологій та обладнання у розвиток авіакосмічної, енергетичної, нафтогазової та інших галузей промисловості України. Свої наступні виступи він присвятив висвітленню нових розробок, що стосуються конкретних важливих об'єктів:

- «Застосування теплового методу для дефектоскопії трубопроводів АЕС»,
- «Термографічне діагностування стану газоперекачуючого обладнання»,
- «Застосування теплобачення в енергозберігаючих технологіях».

Спільну доповідь від Одеського припортового заводу та Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона представив начальник відділу технічного нагляду ОПЗ Ободовський Б.М. – «Використання результатів акустико-емісійного моніторингу технічного стану аміакосховищ Одеського припортового заводу при підготовці та проведенні капітального ремонту». Він зазначив, що на ОПЗ приділяється велика увага забезпеченню безпечної експлуатації відповідальних промислових об'єктів. На заводі використовуються сучасні методи та обладнання контролю та діагностики їх стану, в тому числі застосовуються системи АЕ моніторингу аміакосховищ, що безперервно працюють вже майже 20 років. Мета застосування АЕ моніторингу: визначення зон підвищеної АЕ активності, відстеження в реальному часі динаміки АЕ процесів на резервуарах, оцінка ступеня небезпеки зареєстрованих кластерів АЕ подій згідно з нормативними документами та видача попереднього прогнозу залишкового ресурсу резерву-



арів, рекомендації щодо подальшого режиму експлуатації сховищ аміаку, оперативне оповіщення відповідного персоналу для своєчасного реагування, видача інформації щодо координат та ступеня небезпеки зареєстрованих джерел АЕ (у вигляді таблиць, графіків та локалізація їх на загальній схемі аміакосховищ) для проведення додаткового контролю неруйнівними методами при проведенні ремонту. Автоматизовані системи ЕМА, розроблені в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України спільно з угорськими фахівцями, визначають ступінь небезпеки стану об'єктів з локалізацією місць можливого руйнування, прогнозують руйнівне навантаження при поточних умовах експлуатації, оцінюють залишковий ресурс конструкцій. Роботи проводяться у тісному контакті з фахівцями ОПЗ.

Директор науково-виробничого підприємства «Діамех-Україна» Баглай А.В. зробив доповідь «Впровадження автоматичної системи контролю та діагностики технічного стану вентиляторів газоочищення мартенівських печей». Така система впроваджена на ПАТ «Запоріжсталь» і виконує аналіз технічного стану підшипників та з'єднувальних муфт. Він також зробив два коротких повідомлення – «Динаміка та діагностика зазорів у клітках з багатонитковою прокаткою» та «Використання особливостей технологій та режимів роботи прокатних клітей у діагностичних цілях».

Надзвичайно цікавими та інформативним були виступи представників підприємств, що брали участь у виставці, що своєю працею створюють засоби технічного контролю.

Доповідь заст. директора УкрНДІНК Луценко Т.М. «Стратегія розвитку УкрНДІНК та інших компаній Асоціації «ОКО» в умовах глобалізації ринку» змусила багатьох колег подивитись на нашу діяльність з економічного боку. УкрНДІНК має великий науково-дослідний досвід та потенціал, які дозволяють розробляти сучасні засоби неруйнівного контролю та досліджувати методи контролю. У тісному співробітництві з виробни-



чими підприємствами Асоціації «ОКО» («Ультракон-Сервіс», «Промприлад») УкрНДІНК успішно впроваджує останні розробки в провідних галузях промисловості. Виробничими організаціями Асоціації «ОКО» налагоджено виробництво портативних дефектоскопів для ручного контролю, механізованих та автоматизованих засобів контролю ультразвуковим, вихрострумовим, акустико-емісійним, магнітопорошковим методами і методом вібродіагностики. На сьогоднішній день прилади та системи, розроблені Асоціацією «ОКО», використовуються майже у шістдесяті країнах світу, таких, як США, Німеччина, Туреччина, Китай, Японія, Канада, Франція, Сінгапур, Індонезія, Італія, країни СНД та інші.

У доповіді провідного спеціаліста УкрНДІНК Дідика А.В. «Комплексний контроль зварних з'єднань за технологіями ФАР + TOFD» розглянуто як переваги, так і недоліки кожної з технологій – ФАР і TOFD при контролі зварних з'єднань. Показано можливості і переваги їх одночасного використання. Описано систему OKOSCAN-14-PAUT, в якій реалізовано суміщену технологію УЗК – ФАР + TOFD. Виділено переваги її застосування для контролю зварних з'єднань магістральних трубопроводів, резервуарів, цистерн та інших протяжних зварних з'єднань.



В другій доповіді «Актуальні розробки підприємства «укрНДІНК» в галузі вихрострумового контролю» Дідик А.В. розповів про сучасні розробки УкрНДІНК в сфері вихрострумового контролю та надав приклади реалізації засобів неруйнівного контролю в різноманітних виробничих секторах. Розглянуто також пріоритетні напрямки застосування обладнання для вихрострумового контролю та шляхи розвитку та визначення сучасних тенденцій цього методу.

Новий, незнайомий для багатьох погляд на рентгенографію виклав директор НВФ «Діагностичні прилади» Павлій О.В. в доповіді «Використання зеленочутливих рентгенівських плівок для дефектоскопії зварних з'єднань». На основі досліджень та технічних характеристик він доводить, що застосування зеленочутливих плівкових систем відкриває нову сторінку в класичній промисловій радіографії. Впровадження подібної технології несе істотні переваги: знижує трудомісткість контролю, радіаційне навантаження на персонал, підвищує швидкість робіт.

В другій доповіді «Українським підприємствам – найкращі засоби неруйнівного контролю» від НПФ «Діагностичні прилади» Павлій О.В. розповів про численні засоби технічного контролю від провідних світових виробників, що постачає фірма на вітчизняний ринок. Відчувалась особлива



прихильність доповідача до портативних моноблочних рентгенівських апаратів. Він також прокоментував розробку нових екологічних матеріалів для капілярної і магнітопорошкової дефектоскопії, що не містять шкідливих компонентів.

Провідний спеціаліст НВФ «Ультракон» Глабець С.М. в доповіді «Нові розробки НПФ «Ультракон» розповів про власні розробки фірми. Особливу увагу він приділив портативному ультразвуковому дефектоскопу УД2-50 – результату багаторічних досліджень та випробувань. Це компактний багатофункціональний прилад з яскравим кольоровим екраном і акумуляторним живленням, що забезпечує тривалу роботу без підзарядки.

Провідний спеціаліст ТОВ «Хімлаборреактив» Піщанюк Б.В. у своєму виступі «ХЛР – рішення для лабораторій» розповів про нещодавно створений напрямок в роботі підприємства – контроль якості в промисловості (фізико-механічні випробування, твердометрія, пробопідготовка, корозійні випробування, мікроскопія, випробування лакофарбових і будівельних матеріалів, обладнання для неруйнівного контролю).

Щупак С.О., відповідальний секретар Технічного комітету стандартизації 78 «Технічна діагностика та неруйнівний контроль», у своїй доповіді «Стандартизація і сертифікація в сфері неруйнівного контролю в Україні» розповіла про новини стандартизації і сертифікації, про структуру, напрямки діяльності та основні досягнення ТК 78. Слід відзначити, що на сьогодні в Україні введено в дію близько 200 міжнародних та європейських стандартів в галузі неруйнівного контролю. Також прийняті всі чинні міжнародні та європейські стандарти, що встановлюють вимоги до підготовки, атестації та підтвердження кваліфікації персоналу НК, а також вимоги до організацій, які надають такі послуги.

Цікавість викликали об'єкти контролю, про які розповів у своєму виступі Посипайко Ю.М. з Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона – «Моніторинг технічного стану резервуарів на Українській антарктичній станції «Академік Вернадський». Він відзначив, що у 2016 р. розпочато, а у 2019 р. продовжено роботи з моніторингу технічного стану та профілактичного ремонту резервуарів на УАС «Академік Вернадський» на острові Галіндез в архіпелазі Аргентинських островів. На станції знаходяться два резервуари, призначені для приймання і зберігання дизельного пального: РГС-150 (1979 р.) і РВС-200 (2007 р.). Аналіз результатів технічного діагностування стану резервуарів дозволив зробити висновок, що всі елементи резервуарів знаходяться в задовільному технічному стані, стінки, днище та покрівля не мають недопустимих деформацій чи дефектів, що можуть вплинути на надійність експлуатації та працездатність резервуарів. На мета-

локонструкціях резервуара не виявлені сліди протікання пального, що свідчить про герметичність внутрішньої оболонки. Незначні відступи від вимог проекту та чинних норм не впливають на його працездатність.

Посипайко Ю.М. у другому виступі «Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики: 30 років від дня заснування» розповів про історію заснування Товариства та про основні напрямки його діяльності (www.usndt.com.ua).

СТЕНДОВІ ДОПОВІДІ. Цілий ряд доповідей не виголошувались на конференції, а були віднесені до стендових – їх автори з різних причин не змогли бути присутні в залі засідань. Тези цих доповідей теж включені до збірки. Збірка тез доповідей в електронному вигляді у відкритому доступі знаходиться на сайті Видавничого Дому «Патон» <https://patonpublishinghouse.com>.

Організації та автори, що надали найпомітніші стендові доповіді:

- Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона (м. Київ) – 7 доповідей (автори Троїцький В.О., Михайлов С.Р., Бондаренко О.Г., Карманов М.М., Глуховський В.Ю., Пастовенський Р.О. та інші);
- Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка (м. Львів) – 7 доповідей (автори Назарчук З.Т., Учанін В.М., Юзефович Р.М., Джала Р.М., Рибачук В.Г. та інші);



- Харківський національний університет радіоелектроніки (м. Харків) – 3 доповіді (автори Стороженко В.О., Мягкий А.В. та інші);
- Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського» (м. Київ) – 1 доповідь (автори Куц Ю.В., Редька М.О.);
- Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу – 1 доповідь (автори Середюк О.С., Криницький О.С.);
- Дніпровський національний університет залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна (м. Дніпро) – 1 доповідь (автор Пуларія А.Л.);
- Одеський авіаремонтний завод (м. Одеса) – 1 доповідь (автор Шебордаєв О.М.).

УЧАСНИКИ ВИСТАВКИ ПРИЛАДІВ, ОБЛАДНАННЯ ТА МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ТЕХНІЧНОГО КОНТРОЛЮ.

- Група компаній «Асоціація «ОКО», керівники Луценко Г.Г. і Луценко Т.М.:
- УкрНДІНК (www.ndt.com.ua, www.autondt.com) займається розробкою і створенням технологій та засобів неруйнівного контролю, їх інтеграцією в технологічні процеси виробництва. Інститут було створено у 2004 р. За цей час він перетворився у центр наукових досліджень, об'єднання провідних вчених та спеціалістів, які присвятили себе вдосконаленню методів, технологій та засобів НК. Механізовані та автоматизовані системи, які розробляє УкрНДІНК, застосовуються у різних галузях промисловості, дозволяючи контролювати залізничні рейки, колісні пари, осі, авіаційні колеса, труби, зварні шви тощо при виготовленні та експлуатації.
- «Ультракон-сервіс» (www.ultracon-servise.com.ua) є відомим розробником засобів неруйнівного контролю, першою компанією в Україні, яка зайнялася виробництвом обладнання НК. Підприємство вже протягом більш ніж 27 років виробляє портативні прилади і автоматизовані системи НК, серед яких є розробки, які не мають аналогів у світі. Підприємство пропонує своїм замовникам виготовлення обладнання НК «під ключ». На даний момент дефектоскопи та автоматизовані системи, які розробляє «Ультракон-Сервіс», успішно працюють у майже 60 країнах по всьому світу, створюючи Україні репутацію провідного експерта та надійного партнера у галузі неруйнівного контролю.
- «Промприлад» (www.promprilad.com.ua) займається розробкою та виробництвом обладнання ультразвукового, вихрострумowego, акустико-емісійного, магнітного, візуально-оптичного, електромагнітно-акустичного та капілярного методів неруйнівного контролю. Прилади та системи НК, які розробляються НВФ «Промприлад», використовуються для суцільного контролю об-

ладнання, перевірки окремих виробів та ділянок, виявлення дефектів та пошкоджень, підтвердження даних, отриманих при первинних виробничих або експлуатаційних інспекціях, тощо.

- НВФ «Діагностичні прилади», керівник Павлій О.В. (www.ndt-ua.com) більше 20 років допомагає підприємствам України вирішувати завдання контролю якості продукції і діагностування технічних об'єктів. Фірма поставляє обладнання і матеріали для неруйнівного контролю, розробляє технології, виконує роботи з діагностування, навчає персонал. НВФ «Діагностичні прилади» представляє в Україні світових лідерів: Olympus, MR-Chemie, Teledyne ICM, Galdabini, Ernst, K+D Flux-Technic, Carestream, Spectroline, Parker.
- НВФ «Новотест», керівник Черкасов С.С., (www.novotest.ua) – це прилади і системи контролю якості від виробника. У виробничій програмі фірми твердоміри, товщиноміри, дефектоскопи металів, пластмас, покриттів і багато іншого. Фірма є постійним учасником міжнародних виставок і її прилади та обладнання працюють в багатьох країнах світу.
- НВФ «Ультракон», керівник Павлій І.В. (www.ultracon.com.ua) пропонує підприємствам комплексне обслуговування: поставку широкого спектру обладнання для неруйнівного контролю та технічної діагностики, впровадження обладнання, консультативне і методологічне сприяння в процесі експлуатації. Для вирішення завдань підвищення безпеки і якості, що стоять безпосередньо перед підприємствами, спеціалісти фірми допоможуть оптимально підібрати, придбати, ввести в експлуатацію необхідне обладнання неруйнівного контролю.
- ТОВ «Хімлаборреактив» (www.hlr.ua) – багатопрофільна компанія, що комплексно оснащує лабораторії (обладнання, меблі, реактиви, посуд і т. п.). Департамент неруйнівного контролю пропонує лінійку найсучасніших дефектоскопів для ультразвукового і вихрострумowego контролю та аналізу матеріалів і захисних покриттів, представляє в Україні засоби технічного контролю фірм Zetec (Франція), Guided Ultrasonics (Великобританія), Helmut Fischer (ФРН), Sonotec (ФРН).
- ПАТ Одеський припортовий завод (www.opz.odessa.net) демонстрував на своєму стенді систему акустико-емісійного діагностування технічного стану резервуарів-аміакосховищ, встановлених на заводі.

Олександр Зельніченко,
Юрій Посипайко, Світлана Щупак.

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОВРЕМЕННОЕ СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО» И МЕЖДУНАРОДНАЯ ЯРМАРКА «EXPOWELDING»

Международная конференция по сварке в Сосновце в сочетании с выставкой ExpoWelding – это важнейшая встреча представителей сварочной отрасли. Уже более десяти лет это постоянный пункт в календаре сварщиков, представляющих как исследовательские центры, так и промышленные предприятия, использующие сварочные технологии.

В этом году встреча прошла 13–15 октября под девизом «Современная сварка – современное будущее». Она имела статус Конгресса Международного института сварки, и в нем приняли участие генеральный директор Международного института сварки д-р Лука Коста, президент Международного института сварки Дэвид Лэндон и президент Европейской федерации сварки д-р инж. Михал Кубица. Кроме того, почетный патронат конференции осуществляли Министерство развития и Региональная торговая палата в Катовице.

Организатором конференции является Институт сварки, впервые в составе исследовательской сети Лукасевич: третьей по величине исследовательской сети в Европе, насчитывающей 8 тыс.

сотрудников, 32 научно-исследовательских института, расположенных в 12 городах Польши. Хотя Сеть Лукасевич была создана в 2019 г., Польский Институт сварки работает как независимое научно-исследовательское подразделение уже 75 лет. Основанный 28 марта 1945 г. как Государственный институт сварки, он последовательно выполняет задачи, вытекающие из потребностей и ожиданий польского народного хозяйства, предлагая сегодня практически все, что необходимо современной промышленности в области сварки. Таким образом, конференция являлась поводом подчеркнуть юбилей Института сварки, отмечаемый в этом году.

Перед организаторами конференции стояла огромная задача, поскольку из-за санитарных ограничений, связанных с пандемией, невозможно было подготовить конференцию в традиционном формате. Так, было принято решение о гибридном характере Конференции и Конгресса. Приглашением в Сосновец воспользовались около 60 участников, а еще более 160 решили участвовать удаленно, используя интернет-платформу. Заочные выступления подготовили иностранные гости, в том числе из Италии, США, Германии, Украины и даже Индии. Кроме того, участники прослушали более 20 докладов, представленных представителями важнейших исследовательских центров сварки в Польше. Было также подготовлено много плакатов с результатами исследований польских научных сотрудников. Участники конференции подчеркнули разнообразие тем, включенных в программу конференции в этом году.

Доклад от ИЭС им. Е.О. Патона (авторы Л.М. Лобанов, Н.А. Пасин) был посвящен электродинамической обработке элементов сварных конструкций из алюминиевых и магниевых сплавов.

В седьмой раз Конференция сопровождалась Международной сварочной ярмаркой ExpoWELDING – ведущей сварочной выставкой в Центрально-Восточной Европе. Уже почти двенадцать лет на Expo Silesia в г. Сосновец специалисты по сварке имеют возможность ознакомиться с последними предложениями технологического оборудования, необходимого для выполнения сварочных процессов.

Следующая выставка ExpoWelding и Международная сварочная конференция пройдут с 18 по 20 октября 2022 года в г. Сосновица.

Магистр Марек Драган



Выставочный зал EKSPOSILESIA



Конференцию открывает д-р инж. Адам Пиетрас, директор Польского института сварки

Пам'яті В.М. Сидорця



27 липня 2020 р. на 65 році пішов з життя видатний вчений, провідний науковий співробітник відділу фізики газового розряду і техніки плазми Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона, доктор технічних наук, професор Володимир Миколайович Сидорець.

Все трудове, наукове й творче життя Володимира Миколайовича пов'язано з Інститутом електрозварювання. Прийшовши працювати в Інститут 1972 р., він залишав його лише для навчання на фізичному факультеті університету ім. Т.Г. Шевченка і проходження військової служби офіцером на радіолокаційній станції.

Повернувшись працювати до Інституту, у 1992 р. Володимир Миколайович з успіхом захистив кандидатську, а у 2009 р. і докторську дисертацію, ставши провідним науковим співробітником відділу фізики газового розряду й техніки плазми. У 2013 р. отримав наукове звання професора.

Шлях від лаборанта до провідного наукового співробітника, який він пройшов за ці роки, був наповнений кропіткою і наполегливою працею на науковій ниві, пов'язаною з дослідженням зварювальних процесів. Серед наукових досягнень Володимира Миколайовича особливо слід відзначити вагомий внесок у розвиток моделі динамічної зварювальної дуги, що дозволило розробити стабільні системи «зварювальна дуга – джерело живлення», а також стабілізовані імпульсні системи змінного струму для зварювання відповідальних конструкцій. Суттєвим доробком у науковій діяльності стали фундаментальні дослідження детермінованого хаосу в електричних ланцюгах зі зварювальною дугою, які склали предмет його докторської дисертації та виданої монографії «Детермінований хаос в нелінійних ланцюгах з електричною дугою».

Наукове співтовариство зварювальників високо цінувало вагомий внесок Володимира Миколайовича в дослідження лазерно-дугового розряду та створення нових технологій лазерно-дугового і лазерно-плазмового зварювання. Результати цих досліджень лягли в основу технології високошвидкісного зварювання корозійностійких і алюмінієвих сплавів. Під його керівництвом розроблені нові джерела живлення для мікрозварювання прецизійних сплавів, здатні відтворювати з безлічі допустимих форм кривих струму найбільш оптимальну, що забезпечує високу якість зварного шва.

Володимир Миколайович брав активну участь у роботі наукового співтовариства, будучи членом спеціалізованої Вченої ради по захисту дисертацій Чернігівського технологічного університету, головою державної екзаменаційної комісії

Кафедри біомедичної кібернетики факультету біомедичної інженерії КПІ ім. Ігоря Сікорського, членом організаційного комітету й головою пленарних засідань Міжнародних наукових конференцій «Математичне моделювання та інформаційні технології у зварюванні і споріднених процесах», «Лазерні технології у зварюванні та обробці матеріалів», що проводилися Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона, членом програмних комітетів Міжнародних науково-технічних конференцій «Проблеми сучасної електротехніки», Міжнародної конференції з інтелектуальних енергетичних та енергетичних систем – IEPS, що проводилися Інститутом електродинаміки НАН України, Національним технічним університетом України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Представництвом Польської академії наук у м. Києві та Секцією IEEE в Україні, членом технічного програмного комітету – Міжнародної конференції з електроніки та інформаційних технологій – EIT, що проводилися Секцією IEEE в Україні, Одеським національним політехнічним університетом, Науково-дослідною компанією «Карат», Науково-виробничим підприємством «Сатурн», Науково-технічним журналом «Технологія та конструювання в електронній апаратурі», ПП «Політехперіодика».

Два роки Володимир Миколайович плідно працював у спільному Китайсько-українському Інституті зварювання ім. Є.О. Патона у місті Гуанчжоу в КНР. Завдяки його зусиллям було гідно завершено ключовий п'ятирічний інноваційний проект, в якому публікації світового рівня В.М. Сидорця склали більш, ніж половину з усіх. В.М. Сидорцем було проведено глибокі теоретичні дослідження наукових основ гібридних лазерно-плазмових і плазмово-дугових процесів зварювання. Зокрема було опрацьовано важливе питання зміни частки поглинання лазерного випромінювання в лазерних і гібридних процесах зварювання.

Маючи багатий науковий досвід, знання й талант, В.М. Сидорець підготував одного доктора й трьох кандидатів технічних наук, був науковим консультантом трьох пошукачів докторського ступеня, видав монографію й опублікував більше ніж 200 наукових праць, 47 з яких включені до міжнародних наукометричних баз даних. Доповіді світового рівня В.М. Сидорця опубліковано у матеріалах асамблеї Міжнародного інституту зварювання, міжнародних конференцій, що проводились в Китаї, Грузії, Ізраїлі.

Відхід з життя вченого такого рівня у розквіті творчих сил і знань, це непоправна втрата для Інституту і української науки.

*Колектив Інституту
електрозварювання ім. Є.О. Патона,
редколегія та редакція журналу
«Автоматичне зварювання»*

Пам'яті І.В. Пентегова



29 вересня 2020 р. на 89-му році пішов з життя Ігор Володимирович Пентегов, блискучий вчений, професор, доктор технічних наук, визнаний фахівець в галузі зварювання, теоретичних основ електротехніки та електричних машин. Його науковий стиль відзначався широким поглядом на предмет дослідження, незалежним способом мислення та оригінальністю підходів до розв'язання задач.

Ігор Володимирович народився в місті Надеждинськ (тепер Серов) на Уралі 29 лютого 1932 р. в родині викладача металургійного технікуму Володимира Арсентійовича Пентегова і бібліотекарки вечірньої школи Олександри Антонівни Пентегової. Батько Ігоря Володимировича у 1942 р. загинув на фронті в боях за Донбас.

У 1950 р. Ігор Володимирович вступив на електромеханічний факультет Московського енергетичного інституту – провідного електротехнічного інституту СРСР, який закінчив з відзнакою у 1956 р. і був направлений на найбільше в країні ракетобудівне підприємство «Південний машинобудівний завод». Працюючи інженером на «Південмаші», він зайнявся науковою роботою і отримав свій перший патент з конденсаторного зварювання. Патент був настільки оригінальним, що його відразу помітили в Києві. З 1960 по 1963 рр. І.В. Пентегов навчався в аспірантурі Інституту електротехніки АН УРСР. Науковим керівником молодого дисертанта став відомий вчений, академік Костянтин Костянтинович Хренов. Кандидатську дисертацію «Дослідження електромагнітних процесів в конденсаторних зварювальних машинах» Ігор Володимирович захистив у 1963 р., після чого продовжив свій трудовий шлях в електротехнічному відділі Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона АН УРСР під керівництвом академіка Володимира Костянтиновича Лебедева. У 1974 р. Ігор Володимирович захистив докторську дисертацію з теоретичних основ електротехніки «Основи теорії зарядних кіл ємнісних накопичувачів енергії», у 1983 р. отримав звання професора. У 1985 р. І.В. Пентегов був удостоєний Премії Ради Міністрів СРСР за розробку теорії електромагнітних екранів для захисту операторів при радіочастотному зварюванні труб. В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона Ігор Володимирович пройшов шлях

від молодшого наукового співробітника до завідувача відділом електромагнітних процесів в джерелах живлення. До теперішнього часу працював провідним науковим співробітником у відділі фізики газозового розряду і техніки плазми під керівництвом академіка Ігоря Віталійовича Кривцуна.

Професор Пентегов домігся видатних успіхів у розробці джерел живлення акумульованою енергією, джерел живлення машин для дугового і контактного зварювання, розробив теорію електромагнітних екранів, успішно займався розробкою теорії оптимізації зварювальних та силових трансформаторів різних типів, реакторів та зварювальних джерел живлення, створивши джерела живлення для зварювання алюмінію і його сплавів, що не мають світових аналогів, займався фундаментальними дослідженнями динаміки зварювальної дуги і детермінованого хаосу в колах з дугою. Запропонована ним модель динамічної дуги узагальнює всі відомі моделі й відображає світовий рівень у цій області. Займався дослідженнями теслівських процесів зарядки ємності на основі створеної ним теорії зарядних кіл ємнісних накопичувачів енергії, в результаті чого науково обґрунтував метод передачі енергії по одному проводу.

Професор Пентегов завжди відрізнявся неординарним мисленням і був невичерпним генератором наукових ідей, багато з яких були підхоплені і реалізовані його учнями. Під керівництвом професора Пентегова підготовлено 18 кандидатів технічних наук і 2 доктори технічних наук.

За своє наукове життя І.В. Пентегов опублікував понад 420 наукових робіт, з яких 3 монографії, понад 260 наукових статей і 160 авторських свідоцтв та патентів.

Ігор Володимирович присвятив себе науці, являючи собою зразок представника української школи електротехніки та зварювання. Світлу пам'ять про чудову людину, вченого і учителя назавжди зберуть ті, кому довелося бути знайомим та працювати з Ігорем Володимировичем Пентеговим.

*Колектив Інституту
електрозварювання ім. Є.О. Патона,
редколегія та редакція журналу
«Автоматичне зварювання»*

Зменшення обсягів додаткової обробки на 70 %: Імпульсне зварювання за допомогою Fronius TransSteel Pulse

Компанія Fronius оновила серію TransSteel, додавши функцію імпульсного зварювання. Функція імпульсної зварювальної дуги не лише прискорює зварювання листів значної товщини, але й знижує необхідність у наступній додатковій обробці з огляду на меншу кількість зварювальних бризок.

В імпульсному режимі можна не використовувати проміжну дугу, яка створює бризки та важко піддається контролю. Через меншу кількість бризок на 70 % зменшується й обсяг наступної додаткової обробки деталей. Крім того, з імпульсною дугою швидкість зварювання підвищується на 30 %. Усі ці переваги тепер доступні також у моделях Fronius TransSteel 3000 Compact, TransSteel 4000 та TransSteel 5000.

Імпульсне прихоплення для уникнення деформації матеріалу. Пристрої TransSteel розроблено спеціально для роботи зі сталлю. Розширений спектр функцій, до яких, зокрема, входить функція імпульсного зварювання, дає змогу виконувати різноманітні операції і робить ці джерела струму дійсно універсальними. Функція точкового зварювання допомагає отримувати однакові зварювальні точки

для ідеального прихоплення деталей. Зварювання з інтервалами не лише забезпечує створення ідеального хвилястого шва. Менший тепловий вплив знижує ризик деформації матеріалу під час роботи з тонкими листами.

Спеціальні налаштування забезпечують ідеальні властивості дуги. Універсальні характеристики функції Steel чудово підходять для простих і швидких зварювальних робіт. Функція Steel Root призначена для виконання кореневих проходів. Вона також створює м'яку та стабільну дугу короткого замикання для надійного перекриття широких зазорів. А от жорстка концентрована дуга програми Steel Dynamic забезпечує швидке зварювання та глибоке проплавлення. Якщо потрібне глибоке проплавлення з мінімальною кількістю бризок, ідеальним вибором стане модель TransSteel Pulse із функцією Pulse Controlled



Компанія Fronius додала функцію імпульсного зварювання до пристроїв серії TransSteel, спростивши процес зварювання



Імпульсне зварювання допомагає отримати акуратний хвилястий шов та мінімізувати деформацію матеріалу під час прихоплення



Завдяки зрозумілому принципу роботи TransSteel можна використовувати без попереднього навчання

Spray Arc. У режимі SynchroPulse струм зварювання проходить між двома робочими точками з частотою до 5 Гц. Постійне чергування високого і низького струму полегшує зварювання у вертикальному положенні і допомагає отримати чіткий хвилястий шов на алюмінієвих сплавах.

Три категорії живлення, дві моделі, одне рішення. Завдяки інтуїтивно зрозумілому принципу роботи TransSteel можна використовувати без попереднього навчання. Усі необхідні параметри зварювання регулюються на передній панелі. До того ж, пристрій оснащено зручною функцією протоколюван-



TransSteel 3000 Compact Pulse – це багатофункціональний пристрій, який забезпечує високоякісне виконання усіх трьох процесів: MIG/MAG, TIG та зварювання стрижневим електродом



TransSteel 4000 і 5000 Pulse мають окремий механізм подачі дроту, тому вони особливо підходять для інтенсивних зварювальних робіт

ня параметрів зварювання. До роз'єму на задній панелі блоку живлення можна підключити USB-накопичувач і зберегти на ньому всі важливі відомості, зокрема, час виконання операцій, характеристики пристроїв, а також значення струму, напруги та швидкості подавання дроту.

Компанія Fronius додала функцію імпульсного зварювання до трьох моделей. TransSteel 3000 Compact Pulse – це багатофункціональний пристрій, який забезпечує високоякісне виконання усіх трьох зварювальних процесів. Завдяки компактній конструкції він ідеально підходить для ремонтних робіт та виконання широкого спектру зварювальних операцій на будівельному майданчику і в майстерні. Функція імпульсного зварювання на TransSteel 4000 Pulse і TransSteel 5000 Pulse забезпечує більше можливостей і вищу швидкість для повторюваних зварювальних робіт або дрібносерійного виробництва. Від версії Compact ці пристрої відрізняються підвищеною потужністю та наявністю окремого механізму подавання дроту.

<https://www.fronius.com/en/welding-technology/info-centre/press/transsteel-pulse>

Новий роботизований зварювальний комплекс Fronius

Новий роботизований зварювальний комплекс Fronius дає змогу скоротити тривалість операцій – у двосекційному режимі роботи маніпулятор підхоплює наступну деталь іще до того, як завершиться зварювання попередньої.

На сучасних комерційних та промислових підприємствах дедалі більшого поширення набуває зварювання із використанням роботів. Роботизація зварювання не лише допомагає скоротити до мінімуму час простою – дуже широкий діапазон рухів, доступний для маніпуляторів робота, дає змогу зварювати компоненти найрізноманітнішої форми. Новий роботизований зварювальний комплекс FRW від Fronius створений саме для таких завдань. Ця система, в якій втілено інноваційні зварювальні технології Fronius, характеризується оптимальним співвідношенням ціна/ефективність.

Комплекс можна успішно використовувати й у дрібних, й у великих компаніях для потреб широкомасштабного серійного виробництва та для зварювання різноманітних за формою компонентів, залежно від потреб комерційних підприємств. Роботизований зварювальний комплекс, призначений для зварювання широкого спектру деталей, підвищує продуктивність робочих процесів та забезпечує окупність обладнання протягом прийнятного терміну.

Ми пропонуємо на вибір три типи зварювальних комплексів, що відрізняються за конструкцією обертових маніпуляторів, які підхоплюють деталі та вносять їх у робочу зону зварювального комплексу. Кожен із варіантів може бути поєднано з різними моделями роботів. Роботи, маніпулятори та елементи ке-

рування встановлюються на єдину платформу, що дає змогу прискорити та спростити складання й монтаж комплексу. Ще одна перевага роботизованого зварювального комплексу FRW полягає у скороченні тривалості циклів зварювання. Цього вдається досягти за рахунок використання двосекційного режиму роботи: маніпулятор не простоює у той час, коли відбувається зварювання деталі, й може вже підхоплювати наступну.

Програмне забезпечення з можливостями користувацького програмування забезпечує неперервність робочого процесу. Додаткове програмне забезпечення для моделювання та програмування в автономному режимі надає змогу не лише програмувати рухи робота, а й оптимізувати процес зварювання зі свого ПК. Для цього не потрібно переривати власне процес зварювання, а отже, можна уникнути зайвих простоїв. Серед інших переваг комплексу – прискорені запуск і заміна компонентів та підвищення продуктивності.

Роботизоване зварювання дає змогу з'єднувати за одиницю часу помітно більше деталей порівняно зі зварюванням у ручному режимі й не поступається йому за рівнем якості, незалежно від складності форми зварюваних деталей. Усе це створює важливу й відчутну конкурентну перевагу. У Європі наразі запускають нові системи роботизованого зварювання, а згодом ця тенденція пошириться й на регіони поза її межами.



Роботизований зварювальний комплекс FRW

Welding in the World №8, 9, 10, 11, 2020

Volume 64, issue 8, August 2020

<https://link.springer.com/journal/40194/volumes-and-issues/64-8>

Виготовлення SS316L до Ni80Cr20-градуєваних структур методом 3D-осадження металу за допомогою плазми. *K. Hoefler, J. Rodriguez, A. Haelsig, K.-G. Abstoss & P. Mayr.*

Дріт-лазерне дугове осадження при адитивному виробництві алюмінієвих сплавів з цинком. *E. Eimer, W. Suder, S. Williams & J. Ding.*

Вплив параметрів обробки на механічні та втомні властивості сталі 316 L, виготовленої селективним лазерним плавленням. *A. Damiens, H. Bonnefoy, I. Titeux.*

Розробка нового процесу TIG гарячим дротом для адитивного виробництва. *E. Spaniol, T. Ungethüm, M. Trautmann, K. Andrusch, M. Hertel & U. Füssel.*

Конструкція з декількох матеріалів при адитивному виробництві – перевірка доцільності. *M. Leicher, S. Kamper, K. Treutler & V. Wesling.*

Вимірювання розміру зони розплаву в процесі дуго-дротового адитивного виробництва за допомогою високодинамічної двоколірної пірометричної камери. *C. Halisch, T. Radel, D. Tyralla & T. Seefeld.*

Одноетапний процес виробництва мікроструктурного функціонального сплаву Ti6Al4V за допомогою виробництва лазерного порошкового плавлення. *Yaoyi Geng, Brendan Phelan, Ramesh Raghavendra & Noel Harrison.*

Вплив роздільної здатності на рентгенівське КТ-вимірювання металевих АМ-гратчастих структур, отриманих адитивним виробництвом. *Jitendra Singh Rathore, Caroline Vienne, Yann Quinsat & Christophe Tournier.*

Вплив міжпроходових умов охолодження на мікроструктуру та розтягуючі властивості деталей із сплаву Ti6Al4V виробництва WAAM при дугово-дуговому адитивному виробництві. *L. Vázquez, N. Rodriguez, I. Rodriguez, E. Alberdi & P. Alvarez.*

Оцінка тандемного керування короткого замикання GMAW для поліпшення осадження при адитивному виробництві при дуговому зварюванні в захисних газах великих корабельних компонентів з нікелевої алюмінієвої бронзи. *A. Queguineur, J. Marolleau, A. Lavergne & G. Rückert.*

Мікроструктура та механічні властивості сплаву CoCrW, виготовленого адитивно з використанням лазерного осадження металу. *Masashi Miyake, Tomoki Matsuda, Tomokazu Sano, Akio Hirose, Yasutomo Shiomi & Mitsuo Sasaki.*

Підвищення виробничої ефективності адитивного виробництва методом дугового зварювання за допомогою вдосконалених стратегій охолодження. *Uwe Reisgen, Rahul Sharma, Samuel Mann & Lukas Oster.*

Ефективні об'ємні методи неруйнівного контролю для деталей адитивного виробництва. *A.-F. Obaton, B. Butsch, E. Carcreff, N. Laroche, J. Tarr & A. Donmez.*

Термомеханічне моделювання накладених шарів, виготовлених за допомогою дуго-дугового адитивного виробництва та за допомогою «холодного» зварювання. *C. Cambon, S. Rouquette, I. Bendaoud, C. Bordreuil, R. Wimpory & F. Soulie.*

Моделювання впливу параметрів впорскування на ефективність порошку при лазерній наплавці. *Xinyong Gong, Wei You, Xu Li & Lei Wang.*

Адитивне виробництво осадження на основі дугового зварювання для зміцнення кузова в автомобільній техніці. *A. Josten & M. Höfemann.*

Volume 64, issue 9, September 2020

<https://link.springer.com/journal/40194/volumes-and-issues/64-9>

Вплив мікролегування Nb на мікроструктуру та властивості з'єднань алюмінієвого сплаву A7204-T4 за допомогою гібридного зварювання «волоконний лазер +TIG». *Shikai Wu, Can Wang, Zhongxiu Li, Peng Wen, Song Zhang, Zhendong Mao & Xiaohui Han.*

Етапи точкового зварювання тертям с перемішуванням та контактного точкового зварювання при отриманні з'єднань алюмінію з великою загальною товщиною листа. *Christopher Schmal & Gerson Meschut.*

Дослідження впливу параметрів процесу ультразвукового з'єднання на механічні властивості металокомполітичних гібридних з'єднань. *E. E. Feistauer, J. F. dos Santos & S. T. Amancio-Filho.*

Розробка методу статистичного моделювання для опису викидів зварювальних димів при дуговому зварюванні газових металів з використанням перехідних характеристик процесу. *Uwe Reisgen, Rahul Sharma, Martin Christ & Samuel Mann.*

Застосування ефективного повного проплавлення Т-образних зварних швів у зварних з'єднаннях. *H. Taheri, G. C. Clifton, P. Dong, M. Karpenko, G. M. Raftery & J. B. P. Lim.*

Механіка руйнування та оцінка терміну служби коробчастих зварних конструкцій: аналіз МКЕ та параметричне проектування. *E. Delkhosh, M. Khurshid, I. Barsoum & Z. Barsoum.*

Характеристики одновісного та двовісного деформування зварних з'єднань сплаву AA7075-O при зварюванні тертям. *Doğan Acar, Mehmet Karali, Ömer Necati Cora, Dwight Burford & Muammer Koç.*

Техніко-економічне обґрунтування використання вбудованих волоконно-оптичних датчиків для моніторингу лазерних метало-полімерних з'єднань. *K. Schricker, M. Ganß, C. Könke & J. P. Bergmann.*

Підходи та можливості зменшення залишкових напружень в індукційно паяних цементованих твердосплавних / сталевих з'єднаннях. *K. Bobzin, M. Öte & J. Hebing.*

Міркування щодо нової концепції вакуумної пайки алюмінію та міді. *Ann-Kathrin Sommer, Matthias Türpe, Uwe Füssel & Bernd Grünwald.*

Застосування евтектичного сплаву з високою ентропією Nb0.73CoCrFeNi2.1 для високотемпературних з'єднань. *W. Tillmann, L. Wojarski, D. Stangier, M. Manka & C. Timmer.*

Концепція для розрахунку розподілу теплової потужності в катодній зоні при зварюванні GMA. *O. Mokrov, M. Simon, A. Schiebahn & U. Reisgen.*

Аналіз невизначеності калориметра водного потоку при зварюванні в режимах короткого замикання та розпилення. *R.A. Ribeiro, E.B.F. Dos Santos, P.D.C. Assunção, K.J. Daun & A.P. Gerlich.*

Спрощена модель напруги в GMAW. *G. Zhang, G. Goett, D. Uhrlandt, Ph. Lozano & R. Sharma.*

Volume 64, issue 10, October 2020
<https://link.springer.com/journal/40194/volumes-and-issues/64-10>

Чисельна модель для моделювання впливу швидкості деформації на товщину евтектичної смуги. *J. Draxler, P. Åkerström, J. Edberg, L.-E. Lindgren, S. Singh, T. Raza & J. Andersson.*

Комплексний огляд зварних з'єднань охолоджуваного резервуару для зберігання аміаку методом магнітної пам'яті металу та звичайними методами НК. *Sergey Kolokolnikov, Anatoly Dubov, Andrei Medvedev & Dmitry Boriskin.*

Дослідження залишкових напружень у поліпропілені за допомогою зварювання нагрітим інструментом. *Andrea Wübbeke, Volker Schöppner, Bastian Geißler, Michael Schmidt, Arnaud Magnier, Tao Wu, Thomas Nien-dorf, Fabian Jakob & Hans-Peter Heim.*

Перевірка оцінки втомної міцності сталевих з'єднань, оброблених високочастотною механічною проковкою, при навантаженні зі змінною амплітудою. *M. Leitner, M. Stoschka, Z. Barsoum & M. Farajian.*

Дослідження характеристик втоми та руйнування для низькотемпературних металів з урахуванням впливу різних легуючих компонентів. *Jeong Yeol Park & Myung Hyun Kim.*

Вплив недостатньої гомогенізації під час екструзії поліетиленових труб на цілісність стику з'єднання. *Changyi Yu, Mike Troughton, Amir Khamsehnezhad & Xiang Zhang.*

Покращення якості зварного шва завдяки попередньому лазерному очищенню для лазерного стикового зварювання пластин з високоміцної низьколегованої сталі. *Lixin Zhu, Bingtao Sun, Zheng Li, Xiaoming Pan, Yifeng Chen & Yu Cao.*

Підвищення точності розрахункової втомної стійкості зварних швів за рахунок врахування статистичного ефекту розміру. *Andreas Deinböck, Ann-Christin Hesse, Michael Wächter, Jonas Hensel, Alfons Esderts & Klaus Dilger.*

Поведінка сплаву 5083-H15, що містить Zr і Sc при електронно-променевому зварюванні. *Yu-Chih Tzeng & Ren-Yu Chen.*

Високочастотне імпульсно-модульоване прямокутне зварювання TIG змінним струмом з алюмінієвого сплаву AA6061-T6. *Yajie Wang, Maoai Chen & Chuan-song Wu.*

Вплив температури пайки та часу витримки на змочуваність при паянні алмазу та аналіз границі пайки. *Jigang Chen, Xiaokang Wang, Xiangrui Li, Na Li & Qingxiang Yang.*

З'єднання SiC кераміки та Mo із сплавом AuPd-CoMnNi та міжфазні реакції. *Hongliang Feng, Bo Chen, Haishui Ren, Huaping Xiong, Wenwen Li, Yaoyong Cheng & Wenjiang Zou.*

Явища переривання дуги у вузькому проміжку при зварюванні пульсуючою дугою. *Wenji Liu, Zongbiao Jia, Jianfeng Yue, Haihua Liu & Liangyu Li.*

Візуалізація поведінки дугової плазми та розплавленого дроту в процесі дугового CO₂ – зварювання за допомогою тривимірного чисельного моделювання. *Y. Ogino, S. Asai & Y. Hirata.*

Мікроструктура та міцність на розрив з'єднання алюміній / нержавіюча сталь, отримані інерційним та неперервним тертям. *Yong Liu, Haiyan Zhao, Yun Peng & Xiaofei Ma.*

Volume 64, issue 11, November 2020
<https://link.springer.com/journal/40194/volumes-and-issues/64-11>

Мікроструктура та розвиток корозії мартенситної нержавіючої сталі 13Cr – 4Ni-1Mo. *A. Farzadi & R. Kalantarian.*

Оцінка втоми в зварних з'єднаннях на основі геометричних змін, виміряних лазерним скануванням. *Gustav Hultgren, Zuheir Barsoum.*

Розподіл напружень біля гарячих точок «типу-b» в зварних з'єднаннях. *Norio Yamamoto, Tomohiro Sugimoto, Kinya Ishibashi & Satoyuki Tanaka*

Вібраційне зварювання деталей з кутовими ділянками у напрямку вібрації. *Sascha Vogtschmidt, Isabel Fiebig, Volker Schoeppner.*

Дослідження стійкості залишкових напружень при стисненні, спричинених високочастотним механічним впливом, при циклічних навантаженнях з шиповими навантаженнями. *Hector Ruiz, Naoki Osawa, Sherif Rashed.*

Концентрація напружень у хрестоподібних зварних з'єднаннях в режимах осьового та згинального навантаження. *Krzysztof L. Molski, Piotr Tarasiuk, Grzegorz Glinka.*

Поведінка границі TZM / графіт при високотемпературній пайці твердими паяльними матеріалами на основі Ti. *Quanbin Lu, Weimin Long, Sujuan Zhong, Jian Qin, Yongtao Jiu & Huawei Sun.*

Вивчення будови та механічних властивостей машинобудівних виробів, виготовлених з аустенітно-мартенситної сталі, з використанням техніки металевої магнітної пам'яті металів. *Anatoly Dubov, Alexander Dubov, Artem Marchenkov & Sergey Kolokolnikov.*

Безпосереднє спостереження та чисельне моделювання поведінки розплавленого металу та розплавленого шлаку в процесі електрошлакового зварювання. *Y. Ogino, S. Fukumoto, S. Asai & T. Tsuyama.*

Виготовлення та аналіз методом скінченних елементів циліндра з алюмінієвого сплаву 4043 на основі перенесення холодного металу при адитивному виробництві. *R. Pramod, S. Mohan Kumar, B. Girinath, A. Rajesh Kannan, N. Pravin Kumar & N. Siva Shanmugam.*

Властивості анізотропії сплаву на основі нікелю, виготовленого роботом при дрого-дуговому адитивному виробництві. *Thomas Hassel, Torben Carstensen.*

Мікроструктура та механічні властивості паяного з'єднання з алюмінієвого сплаву 6063 із присадним металом Al-Cu-Si-Ni. *Chong Pei, Xin Wu, Guoqing Zhang, Yaoyong Cheng, Xinyu Ren, Wei Wang & Huaping Xiong.*

Моделювання та термічне моделювання квазіодногочасного лазерного зварювання прозорих пластмас без поглиначів. *Nam-Phong Nguyen, Stefan Behrens, Maximilian Brosda, Alexander Olowinsky & Arnold Gillner.*

Надійність методів високочастотної механічної обробки та вплив якості зварного шва на покращення терміну служби зварних з'єднань. *R. Aldén, Z. Barsoum, T. Vouristo & M. Al-Emrani*

Міжзернисте крихке розтріскування, спричинене проникненням рідкого цинку, при точковому зварюванні оцинкованої високоміцної сталі. *Siva Prasad Murugan, Jong Bae Jeon, Changwook Ji & Yeong-Do Park.*

ПЕРЕДПЛАТА 2021

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

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделоллю.

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

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

Передплата на електронну версію журналів.

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

Передплата через сайт видавництва:

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

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



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



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



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

РЕКЛАМА В ЖУРНАЛАХ

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках журналів.

Перша сторінка обкладинки – 200x200 мм.

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

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

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

Розміри журналів після обрізу 200x290 мм.

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

ВАРТІСТЬ РЕКЛАМИ

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

ВИДАВНИЦТВО

Міжнародна Асоціація «Зварювання»
 03150, Київ, вул. Казимира Малевича, 11
 Тел./факс: 38044 200-82-77
 E-mail: journal@paton.kiev.ua
<https://patonpublishinghouse.com>