

З А В Т О М А Т И Ч Н Е 8 С В А Р Ю В А Н Н Я 2021

Автоматическая сварка

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Automatic Welding

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

МЕТАЛУРГІЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА НАПЛАВЛЕННЯ

- Книш В.В., Соловей С.О., Рябцев І.О., Бабінець А.А. Втомна довговічність зразків зі сталі 40Х після зносостійкого наплавлення з підшаром з низьколегованої сталі.....3
- Размишляев О.Д., Агеева М.В., Білик О.Г., Халед Е. Вплив поздовжнього керуючого магнітного поля на ефективність процесу дугового наплавлення.....9
- Лещинський Л.К., Іванов В.П., Матвієнко В.М., Степнов К.К., Воз'янов Є.І. Розробка технології наплавлення робочого шару змінного складу на обтискні прокатні валки.....14
- Стефанів Б.В. Розробка технології виготовлення бурових доліт із захисним покриттям робочих органів.....18

ПРОЦЕСИ ПАЙКИ

- Максимова С.В., Зволінський І.В., Іванченко Е.В. Вплив легуючих елементів на температури солідусу і ліквідусу сплавів системи Cu–Mn–Ni–Si.....24

3D ДРУК

- Сенченков І.К., Юрженко М.В., Червінко О.П., Масючок О.П., Кораб М.Г. Чисельне моделювання напружено-деформованого стану елементів, які виготовляються за допомогою 3D друку.....29

ЗВАРЮВАННЯ В ТВЕРДІЙ ФАЗІ

- Кучук-Яценко С.І., Гушин К.В., Зягор І.В., Самоотрясов С.М., Завертанний М.С., Левчук А.М. Структура та механічні властивості з'єднань алюмінієвого сплаву 2219-T87, отриманих контактним стиковим зварюванням опаленням.....35
- Добрушин Л.Д., Бризгалін А.Г., Шльонський П.С., Пекар Є.Д., Венцев С.Д. Розробка технології виготовлення апаратних затискачів з використанням зварювання вибухом.....41

ЗВАРЮВАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

- Костін О.М., Ярослав О.О., Ярослав Ю.О., Савенко О.В. Комплекс УПЕ-500 для визначення зварювально-технологічних характеристик покритих електродів.....47

ЗВАРЮВАННЯ ЗА КОРДОНОМ

- Welding in the World № 7–8, 2021.....53

СПАДЩИНА Б.Є. ПАТОНА

- Усе залишається людям.....54

ІНФОРМАЦІЯ

- Пристрій «ВВК/ТВА-1» для швидкого і точного візуального контролю протяжних металоконструкцій.....56
- До 100-річчя Дудка Д.А.58
- Пам'яті В.Д. Шелягіна.....60

CONTENT

METALLURGY AND TECHNOLOGY OF WELDING AND SURFACING

- Knysh V.V., Solovej S.O., Ryabtsev I.O., Babinets A.A. Fatigue life of specimens from 40Kh steel after wear-resistant surfacing with a low-alloy steel sublayer3
- Razmyshlyayev O.D., Ageeva M.V., Bilyk O.G., Khaled E. Influence of longitudinal controlling magnetic field on the effectiveness of arc surfacing process9
- Leshchinskiy L.K., Ivanov V.P., Matviyenko V.M., Stepnov K.K., Vozyanov E.I. Development of surfacing technology for the working layer of variable composition on the blooming rolls14
- Stefaniv B.V. Development of technology of manufacture of drill bits with protective coating of working bodies.....18

BRAZING

- Maksymova S.V., Zvolinskyi I.V., Ivanchenko E.V. Influence of alloying elements on solidus and liquidus temperatures of Cu–Mn–Ni–Si system alloys.....24

3D PRINTING

- Senchenkov I.K., Iurzhenko M.V., Chervinko O.P., Masiuchok O.P., Korab M.G. Numerical modelling of stress-strain state of elements manufactured by 3D printing.....29

SOLID PHASE WELDING

- Kuchuk-Yatsenko S.I., Hushchyn K.V., Ziakhor I.V., Samotryasov S.M., Zavertannyi M.S., Levchuk A.M. Structure and mechanical properties of 2219-T87 aluminum alloy joints produced by flash butt welding35
- Dobrushin L.D., Bryzgalin A.G., Shlonskiy P.S., Pekar E.D., Ventsev S.D. Development of the technology of manufacturing hardware clamps, using explosion welding41

WELDING CONSUMABLES

- Kostin O.M., Yaros O.O., Yaros Y.O., Savenko O.V. UPE-500 complex for determining welding and technological characteristics of coated electrodes47

WELDING ABROAD

- Welding in the World № 7–8, 2021.....53

B.E. PATON'S HERITAGE

- Everything remains for people.....54

INFORMATIONS

- VIK/TVA-1 device for fast and accurate visual inspection of stretched metal structures56
- To the 100th anniversary of D.A. Dudko.....58
- In memory of V.D. Shelyagin.....60



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



Автоматичне зварювання Автоматическая сварка Automatic Welding

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

Засновники

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

Адреса

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

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

Рекомендовано до друку
редакційною колегією журналу

Свідоцтво про державну
реєстрацію KB 4788 від 09.01.2001

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

Передплата 2021

Передплатний індекс 70031.

12 випусків на рік (видається щомісячно).

Друкована версія: 2880 грн. за річний комплект
з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

Електронна версія: 2880 грн. за річний комплект
(випуски журналу надсилаються електронною поштою
у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера
передплатника надається доступ до архіву журналу).
Передплата можлива на попередні випуски за будь-який рік.

Журнал «Автоматичне зварювання» перевидается
англійською мовою під назвою
«The Paton Welding Journal»:
www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

За зміст рекламних матеріалів
редакція журналу відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

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

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

Founders

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

Address

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

The Journal is included in the list of publications approved
by the Ministry of Education and Science of Ukraine
for the publication of works of applicants for academic degrees
in specialties 131, 132, 151.

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for printing editorial board of the Journal

Certificate of state registration
of KV 4788 dated 09.01.2001
ISSN 0005-111X

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

Subscription 2021

Subscription index 70031.

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

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

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

Subscription is possible for previous issues for any year.

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

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

ВТОМНА ДОВГОВІЧНІСТЬ ЗРАЗКІВ ЗІ СТАЛІ 40Х ПІСЛЯ ЗНОСОСТІЙКОГО НАПЛАВЛЕННЯ З ПІДШАРОМ З НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ

В.В. Книш, С.О. Соловей, І.О. Рябцев, А.А. Бабінець

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

Досліджено опір втомному руйнуванню багатошарового матеріалу, зносостійкий шар якого наплавлений порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром з низьколегованого матеріалу, наплавленого дротом ПП-Нп-12Х1МФ. Конструкція наплавлених зразків і методика їх випробувань імітували умови експлуатації сталевих прокатних валків. Комплексна методика оцінки опору втомному руйнуванню багатошарових наплавлених зразків включала три етапи: встановлення циклічної довговічності зразків після виготовлення наплавлення; дослідження циклічної тріщиностійкості різних наплавлених шарів; визначення втомної довговічності зразків, які в процесі попередніх випробувань мали в наплавленому шарі втомні тріщини, після ремонтного наплавлення. Встановлено, що циклічна довговічність зразків з вуглецевої сталі 40Х, наплавлених порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром з низьколегованої сталі 12Х1МФ при рівні максимальних напружень 500 МПа знаходиться в діапазоні 346...716 тис. циклів. Виявлено особливості кінетики втомного руйнування досліджуваного багатошарового матеріалу. Встановлено, що в наплавленому металі (в зносостійкому шарі та в підшарі з низьколегованої сталі) втомна тріщина розвивається нестабільно, постійно змінюючи швидкість та напрям. Показано, що видалення втомних тріщин та наступне наплавлення місць їх видалення дозволяє відновити циклічну довговічність зразка до рівня вихідного стану, тобто збільшити загальну довговічність у 2 рази. Бібліогр. 16, табл. 4, рис. 7.

Ключові слова: дугове наплавлення, ремонтне наплавлення, підшар, втомна довговічність, тріщини втоми, коефіцієнт інтенсивності напружень.

Широко відомо, що в металургійній та машинобудівній галузях значна кількість деталей та інструментів експлуатуються в умовах дії циклічних механічних навантажень [1]. Такі складні умови експлуатації призводять, зокрема, до появи на поверхні деталей втомних тріщин, що, на прикладі прокатних валків, може призвести до браку металопродукції, виходу з ладу обладнання та, як наслідок, значних матеріальних втрат [1–6].

З метою підвищення довговічності таких деталей, які виготовляються з середньовуглецевих сталей типу 35ХМ, 45, 50, 40Х, 50Х та ін., часто застосовують виготовне або ремонтно-відновлювальне наплавлення на них зовнішнього зносостійкого шару металу. Найчастіше для цього застосовуються електродні матеріали, які забезпечують отримання наплавленого металу типу середньо- або високолегованих напівтеплостійких або теплостійких інструментальних сталей 25Х5ФМС, 30Х4В2М2ФС, 35В9Х3СФ та ін. [7, 8].

Широко відомо, що для поліпшення зварюваності основного та наплавленого металу, особливо, якщо вони відносяться до різнорідних класів металів, використовують наплавлення проміжного пластичного шару металу (підшару). Також при використанні матеріалу підшару з проміжним значенням коефіцієнта температурного розширення можна дещо знизити залишкові наплавочні напруження, що може позитивно вплинути на загальну втомну довговічність наплавленого зразка чи деталі [7, 8]. З практичного досвіду відомо, що в якості матеріалу підшару найчастіше

обирають низьковуглецеві, низьколеговані матеріали, які забезпечують отримання пластичного металу типу сталей 08кп, 08Г2С та ін. [8].

Так, в роботі [9] було показано, що застосування пластичного металу типу 08кп в якості підшару дозволило підвищити втомну довговічність дослідних зразків при циклічному механічному навантаженні у порівнянні з аналогічними зразками без підшару у 1,4 рази. В роботах [10, 11], в результаті комплексної оцінки втомної довговічності зразків з таким же матеріалом підшару, але наплавлених за іншою технологією, було встановлено, що при виготовленні наплавленні дротом Св-08А на сталь 40Х із наступним наплавленням зносостійкого та термостійкого шару сталі типу 25Х5ФМС, втомна довговічність зразків у 2 рази вища у порівнянні зі зразками, наплавленими без підшару.

Мета роботи – експериментальне порівняльне дослідження впливу низьколегованого підшару металу на втомну довговічність багатошарового матеріалу при виготовленні та ремонтному (відновлювальному) зносостійкому наплавленні.

Методики, технології та матеріали досліджень. З метою порівняння впливу матеріалу підшару на втомну довговічність наплавлених зразків, в даній роботі використовували підшар з низьколегованої сталі типу 12Х1МФ. Сталь даної марки було обрано виходячи з її більш високих механічних властивостей у порівнянні зі сталлю 08кп (табл. 1).

Для встановлення доцільності застосування підшару з низьколегованої сталі з метою підви-

Книш В.В. – <https://orsid.org/0000-0003-1289-4462>, Соловей С.О. – <https://orsid.org/0000-0002-1126-5536>,

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

© В.В. Книш, С.О. Соловей, І.О. Рябцев, А.А. Бабінець, 2021

Таблиця 1. Механічні властивості основного й наплавленого металів [12]

Марка матеріалу	Механічні властивості (після нормалізації)					
	Умовна межа течу- чості $\sigma_{0,2}$, МПа	Межа міцності σ_b , МПа	Відносне подовження δ , %	Відносне звуження ψ , %	Ударна в'язкість KCU , Дж/см ²	Твердість HV
40X	345	590	12,5	52	7,5	174...217
08кп*	196	320	33	60	-	≤ 131
12X1МФ	255	470	21	55	98	≤ 217
4X5МФС*	1570	1710	12	54	51	444...478

Примітка. * – у літературі відсутні дані по механічних властивостях металу, наплавленого дротами Св-08А та ПП-Нп-25Х5ФМС. Тому наведені дані для їх аналогів (найбільш близьких за хімічним складом і механічним властивостям), відповідно сталей 08кп та 4Х5МФС.

Таблиця 2. Хімічний склад основного й наплавленого металів [12]

Марка матеріалу	Масова частка елементів, %							
	C	Mn	Si	Cr	V	Mo	S	P
40X	0,36...0,40	0,5...0,8	0,17...0,37	0,8...1,1	-	-	≤0,035	≤0,035
Св-08А**	0,05...0,12	0,2...0,4	0,1...0,3	-	-	-	≤0,04	≤0,04
08кп	0,05...0,12	0,25...0,5	≤0,3	≤0,10	-	-	≤0,035	≤0,04
12X1МФ	0,10...0,15	0,4...0,7	0,17...0,37	0,9...1,2	0,15...0,3	0,25...0,35	≤0,025	≤0,035
ПП-Нп- 25Х5ФМС**	0,20...0,32	0,5...1,0	0,80...1,30	4,6...5,8	0,2...0,6	0,9...1,5	≤0,04	≤0,04
4Х5МФС**	0,32...0,40	0,2...0,5	0,90...1,20	4,5...5,5	0,3...0,5	1,2...1,5	≤0,04	≤0,04

Примітка. ** – дана масова частка елементів у наплавленому металі.

щення втомної довговічності багат шарових на-
плавлених зразків, використовували раніше ро-
зроблену технологію наплавлення, яка детально
описана в роботах [10, 11]. Для отримання до-
стовірних результатів досліджень марки сталі ос-
новного металу і наплавленого зносостійкого шару
металу (сталь 40X та 25Х5ФМС, відповідно) при
наплавленні зразків без підшару та з підшаром різ-
них типів були однакові. Для наплавлення проміж-
ного шару використовували дослідний порошко-
вий дріт марки ПП-Нп-12Х1МФ діаметром 1,8 мм.
Хімічний склад і механічні властивості матеріалів,
використаних у роботі, наведено в табл. 1, 2 [12].

Дослідження виконували в три етапи, для кож-
ного з яких було виготовлено по 3...5 призматич-
них зразків розмірами 350×40×20 мм, які в подаль-
шому випробували використовуючи розроблену
комплексну методику оцінки опору багат шарово-
го матеріалу втомному руйнуванню [10, 11]. Дана
методика включає наступні етапи: встановлення
циклічної довговічності зразків після виготовного
наплавлення; дослідження циклічної тріщиностій-
кості різних шарів металу; визначення втомної дов-
говічності зразків, які в процесі попередніх випро-
бувань мали в наплавленому шарі втомні тріщини,
після ремонтного наплавлення. Більш детально ре-
жими та технології наплавлення, а також методики
досліджень описано в роботах [10, 11].

Результати експериментів і їх обговорення.
Зразки першої серії. Спочатку три зразки першої
серії з вуглецевої сталі 40X, наплавлених порошко-
вим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром з низь-
колегованої сталі 12Х1МФ, випробовували при
рівнях максимальних напружень 600 МПа, харак-
терних зразкам, виготовленим з підшаром з низь-
ковуглецевої сталі [11]. Через наявність внутрішніх

дефектів у наплавленому шарі на них не вдалося
отримати достовірні результати втомної довговіч-
ності, тому було виготовлено додаткові зразки та
вирішено виконувати випробування при рівнях
максимальних напружень 500 МПа, характерних
зразкам, виготовленим без підшару [10]. Результа-
ти досліджень втомної довговічності зразків, на-
плавлених дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром з
низьколегованої сталі 12Х1МФ, наведено в табл. 3.

Випробуваннями на втому першої серії зразків,
наплавлених дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підша-
ром з низьколегованої сталі, встановлено, що їх
циклічна довговічність до руйнування при макси-
мальних прикладених напруженнях 500 МПа зна-
ходиться в діапазоні 346000...716800 циклів.

Слід відмітити, що руйнування зразків без
підшару при рівнях максимальних напружень
500 МПа відбувалося в діапазоні від 560800 до
1420100 циклів змін напружень [10], а зразки з
підшаром з низьковуглецевої сталі витримали
більше 2000000 циклів змін напружень [11].

На зразках другої серії від гострого надрізу в зно-
состійкому шарі металу вирощували вихідну трі-

Таблиця 3. Результати втомних випробувань зразків пер-
шої серії

Номер зразка	Максимальні напру- ження циклу, МПа	Циклічна довговічність до руйнування, цикли
1	600	18000*
2	->-	72400*
3	->-	261000
4	500	716800
5	->-	381800
6	->-	528700
7	->-	346000

Примітка. * – в зразках були знайдені дефекти, які утвори-
лися під час наплавлення

щину глибиною 1 мм при рівнях максимальних напружень 400 МПа. При подальших випробуваннях зразка також при рівнях максимальних напружень 400 МПа фіксували довжину втомної тріщини та відповідне число циклів змінного навантаження N .

Експериментальні дослідження особливостей розвитку втомних тріщин в даних зразках підтвердили отримані раніше дані, що зона сплавлення окремих валиків та шарів відіграє важливу роль у процесі втомного руйнування наплавлених деталей, адже тріщини здебільшого розвиваються або по межі сплавлення окремих валиків, або близько до цієї межі (рис. 1).

Для побудови кінетичних діаграм втомного руйнування (КДВР) проводили розрахунок значень розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) для призматичного зразка з поперечною крайовою тріщиною при трьохточковому згинанні за виразами, приведеними в [13]. Експериментальна залежність швидкості росту втомної тріщини від розмаху КІН в різних шарах металу багат шарового зразка приведена у вигляді відповідної КДВР, отриманої за результатами випробування трьох зразків (рис. 2). Окремо, на рис. 3 наведено кінетичну діаграму втомного руйнування основного металу сталі 40Х.

В наплавленому металі (в зносостійкому шарі та в підшарі з низьколегованої сталі) втомна тріщина розвивається нестабільно. Так, в інтервалі розмаху КІН 45...60 МПа $\sqrt{м}$, коли тріщина розвивалася в металі зносостійкого шару, її швидкість постійно змінювалася в діапазоні значень $10^{-8}...10^{-7}$ м/цикл. При подальшому розвитку в металі підшару швидкість росту втомної тріщини підвищується на порядок до $2 \cdot 10^{-7}...2 \cdot 10^{-6}$ м/цикл в інтервалі розмаху КІН 60...100 МПа $\sqrt{м}$. В основному металі тріщина стабільно розвивалася з постійно зростаючою швидкістю від $6 \cdot 10^{-7}$ до $7 \cdot 10^{-6}$ м/цикл до руйнування зразка при значеннях розмаху КІН 160...180 МПа $\sqrt{м}$, що відповідає встановленій КДВР сталі 40Х.

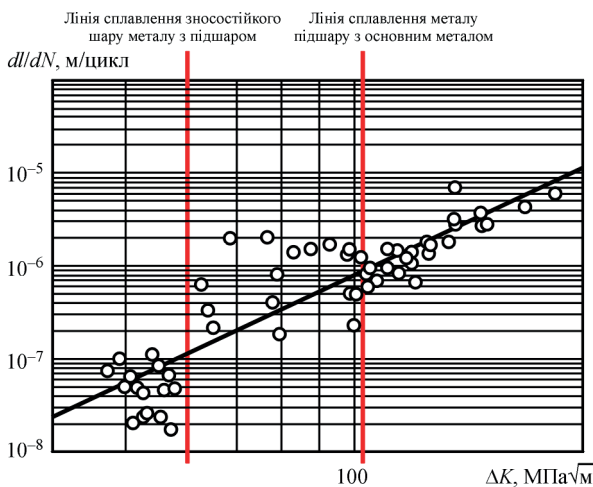


Рис. 2. Кінетична діаграма втомного руйнування багат шарового матеріалу, сформованого зносостійким наплавленням з використанням підшару з низьколегованої сталі

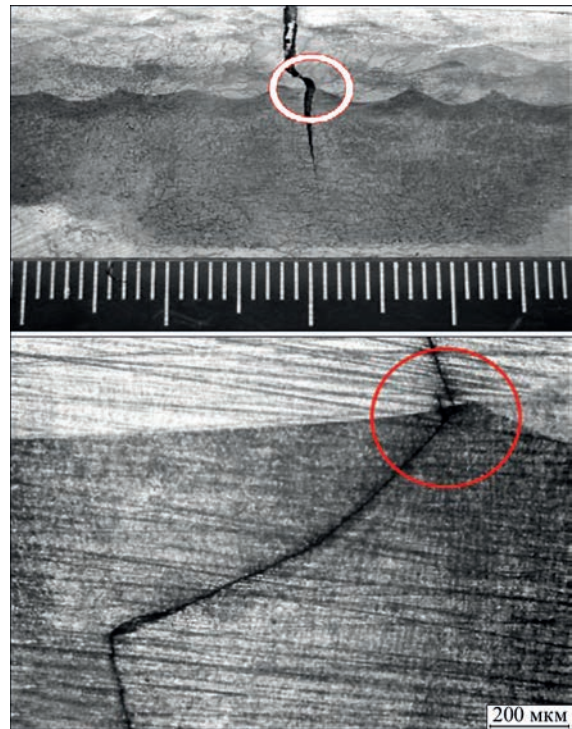


Рис. 1. Характер розповсюдження втомної тріщини в зразках зі сталі 40Х, наплавлених дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром з низьколегованої сталі 12Х1МФ

На зразках третьої серії спочатку моделювали зародження та розвиток втомних тріщин від можливих дефектів в наплавленому зносостійкому шарі металу. Тобто зразки випробовували при циклічному навантаженні до утворення тріщин втоми глибиною 10...12 мм, які в подальшому підлягали усуненню за допомогою ремонтного наплавлення. Після виконання ремонтного наплавлення проводили вимірювання залишкових напружень неруйнівним ультразвуковим методом [14]. Даний метод не дозволяє проводити вимірювання залишкових напружень у литому металі, тому вимірювання залишкових напружень, орієнтованих вздовж та поперек зразка, проводили на відстані від лінії сплавлення низьковуглецевого підшару з основним металом (визначали за макроструктурою) вглиб металу. Приведені на епюрах значення залишкових напружень є усередненими по товщині

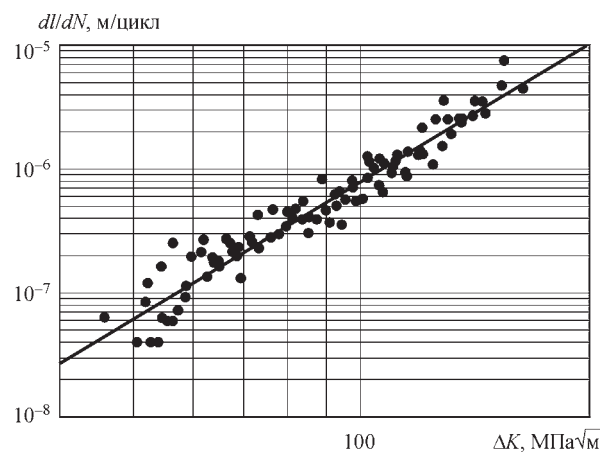


Рис. 3. Кінетична діаграма втомного руйнування основного металу сталі 40Х

зразка. Схематичне зображення місць вимірювання залишкових напружень приведено на рис. 4, а епюри розподілу залишкових напружень у вихідному стані та після ремонтного наплавлення на рис. 5, 6.

Приведені на рис. 5 дані вимірів залишкових напружень в зразку сталі 40Х з наплавленням зносостійким шаром з підшаром з сталі 12Х1МФ показують, що максимальні напруження розтягу σ_x , які орієнтовані вздовж зразка (співпадають за напрямом з прикладеними робочими напруженнями при випробуванні зразків на втому) на 20 % вищі у порівнянні з максимальними залишковими напруженнями розтягу σ_x , сформованими в багатошаровому матеріалі з підшаром з сталі 08кп [11].

Після ремонтного наплавлення максимальні залишкові напруження розтягу σ_x в перетинах 1 та 2 зразка фактично залишаються незмінними, в той час, як в перетині 3 суттєво зменшуються до 60 МПа (рис. 6).

Після вимірювання залишкових напружень зразки третьої серії випробовували на втому при трьохточковому віддільному циклічному згинанні. Циклічну довговічність зразків до та після ремонтного наплавлення наведено в табл. 4. При цьому слід відзначити, що всі зразки після ремонту при втомних випробуваннях зруйнувалися більш ніж в 20 мм від перерізу 3, тобто в місцях з більш високими залишковими напруженнями розтягу σ_x .

Після виконання ремонтного наплавлення, як і у випадку виготовного наплавлення, зародження та

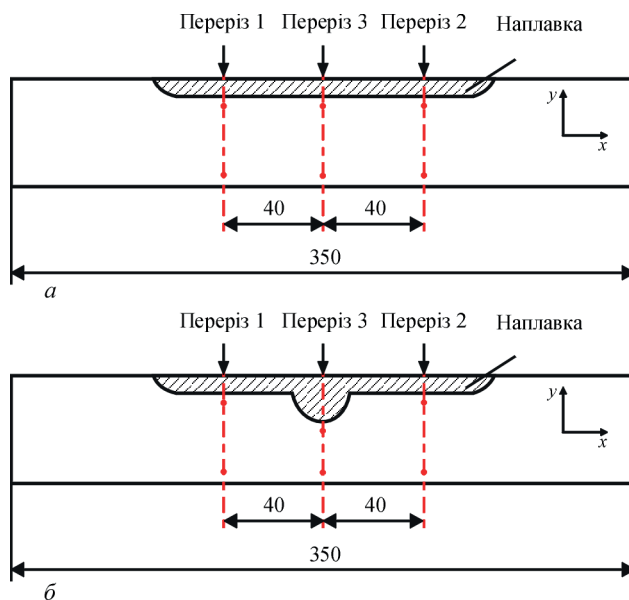


Рис. 4. Схематичне зображення місць вимірювання залишкових напружень в зразку до (а) та після (б) ремонтного наплавлення

розвиток тріщин втоми в усіх зразках третьої серії відбувалося або по межі сплавлення окремих валиків, або безпосередньо біля цієї межі, очевидно, внаслідок хімічної та структурної неоднорідності в даній зоні (рис. 7, а). Сумарно зразки, наплавлені з підшаром з низьколегованої сталі, після попереднього напрацювання до моменту утворення тріщини, ремонтного наплавлення та наступного циклічного навантаження витримали в середньому близько

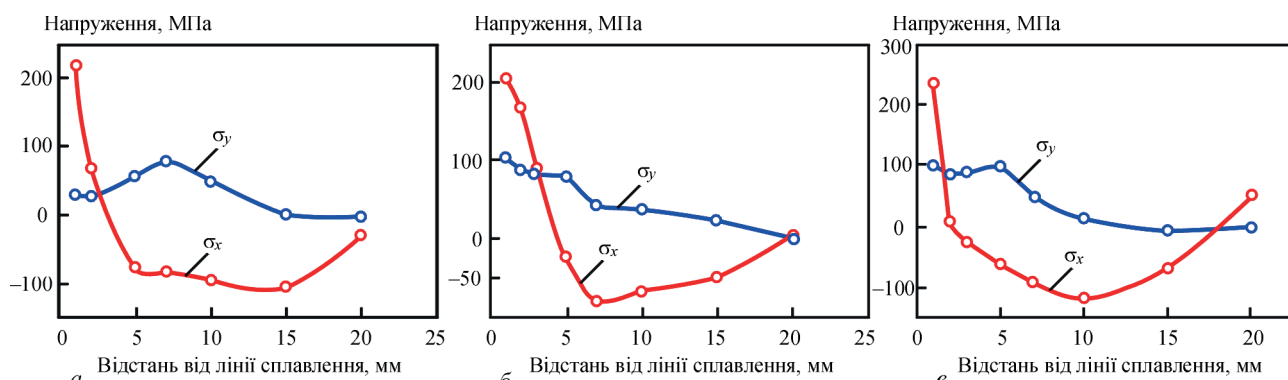


Рис. 5. Розподіл залишкових напружень, орієнтованих вздовж σ_x та поперек σ_y зразка до ремонтного наплавлення, в перерізі 1 (а), перерізі 2 (б) та перерізі 3 (в) за рис. 4, а

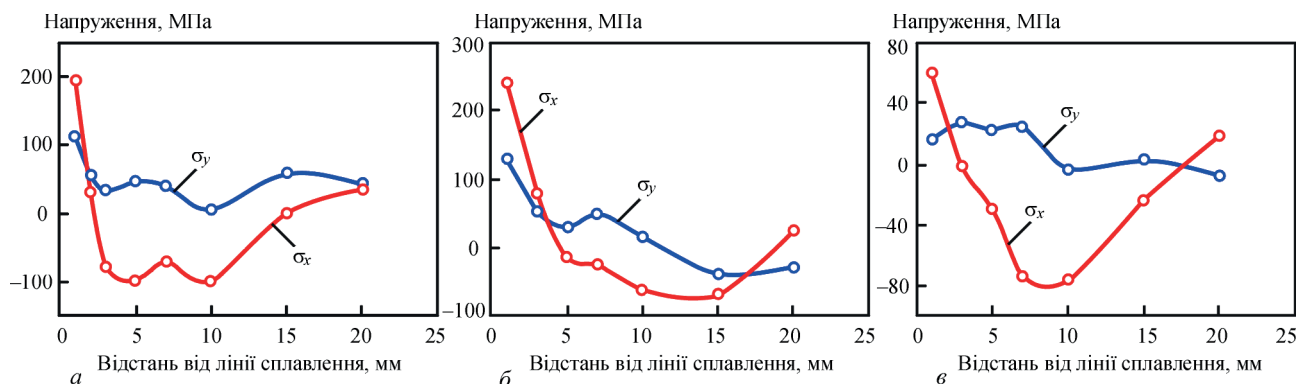


Рис. 6. Розподіл залишкових напружень, орієнтованих вздовж σ_x та поперек σ_y зразка після ремонтного наплавлення, в перерізі 1 (а), перерізі 2 (б) та перерізі 3 (в) за рис. 4, б

Таблиця 4. Результати втомних випробувань зразків третьої серії

Номер зразка	Максимальні напруження циклу, МПа	Циклічна довговічність до утворення тріщини 10...12 мм, цикли	Циклічна довговічність після виконання ремонтного наплавлення, цикли	Загальна циклічна довговічність, цикли
11	500	285600	256400	542000
12	500	333300	144900	478200
13	500	283100	448200	731300

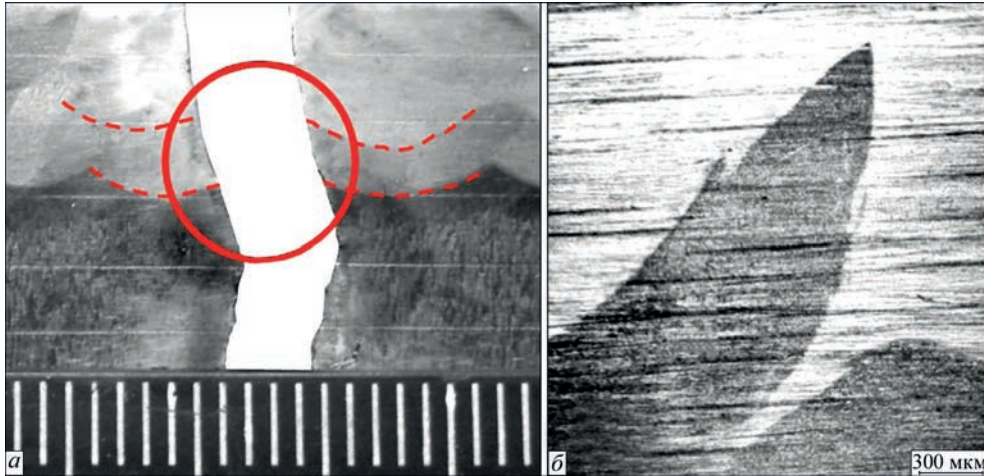


Рис. 7. Зовнішній вигляд ділянки зразка після ремонтного наплавлення із втомною тріщиною, яка проходить по межі між сусідніми наплавленими валиками (а) та зона макронеоднорідності – межа між «старим» наплавленим металом, та металом, який був наплавлений в ході ремонту (б)

≈ 600 тис. циклів. Тобто довговічність зразків після виготовного та після ремонтного наплавлення приблизно однакова і становить ≈ 300 тис. циклів.

Окрему увагу слід приділити і технології ремонтного наплавлення, адже при виконанні розділки згідно з визначеними раніше параметрами і наступному її заплавленні, на межі між новим наплавленим металом і «старим» можуть утворюватися несприятливі зони макронеоднорідності (рис. 7, б), що також може несприятливо впливати на втомну довговічність зразка.

Узагальнення результатів. Порівняння даних, отриманих для зразків сталі 40Х, наплавлених без підшару [10], з підшарами з низьковуглецевої сталі 08кп [11] та низьколегованої сталі 12Х1МФ вказує на те, що найбільшу довговічність як до так і після ремонтного наплавлення мають зразки, наплавлені з підшаром з більш пластичної низьковуглецевої сталі 08кп. Це може бути пояснено декількома факторами. По-перше, це пов'язано з більш високими межами міцності та текучості сталі 12Х1МФ у порівнянні зі сталлю 08кп і, водночас, більш низьким відносним подовженням (див. табл. 1), що призвело до формування більш високих рівнів залишкових напружень розтягу в наплавленому металі (див. рис. 5, 6). По-друге, причиною негативного впливу на втомну довговічність матеріалу 12Х1МФ можуть бути хімічні чи структурні неоднорідності, які утворилися в зонах переходу основа – підшар – робочий шар [5, 15, 16].

Очевидно, що при ремонтному наплавленні, коли видаляється та заново заплавляється лише ділянка металу навколо втомної тріщини, додають-

ся труднощі в забезпеченні рівномірного хімічного й макроструктурного стану через порушення первісного порядку укладання та структури наплавлених валиків. Крім того, при багатошаровому наплавленні середньо- та високовуглецевими електродними матеріалами, через повторні нагріви, у зонах перекриттів сусідніх валиків може відбуватися додаткове утворення карбідів, що збіднює навколишню матрицю й приводить до утворення хімічної та структурної неоднорідності. Ці області можуть стати джерелами виникнення тріщин в умовах механічного циклічного навантаження, а отже, наведені вище фактори необхідно враховувати при розробленні техніки та технології як виготовного так і, особливо, ремонтного наплавлення.

Висновки

1. Розроблено технологію виготовного та ремонтного наплавлення зразків з вуглецевої сталі 40Х, наплавлених порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром з низьколегованої сталі 12Х1МФ. Неруйнівним ультразвуковим методом вимірювання напружень встановлено, що при цьому максимальні повздовжні залишкові напруження розтягу досягають значень 220...240 МПа. Після виконання ремонтного наплавлення максимальні залишкові напруження розтягу σ_x зменшуються до 60 МПа, в той же час в інших перетинах зразка рівні залишкових напружень розтягу фактично залишаються незмінними.

2. В наплавленому металі (в зносостійкому шарі та в підшарі з низьколегованої сталі) втомна тріщина розвивається нестабільно. Так, в інтер-

валі розмаху КІН $45 \dots 60$ МПа $\sqrt{\text{м}}$, коли тріщина розвивалась в металі зносостійкого шару, її швидкість постійно змінювалася в діапазоні значень $10^{-8} \dots 10^{-7}$ м/цикл. При подальшому розвитку в металі підшару швидкість росту втомної тріщини підвищується на порядок до $2 \cdot 10^{-7} \dots 2 \cdot 10^{-6}$ м/цикл в інтервалі розмаху КІН $60 \dots 100$ МПа $\sqrt{\text{м}}$. В основному металі тріщина стабільно розвивалась з постійно зростаючою швидкістю від $6 \cdot 10^{-7}$ до $7 \cdot 10^{-6}$ м/цикл до руйнування зразка при значеннях розмаху КІН $160 \dots 180$ МПа $\sqrt{\text{м}}$, що відповідає встановленій КДВР сталі 40Х.

3. Встановлено, що циклічна довговічність зразків з вуглецевої сталі 40Х, наплавлених порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром з низьколегованої сталі 12Х1МФ в 2...3 рази нижча циклічної довговічності зразків, наплавлених без підшару. Так, циклічна довговічність зразків без підшару при рівнях максимальних напружень 500 МПа, знаходиться в діапазоні 561...1420 тис. циклів змін напружень, а циклічна довговічність бездефектних зразків з підшаром 12Х1МФ – 346...716 тис. циклів.

5. Показано, що виконання ремонтного наплавлення за схемою видалення та наступного наплавлення лише ділянок металу із втомними тріщинами дозволяє відновити циклічну довговічність до рівня вихідного стану, тобто збільшити загальну довговічність у 2 рази. При цьому руйнування відновлених зразків відбувалося віддалік від місця ремонтного наплавлення.

Список літератури/References

1. Du Toit, M., Van Niekerk, J. (2010) Improving the Life of Continuous Casting Rolls Through Submerged Arc Cladding with Nitrogen-Alloyed Martensitic Stainless Steel. *Welding in the World*, 54(11-12), 342–349. Doi:10.1007/bf03266748
2. Jhavar, S., Paul, C.P., Jain, N.K. (2013) Causes of failure and repairing options for dies and molds: A review. *Engineering Failure Analysis*, 34, 519–535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.09.006>
3. Ahn, D.-G. (2013) Hardfacing technologies for improvement of wear characteristics of hot working tools: A Review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14(7), 1271–1283. Doi:10.1007/s12541-013-0174-z

4. Zhang, J., Zhou, J., Tao, Y. et al. (2015) The microstructure and properties change of dies manufactured by bimetal-gradient-layer surfacing technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80, 1807–1814 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7170-7>
5. Gao, F., Zhou, J., Zhou, J. et al. (2017) Microstructure and properties of surfacing layers of dies manufactured by bimetal-gradient-layer surfacing technology before and after service. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, 1289–1297. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8679-0>
6. Vundru, C., Paul, S., Singh, R., Yan, W. (2018) Numerical analysis of multi-layered laser cladding for die repair applications to determine residual stresses and hardness. *Procedia Manufacturing*, 26, 952–961. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.122>
7. Рябцев И.А., Сенченков И.К. (2013) *Теория и практика наплавочных работ*. Киев, Екотехнологія.
8. Ryabtsev, I.A., Senchenkov, I.K. (2013) *Theory and practice of surfacing works*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
8. Rjabcev, I.A., Senchenkov, I.K., Turyk, Je.V. (2015) *Naplavka. Materialy, tehnologii, matematicheskoe modelirovanie* [Surfacing. Materials, technologies, mathematical modeling]. Gliwice, Wydawnictwo politechniki slaskiej [in Russian].
9. Babinets, A.A., Ryabtsev, I.A. (2016) Fatigue life of multilayer hard-faced specimens. *Welding International*, 30, 4, 305–309. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1058004>
10. Ryabtsev, I.O., Knysh, V.V., Babinets, A.A. et al. (2020) Fatigue life of specimens after wear-resistant, manufacturing and repair surfacing. *The Paton Welding J.*, 9, 19–25. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.09.03>
11. Ryabtsev, I.O., Knysh, V.V., Babinets, A.A., Solovej, S.O. (2021) Fatigue life of steel 40Kh specimens after wear-resistant surfacing with a sublayer of low-carbon steel. *Ibid*, 3, 2–8. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.03.01>
12. Oberg, E. et al. (1996) *Machinery's Handbook* (25th ed.), Industrial Press Inc.
13. Murakami, Yu. (1990) *Reference book on stress intensity coefficients*. In: 2 Vol. Moscow, Mir [in Russian].
14. (2004) *Пристрій контролю механічних напружень та деформацій в твердих середовищах*. Пат. UA 71637 C2.
15. Kaierle, S., Overmeyer, L., Alfred, I. et al. (2017) Single-crystal turbine blade tip repair by laser cladding and remelting. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 19, 196–199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.04.001>
16. Kim, D.-Y., Kim, D., Kang, M., Kim, Y.-M. (2017) Improvement of fatigue strength of lap fillet joints by using tandem MAG welding in a 590-MPa-grade galvanized steel sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(9-12), 4379–4387. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0828-6>

FATIGUE LIFE OF SPECIMENS FROM 40KH STEEL AFTER WEAR-RESISTANT SURFACING WITH A LOW-ALLOY STEEL SUBLAYER

V.V. Knysh, S.O. Solovej, I.O. Ryabtsev, A.A. Babinets

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Studied was the fatigue fracture resistance of a multilayer material, in which the wear-resistant layer was deposited with PP-Np-25Kh5FMS flux-cored wire with a sublayer from a low-alloy material, deposited with PP-Np-12Kh1MF wire. The surfaced specimens design and their testing procedure simulated the operating conditions of steel mill rolls. The integrated procedure of evaluation of fatigue fracture resistance of multilayer surfaced specimens included three stages: determination of cyclic fatigue life of the specimens after fabrication surfacing; studying the cyclic crack resistance of different deposited layers; determination of fatigue life of specimens, having fatigue cracks in the deposited layer during previous testing, after their repair surfacing. It is found that the cyclic fatigue life of specimens from 40Kh carbon steel, surfaced with PP-Np-25Kh5FMS flux-cored wire with a sublayer of 12Kh1MF low-alloy steel is in the range of 346...716 thous. cycles at maximum stress level of 500 MPa. Features of fatigue fracture kinetics of the studied multilayer material were determined. It was established that the fatigue crack propagates in an unstable manner in the deposited metal (in the wear-resistant layer and low-alloy steel sublayer), constantly changing its rate and direction. It is shown that cutting out fatigue cracks and subsequent surfacing of their removal areas allows restoring the cyclic fatigue life of the specimen to the initial level, i.e. doubling the total life. 16 Ref., 4 Tabl., 7 Fig.

Keywords: arc surfacing, repair surfacing, sublayer, fatigue life, fatigue crack, stress intensity factor.

Надійшла до редакції 09.06.2021

ВПЛИВ ПОЗДОВЖНЬОГО КЕРУЮЧОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ ДУГОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

О.Д. Размишляєв¹, М.В. Агєєва², О.Г. Білик¹, Е. Халед¹

¹ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет». 87500, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7. E-mail: office@pstu.edu

²Донбаська державна машинобудівна академія. 84300, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72

Огляд літературних даних показав, що для підвищення ефективності процесів при дуговому наплавленні та зварюванні застосовують поздовжнє магнітне поле (ПДМП). При наплавленні і зварюванні з дією ПДМП підвищується продуктивність розплавлення електродного металу, можливе управління геометричними розмірами поперечного перерізу наплавлених валиків і зварних швів, подрібнення структури наплавленого металу і швів, збільшується твердість, міцність і пластичність металу шва, підвищується опірність швів утворенню гарячих тріщин. Встановлено, що для подрібнення структурних складових металу, наплавленого з дією ПДМП, необхідно забезпечити ефективне перемішування рідкого металу в зварювальній ванні, тобто по всій її довжині. При цьому потрібно забезпечити оптимальні параметри керуючих магнітних полів. В даній роботі виконали експерименти по наплавленню під флюсом дротом Св-08А діаметром 5 мм з дією ПДМП при частотах: 5, 10, 20, 33 та 50 Гц на пластини з низьковуглецевої сталі товщиною 20 мм. Величина поздовжньої компоненти індукції B_z магнітного поля при вимірюванні під електродом у поверхні виробу-пластини становила 30...40 мТл. Досліджено вплив частоти ПДМП на глибину проплавлення основного металу і ширину наплавлених валиків. Встановлено, що при частотах ПДМП в межах $f = 5 \dots 50$ Гц глибина проплавлення менше, а ширина валика більша, ніж при наплавленні без дії ПДМП. Бібліогр. 25, рис. 4.

Ключові слова: дугове наплавлення під флюсом, зварювальний дріт, керуюче магнітне поле, оптимальні режими, якість зварних з'єднань

Використання поздовжнього магнітного поля (ПДМП) при дуговому наплавленні і зварюванні дротом під флюсом дозволяє підвищити ефективність цих процесів. Важливим є виконання аналізу технологічних переваг, які досягаються при використанні керуючого ПДМП при дуговому наплавленні та зварюванні електродним дротом. Такий аналіз необхідний з метою раціонального вибору оптимальних параметрів керуючих (зовнішніх) магнітних полів технологіями в області зварювального виробництва з урахуванням особливостей конструкції, що зварюється або наплавляється. Ефективність процесу дугового наплавлення підвищується у разі підвищення продуктивності розплавлення електродного металу, можливості управляти геометричними розмірами зварних швів і валиків (глибиною проплавлення основного металу і шириною наплавлених валиків), подрібненням структури наплавленого металу і шва, підвищенням працездатності деталей і конструкцій. Слід відзначити, що магнітне управління має низку переваг у порівнянні з механічними способами управління, оскільки здійснюється без безпосереднього контакту керуючих пристроїв з зоною зварювання, не потрібно істотних змін стандартного устаткування і техніки наплавлення.

Основні (узагальнені) дані про ефективність використання ПДМП при дуговому зварюванні та наплавленні наведено в роботах [1–4]. Але в останній час були опубліковані нові дані. В зв'язку з цим потрібен більш детальний аналіз літературних даних по вказаному питанню.

Мета роботи – проаналізувати літературні дані про вплив поздовжнього магнітного поля на ефективність процесу дугового наплавлення зношених поверхонь деталей і конструкцій з урахуванням магнітних властивостей електродних дротів і основного металу для підвищення ефективності цього процесу.

Зовнішнє поздовжнє магнітне поле генерують в зоні горіння дуги за допомогою пристрою введення (ПВ) ПДМП, який встановлюють на зварювальній головці зварювального автомату співвідносно з електродним дротом.

Схема пристрою введення ПДМП, який використовують при автоматичному електродуговому наплавленні дротяними електродами, наведена на рис. 1. Наявність осердя з феромагнітного матеріалу 3, електрода 1 і виробу 4 з немагнітних матеріалів або феромагнітних матеріалів значно впливає на рівень поздовжньої компоненти індукції B_z у поверхні пластини. Як встановлено в роботі [1], збільшує поздовжню компоненту індукції B_z у поверхні пластини наявність фероосердя в 2 рази в порівнянні з варіантом, коли немає фероосердя. В роботі [2] показано, що якщо виріб з феромагнітного матеріалу, то індукція під торцем електрода (при зазорі $\Delta = 5$ мм) підвищується ще в 2 рази. Якщо ж не тільки виріб-пластина, але і електродний дріт – феромагнетики, то індукція B_z під торцем електрода (при $\Delta = 5$ мм) підвищується не в 2, а в 3 рази і більше.

Таким чином, процес дугового наплавлення і зварювання дротом під флюсом з дією ПДМП доцільно виконувати, якщо виріб і електродний дріт

Размишляєв О.Д. – <https://orcid.org/0000-0001-6616-7717>, Агєєва М.В. – <https://orcid.org/0000-0001-8275-6781>

Білик О.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-6240-1497>

© О.Д. Размишляєв, М.В. Агєєва, О.Г. Білик, Е. Халед, 2021

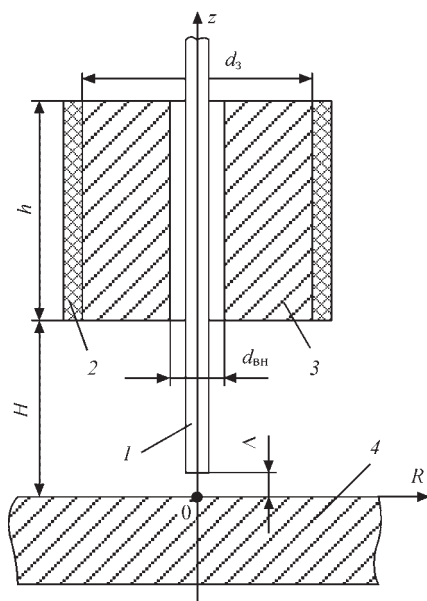


Рис. 1. Схема пристрою введення ПДМП: 1 – електродний дріт; 2 – обмотка; 3 – осердя; 4 – виріб (пластина)

виготовлені з феромагнітного матеріалу. Діаметр (зовнішній) фероосердя 3 ПВ ПДМП (з феромагнітної сталі, наприклад, сталь 45) не повинен перевищувати 52 мм [5], оскільки подальше його збільшення знижує рівень B_z у поверхні як феромагнітної, так і неферомагнітної пластини. При наплавленні з дією постійного ПДМП підвищення коефіцієнта розплавлення електродних дрітів α_p при зворотній полярності процесу наплавлення досягає 30 %. При наплавленні дротами, які виготовлені з немагнітних матеріалів, з дією ПДМП α_p електродів не підвищується. Підвищення α_p електродів обумовлено примусовим видаленням (за рахунок дії ПДМП) електродних крапель з торця електрода, що плавиться. Механізм дії ПДМП на видалення електродних крапель з торців електродів при зварюванні докладно викладено в роботі [3].

При збільшенні індукції приблизно до 40 мТл спостерігається практично лінійне зростання продуктивності розплавлення електродного дроту. Знакозмінне ПДМП частотою 50 Гц також підвищує α_p електрода, проте в меншій мірі, ніж постійне ПДМП (рис. 2).

Встановлено, що підвищення α_p електродних дрітів залежить від величини поздовжньої компоненти індукції ПДМП B_z (див. рис. 1) і становить в середньому 30 % при дії постійного ПДМП і 20 % при дії змінного частотою 50 Гц ПДМП [6].

В роботі [7] досліджено швидкість розплавлення електродних дрітів діаметром 2...5 мм при автоматизованому зварюванні під флюсом в діапазоні струмів 200...1000 А. Дослідження проводили на пластинках зі сталі 10ХСНД, дротом Св-08А під флюсом АН-348АМ. Індукцію магнітного поля змінювали до 100 мТл. При цьому спостерігали, що при дії керуючого зовнішнього поздовжнього магнітного поля збільшується швидкість розплавлення електродного дроту при одних і тих же параметрах режиму на-

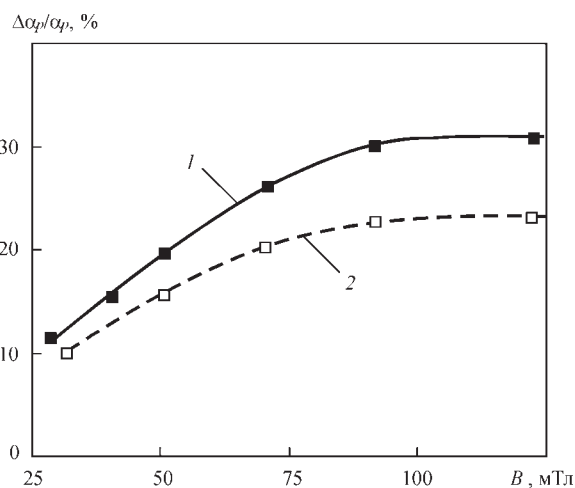


Рис. 2. Вплив поздовжньої компоненти індукції B_z ПДМП на відносне збільшення ($\Delta\alpha_p/\alpha_p$) коефіцієнта розплавлення електродного дроту Св-08А: 1 – постійне ПДМП; 2 – ПДМП частотою $f=50$ Гц [6]

плавлення, що і при наплавленні без дії магнітного поля. При збільшенні індукції приблизно до 40 мТл спостерігається практично лінійне зростання продуктивності розплавлення електродного дроту. При перевищенні рівня індукції $B_z = 80$ мТл спостерігається ефект припинення росту α_p дроту.

На ефект підвищення α_p дроту впливає частота ПДМП. Були виконані дослідження по встановленню впливу частоти ПДМП на α_p електродних дрітів при дуговому наплавленні постійним струмом. Живлення котушок ПВ ПДМП забезпечувалося спеціальним джерелом прямокутних знакозмінних імпульсів (струму I_k в котушках і індукції B_x), що описано раніше в роботі [4]. Встановлено (рис. 3 [8]), що при зворотній полярності наплавлення максимальний ефект підвищення $\Delta\alpha_p/\alpha_p$ має місце при впливі постійного ПДМП. При збільшенні частоти ПДМП від 1 до 4 Гц ефект підвищення α_p електрода знижується, до частоти $f=10$ Гц зменшується плавно і при збільшенні частоти від 10 до 50 Гц залишається на одному рівні (рис. 3, криві 1, 3, 5, 6). В роботах [3, 7] було встановлено, що при дуговому наплавленні дротом Св-08А під флюсом на зворотній полярності з впливом постійного ПДМП коефіцієнт розплавлення електродного дроту α_p підвищується на 30 %. Також було відзначено, що через інерційність розплавлення краплі на торці електрода змінне ПДМП частотою 50 Гц неефективно впливає на α_p дрітів при дуговому наплавленні [3]. Знакозмінні ПДМП частотою 50 Гц також підвищує α_p електрода, проте в меншій мірі, ніж постійне ПДМП [6].

Причини підвищення коефіцієнта розплавлення електродних дрітів при дуговому наплавленні з дією ПДМП пояснено в роботах [2–4, 8]. При наплавленні в поздовжньому магнітному полі характер теплопередачі від дуги через рідку краплю до твердого металу електрода змінюється. В роботах [3, 8] показано, що при дії ПДМП на краплю електродного металу виникають відцентрові сили, що викликають обертання та подрібнення

електродного металу на більш дрібні краплі. При цьому зменшується висота краплі в напрямку осі електрода (і час її існування), це покращує умови теплопередачі q через краплю і підвищується коефіцієнт розплавлення електродного дроту.

В літературі мало даних про вплив частоти ПДМП на геометричні розміри валиків у поперечному перерізі при дуговому наплавленні (зварюванні) під флюсом [2–4, 8–12]. В зв'язку з цим виконували наплавлення на пластини зі сталі ВМСт.3сп товщиною 20 мм дротом Св-08А діаметром 5 мм під флюсом АН-348А при зворотній полярності процесу при дії на дугу ПДМП і без дії ПДМП. Режим наплавлення: $I_n = 750 \dots 780$ А; $U_d = 34 \dots 36$ В; $V_n = 30$ м/год. Котушку соленоїду, що

генерує ПДМП, живили від генератора прямокутних знакозмінних імпульсів [4].

Розміри валиків (швів) визначали на макрошліфах (як середнє з трьох значень на кожному режимі наплавлення).

Величина поздовжньої компоненти індукції B_z магнітного поля, вимірювана під електродом у поверхні виробу-пластини з низьковуглецевої сталі становила 30...40 мТл. Експерименти з наплавлення з дією ПДМП виконували при частотах ПДМП: 5, 10, 20, 33 та 50 Гц. Дані дослідження про вплив частоти ПДМП на глибину проплавлення наведено на рис. 4, а.

Дані показують, що з ростом частоти знакозмінного ПДМП до $f = 20$ Гц є деяке зниження глибини проплавлення основного металу, а від частоти ПДМП $f = 20$ Гц до $f = 50$ Гц глибина проплавлення дещо збільшилася (рис. 4, а, крива 2). Ширина валика з ростом частоти ПДМП до $f = 20$ Гц дещо збільшилася, а від частоти ПДМП $f = 20$ Гц до $f = 50$ Гц ширина валика дещо зменшується (рис. 4, б, крива 2). Таким чином, частота знакозмінного ПДМП зменшує глибину проплавлення металу і збільшує ширину валика. При частотах $f = 5 \dots 50$ Гц глибина проплавлення менше, а ширина валика більша, ніж при наплавленні без дії ПДМП.

Важливим є питання підвищення експлуатаційних властивостей зварних з'єднань і наплавлених деталей. Це можливо досягти за рахунок подрібнення структури металу, наплавленого з дією ПДМП. Є значна кількість публікацій, в яких встановлено, що при дуговому зварюванні з дією ПДМП відбувається подрібнення структури металу шва (або наплавлення) і підвищення механічних властивостей зварних швів. Наведемо короткий аналіз цих даних.

В існуючих роботах простежується прямий зв'язок між механічними властивостями і структурою швів, зварених з дією ПДМП. Якщо ці характеристики уявити графічно в залежності від

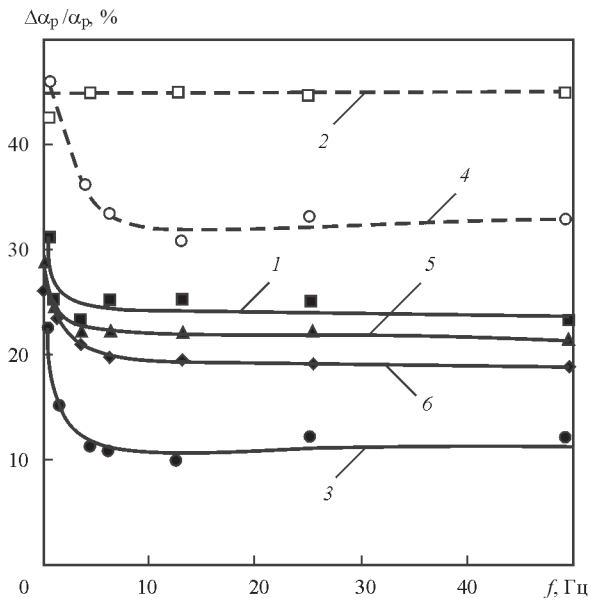


Рис. 3. Вплив частоти ПДМП на відносне збільшення $\Delta\alpha_p/\alpha_p$ коефіцієнта розплавлення електродів: 1, 3, 5, 6 – зворотна полярність; 2, 4 – пряма полярність; 1, 2 – Св-08А; 3, 4 – ПП-12Х13; 5 – Св-08Г2С; 6 – Нп-30ХГСА [7]

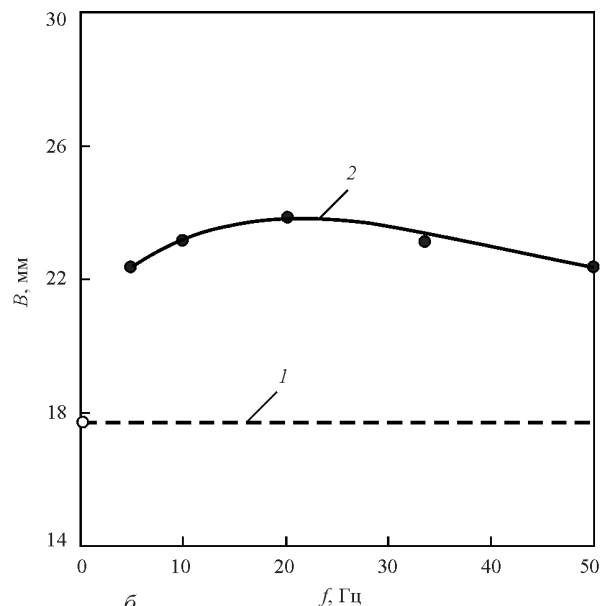
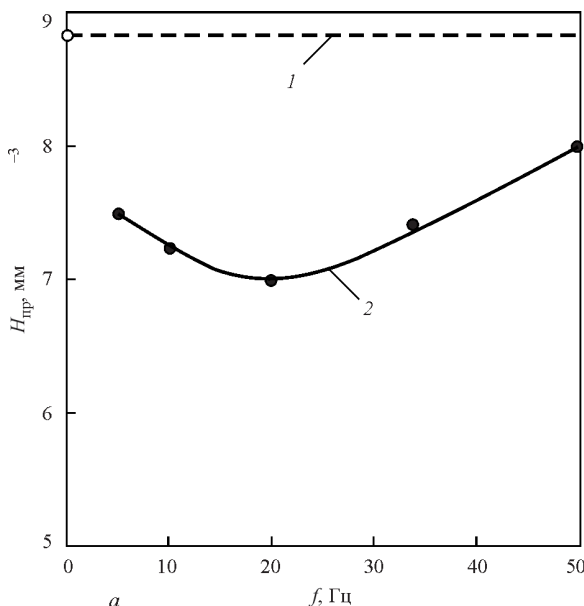


Рис. 4. Вплив частоти ПДМП на глибину проплавлення $H_{пр}$ основного металу (а) і ширину валика B (б): 1 – без поля; 2 – при дії знакозмінного ПДМП

параметрів ПДМП, то вони мають вигляд кривих з максимумом. Причому максимуми будуть відповідати оптимальним параметрам ПДМП. Завдяки дії магнітних полів при зварюванні збільшується твердість, підвищуються міцність і пластичні властивості металу шва, підвищується опірність швів утворенню гарячих тріщин [1–4, 13–21].

Показано [13, 14], що при зварюванні високоміцних сталей з дією змінного ПДМП в області оптимальних режимів ПДМП різко зростає опірність утворенню гарячих і холодних тріщин. При цьому пластичність металу шва зросла в 3,0...3,5 рази в порівнянні з показниками пластичності зразків, отриманих при зварюванні без дії ПДМП. Встановлено, що оптимальною є частота ПДМП в межах 0,6...15 Гц, що збігається з рекомендованими значеннями частот у багатьох роботах [4, 15–25]. Це досягається за рахунок перемішування рідкого металу у зварювальній ванні. При перемішуванні розплаву у ванні при дуговому наплавленні з дією магнітних полів відбувається подрібнення структурних складових. Для ефективного перемішування в ванні необхідно, щоб рідкий метал розплаву досягав крайніх точок в хвостовій частині ванни. Оскільки при зварюванні (наплавленні) якісне формування швів (валиків) спостерігається тільки при дії знакозмінного ПДМП, то необхідно визначити оптимальні параметри знакозмінних ПДМП, які забезпечували б ефективне (по всій довжині ванни) перемішування металу при дуговому наплавленні (зварюванні) електродним дротом.

Слід відзначити, що наведені в літературі дані відносяться до процесу дугового наплавлення дротами суцільного перерізу і потрібно виконання досліджень в цьому напрямку для дугового наплавлення з використанням порошкових дротяних і стрічкових електродів.

Висновки

1. Аналіз літературних даних дозволив встановити, що використання керуючого поздовжнього магнітного поля (ПДМП) при дуговому наплавленні і зварюванні дозволяє підвищити продуктивність розплавлення електродного металу, змінювати геометричні параметри зварних швів (валиків), подрібнювати структурні складові наплавленого металу і швів, збільшувати твердість, підвищувати міцність і пластичність металу шва, опірність швів утворенню гарячих тріщин, тобто підвищити службові характеристики деталей і конструкцій.

2. Огляд літературних даних показав, що наведені дані відносяться до процесу дугового наплавлення дротами суцільного перерізу, відсутні дані про наплавлення з використанням порошкових дротяних і стрічкових електродів, тому в подальшому необхідно виконувати такі дослідження.

Список літератури

1. Черныш В.П., Кузнецов В.Д., Брисман А.Н., Шеленков Г.М. (1983) *Сварка с электромагнитным перемешиванием*. Киев, Техника.
2. Размышляев А.Д. (2000) *Магнитное управление формированием швов при дуговой сварке*. Мариуполь, ПГТУ.

3. Размышляев А.Д., Миронова М.В. (2009) *Магнитное управление формированием валиков и швов при дуговой наплавке и сварке*. Мариуполь, Изд-во ПГТУ.
4. Размышляев А.Д., Выхмыш П.А., Агеева М.В. (2017) *Автоматическая электродуговая сварка под флюсом с воздействием внешнего магнитного поля*. Мариуполь, Изд-во ПГТУ.
5. Размышляев А.Д., Маевский В.Р., Сидоренко С.М. (2001) Расчет индукции магнитного поля соленоид с ферромагнитным сердечником применительно к дуговой наплавке. *Автоматическая сварка*, **8**, 22–24.
6. Размышляев А.Д., Дели А.А., Миронова М.В. (2007) Влияние продольного магнитного поля на производительность расплавления проволоки при электродуговой наплавке под флюсом. *Автоматическая сварка*, **6**, 31–35.
7. Boldyrev, A.M., Birzhev, V.A., Chernykh, A.V. (1990) Increasing the melting efficiency of electrode wire in welding in a longitudinal magnetic field. *Welding International*, **4**, **9**, 746–748.
8. Размышляев А.Д., Миронова М.В., Дели А.А. (2007) Влияние частоты продольного магнитного поля на коэффициент расплавления проволоки при электродуговой наплавке под флюсом. *Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць*. Мариуполь, ПДТУ, **17**, сс. 150–152.
9. Размышляев А.Д., Маевский В.Р. (1996) Влияние управляющих магнитных полей на геометрические размеры шва при дуговой сварке под флюсом. *Сварочное производство*, **2**, 17–19.
10. Размышляев А.Д. (1996) Влияние магнитного поля на размеры зоны проплавления при наплавке под флюсом. *Автоматическая сварка*, **8**, 25–27, 30.
11. Болдырев А.М., Биржев В.А., Черных А.В. (1993) Управление глубиной проплавления при дуговой сварке и наплавке с помощью продольного переменного магнитного поля. *Сварочное производство*, **6**, 30–31.
12. Размышляев А.Д., Миронова М.В. (2008) Особенности проплавления основного металла при дуговой наплавке в продольном магнитном поле. *Автоматическая сварка*, **8**, 24–28.
13. Тюменцев И.Г., Полищук С.В. (2006) Влияние переменного продольного магнитного поля на конструкционную прочность сварных соединений высокопрочных сталей. Актуальные проблемы электрометаллургии, сварки, качества: *труды Международной научно-практической конференции, Новокузнецк, 25–26 мая, 2006*. Т. 2. Сиб. гос. индустр. ун-т. Новокузнецк, СибГИУ, сс. 83–84.
14. Тюменцев И.Г., Полищук С.В., Тюменцев М.И. и др. (2007) Энергетический метод оценки прочности металла шва при ударном нагружении, полученного при сварке в условиях кристаллизации в продольном магнитном поле. *Металлургия: новые технологии, управление, инновации и качество: труды Всероссийской научно-практической конференции, Новокузнецк, 16–19 октября, 2007*. Новокузнецк СибГИУ, сс. 191–193.
15. Сутырин Г.В. (1975) Исследование механизма воздействия низкочастотной вибрации на кристаллизацию сварочной ванны. *Автоматическая сварка*, **5**, 7–10.
16. Аристов С.В., Руссо В.Л. (1982) Кристаллизация металла шва при низкочастотных колебаниях расплава. *Сварочное производство*, **11**, 42–44.
17. Карпов В.М., Ли Д.С., Воропаев А.О. и др. (2014) Влияние электромагнитного перемешивания на структуру металла шва, выполненного автоматической сваркой под водой. *Мор. интеллект. технол.*, **4**, **1**, 80–84.
18. Морозов В.П. (2010) Влияние колебательного механизма кристаллизации на процесс измельчения первичной структуры металла шва и зоны термического влияния. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, **9**, 1–8.
19. Морозов В.П. (2010) Определение связи между периодичностью процесса кристаллизации металла сварного шва, изменениями мгновенной скорости затвердевания и показателями технологической прочности. *Там же*, **9**, 3–9.
20. Морозов В.П. (2010) Влияние внешнего пульсирующего источника тепла на расплавленный металл сварного шва в процессе его кристаллизации с целью эффективного управления структурообразованием. *Там же*, **10**, 4–8.
21. Болдырев А.М., Дорофеев Э.В., Антонов Е.Г. (1971) Управление кристаллизацией металла при сварке плавлением. *Сварочное производство*, **6**, 35–37.

22. Агеева М.В., Размышляев А.Д. (2019) О перемешивании расплава в сварочной ванне при электродуговой наплавке в продольном магнитном поле. «Фундаментальні та прикладні дослідження у сучасній науці»: VII Наукова конференція, Харків, 30 жовтня 2019 р. Харків, Технологічний центр», 54.
23. Размышляев А.Д., Агеева М.В. (2019) Измельчение структуры металла при дуговой наплавке под воздействием продольного магнитного поля. *Автоматическая сварка*, **2**, 25–28.
24. Размышляев А.Д., Агеева М.В. (2019) Влияние магнитного поля на кристаллизацию швов при дуговой сварке. *Там же*, **1**, 40–43.
25. Размышляев А.Д., Агеева М.В. (2018) О механизме измельчения структуры металла шва при дуговой сварке с воздействием магнитных полей (Обзор). *Там же*, **3**, 29–33.
1. Chernysh, V.P., Kuznetsov, V.D., Briskman, A.N., Shelenkov, G.M. (1983) *Welding with electromagnetic stirring*. Kiev, Tekhnika [in Russian].
2. Razмышляев, A.D. (2000) *Magnetic control of weld formation in arc welding*. Mariupol, PGU [in Russian].
3. Razмышляев, A.D., Mironova, M.V. (2009) *Magnetic control of bead and weld formation in arc surfacing and welding*. Mariupol, PGU [in Russian].
4. Razмышляев, A.D., Vydmysh, P.A., Ageeva, M.V. (2017) *Automatic submerged arc welding under action of external magnetic field*. Mariupol, PGU [in Russian].
5. Razмышляев, A.D., Maevsky, V.R., Sidorenko, S.M. (2001) Calculation of magnetic field induction of solenoid with ferromagnetic core for arc surfacing. *The Paton Welding J.*, **8**, 18–21.
6. Razмышляев, A.D., Deli, A.A., Mironova, M.V. (2007) Effect of longitudinal magnetic field on efficiency of wire melting in submerged-arc surfacing. *Ibid.*, **6**, 23–27.
7. Boldyrev, A.M., Birzhev, V.A., Chernykh, A.V. (1990) Increasing the melting efficiency of electrode wire in welding in a longitudinal magnetic field. *Welding Intern.*, **4**(9), 746–748.
8. Razмышляев, A.D., Mironova, M.V., Deli, A.A. (2007) Influence of longitudinal magnetic field frequency on melting coefficient of wire in submerged arc surfacing. *Visnyk PDTU*, **17**, 150–152 [in Russian].
9. Razмышляев, A.D., Maevsky, V.R. (1996) Influence of controlling magnetic fields on geometrical dimensions of welds in submerged arc welding. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 17–19 [in Russian].
10. Razмышляев, A.D. (1996) Influence of magnetic field on dimensions of penetration zone in submerged arc surfacing. *Avtomatich. Svarka*, **8**, 25–27, 30 [in Russian].
11. Boldyrev, A.M., Birzhev, V.A., Chernykh, A.V. (1993) Control of penetration depth in arc welding and surfacing by longitudinal variable magnetic field. *Svarochn. Proizvodstvo*, **6**, 30–31 [in Russian].
12. Razмышляев, A.D., Mironova, M.V. (2008) Peculiarities of base metal penetration in arc surfacing in longitudinal magnetic field. *The Paton Welding J.*, **8**, 24–28.
13. Tyumentsev, I.G., Polishchuk, S.V. (2006) Influence of the variable magnetic field on structural strength of high-strength welded joints. In: *Proc. of Int. Sci.-Pract. Conf. on Actual Problems of Electrometallurgy, Welding, Quality* (Novokuznetsk, 25–26 May 2006). Vol. 2, SibGIU, Novokuznetsk, 83–84.
14. Tyumentsev, I.G., Polishchuk, S.V., Tyumentsev, M.I. et al. (2007) Energy method of evaluation of weld metal strength under impact loading produced by welding under crystallization conditions in longitudinal magnetic field. In: *Proc. of All-Russian Sci.-Pract. Conf. on Metallurgy: New Technologies, Management, Innovation and Quality* (Novokuznetsk, 16–19 October 2007). SibGIU, Novokuznetsk, 191–193 [in Russian].
15. Sutyurin, G.V. (1975) Investigation of mechanism of low-frequency vibration action on weld pool crystallization. *Avtomatich. Svarka*, **5**, 7–10 [in Russian].
16. Aristov, S.V., Russo, V.L. (1982) Weld metal crystallization in low-frequency oscillations of melt. *Svarochn. Proizvodstvo*, **11**, 42–44 [in Russian].
17. Karpov, V.M., Li, D.S., Voropaev, A.O. et al. (2014) Influence of electromagnetic stirring on structure of weld metal produced by automatic underwater welding. *Mor. Intellect. Tekhnol.*, **4**(1), 80–84 [in Russian].
18. Morozov, V.P. (2010) Influence of oscillating mechanism of crystallization on the process of primary structure refinement of the weld metal and heat-affected zone. *Nauka i Obrazovanie, MGTU*, **9**, 1–8 [in Russian].
19. Morozov, V.P. (2010) Determination of the relation between periodicity of the weld metal crystallization process, changes of instantaneous solidification speed and values of technological strength. *Ibid.*, **9**, 3–9 [in Russian].
20. Morozov, V.P. (2010) Influence of the external pulsating heat source on melted weld metal during its crystallization for efficient control of structure formation. *Ibid.*, **10**, 4–8 [in Russian].
21. Boldyrev, A.M., Dorofeev, E.V., Antonov, E.G. (1971) Control of metal crystallization in fusion welding. *Svarochn. Proizvodstvo*, **6**, 35–37 [in Russian].
22. Ageeva, M.V., Razмышляев, A.D. (2019) About stirring of melt in weld pool in electric arc surfacing in longitudinal magnetic field. In: *Proc. of 7th Sci. Conf. on Fundamental and Applied Research in Modern Science* (Kharkiv, 30 October 2019). Kharkiv, Technological Center, 54 [in Russian].
23. Razмышляев, A.D., Ageeva, M.V. (2019) Refinement of metal structure in arc surfacing under the effect of longitudinal magnetic field. *The Paton Welding J.*, **2**, 19–21.
24. Razмышляев, A.D., Ageeva, M.V. (2019) Influence of magnetic field on crystallization of welds in arc welding. *Ibid.*, **1**, 25–27.
25. Razмышляев, A.D., Ageeva, M.V. (2018) On mechanism of weld metal structure refinement in arc welding under action of magnetic field (Review). *Ibid.*, **3**, 25–28.

INFLUENCE OF LONGITUDINAL CONTROLLING MAGNETIC FIELD ON THE EFFECTIVENESS OF ARC SURFACING PROCESS

O.D. Razмышляев¹, M.V. Ageeva², O.G. Bilyk¹, E. Khaled¹

¹SHEI «Priazovskyi State Technical University». 7 Universitetskaya str., Mariupol, 87500. E-mail: office@pstu.edu

²Donbas State Mechanical Engineering Academy. 72 Akademichna Str., Kramatorsk, 84300

Literature data review showed that the longitudinal magnetic field (LMF) is used to increase the process effectiveness at arc surfacing and welding. At surfacing and welding with LMF impact, the electrode metal melting rate increases, control of the cross-sectional geometrical dimensions of the deposited bead and weld becomes possible, the structure of the deposited metal and welds is refined, and hardness, strength and ductility of weld metal, as well as hot cracking resistance of the welds become higher. It was established that effective stirring of liquid metal in the weld pool, i.e. along its entire length, should be ensured for refinement of structural components of the metal deposited under LMF impact. Here, optimum parameters of the controlling magnetic fields should be provided. In this work, experiments were performed on submerged-arc surfacing of plates from 20 mm thick low-carbon steel with 5 mm Sv-08A wire under the impact of LMF at the following frequencies: 5, 10, 20, 33 and 50 Hz. The magnitude of the longitudinal component of magnetic field induction B_z was 30...40 mT, when measured under the electrode at the surface of the plate product. The influence of LMF frequency on base metal penetration depth and deposited bead width was studied. It is found that at LMF frequencies in the range of $f = 5...50$ Hz, the penetration depth is smaller, while the bead width is greater than at surfacing without LMF application. 25 Ref., 4 Fig.

Keywords: submerged-arc surfacing, welding wire, controlling magnetic field, optimum modes, welded joint quality

Надійшла до редакції 08.06.2021

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ НАПЛАВЛЕННЯ РОБОЧОГО ШАРУ ЗМІННОГО СКЛАДУ НА ОБТИСКНІ ПРОКАТНІ ВАЛКИ

Л.К. Лещинський, В.П. Іванов, В.М. Матвієнко, К.К. Степнов, Є.І. Воз'янов

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» МОН України. 87555, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7.
E-mail: ivanov_v_p@pstu.edu

Показано, що розробка технології наплавлення на обтискні валки робочого шару змінного по довжині бочки складу і механічних властивостей дозволяє звести до мінімуму нерівномірність зносу, особливо на ділянці з його найбільшою глибиною. Застосування цієї технології передбачає використання системи управління, що забезпечує роздільне регулювання приводом подачі кожного з електродів. Показано, що при напавленні обтискних валків шаром змінного складу системи легування C–Cr–Mo–V зміст елементів доцільно обмежити межами 15X3ГСМФ – 24Х4МФБС. Показано, що реалізація технології наплавлення робочого шару змінного складу на обтискні валки здійснюється шляхом подачі в загальну зварювальну ванну двох стрічкових електродів ЛН-15Х3ГСМФ та ЛН-24Х4МФБС. Встановлено, що для отримання необхідного закону зміни складу шару по довжині бочки співвідношення швидкостей подачі стрічкових електродів змінюють відповідно до показника вуглецевого еквівалента металу стрічкових електродів. Показано, що при експлуатації горизонтальних валків стану слябінг, напавлених шаром змінного складу, знижується нерівномірність зносу бочки, а також підвищується напрацювання валків на 1 мм зносу робочого шару. Бібліогр. 9, табл. 3, рис. 2.

Ключові слова: напавлення, робочий шар, змінний хімічний склад, вуглецевий еквівалент, стрічкові електроди, обтискний прокатний валок, нерівномірний знос, закон змінення твердості

Удосконалення технології наплавлення обтискних прокатних валків викликано необхідністю зниження інтенсивності і нерівномірності зносу робочого шару, підвищення його стійкості до зношування і циклічних теплових змін [1, 2]. Глибина зносу нерівномірна по довжині бочки горизонтального валка слябінга [3] і зростає з віддаленням від краю бочки, досягаючи максимальної величини в зоні розташування кромки сляба (30...450 мм від його країв), після чого дещо знижується (рис. 1). Нерівномірний знос призводить до зміни форми і розмірів сляба, в зв'язку з чим потрібні часті перевалки і переточки валків. Звести до мінімуму нерівномірність зносу бочки дозволяє застосування технології електродугового наплавлення шару змінного хімічного складу [4]. Це здійснюється шляхом подачі з програмованої швидкістю в загальну зварювальну ванну двох електродів, які відрізняються вмістом легуючих елементів, що оцінюється показниками вуглецевого еквіваленту та твердості. Тим самим забезпечується залежність зміни складу напавленого металу і його властивостей відповідно до профілю зносу валка.

Зміна вмісту легуючих елементів в напавленому робочому шарі, його механічних і експлуатаційних властивостей не тільки зводить до мінімуму нерівномірність зносу, але також супроводжується формуванням на поверхні бочки ділянок, що відрізняються за складом і твердістю від навко-

лишнього металу. Це дозволяє поліпшити умови захоплення заготовки валками. Технологія наплавлення обтискних валків шаром змінного хімічного складу, що якнайповніше відповідає цим вимогам, передбачає створення системи управління [4], яка забезпечує роздільне управління приводами подачі електродів, а отже, необхідне змінення складу та твердості напавленого шару. Система забезпечує також відпрацювання траєкторії переміщення напавочного апарату щодо поверхні валка.

Виходячи з умов експлуатації, робочий шар обтискних валків зі сталі типу 60ХН характеризується твердістю $HV\ 270\ldots 290$, міцністю $\sigma_{0,2} = 520\ldots 540$ МПа, пластичністю $\psi = 30\ldots 35\%$, ударною в'язкістю $0,20\ldots 0,25$ МПа [5]. Більш високі вимоги до властивостей напавленого шару передбачають поєднання оптимальних значень твердості ($HV \leq 400$), технологічної міцності

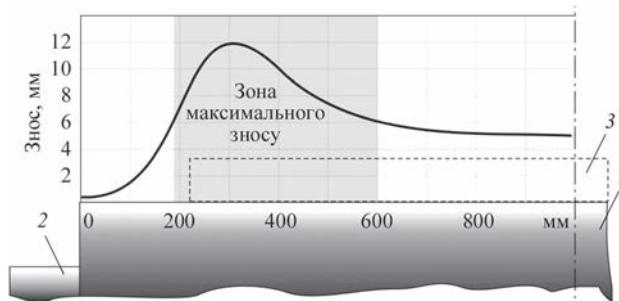


Рис. 1. Характер зносу горизонтального валка слябінга: 1 – бочка валка; 2 – шийка; 3 – сляб

Лещинський Л.К. – <https://orcid.org/0000-0002-7473-7510>, Іванов В.П. – <https://orcid.org/0000-0003-3339-7633>,
Матвієнко В.М. – <https://orcid.org/0000-0002-8713-1630>, Воз'янов Є.І. – <http://orcid.org/0000-0002-2034-1270>
© Л.К. Лещинський, В.П. Іванов, В.М. Матвієнко, К.К. Степнов, Є.І. Воз'янов, 2021

($A_{кр} \geq 10 \dots 12$ мм/хв), пластичності ($\psi \geq 40 \dots 45$ %), динамічної тріщиностійкості (ударної в'язкості $KC \geq 0,30 \dots 0,33$ МДж/м² і коефіцієнта інтенсивності напружень $K_{ID} \geq 26,0 \dots 28,0$ МПа·м^{1/2}). Цими властивостями характеризуються сталі 15Х3М1Ф, 20Х2М2ФН, 25Х5ФМС, які наплавлені відповідними електродними матеріалами [6]. Разом з тим, при отриманні шару змінного хімічного складу з безперервним змінням вмісту легуючих елементів доцільно використовувати наплавні матеріали системи легування С–Cr–Mo–V, обмеживши вміст хрому (2,5...5,0 %), вуглецю (0,15...0,25 %), молібдену (0,6...1,3 %), ванадію (0,15...0,40 %), ніобію (0,15...0,25 %). В роботі [7] в якості нижньої межі даної області пропонується склад 16Х4ГМФС (еквівалент вуглецю $C_e = 1,273$ *, твердість HV 345). Разом з тим, верхньою межею є склад 25Х5ФМС ($C_e = 1,707$; HV 420), який характеризується високим опором зносу в поєднанні з достатньою пластичністю.

Однак, з огляду на змінні термосилові навантаження високої інтенсивності, що впливають на обтискний валок, для наплавлення робочого шару доцільно використовувати матеріали з більш високою пластичністю і тріщиностійкістю. Тому для нижньої межі області легування обрано наплавний метал 15Х3ГМФС ($C_e = 1,066$, твердість HV 305). У той же час для верхньої межі використовується наплавний метал 24Х4МФБС ($C_e = 1,45$, HV 400), в якому в порівнянні з наплавним металом 25Х5ФМС зменшений вміст хрому і вуглецю, а також введений ніобій. При цьому зміна вуглецевого еквівалента C_e в межах 1,07...1,45 супроводжується зростанням твердості металу HV від 305 до 400, але в меншій мірі – зниженням ударної в'язкості (табл. 1). Останнє пояснюється присутністю в структурі пакетного мартенситу, що впливає на енергоємний механізм руйнування – транскристалітний скол і мікрів'язке ямкове.

У сталі 15Х3ГМФС, що містить (мас. %) 0,15 С; 3,2 Cr; 0,3 Мо; 0,08 V; 1,2 Mn; 0,5 Si ($C_e = 1,066$), після наплавлення та термоциклічної відпустки утворюється феритно-цементитна структура, в якій ~ 10 % вільного фериту, а карбідна фаза представлена великими пластинами цементиту [7]. Така структура відрізняється низькою твердістю HV 305 (HSD 46), високою пластичні-

стю, ударною в'язкістю та стійкістю до розтріскування при циклічних тепловмінах (див. табл. 1). Механізм руйнування такої структури – в основному мікрів'язкий ямковий. Разом з тим, у зв'язку з обмеженим опором зносу тертям при підвищеній температурі, склад 15Х3ГМФС доцільно використовувати для наплавлення краю бочки (рис. 2). У міру віддалення від краю змінюють склад і твердість наплавленого шару за законом, поданим на рис. 2, таким чином, щоб максимальне значення еквівалента вуглецю і твердості металу досягти на ділянці найбільш інтенсивного зносу. Ця ділянка на бочці валка знаходиться в зоні розташування кромки сляба (для горизонтального валка слябінга ~ 400 мм від країв бочки) (рис. 2). Такому значенню C_e відповідає склад 24Х4МФБС, що містить (мас. %) 0,24 С; 4,2 Cr; 0,8 Мо; 0,40 V; 0,25 Nb; 0,8 Mn; 0,5 Si, який забезпечує твердість HV 400 (HSD 57) і високий опір зношуванню. Ці характеристики зберігають незмінними на ділянці бочки (рис. 2), після чого, зменшуючи вміст вуглецю до 0,20 %, забезпечують зміну складу наплавленого шару (20Х4ГФМБ). При цьому C_e знижується до 1,297, а твердість металу – до HV 365 (HSD 53), в його структурі мартенситна матриця з відносно великими первинними і дисперсними вторинними карбідами хрому, ніобію і ванадію.

Відповідно до розроблених матеріалів, на металургійному комбінаті «ММК ім. Ілліча» освоєно промислове виробництво холоднокатаної легованої стрічки товщиною 1,0^{-0,2} мм і шириною 30 мм і отримання стрічкових електродів для наплавлення прокатних валків [8, 9]. При зміцненні горизонтального валка слябінга наплавлення шару змінного хімічного складу забезпечується подачею в загальну зварювальну ванну з регульованою швидкістю двох стрічкових електродів

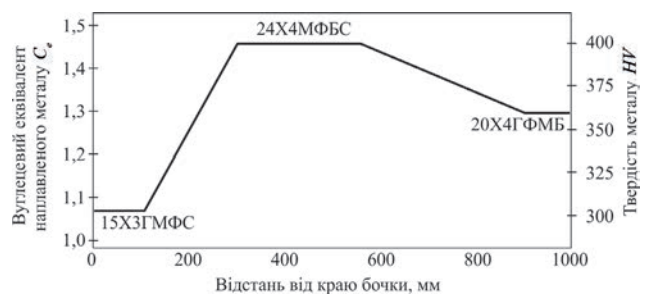


Рис. 2. Зміна вуглецевого еквівалента C_e і твердості наплавленого металу

Таблиця 1. Експлуатаційні властивості наплавленого металу

Склад металу	$A_{кр}$, мм/мин	KC^* , МДж/м ²	K_{ID} , МПа·м ^{1/2}	Число циклів нагрів-охолодження до появи тріщини	Відносна зносостійкість при 600 °С
15Х3ГМФС	11,9	0,46	29,5	1930	1,0
20Х4ГФМБ	11,3	0,40	28,6	1800	1,3
24Х4МФБС	11,0	0,37	28,5	1670	1,5

*Випробування для визначення KC і K_{ID} проводилися при 20 °С.

* Розрахунок значень еквівалента вуглецю C_e здійснювався за запропонованою Міжнародним інститутом зварювання залежністю.

Таблиця 2. Вплив співвідношення швидкостей подачі стрічкових електродів ЛН-15Х3ГМФС та ЛН-24Х4МФБС на показник C_e і властивості металу

Співвідношення швидкостей	C_e	$HV (HSD)$	$\psi, \%$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$
100/0	1,066	305 (46)	57,0	680
40/60	1,297	365 (53)	53,0	740
0/100	1,453	400 (57)	48,0	780

Таблиця 3. Результати експлуатації наплавлених обтискових валків

Горизонтальні валки стану слябінг 1150	Обсяг прокатаного металу, тис. т	Напрацювання на 1 мм зносу, т/мм
Валки зі сталі 60ХН	825,0	22,0
Валки, наплавлені шаром постійного складу	927,0	38,4
Валки, наплавлені шаром змінного складу	1050,0	43,5

ЛН-15Х3ГМФС і ЛН-24Х4МФБС. Співвідношення масової швидкості їх подачі (при постійній сумарній швидкості) вибирається, виходячи з показника вуглецевого еквівалента таким чином, щоб отримати на краю бочки склад з мінімальним значенням C_e (чому відповідає сталь 15Х3ГМФС). Далі, змінюючи співвідношення швидкостей подачі, забезпечують збільшення C_e до його максимального значення (чому відповідає сталь 24Х4МФБС). Режим наплавлення двома стрічковими електродами загальним перетином 60 мм²: струм постійний зворотної полярності $I_{\text{н}} = 700 \dots 740 \text{ А}$, $U = 34 \dots 36 \text{ В}$, $v_{\text{н}} = 10,5 \text{ м/год}$; сумарна об'ємна швидкість подачі двох стрічок 0,9 см³/с.

Промислова експлуатація наплавлених горизонтальних валків слябінгу 1150 з робочим шаром змінного хімічного складу показала, що зменшилася нерівномірність зносу бочки, а також підвищилося напрацювання на 1 мм зносу робочого шару (табл. 3).

Таким чином, застосування технології наплавлення робочого шару змінного хімічного складу і твердості для зміцнення горизонтальних валків слябінгу забезпечує стабілізацію вихідного профілювання за рахунок більш рівномірного зносу бочки. Це покращує геометрію слябів, що дозволяє при подальшій прокатці на широкосмуговому стані знизити витрату металу, пов'язану з припуском на ширину смуги.

Висновки

При виконанні досліджень встановлено:

1. Розробку технології наплавлення прокатних валків шарами змінного складу при заданій системі легування доцільно здійснювати, вибираючи співвідношення швидкостей подачі стрічкових електродів з найменшим і найбільшим показни-

ком вуглецевого еквівалента, що визначає властивості наплавленого металу.

2. Застосування технології наплавлення горизонтальних валків слябінга робочим шаром змінного хімічного складу і властивостей призводить не тільки до усунення нерівномірного зносу, але також до підвищення напрацювання валків на 1 мм зносу робочого шару.

Список літератури

1. Рябцев И.А., Кондратьев И.А., Васильев В.Г. и др. (2010) Исследование структуры и эксплуатационных свойств наплавленного металла для восстановления и упрочнения прокатных валков. *Автоматическая сварка*, 7, 14–18.

2. Рябцев И.А., Бабинцев А.А., Гордань Г.Н., Рябцев И.И. и др. (2013) Структура многослойных образцов, имитирующих наплавленные инструменты для горячего деформирования металлов. *Там же*, 9, 43–47.

3. Матвиенков С.А., Шебаниц Э.Н., Мурашкин А.В. и др. (2012) Наплавка рабочих и опорных валков с применением керамического флюса И-КФ-45-65 на ММК им. Ильича. *Металл и литье Украины*, 2-3, 50–54.

4. Иванов В.П., Лещинский Л.К., Щербakov С.В. (2019) Моделирование технологии наплавки износостойкого слоя переменного химического состава. *Автоматическая сварка*, 11, 40–45.

5. Corbett, R. (1990) *Rolls for Metalworking Industries*. Warrendale, Iron & Steel Society.

6. Рябцев И.А., Сенченков И.К. (2013) *Теория и практика наплавочных работ*. Киев, Экотехнология.

7. Самогугин С.С., Лаврик В.П., Лещинский Л.К., Соляник Н.Х. (2001) Плазменная обработка экономнолегированного теплостойкого наплавленного металла. *Проблемы спецэлектрометаллургии*, 2, 26–31.

8. Лещинский Л.К., Иванов В.П., Маслов А.А., Краева Л.В. и др. (1997) *Электродная лента для наплавки*. Пат. RU 2087589, C23C 30/00, B23K 020/227.

9. Бойко В.С., Степнов К.К., Шебаниц Е.М. та ін. (2003) *Электродна стрічка для наплавлення*. Пат. UA 62591, B23K 35/00.

References

1. Ryabtsev, I.A., Kondratiev, I.A., Vasiliev, V.G. et al. (2010) Investigation of structure and service properties of deposited metal for reconditioning and strengthening of rolling mill rolls. *The Paton Welding J.*, 7, 12-15.

2. Ryabtsev, I.A., Babinets, A.A., Gordan, G.N. et al. (2013) Structure of multilayer samples, simulating surfaced tools for hot deforming of metals. *Ibid.*, 9, 41-45.

3. Matvienkov, S.A., Shebanits, E.N., Murashkin, A.V. et al. (2012) Surfacing of working and backup rolls using the ceramic flux I-KF-45-65 at MMK im. Ilyicha. *Metall i Litio Ukrainy*, 2, 50–54 [in Russian].

4. Ivanov, V.P., Leshchynskiy, L.K., Shcherbakov, S.V. (2019) Modeling the technology of deposition of a layer of variable chemical composition. *The Paton Welding J.*, 11, 33-37.

5. Corbett, R. (1990) *Rolls for Metalworking Industries*. Warrendale, Iron & Steel Society.

6. Ryabtsev, I.A., Senchenkov, I.K. (2013) *Theory and practice of surfacing works*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].

7. Samotugin, S.S., Lavrik, V.P., Leshchinskyi, L.K., Solyanik, N.H. (2001) Plasma treatment of sparcely-alloed heat-resistant deposited metal. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, 2, 26–31 [in Russian]. Strip

8. Leshchinskiy, L.K., Ivanov, V.P., Maslov, A.A. at al. (1997) *Electrode strip for surfacing*. Patent 2087589 RU, Int. Cl. B23K020/227 [in Russian].

9. Boiko, V.S., Stepnov, K.K., Shebanits, E.M. et al. (2003) *Electrode strip for surfacing*. Patent 62591 UA, Int. Cl. B23K 35/00 [in Ukrainian].

DEVELOPMENT OF SURFACING TECHNOLOGY FOR THE WORKING LAYER OF VARIABLE COMPOSITION ON THE BLOOMING ROLLS

L.K. Leshchinskiy, V.P. Ivanov, V.M. Matviyenko, K.K. Stepnov, E.I. Vozyanov

State Higher Education Institute «Pryazovskyi State Technical University», 7 Universitetskaya Str., 87555, Mariupol, Ukraine.

E-mail: ivanov_v_p@pstu.edu

It is shown that development of the technology of surfacing of crimping rolls with a working layer of variable composition and mechanical properties along the barrel length makes it possible to minimize the unevenness of wear, especially in the area with its greatest depth. Application of this technology involves the use of a control system that provides separate control of the feed drive for each of the electrodes. It is shown that when surfacing the crimping rolls with a layer of variable composition of C-Cr-Mo-V alloying system, it is advisable to limit the content of elements within the range of 15Kh3GSMF – 24Kh4MFBS. It is demonstrated that the technology of surfacing of crimping rolls with a working layer of variable composition is realized by feeding two strip electrodes LN-15Kh3GSMF and LN-24Kh4MFBS into the common weld pool. It was found that to obtain the required law of the change of the layer composition along the barrel length, the ratio of feed rates of the strip electrodes is changed in accordance with the carbon equivalent index of the metal of strip electrodes. It is shown that during operation of horizontal rolls of the slabbing mill, surfaced with a layer of variable composition, the unevenness of barrel wear decreases, and the rolls operating time per 1 mm of wear of the working layer also increases. 9 Ref., 3 Tabl., 2 Fig.

Keywords: surfacing, working layer, variable chemical composition, carbon equivalent, strip electrodes, crimping roll, uneven wear, law of hardness change

Надійшла до редакції 01.07.2021

КОМПОЗИЦІЇ НА ОСНОВІ МАГНІТНИХ НАНОЧАСТИНОК ДЛЯ НЕРУЙНІВНОЇ МАГНІТНОЇ ДЕФЕКТОСКОПІЇ

Призначення: проведення неруйнівної дефектоскопії виробів з магнітних матеріалів із використанням композицій на основі магнітних наночастинок, а також одержання стійкого зображення дефекту завдяки створенню репліки при затвердінні композиції.

Область застосування: дефектоскопія виробів з магнітних матеріалів – сталі, заліза, чавуну.

Основні технічні характеристики та переваги:

Розмір дефектів, які можна виявити	1,2 мкм і більше
Виявлення скритих дефектів, що не виходять на поверхню	до 3 мм під поверхнею
Висока контрастність зображення дефекту	Так
Можливість фіксації зображення дефекту при затвердінні репліки	Так
Низька вартість композиції	Так
Відсутність потреби в спеціальному обладнанні	Так



Інститут фізичної хімії
ім. Л.В. Писаржевського НАН України

ПРИСТРІЙ ДЛЯ КОНТРОЛЮ НАЯВНОСТІ ТРІЩИН В НАРІЗНИХ З'ЄДНАННЯХ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ТА ТРАНСПОРТНОГО ОБЛАДНАННЯ

Призначення: вихорострумний портативний пристрій індикаторного типу, для виявлення дефектів в металевих виробках.

Область застосування: енергетика, машинобудування, транспорт, видобувна промисловість.

Прилади комплектуються датчиками, що забезпечують контроль деталей різної конфігурації, в тому числі пристосуваннями для виявлення дефектів в металевих виробках. Залежно від виду об'єкта та умов контролю (наприклад, виявлення тріщин в деталях нарізних з'єднань або відшарування бабіту у підшипниках ковзання, теплових канавках роторів), пристрій оснащується датчиками відповідної конструкції та чутливості.

Основні технічні характеристики та переваги:

- Мінімальна глибина реєстрованого дефекту, мм... 0,5;
- Товщина ізолюючого покриття, мм, не більше 3;
- Виявлення дефектів у різі глибиною до 4 мм для феромагнітних та до 10 мм для неферомагнітних металів.
- Габаритні розміри, мм..... 63 x 83 x 30;
- Вага, кг 0,2;
- Живлення автономне напругою, В..... 1,5.



Інститут проблем машинобудування
НАН України ім. А.М. Підгорного

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ БУРОВИХ ДОЛІТ ІЗ ЗАХИСНИМ ПОКРИТТЯМ РОБОЧИХ ОРГАНІВ

Б.В. Стефанів

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

Розглянуто і вивчено особливості виготовлення бурових доліт і шарошок. Проведений аналіз експлуатації робочих органів корпусів бурових доліт показав, що найчастіше при бурінні відбувається зношування різців, захисного покриття посадочних гнізд і калібруючої поверхні корпусів бурових доліт. Досліджено, що при дуговому наплавленні ТІГ-способом низькі швидкості нагрівання і охолодження металу під час підігріву робочих органів долота дозволяють зменшити залишкові напруження й уникнути утворення тріщин в покриттях і основному матеріалі. Встановлено, що оптимальна товщина наплавлення захисного покриття повинна бути в межах 2,0...3,0 мм, де спостерігається рівномірне розміщення карбідів вольфраму по всьому об'єму наплавленого шару, що дозволяє ефективно протистояти зношуванню робочих органів лопатей і корпусів доліт в умовах знакозмінних та ударних навантажень, гідроабразивного зносу, корозії, ерозії, тощо. Встановлено, що долота з захисним покриттям, маючи високу зносостійкість і корозійну стійкість, підвищують механічну швидкість буріння і вирішують найважливіше завдання щодо зменшення кількості опускально-підймальних операцій при бурінні газових та нафтових свердловин. В результаті проведених виробничих випробувань виготовлених бурових доліт встановлено, що захисне покриття робочих органів дозволяє подовжити експлуатаційний ресурс. Бібліогр. 18, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: долота, шарошки, буріння, зношування, робочий орган, полікристалічний алмазний різець (PDC-polycrystalline diamond cutter), твердосплавне покриття, наплавлення, карбіди вольфраму, мікроструктура, зносостійкість, випробування

Для ефективного буріння надр для видобутку вуглеводнів потрібно правильний вибір долота при певних умовах експлуатації. Основний буровий інструмент – долото для обертального буріння (яке в широкому сенсі слова класифікується як долото з фіксованими різцями або як шарошкове долото) призначене для різних порід і широкого спектру умов. Сьогодні бурові долота на ринку України представлено долотами вітчизняного і закордонного виробництва.

В світі налічується більше трьох десятків компаній, що займаються розробкою і виробництвом бурового інструмента. Провідне місце належить компаніям «Varel International», «Hughes Christensen», «Halliburton», «Smith Bits», «Reed Hycalod», «National Oilwell Varco», «Schlumberger», «Reed Tools Company», «Baker Hughes» і «GemDrill» та інші. Ці компанії поставляють інструменти більш ніж в 86 країн світу. Частка імпортних бурових доліт на українському ринку доліт для нафтогазової промисловості складає близько 12 %, а гірничорудних – 14 %.

Основними характеристиками спрацювання PDC доліт (як власного, так і іноземного виробництва) на родовищах України є: зношування зубків – 17 %, поломка зубків – 30 %, сколювання зубків – 31 %, випадіння зубків – 3 та 19 % – відсутність спрацювання [1].

В Україні бурові долота типу PDC та шарошкові долота виготовляються Інститутом надтвердих

матеріалів [2] і Дрогобицьким долотним заводом «ТОВ «Універсальна бурильна техніка» [3]. Недоліком бурових доліт типу PDC, виготовлених в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля є недостатній захист робочих органів, а саме лопатей і калібруючої поверхні корпусу без захисного покриття, що суттєво впливає на їх зносостійкість і експлуатаційний ресурс.

На Дрогобицькому долотному заводі ТОВ «Універсальна бурильна техніка» в основному виготовляються тришарошкові бурові долота, в яких шарошки оснащені вставними твердосплавними зубками. Недоліком шарошкових доліт є недостатній захист робочих органів, а саме втрата фрагментів шарошки (розколювання тіла шарошки, відламування цапфи лапи), тіл кочення (заклинювання опор і зупинення обертання шарошок) чи цілої секції (розколювання, зношування, випадання вставного породоруйнівного оснащення шарошок).

Застосування бурових доліт типу PDC із захисним покриттям робочих органів дозволяє на порядок і більше підвищити проходку в порівнянні шарошковими та долотами без захисного покриття і знизити витрати на опускально-підймальні операції. Це свідчить про необхідність подальших досліджень в напрямку аналізу і підбору даних буріння, оскільки буріння долотами PDC дає змогу полегшити бурові роботи, скоротити терміни спорудження свердловин, особливо в процесі буріння глибоких свердловин, а відсутність рухомих елементів конструкції доліт виключає виникнення аварійних ситуацій. Конструкція типу доліт PDC забезпечує тривалий ресурс

експлуатації і високі швидкості буріння за рахунок високої зносостійкості захисного покриття робочих органів і ріжучих елементів PDC-різців, відсутності підшипникової опори, що підвищує проходку бурового інструмента. Незначний вплив динаміки роботи долота на вибій і бурильну колону (порівняно з шарошковими) та висока зносостійкість захисного покриття і різців калібруючої поверхні виключають необхідність проробки і калібрування стовбура свердловини перед опусканням обсадної колонії.

Для бурового інструмента основними показниками механічних властивостей зносостійких покриттів є гідроабразивна зносостійкість, твердість і корозійна стійкість, що дозволяє ефективно протистояти ряду проблем зношування робочих органів доліт в умовах знакозмінних та ударних навантажень, гідроабразивного зносу, корозії, ерозії і т.д. Міцність захисного покриття залежить від температури, тиску, механічного навантаження, агресивності середовища і міцності гірських порід. Маючи високу зносостійкість і корозійну стійкість, долота з захисним покриттям підвищують механічну швидкість буріння і вирішують найважливіше завдання щодо зниження вартості метра проходки.

Зважаючи на зазначене вище, мета роботи полягала у розробці технології виготовлення бурових доліт із захисним покриттям робочих органів, що дає змогу подовжити експлуатаційний ресурс.

Матеріали та методи. Об'єкт досліджень – ділянки робочих органів корпусів сталевих бурових доліт. Дослідження мікроструктури проводили за стандартною методикою на електронному мікроскопі Tescan Mira 3 LMU та оптичному мікроскопі Неофот 32. Зварювальні апарати Корал-300 та ПРС-3М. Композиційний матеріал – Tero Cote 7888T.

Результати дослідження. Для захисту робочих органів бурового інструмента від різних видів зношування широко застосовуються композиційні матеріали на базі сплавів Ni, Fe, NiCr, NiCrBSi, міді тощо, зміцнених карбідами вольфраму [4, 5]. Перш за все це пов'язано з унікальними властивостями армуючої фази таких сплавів – карбідами вольфраму. Карбід вольфраму є одним з найбільш твердих і удароміцних карбідів, і наплавлення твердосплавного покриття (ТП) є швидким способом нанесення карбідо-вольфрамового покриття на ділянки робочих органів, що піддаються дії інтенсивних абразивних навантажень і зберігає механічні властивості в широкому діапазоні температур, стійкий до фрикційної корозії і здатний утворювати міцний зв'язок з металами [6, 7].

Проведені дослідження зносостійкості композиційних матеріалів в умовах гідроабразивного зношування показали, що зносостійкість захисного покриття TeroCote 7888T на основі системи Ni–Cr–B–Si з колотими частинками карбіду вольфраму

перевищує зносостійкість реліту «ЛЗ-11–7» і Diamax M [8]. За результатами досліджень зносостійкості був вибраний сплав TeroCote7888T, на основі якого були проведені дослідження цього матеріалу на корозійну стійкість. Результати проведених досліджень на корозійну стійкість показали [9], що застосування захисного покриття, нанесеного з використанням композиційного матеріалу TeroCote 7888T, дозволяє суттєво знизити швидкість корозії сталевих робочих органів бурових доліт без захисного покриття. Ґрунтуючись на результатах досліджень гідроабразивного і корозійного зношування композиційних матеріалів, головну увагу було приділено даному сплаву, який відноситься до категорії корозійно-зносостійких захисних матеріалів.

Стійкість і показники буріння буровими сталевими долотами із захисним покриттям прямо залежить від здатності елементів озброєння у вигляді полікристалічних алмазних різців і твердосплавних вставок чинити опір абразивному зносу ділянок лопатей навколо цих елементів, які прагнуть зруйнувати систему кріплення цих породоруйнівних елементів (рис. 1). Зокрема, абразивне зношування сталевих ділянок лопатей, розташованих навколо ріжучих і калібруючих елементів, а також припою, який утримує їх від виривання, сприяє оголенню, збільшенню розміру виступу і поступового випадання окремих елементів.

Для визначення товщини захисного покриття робочих органів доліт були проведені дослідні роботи щодо наплавлення композиційного сплаву TeroCote 7888T. Наплавлення вико-



Рис. 1. Схема розташування робочих органів долота: 1 – різець; 2 – твердосплавна вставка калібруючої поверхні; 3 – міжлопатевий простір для виносу шламу; 4 – захисне покриття промивного каналу; 5 – твердосплавна насадка промивного каналу; 6 – захисне покриття робочих органів лопатей

нували ТІГ-способом на зразках, виготовлених зі сталі 30Х, товщиною 14 мм. При нанесенні зносостійкого шару до 1,5 мм (рис. 2, а) на зразки спостерігається хаотичне розміщення частинок карбідів вольфраму, а при 2,0...3,0 мм (рис. 2, б) – рівномірне розташування карбідів вольфраму по всьому об'єму наплавленого шару. При збільшенні товщини покриття 3,5 мм (рис. 2, в) основна маса частинок карбідів вольфраму розташовується в нижніх і середніх зонах, в верхніх зонах – практично відсутня. Все це можна пояснити фізичними властивостями композиційного матеріалу, оскільки в матричному матеріалі міститься 65 % карбідів вольфраму. Великий вміст карбідів вольфраму не дає змогу матричному матеріалу змочуватися і розтікатися на поверхні основного металу.

На основі результатів проведених робіт можна констатувати, що оптимальна товщина наплавлення повинна бути в межах 2,0...3,0 мм, де спостерігається рівномірне розміщення карбідів вольфраму по всьому об'єму наплавленого шару, тоді як в меншій – частинки карбідів вольфраму розташовуються в верхній зоні, а в більшій – частинки карбідів вольфраму в основному розташовуються в середній і нижній зонах наплавлення. Товщина наплавленого зносостійкого шару в межах 2,0...3,0 мм дозволяє ефективно захистити поверхню робочого органу сталевих бурових долот від корозійного, ерозійного та абразивного зношування при бурінні газових і нафтових свердловин.

Для технології виготовлення бурових доліт із захисним покриттям робочих органів необхідно виконання ряду технологічних операцій. Від власних розробок на базі ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України була створена технологічна схема:

- проектування конструкції долота з урахуванням умов свердловини;
- виготовлення деталей долота на п'ятикоординатному обробному центрі (ЧПУ);

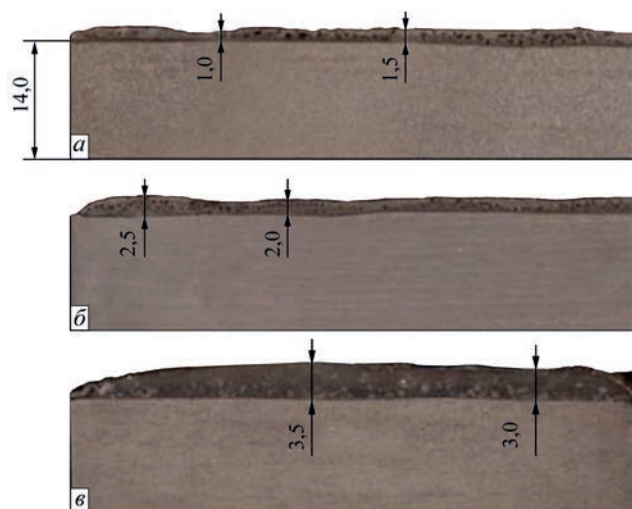


Рис. 2. Нанесення зносостійкого покриття на зразки: а – 1,0...1,5; б – 2,0...2,5; в – 3,0...3,5 мм

- наплавлення зносостійкого твердосплавного матеріалу на робочі органи;
- встановлення та паяння різців і твердосплавних вставок;
- обробка поверхонь долота до розміру;
- випробування.

Вибір типів бурових доліт на стадії проектування проводилося двома способами: за механічними та абразивними властивостями гірських порід і за промисловими даними. Проектування конструкції бурового долота відбувалося з урахуванням шести чинників впливу, а саме: характеристики розбурюваних порід згідно [10], діаметр бурового долота, навантаження, число обертів, об'єм промивної рідини, тиск на вибої. Звісно, дані параметри далеко не повністю описують всі можливі чинники впливу, проте вони були вибрані нами тому, що саме вони фіксуються у бурових журналах. Для доліт вітчизняного виробництва додатковим параметром був тип буріння (1 – роторний; 2 – турбінний).

На етапі проектування бурових доліт використовувалася інформація про експлуатаційні показники. Така інформація отримана з даних напрацювання аналогічних конструкцій в реальних умовах буріння. Моделювання бурових доліт діаметром 165,1 мм (рис. 3) здійснювалося за результатами попередньо проведених нами робіт щодо підземного і поверхневого буріння м'яко-середніх, середніх та твердих гірських порід для видобутку розсіяного метану і природного газу [11]. За результатами проведених робіт в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України були розроблені конструкції бурових доліт і калібраторів та одержано патенти на їх винахід [12, 13].

Виготовлення бурового долота включало токарну і фрезерну обробку корпусу, свердління центрального каналу корпусу та розточування каналів для підведення промивної рідини до охолодження лопатей і різальним

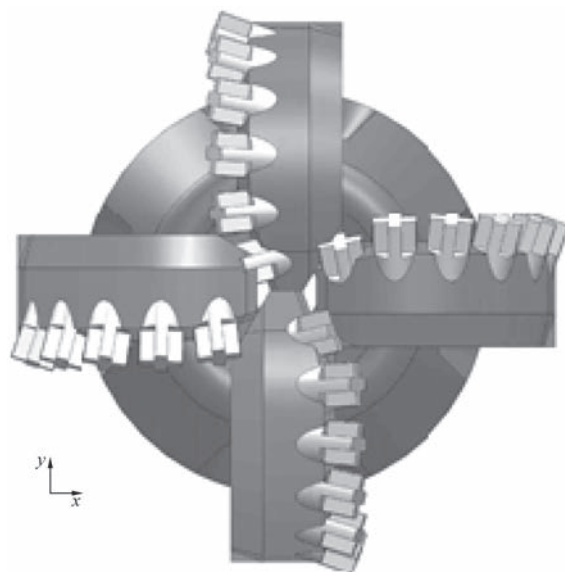


Рис. 3. Моделювання різців лопатей корпусу долота

кромкам алмазно-твердосплавних різців. Роботи виконувалися на п'ятикоординатному обробному центрі (ЧПУ). Були виготовлені заготовки корпусу для цільнофрезерованих (рис. 4) та корпусу і лопатей комбінованих (рис. 5) бурових доліт. Комбіновані долота відрізняються від цільнофрезерованих тим, що корпус долота з'єднується з лопатями методом зварювання, що дає змогу зменшити собівартість виготовлення доліт.

Зварювання лопатей з корпусом бурового долота проводилося аргонодуговим зварюванням в чистому аргоні марки А неплавким електродом на апараті «Корал-300». Корінь шва варили присадним дротом марки ВНС-17 (03Х11Н10М2Т) діаметром 2 мм. При цьому зварювальний струм $I = 140 \dots 150$ А, напруга $U = 11 \dots 12$ В. Посилення катета зварювального шва виконувалося із застосуванням присадного дроту марки 18Х4ГМА, діаметром 3 мм ($I = 160 \dots 170$ А, $U = 12 \dots 13$ В). Для зняття зварювальних напружень в швах проводили відпуск долота в печі з температурою нагріву 640°C протягом 2 год. Охолодження долота відбувалося на повітрі. Твердість після відпустки становила $HB\ 179$.

За результатами проведених робіт [14, 15] щодо нанесення захисного покриття робочих органів корпусів



Рис. 4. Корпус цільнофрезерованого долота

бурових доліт був обраний композиційний матеріал TeroCote 7888 Т, який добре змочує основний метал та не має дефектів при нанесенні наплавлювального шару на набігаючій і збігаючій ділянок посадкових гнізд отворів алмазно-твердосплавних різців (АТР). При розробці технології нанесення корозійнозносостійкого шару на ділянки робочих органів доліт було віддано перевагу дуговому наплавленню. Суть процесу наплавлення полягає в використанні теплоти для розплавлення присадного матеріалу і його з'єднання з основним металом корпусу долота. Необхідність використання місцевого підігріву робочих органів корпусу долота обумовлена малими значеннями рідкоплинності та розтікання композиційного матеріалу, який вміщує близько 65 мас.% частинок з карбідів вольфраму порівняно з його основою – високотемпературним сплавом металічної системи Ni-Cr-B-Si . Використовуючи можливості дугового наплавлення, на поверхні лопатей можна отримати наплавлений шар необхідної товщини, хімічного складу з потрібними властивостями.

Перед нанесенням захисного покриття на ділянки робочих органів потрібно щільно установити в гнізда отворів лопатей графітові пробки, які дають змогу при наплавленні захистити ці отвори від затікання наплавленого зносостійкого сплаву; провести попередній підігрів робочих органів корпусу до температури $400 \dots 500^\circ\text{C}$. При наплавленні ділянок робочих органів (рис. 6, а) були використані два джерела теплової енергії: електромагнітного поля високочастотного змінного струму (індукційне) для попереднього підігріву корпусу, та теплоти, яка виділяється при ТІГ-способі наплавлення – нанесення присадного сплаву TeroCote 7888Т при температурі $1200 \dots 1250^\circ\text{C}$ (таблиця).

Середня товщина наплавленого шару робочих органів лопатей становила $2 \dots 3$ мм.

Паяння алмазно-твердосплавних різців в гнізда отворів робочих органів лопатей корпусу долота проводилося при температурі $650 \dots 680^\circ\text{C}$ (рис. 6, б), оскільки більша температура нагрівання починає



Рис. 5. Комбіноване долото: а – корпус; б – лопаті

Режими дугового наплавлення

Напруга, В	Рід струму	Струм, А	Витрата аргону, $\text{дм}^3/\text{хв}$	Швидкість наплавлення, м/год	Джерело живлення
10...12	Постійний, пряма полярність	80...100	2,5...3,0	2...4	ПРС-3М

впливати на міцносні властивості полікристалічних алмазних різців [16, 17]. Все це може привести до графітизації полікристалічних синтетичних алмазів, утворення тріщин, викликаних різницею коефіцієнтів теплового розширення алмазу і кобальту, і, як наслідок, руйнування алмазного шару.

Для визначення мікроструктури захисного покриття були виготовлені мікрошліфи зі сталі 30X з наплавленим шаром (рис. 7). Металографічні дослідження показали, що при наплавленні ТІГ-способом під час формування наплавленого шару відбувається рівномірне розподілення частинок карбіду вольфраму по всьому об'єму композиційного матеріалу TeroCote 7888T, яке обумовлює рівномірне розподілення твердості по глибині покриття.

Мікроструктура наплавленого шару сталевого долота містить твердий розчин на основі нікель-хром, зміцненого карбідами вольфраму, і вмістом депресантів кремнію та бору. Присутність бору та кремнію в складі присадних дрітків надає їм самофлюсуючі властивості при наплавленні на сталь. Карбіди вольфраму неправильної форми (різних розмірів) розподілені по всьому полю мікрошліфу. З літератури відомо, що якісне зносостійке покрит-



Рис. 6. Нанесення покриття на робочі органи долота: а – лопать; б – долото після паяння алмазно-твердосплавних різців і вставок

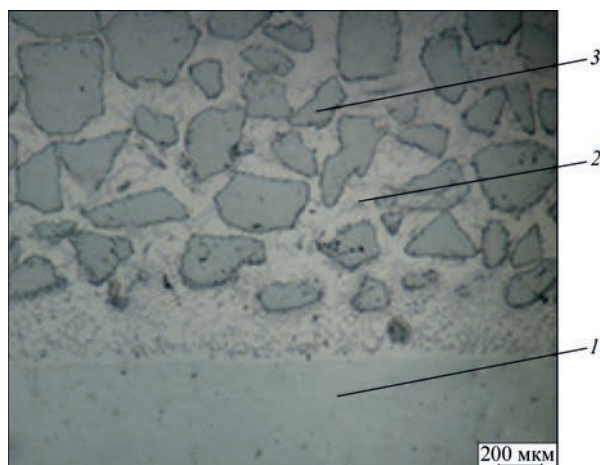


Рис. 7. Мікроструктура покриття сталевого долота: 1 – сталь 30X; 2 – матриця на основі сплаву NiCrBSi; 3 – карбіди вольфраму



Рис. 8. Бурові долота із захисним покриттям: 1 – комбіноване; 2 – цільнофрезероване; 3 – калібратор

тя повинно мати рівномірне розподілення твердих фаз з відстанню між цими фазами меншою, ніж розмір абразивних частинок [18].

Отримана структура наплавленого шару покриття дозволяє ефективно захистити поверхню робочих органів бурових доліт від ерозійного та абразивного зносу, викликаного впливом таких матеріалів, як пісок, гравій, земля, мінерали і т.д. В'язка матриця наплавленого сплаву поглинає ударні навантаження і покращує опір корозії, в той час як спеціальна форма карбідів вольфраму унеможливорює вирвати їх з матриці. Дослідження показали, що при наплавленні ТІГ-способом низькі швидкості нагрівання і охолодження металу під час підігріву робочих органів долота дозволяють зменшити залишкові напруження й уникнути утворення тріщин в покриттях і основному матеріалі.

Після кожного випадку використання долота обслуговуються і ремонтуються. Ремонт проводиться на ділянці ремонту робочих органів доліт за тією ж технологією, що і виготовлення нових бурових доліт. Партія бурових доліт і калібраторів із захисним покриттям робочих органів діаметром 165,1 мм, виготовлених в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, успішно пройшли випробування при бурінні свердловин на нафтогазоконденсатних родовищах Харківської області (рис. 8).

Висновки

1. Встановлено, що оптимальна товщина наплавлення захисного покриття повинна бути в межах 2,0...3,0 мм, де спостерігається рівномірне розміщення карбідів вольфраму по всьому об'єму наплавленого шару.

2. За результатами виробничих випробувань сталевих бурових доліт встановлено, що застосування даних доліт із захисним покриттям робочих органів дозволяє збільшити експлуатаційний ресурс при бурінні газових і нафтових свердловин.

Список літератури

1. Драганчук О.Т., Пригоровська Т.О. (2008) Аналіз відпрацювання доліт типу PDC на родовищах України і світу. *Нафтогазова енергетика*, 4, 9, 33–39.

References

2. Бондаренко Н.А. (2018) Высокоэффективный алмазный инструмент ИСМ для бурения нефтяных и газовых скважин. Обзор. *Сверхтвердые материалы*, 5, 79–92.
3. Яким Р.С. (2014) Оцінка надійності та критерії підвищення якості тришарових бурових доліт для буріння особливо міцних порід. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, 4, 53, 43–51.
4. Износостойкие материалы. Прутки для газовой и TIG-сварки [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://docplayer.ru/32381351-Iznosostoykie-materialy-i-tyvordye-splavy-na-osnove-kobalta.html>.
5. Материалы для пайки и наплавки TeroCote [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.castolin.com.ua>.
6. Самсонов Г.В., Витрянук В.Н., Чаплыгин Ф.И. (1974) *Карбиды вольфрама*. Киев, Наукова думка.
7. Pierson, H.O. (1996) *Handbook of Refractory Carbides and Nitrides*. New Jersey, Noyes Publications.
8. Стефанів Б.В. (2016) Исследование износостойкости защитных покрытий в условиях гидроабразивного износа. *Автоматическая сварка*, 2, 25–29.
9. Стефанів Б.В., Ниркова Л.І., Ларіонов А.В., Осадчук С.О. (2020) Корозійна стійкість композиційного матеріалу, наплавленого з використанням гнучкого шнура TeroCote 7888T. *Автоматичне зварювання*, 2, 29–32. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.02.05>
10. Сайфутдинов А.Б., Шарнин М.Ю. (1998) Эффективность использования долот PDC. *Нефтяное хозяйство*, 9.
11. Хорунов В.Ф., Максимова С.В., Стефанів Б.В. (2010) Изготовление буровых долот для добычи рассеянного метана в шахтных выработках. *Автоматическая сварка*, 6, 48–51.
12. Патон Б.Є., Стефанів Б.В., Хорунов В.Ф. та ін. (2009) *Бурове алмазне долото*. Україна Пат. 92268, (51) МПК E21B 10/46 E21B 10/5; заявл. 05.05.2009; опубл. 11.10.2010, Бюл. № 19.
13. Патон Б.Є., Стефанів Б.В., Хорунов В.Ф. та ін. (2009) *Калібратор*. Україна Пат. 92820, (51) МПК E21B 10/26 E21B 7/28; заявл. 10.03.2009; опубл. 10.12.2010, Бюл. № 23.
14. Стефанів Б.В., Хорунов В.Ф., Сабадаш О.М. и др. (2014) Особенности восстановления поврежденного промывочного канала стального бурового долота. *Автоматическая сварка*, 11, 54–58.
15. Стефанів Б.В., Хорунов В.Ф., Сабадаш О.М. и др. (2015) Особенности реставрации рабочих органов матричных корпусов буровых долот. *Там же*, 8, 51–54.
16. Стефанів Б.В. (2013) Разработка технологии пайки алмазно-твердосплавных резцов. *Там же*, 2, 38–42.
17. Стефанів Б.В. (2013) Особенности индукционной пайки алмазно-твердосплавных резцов с лопастью корпуса составного бурового долота. *Там же*, 8, 50–54.
18. Износостойкие материалы [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.svarka52.ru/upload/osnovnoi_katalog_po_paike_i_Terocote_BRAZING_1.pdf.
1. Draganchuk, O.T., Prygorovska, T.O. (2008) Analysis of drilling bit wear of PDC type in deposits of Ukraine and world. *Naftogazova Energetyka*, 4(9), 33–39 [in Ukrainian].
2. Bondarenko, N.A. (2018) High-efficient diamond tool ISM for drilling of oil and gas wells: Review. *Sverkhhtvordye Materialy*, 5, 79–92 [in Russian].
3. Yakym, R.S. (2014) Evaluation of reliability and criteria of quality improvement of tricone drill bits for drilling of extra hard rocks. *Rozvidka ta Rozrobka Naftovykh i Gazovykh Rodovyshch*, 4(53), 43–51 [in Ukrainian].
4. Wear-resistant materials. Rods for gas and TIG welding. <https://docplayer.ru/32381351-Iznosostoykie-materialy-i-tyvordye-splavy-na-osnove-kobalta.html>.
5. Materials for brazing and surfacing. TeroCote. <http://www.castolin.com.ua>.
6. Samsonov, G.V., Vitryanyuk, V.N., Chaplygin, F.I. (1974) *Tungsten carbides*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
7. Pierson, H.O. (1996) *Handbook of Refractory Carbides and Nitrides*. New Jersey, Noyes Publications.
8. Stefaniv, B.V. (2016) Investigation of wear resistance of protective coatings under conditions of hydroabrasive wear. *The Paton Welding J.*, 9, 26–29.
9. Stefaniv, B.V., Nyrkova, L.I., Larionov, A.V., Osadchuk, S.O. (2020) Corrosion resistance of composite material deposited by TIG method using flexible cord TeroCote 7888T. *Ibid.*, 2, 29–32. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.02.05>
10. Sajfutdinov, A.B., Sharnin, M.Yu. (1998) Efficiency of drill bits PDC. *Neftyanoe Khozyajstvo*, 9 [in Russian].
11. Khorunov, V.F., Maksymova, S.V., Stefaniv, B.V. (2010) Manufacture of drill bits for production of dispersed methane in mine working. *The Paton Welding J.*, 6, 48–51.
12. Paton, B.E., Stefaniv, B.V., Khorunov, V.F. et al. (2009) *Diamond drill bit*. Ukraine Pat. 92268, (51), Int. Cl. E21B 10/46 E21B 10/5; fill. 05.05.2009; publish. 11.10.2010
13. Paton, B.E., Stefaniv, B.V., Khorunov, V.F. et al. (2009) *Calibrator*. Pat. Ukraine 92820, (51), Int. Cl. E21B 10/26 E21B 7/28; fill. 10.03.2009; publish. 10.12.2010 [in Ukraine].
14. Stefaniv, B.V., Khorunov, V.F., Sabadash, O.M. et al. (2014) Features of reconditioning steel drill bit watercourse. *The Paton Welding J.*, 11, 50–54.
15. Stefaniv, B.V., Khorunov, V.F., Sabadash, O.M. et al. (2015) Peculiarities of restoration of working parts of drilling bit matrix bodies. *Ibid.*, 8, 47–50.
16. Stefaniv, B.V. (2013) Development of the technology of brazing diamond-hard alloy cutters. *Ibid.*, 2, 37–41.
17. Stefaniv, B.V. (2013) Peculiarities of induction brazing of diamond-hard alloy cutters to blade of body of complex drill bit. *Ibid.*, 8, 49–53.
18. Wear-resistant materials. http://www.svarka52.ru/upload/osnovnoi_katalog_po_paike_i_Terocote_BRAZING_1.pdf.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF MANUFACTURE OF DRILL BITS WITH PROTECTIVE COATING OF WORKING BODIES

B.V. Stefaniv

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

E-mail: office@paton.kyiv.ua

The peculiarities of manufacturing drill bits and cutters are considered and studied. The carried out analysis of operation of working bodies of drill bit frames showed that during drilling most often a wear of cutters, a protective coating of sitters and a calibrating surface of frames of drilling bits occur. It was investigated that in arc surfacing using TIG method, low rates of heating and cooling of metal during preheating of working bodies of a bit allow reducing residual stresses and avoiding the formation of cracks in coatings and base material. It was established that the optimal thickness of surfacing the protective coating should be within 2.0...3.0 mm, where a uniform distribution of tungsten carbides throughout the volume of the deposited layer is observed, which effectively resists wear of the working bodies of blades and frames of bits in the conditions of alternating and shock loads, hydroabrasive wear, corrosion, erosion, etc. It was established that bits with a protective coating, having a high wear and corrosion resistance, increase the mechanical speed of drilling and solve the most important task of reducing the number of lowering and lifting operations when drilling gas and oil wells. As a result of carried out production tests of manufactured drill bits, it was found that protective coating of working bodies allows extending the service life. 18 Ref., 1 Tabl., 8 Fig.

Keywords: bits, cutters, drilling, wear, working body, polycrystalline diamond cutter (PDC), hard-alloy coating, surfacing, tungsten carbides, microstructure, wear resistance, tests

Надійшла до редакції 21.06.2021

ВПЛИВ ЛЕГУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ НА ТЕМПЕРАТУРИ СОЛІДУСУ І ЛІКВІДУСУ СПЛАВІВ СИСТЕМИ Cu–Mn–Ni–Si*

С.В. Максимова, І.В. Зволінський, Е.В. Іванченко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
Для плазмового паяння сталей застосовують припої, які мають температуру ліквідусу вище 1000 °С. В даній роботі показана можливість зниження температури паяння шляхом застосування припоїв, що мають меншу температуру плавлення. Методом високотемпературного диференційного термічного аналізу встановлено вплив марганцю, нікелю та кремнію на температури солідусу та ліквідусу експериментальних сплавів системи Cu–Mn–Ni–Si. З застосуванням емпіричних даних та з залученням математичних методів обробки визначено вплив хімічних елементів на розрахункові коефіцієнти впливу легуючих елементів на температури солідусу та ліквідусу сплавів системи Cu–Mn–Ni–Si, що сприяє зниженню температури плавлення. Досліджено вплив вмісту нікелю та кремнію при фіксованій кількості марганцю 10 та 16 мас. % на площу розтікання по сталі 08кп та температурний інтервал плавлення. Експериментально доведено якісне формування паяних з’єднань зі сплаву 08кп, що отримані шляхом плазмового паяння з застосуванням досліджуваних сплавів. Бібліогр. 16, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: плазмове паяння, площа розтікання, температура солідусу та ліквідусу, високотемпературний диференційний термічний аналіз, температурний інтервал плавлення

В даний час, як альтернатива MIG-паянню розвивається процес плазмового паяння, при якому використовуються дві незалежні дуги – чергова та основна. Чергова дуга горить між соплом та вольфрамовим електродом, а основна – між вольфрамовим електродом та виробом. Паяння виконується з використанням постійного незмінного та модульованого струму, припій подається автоматично. Плазмове паяння досить успішно застосовують для з’єднання деталей при виготовленні кузовів автомобілів, металопластикових вікон та вентиляційних коробів [1–6]. Для плазмового паяння пропонується широке коло стандартних припоїв на основі міді, які розділені на три групи в залежності від характеру легування (табл. 1).

Найбільш часто використовують бронзи, що леговані кремнієм (SG–CuSi3) та алюмінієм (SG–CuAl8). Всі припої мають температуру ліквідусу близько 1000 °С та вище. Зменшення температури плавлення припою дозволяє зменшити погонну енергію, необхідну для отримання якісних паяних з’єднань [6, 9, 10]. Це призводить також до зменшення залишкових напружень та збільшення терміну служби паяних з’єднань.

Таблиця 1. Хімічний склад припоїв і температури плавлення [7, 8]

Порядковий номер	Марка бронзи	Температурний інтервал плавлення, °С
1	SG–CuSi3	910...1025
2	SG–CuSn6	910...1040
3	SG–CuAl8	1030...1040

Метою даної роботи є встановлення закономірностей впливу Mn, Ni, Si на температури солідусу і ліквідусу сплавів системи Cu–Mn–Ni–Si, які використовують в якості припоїв при плазмовому паянні.

Методика експерименту. Для проведення досліджень виготовляли литі припої в лабораторній електродуговій установці (рис. 1) на мідній водоохолоджуваній підкладці в атмосфері очищеного аргону.

В якості вихідних компонентів використовували матеріали чистотою не нижче 99,95 мас. %. Визначення температури солідусу і ліквідусу отриманих сплавів визначали методом висо-



Рис. 1. Лабораторна установка для виплавки припоїв в середовищі аргону

* Друкується по матеріалам доповіді на міжнародній конференції «Сучасні технології з’єднання матеріалів», ІЕЗ ім. Є.О. Патона, Київ, 31 травня – 02 червня 2021 р.

Максимова С.В. – <https://orsid.org/0000-0003-0158-5760>, Зволінський І.В. – <https://orsid.org/0000-0003-1442-7980>, Іванченко Е.В. <https://orcid.org/0000-0001-7417-4087>

© С.В. Максимова, І.В. Зволінський, Е.В. Іванченко, 2021

котемпературного диференційного термічного аналізу на установці ВДТА-8М в середовищі гелію при швидкостях нагрівання та охолодження 40 °С/хв. На підставі методу багатфакторного планування [11] та аналізу подвійних діаграм стану Cu–Mn, Cu–Ni, Cu–Si [12, 13] побудована матриця зі змінним складом легуючих елементів Mn, Ni, Si. Базовим обраний сплав Cu–13Mn–2Ni–2Si** з температурою солідусу 823 °С, ліквідусу – 962 °С (температурний інтервал кристалізації 139 °С). Концентраційні межі марганцю (10...16 мас. %) обрано на базі аналізу бінарних діаграм стану мідь–марганець [12] з урахуванням температурного інтервалу плавлення.

Змочування експериментальними припоями сталі 08кп проводили з застосуванням дугового (TIG) методу, який сприяє рівномірному нагріву більшої площини підкладки основного металу в порівнянні з плазмовим нагрівом [14]. Температуру нагріву контролювали з використанням термопари ХА та прибору ТРМ.

Кінцівки термопари приварювали зі зворотного боку основного металу (підкладки) для отримання гарячого спаю. Обрахунок отриманих експериментальних даних з розтікання (площі розтікання) проводили з використанням програми AutoCard.

Для плазмового паяння зразків зі сталі 08кп застосовували джерело живлення КЕМРРІ Master TIG 2300 з плазмовим модулем.

За стандартною методикою готували мікрошліфи, які досліджували без хімічного травлення з використанням електронного скануючого мікроскопу TescanMira 3 LMU.

Результати експериментів та їх аналіз. Вплив легуючих елементів Mn, Ni, Si на температуру ліквідусу та солідусу сплавів на основі міді оцінювали з використанням формул (1) та (2). Фактично це означає розкладання функції впливу в ряд Тейлора [15, 16] в області плавлення чистої міді.

$$T_{(Cu)}^{sol.} = T_{Cu} + \left(\frac{\partial T_{Cu}}{\partial C_{Mn}} \right)^{sol.} C_{Mn} + \left(\frac{\partial T_{Cu}}{\partial C_{Ni}} \right)^{sol.} C_{Ni} + \left(\frac{\partial T_{Cu}}{\partial C_{Si}} \right)^{sol.} C_{Si} \quad (1)$$

$$T_{(Cu)}^{lic.} = T_{Cu} + \left(\frac{\partial T_{Cu}}{\partial C_{Mn}} \right)^{lic.} C_{Mn} + \left(\frac{\partial T_{Cu}}{\partial C_{Ni}} \right)^{lic.} C_{Ni} + \left(\frac{\partial T_{Cu}}{\partial C_{Si}} \right)^{lic.} C_{Si}, \quad (2)$$

де $\frac{\partial T_{Cu}}{\partial C_i}$ – тангенс кута нахилу ліній солідусу та ліквідусу біля точки плавлення чистої міді на діаграмах стану відповідних бінарних систем [13]. Область задіяних концентрацій легування показує, що залежності температури солідусу і ліквідусу можна прийняти близькими до лінійних та співвідношення $\frac{\partial T_{Cu}}{\partial C_i}$ можна замінити на $\frac{\Delta T_{Cu}}{\Delta C_i}$, яке свідчить вплив Mn, Ni, Si на температури солідусу та ліквідусу сплавів на основі міді у межах легуючого комплексу, %: 1...3 кремнію; 1...3 нікелю; 10...16 марганцю. Результатами розрахунків визначено, що кремній максимально впливає на зниження температури солідусу і ліквідусу (табл. 2).

Розрахункові коефіцієнти впливу легуючих елементів на температури солідусу та ліквідусу в сплавах системи Cu–Mn–Ni–Si показують, що при заданій зміні концентраційного інтервалу легуючих елементів більший вплив на зниження температури солідусу і ліквідусу чинить вміст кремнію з коефіцієнтом для температури солідусу –40,5 та ліквідусу –23,5. Кількість марганцю в меншій мірі впливає на зменшення температури солідусу і ліквідусу, на що вказують менші величини коефіцієнтів: –8,3 та –0,33 (для температури солідусу і ліквідусу відповідно).

На підставі експериментальних даних, які отримано при розтіканні досліджуваних сплавів встановлено, що наявність нікелю в межах 1...3 % в припої системи Cu–Mn–Ni–Si при фіксованій концентрації марганцю 10 і кремнію менше 2 % призводить до зменшення площі розтікання (в порівнянні з базовим). Підвищення концентрації кремнію більше 2 % та зменшення вмісту нікелю сприяє збільшенню площі розтікання в порівнянні з базовим сплавом (рис. 2).

При концентрації марганцю 16 %, кремнію менше 2 % зменшення вмісту нікелю (до 1 %), в

Таблиця 2. Коефіцієнти впливу легуючих елементів на температури солідусу та ліквідусу сплавів на основі міді (розрахункові дані)

Легуючий елемент <i>i</i>	$\Delta T_i^{lic.}$, °С	$\Delta T_i^{sol.}$, °С	ΔC_i , мас. %	$(\Delta T/\Delta C)^{lic.}$	$(\Delta T/\Delta C)^{sol.}$
Mn	–62	–50	6	–10,33	–8,33
Ni	12	7	2	6	3,5
Si	–47	–81	2	–23,5	–40,5

Примітка. ΔC – зміна концентраційного інтервалу, в якому спостерігається зниження температури плавлення на величину ΔT . ΔT – зміна температурного інтервалу, який залежить від концентрації складових елементів.

**тут і надалі мас. %.

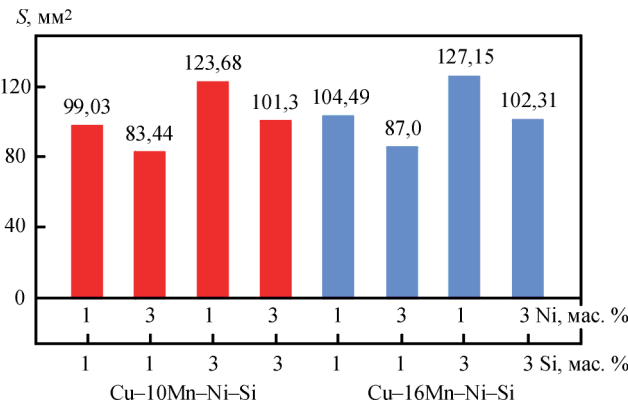


Рис. 2. Залежність площі розтікання експериментальних сплавів системи Cu–Mn–Ni–Si при фіксованому вмісті Mn від кількості Ni та Si

порівнянні з базовим, збільшує площу розтікання, а збільшення нікелю більше 2 % призводить до зменшення площі розтікання. У сплавах з вмістом марганцю 16 % і нікелю менше 2 % та кремнію в межах 1...3 % спостерігається поступове збільшення площі розтікання до 104,49 та 127,15 мм² відповідно. При кількості нікелю більше 2 % зменшення вмісту кремнію, в порівнянні з базовим, зменшує площу розтікання.

Результати досліджень високотемпературного диференційного термічного аналізу експериментальних припоїв показали, що при вмісті марганцю 10 % і кремнію менше 2 % легування нікелем $T_{\text{сол}}, ^\circ\text{C}$

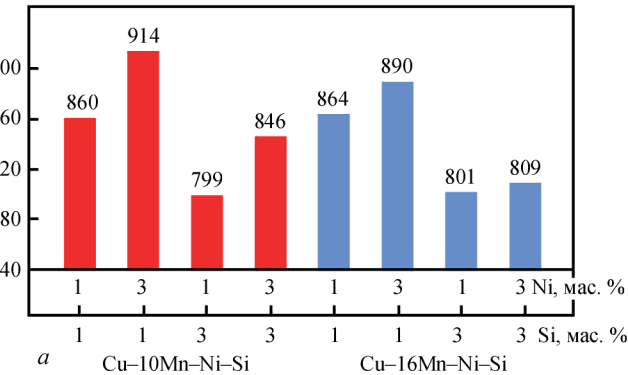


Рис. 3. Залежність температури солідусу (а) і ліквідусу (б) експериментальних сплавів системи Cu–Mn–Ni–Si від вмісту марганцю, нікелю та кремнію

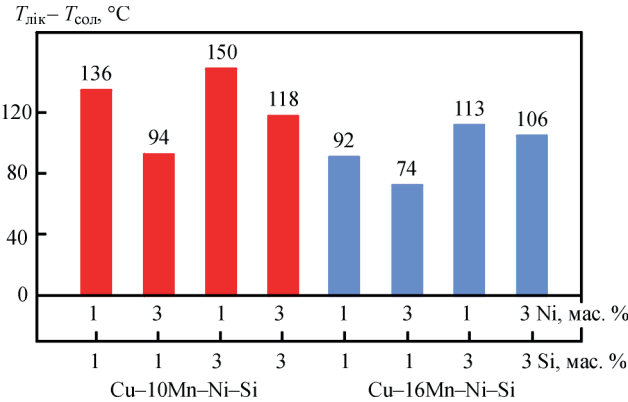


Рис. 4. Залежність температурного інтервалу плавлення експериментальних сплавів системи Cu–Mn–Ni–Si від вмісту марганцю, нікелю та кремнію

в межах 1...3 % підвищує температуру солідусу та ліквідусу. При зменшенні кількості нікелю в сплаві, що містить 10 % марганцю та більше 2 % кремнію відбувається зниження температури солідусу та ліквідусу сплаву. Збільшення вмісту нікелю підвищує температуру солідусу (рис. 3, а).

В сплаві, що містить 16 % марганцю і менше 2 % кремнію легування нікелем сприяє підвищенню температури солідусу. Температура ліквідусу теж зростає, але незначно (рис. 3, б). Легування сплаву, що містить підвищену концентрацію нікелю (до 3 %) кремнієм (до 3 %), сприяє зниженню температури солідусу і ліквідусу (рис. 3, а, б).

Відомо, що температурний інтервал плавлення – це різниця між температурами солідусу та ліквідусу сплаву. З отриманих результатів досліджень витікає наступне. При концентрації марганцю 10 % та кремнію менше 2 % легування нікелем зменшує інтервал кристалізації в порівнянні з базовим сплавом.

Вміст кремнію більше 2 % та зменшення кількості нікелю призводить до збільшення температурного інтервалу плавлення в порівнянні з базовими значеннями. А збільшення вмісту нікелю зменшує його (рис. 4).

Легування нікелем в межах 1...3 % сплаву системи Cu–Mn–Ni–Si, що містить 16 % марганцю та менше 2 % кремнію призводить до зменшення тем-

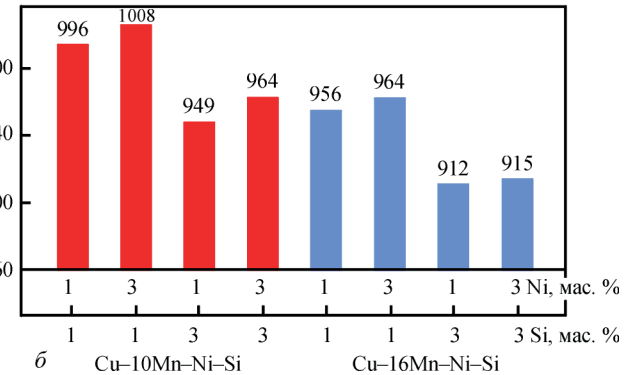


Рис. 5. Паяне з'єднання зі сталі 08кп, що отримано при плазмовому паянні

пературного інтервалу плавлення, що також спостерігається в сплавах, які містять більше 2 % кремнію.

На основі отриманих результатів експериментальних досліджень обрані оптимальні склади припоїв з прийнятним температурним інтервалом, які використали при плазмовому паянні. Структурні дослідження паяних з'єднань показали якісне формування щільних бездефектних швів при застосуванні припою Cu–16Mn–1Ni–3Si ($T_{lic} = 912\text{ }^{\circ}\text{C}$) (рис. 5).

Висновки

Розрахунковим шляхом визначено коефіцієнти впливу легуючих елементів на температури солідусу та ліквідусу в сплавах системи Cu–Mn–Ni–Si, які показують, що при заданій зміні концентраційного інтервалу легуючих елементів більший вплив на зменшення температури солідусу і ліквідусу чинить вміст кремнію з коефіцієнтом для температури солідусу –40,5 та ліквідусу –23,5. Кількість марганцю в меншій мірі впливає на зменшення температури солідусу і ліквідусу, на що вказують нижчі коефіцієнти: –8,3 та –10,33 (для температури солідусу і ліквідусу відповідно).

Експериментально доведено, що легування нікелем в межах 1...3 % сплаву системи Cu–Mn–Si, який містить фіксовану кількість марганцю 10 %, кремнію менше 2 %, призводить до зменшення площі розтікання (до 99,03...83,44 мм²) та підвищення температури солідусу до 860...914 °C і ліквідусу до 996...1008 °C в порівнянні з базовим сплавом. При підвищенні концентрації кремнію до 3 % зменшення вмісту нікелю сприяє збільшенню площі розтікання до 123,68 мм² в порівнянні з базовим сплавом.

Результатами експериментальних досліджень визначено, що збільшення вмісту нікелю при концентрації марганцю 10 % і кремнію менше 2 % зменшує температурний інтервал плавлення з 136 до 94 °C в порівнянні з базовим. Зменшення кількості нікелю в сплаві з підвищеною концентрацією кремнію (більше 2 %) збільшує температурний інтервал плавлення до 150 °C в порівнянні з аналогічними показниками базового сплаву.

Легування нікелем сплаву, що містить 16 % марганцю та менше 2 % кремнію зменшує температурний інтервал кристалізації до 74...92 °C в порівнянні з базовими значеннями. При підвищеній концентрації кремнію легування нікелем призводить до зростання інтервалу плавлення до 106...113 °C.

На підставі комплексного оцінювання емпіричних даних обрано концентраційні межі легуючих елементів, мас. %: 10...16 Mn, 1...3 Ni, 1...3 Si, які забезпечують прийнятну температуру солідусу та ліквідусу припою на основі міді і якісне формування паяних з'єднань зі сталі 08кп.

Список літератури/References

1. Frigs, A., Stockel, S. (2012) Vollmechanisches Metall-Inert gas hartloten von feuerverzinktem Feinblech aus Stahl. *Schweißen und Schneiden*, **12**, 624–629.
2. Chovet, C., Guiheux, S. (2006) Possibilities offered by MIG and TIG brazing of galvanized ultra-high strength steel for automotive applications. *La metallurgia Italiana*, **7-8**, 47–53.
3. Kim, Y., Park, K. (2016) A Review of Arc Brazing Process and Its Application in Automotive Institute for Advanced Engineering. Robot Center, Yongin, Republic of Korea, Sungbok Kwak Duckyang Ind. Co., Ltd., R&D Center, Suwon, Republic of Korea. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, **5**, **4**, 246–250.
4. Matusiak, J., Wycislik, J. (2015) Influence of shielding gas on fume and gas emission during arc weld brazing of steel sheets with coatings. *SHIELDING GAS ON FUMEing arc weld brazing of steel sheets with coatings Metalurgija*, **54**, 71–74.
5. Wook-Je Cho, Tae-Jin Yoon, Sung-Yun Kwak et al. (2017) Effects of Brazing Current on Mechanical Properties of Gas Metal Arc Brazed Joint of 1000MPa Grade DP Steel. *Journal of Welding and Joining*, **35**(2), 23–29.
6. Norbert Knopp, Mündersbach, Robert Killing, Solingen (2005) Brazing of galvanized sheets using an arc-reliable and economically viable. *Welding and Cutting*, **4**, **6**, 7–9.
7. Belkacem Bouaifi (2003) Low-heat process enhances joining of coated sheet metals. *Welding J.*, **1**, 26–30.
8. Knopp N., Killing R. (2004) Hartlöten verzinkter Feinbleche mit dem Lichtbogen sicher und wirtschaftlich [Teil 2]. *Der Praktiker*, **1**, 8–12.
9. Maksymova, S.V., Zvolinsky, I.V., Yurkiv, V.V. et al. (2020) Residual stresses in thin-sheet galvanized steel joint after arc welding and plasma brazing. *The Paton Welding J.*, **9**, 31–35 [in English]. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.09.05>
10. Knopp, N., Killing, R. (2003) Hartlöten verzinkter Feinbleche mit dem Lichtbogen – sicher und wirtschaftlich (Teil 1). *Der Praktiker*, **12**, 366–371 [in German].
11. Ашмарин И.П., Васильев Н.Н., Амбросов В.А. (1975) Быстрые методы статистической обработки и планирование экспериментов. Изд. Ленинградского университета. Ashmarin, I.P., Vasiliev, N.N., Ambrosov, V.A. (1975) *Fast statistical methods and experimental design*. Izd.-vo Leningrad. Un-ta [in Russian].
12. Лякишев Н.П. (1997) *Диаграммы состояния двойных металлических систем*. Справочник в 3 т. Т. 2. Москва, Машиностроение.
13. Lyakishev, N.P. (1997) *Constitutional diagrams of binary metal systems*. In: Refer. book, 3 Vol., Vol. 2. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
14. Massalski, T.B., Okamoto, H., Subramanian, P.R., Kacprzak, L. (1990) Binary alloy phase diagrams. The materials information society. *ASM International*, **1**.
15. Применение процесса плазменной и плазменной+TIG сварки. <https://www.svartools.ru/technology/primenenie-protssesa-plazmennoy-i-plazmennoy-tig-varki> Application of the process of plasma and plasma+TIG welding. <https://www.svartools.ru/technology/primenenie-protssesa-plazmennoy-i-plazmennoy-tig-varki>
16. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. (1986) *Справочник по математике*. Москва, Наука.
17. Bronshtejn, I.N., Semendyaev, K.A. (1986) *Mathematics handbook*. Moscow, Nauka [in Russian].
18. Иванченко В.Г., Ошкадеров С.П., Северина С.Н. (2012) Определение оптимальных составов литых сложнотвердорастворных сплавов на основе никель-хром для ортопедической стоматологии. *Металлофизика и новейшие технологии*, **34**, **8**, 1133–1143.
19. Ivanchenko, V.G., Oshkaderov, S.P., Severina, S.N. (2012) Determination of optimum compositions of complex solid solution hardened alloys based on nickel-chrome for orthopedic dentistry. *Metallrofizika i Novejshe Tekhnologii*, **34**(8), 1133–1143 [in Russian].

INFLUENCE OF ALLOYING ELEMENTS ON SOLIDUS AND LIQUIDUS TEMPERATURES OF Cu–Mn–Ni–Si SYSTEM ALLOYS

S.V. Maksymova, I.V. Zvolinskyy, E.V. Ivanchenko

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Plasma brazing of steels is performed using brazing filler metals having liquidus temperature above 1000 °C. This work shows the possibility of lowering the brazing temperature by applying brazing filler metals having a lower melting temperature. The method of high-temperature differential thermal analysis was used to establish the influence of manganese, nickel and silicon on solidus and liquidus temperatures of experimental alloys of Cu–Mn–Ni–Si system. Empirical data and mathematical processing methods were applied to determine the influence of chemical elements on calculated coefficients of the impact of alloying elements on solidus and liquidus temperatures of alloys of Cu–Mn–Ni–Si system that promotes lowering of melting temperature. The influence of nickel and silicon content at fixed quantity of manganese of 10 and 16 wt.% on the area of spreading over 08kp (rimmed) steel and melting temperature range was studied. Sound formation of brazed joints from 08kp alloy produced by plasma brazing with application of the studied alloys was proved experimentally. Ref. 16, Tabl. 2, Fig. 5

Keywords: plasma brazing, spreading area, solidus and liquidus temperature, high-temperature differential thermal analysis, melting temperature range

Надійшла до редакції 28.04.2021

НОВІ КНИГИ

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

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

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

Глава 1. Температурное поле при сварке

Глава 2. Сварочные напряжения и деформации

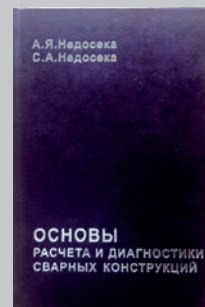
Глава 3. Несущая способность сварных конструкций

Глава 4. Диагностика и прогнозирование остаточного ресурса сварных конструкций

Глава 5. Акустическая эмиссия

Глава 6. Дополнительные разделы

Приложения



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

Замовлення на книги прохання надсилати до редакції журналу.

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

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ, ЯКІ ВИГОТОВЛЯЮТЬСЯ ЗА ДОПОМОГОЮ 3D ДРУКУ

І.К. Сенченков¹, М.В. Юрженко², О.П. Червінко¹, О.П. Масючок², М.Г. Кораб²

¹Інститут механіки ім. С.П. Тимошенка НАН України. 02000, м. Київ, вул. П. Нестерова, 3.

²ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Виготовлення деталей методом 3D друку, зокрема, за технологією FDM (англ. Fusing Deposition Modeling), є перспективним напрямком в багатьох галузях машинобудування, архітектурі, будівництві, медицині, тощо. Ця проблематика породжує три основні напрямки досліджень: технології FDM 3D друку, матеріалознавство і математичне моделювання процесів з метою оцінки функціональних якостей, зокрема, міцності виробів. Дана робота присвячена третьому напрямку: оцінці напружено-деформованого стану виробів, отриманих методом 3D друку за технологією FDM. В роботі розглянуто три стадії розв'язання цієї задачі: 1 – математична постановка задачі, що включає універсальні балансові співвідношення, визначальні рівняння механічної поведінки матеріалу; 2 – методику чисельного розв'язку задачі; 3 – розв'язування конкретних задач з метою виявлення закономірностей термомеханічних процесів і надання рекомендацій щодо технологічних параметрів 3D друку. Бібліогр. 10, рис. 12.

Ключові слова: адитивні технології, FDM 3D друк, математичне моделювання, напружено-деформований стан

Моделювання методом пошарового наплавлення або FDM 3D друк полімерними матеріалами завдяки універсальності, простоті, багатофункціональності і доступності вважається найбільш поширеною технологією 3D друку в світі, на основі якої працюють мільйони 3D принтерів – від найдешевших до промислових систем тривимірного друку [1, 2]. Для створення виробів методом FDM 3D друку використовується полімерний матеріал у вигляді нитки (філамент) з різних термопластичних матеріалів, які поставляються у котушках. Філамент може бути двох стандартних діаметрів: 1,75 і 3,0 мм в залежності від специфікації принтера [3].

Як і у всіх технологіях 3D друку, першим кроком на шляху до виготовлення фізичного об'єкта є побудова його цифрової 3D моделі [4] в спеціальних програмах (Autodesk 3DsMAX, ZBrush, Maya,

Blender, SolidWorks і т. д.), яка в форматі STL передається в програмне забезпечення 3D принтера. Перед запуском процесу друку обираються необхідні налаштування 3D друку (швидкість, температура і т. д.) і модель в програмі-слайсері автоматично розділяється на горизонтальні шари для проведення розрахунку шляхів переміщення екструдера (друкуючої головки) – пристрою, який оснащено механічним приводом для подачі філаменту, нагрівальним елементом для його плавлення і фільєрою, через яку здійснюється безпосередньо екструзія – виштовхування розплавленого полімерного матеріалу на поверхню виробу (рис. 1, а).

На цьому ж етапі за необхідності генеруються підтримуючі конструкції при наявності нависаючих елементів в моделі. По завершенню підготовки частини програмою генерується керуючий

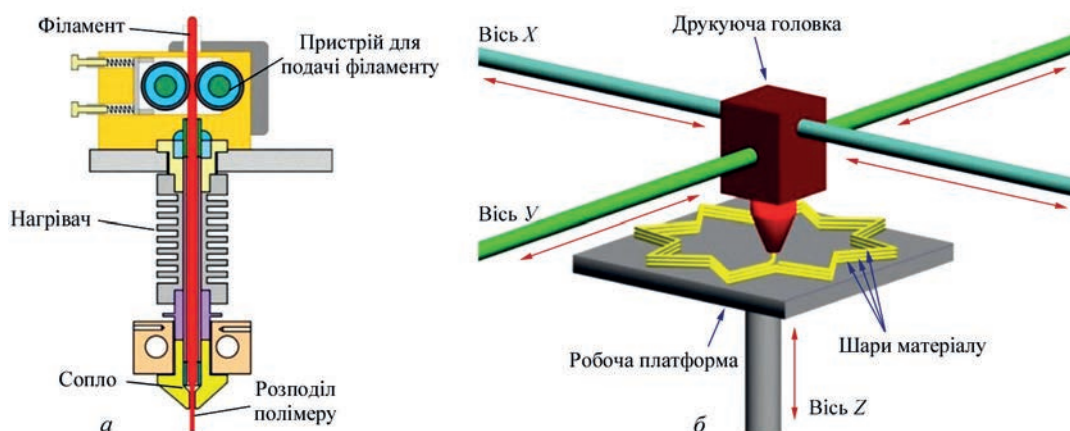


Рис. 1. Схеми екструдера FDM 3D принтера (а) і процесу створення ним тривимірної моделі (б) [5]

Юрженко М.В. – <http://orcid.org/0000-0002-5535-731X>, Масючок О.П. – <https://orcid.org/0000-0002-3302-3079>

Кораб М.Г. – <https://orcid.org/0000-0001-8030-1468>

© І.К. Сенченков, М.В. Юрженко, О.П. Червінко, О.П. Масючок, М.Г. Кораб, 2021

код (G-code) для 3D принтера на основі цифрових даних і вибраних налаштувань. Надалі філамент з котушки розмотується для введення в екструдер і запускається процес безпосередньо 3D друку: екструдер розплавляє філамент і з високою точністю подає розплав полімерного матеріалу тонкими шарами на робочу поверхню 3D принтера у відповідності до алгоритму друку та цифрової 3D моделі.

Після нанесення шару полімерний матеріал охолоджується і затвердіває, а платформа, на якій формується об'єкт, опускається на величину, рівну товщині шару, що наноситься. Рух в трьох площинах голівки і платформи (рис. 1, б) задається алгоритмом, розробленим заздалегідь за допомогою спеціального програмного забезпечення. По завершенню процесу побудови виробу допоміжні конструкції видаляються (вручну або розчиняються в спеціальному розчині), а готовий виріб може бути використано в надрукованому вигляді або піддано будь-якому способу подальшої обробки.

Важливу роль для оцінки міцності деталей відіграє інформація щодо поточних та залишкових напружень, а також дисторсії, особливо для тонкостінних елементів. Тому розробка методів математичного моделювання процесів та оцінки вказаних параметрів є актуальним питанням даної проблематики.

Постановка задачі. В даній роботі використовується спрощена термopружна постановка задачі. Ця модель не враховує ефект релаксації і дає верхню оцінку поточних і залишкових напружень [6]. Більш точна постановка, яка враховує в'язкопружні властивості матеріалу, структурні перетворення (кристалізацію) в матеріалі, а також їх вплив на фізико-механічні властивості матеріалу, буде розглянута в наступних публікаціях.

Балансові рівняння. Нарощування елемента розглядається в прямокутній декартовій системі координат. Матеріал вважається ізотропним. Вихідна постановка задачі в інваріантній формі включає кінематичні співвідношення,

рівняння теплопровідності

$$c_v \dot{\theta} = \text{div}(k \text{ grad } \theta) + Q, \quad (1.1)$$

квазістатичної рівноваги

$$\text{div } \sigma = 0, \quad (1.2)$$

граничні і початкові умови

$$\theta = \theta_0 \text{ при } t = 0; -k \vec{n} \cdot \text{grad } \theta = -q + \gamma(\theta - \theta_c);$$

$$\sigma \cdot \vec{n} = 0, \quad (1.3)$$

де θ – температура; σ – тензор напружень; Q – потужність об'ємного джерела тепла; q – заданий потік тепла; c_v і k – коефіцієнти теплоємності і теплопровідності; γ – коефіцієнт тепловіддачі; θ_c – температура навколишнього середовища; θ_0 – початкова температура; $\vec{n}$ – зовнішня нормаль до поверхні тіла; $\sigma = (\sigma_{ij})$. $i, j = x, y, z$; $i, j = x, y, z$.

Надалі ці рівняння будуть модифіковані з урахуванням процесу нарощування.

Для плоского напруженого в площині Oxy стану маємо

$$\sigma_{zz} = \sigma_{zx} = \sigma_{yz} = 0, u_i = u_i(x, y), \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}(x, y), \sigma_{ij} = \sigma_{ij}(x, y), \theta = \theta(x, y).$$

Термомеханічна поведінка матеріалу описується за допомогою співвідношень

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^0; \quad \varepsilon^0 = \alpha(\theta - \theta_0)I; \quad (1.4)$$

$$s = 2G\varepsilon, \quad tr \sigma = 3K_v tr(\varepsilon - \varepsilon^0); \quad (1.5)$$

тут ε^e і ε^0 – пружна і теплова складові деформації; s і ε – девіатори тензорів напружень і деформацій; G і K_v – зсувний та об'ємний модулі; tr – слід тензора; I – одиничний тензор.

Модель тіл, що ростуть. Розглянемо модифікацію співвідношень (1.4), (1.5) з урахуванням процесу нарощування [7–9]. Припустимо, що задача розв'язується методом скінченних елементів. Нехай процес нарощування є контрольованим, тобто відомі швидкість нарощування і кінцева конфігурація тіла. Найпростіший варіант алгоритму розв'язання полягає в наступному. Конфігурація тіла, що нарощується, покривається фіксованою СЕ-сіткою. СЕ-сітка покриває як саме тіло, що нарощуватиметься, у вихідній конфігурації, так і всі нарощувані в майбутньому шари. Таким чином, сітка (кількість вузлів) не змінюється в процесі чисельного моделювання. Інший підхід полягає в тому, що сітка збільшується внаслідок приєднання елементів, що нарощуються. В області, яка зайнята вихідним тілом, властивості визначаються матеріалом тіла. Елементам, що нарощуються, спочатку приписуються властивості матеріалу «порожнечі», який вважається термopружним з характеристиками

$$E \approx 0, \nu \approx 0, \alpha = \alpha_f,$$

де E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона; α_f – коефіцієнт лінійного теплового розширення матеріалу нарощування. Теплофізичні властивості «порожнечі» приймаються такими ж, як у матеріалу, який нарощується. Отже, елемент «порожній» тільки з точки зору механіки. У процесі заповнення, який розглядається як процес, що розвивається в часі, «порожні» елементи СЕ-сітки будуть заповнюватися нарощуваним матеріалом. Важливо мати на увазі, що в процесі заповнення елементів (нарощування) деформується вся СЕ-сітка, що покриває як вихідне тіло, так і прилеглі до тіла «порожні» елементи.

Нехай в момент заповнення t^* деякий порожній елемент $\Delta V(t^*)$ сітки має деформацію ε_{ij}^* , і нехай він заповнюється матеріалом, що має температуру θ^* . Передбачається, що матеріал нарощуваних елементів аж до контакту з поверхнею тіла є ненапруженим:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = 0 \text{ при } t = t^*. \quad (1.6)$$

В рамках даної моделі нарощування є заповнення елемента, що має попередню деформацію ε_{ij}^* ,

матеріалом нарощування з температурою θ^* . Таким чином, умови (1.6), по суті, означають, що

$$\sigma_{ij}(\varepsilon_{kl}^*, \theta^*) = 0 \text{ в } \Delta V(t^*). \quad (1.7)$$

Для того, щоб визначальні рівняння нарощуваного матеріалу (1.5) узгоджувалися з умовою (1.7), необхідно і достатньо модифікувати рівняння (1.5) наступним чином:

$$\underline{\varepsilon} = 2G_f(\underline{\varepsilon} - \underline{\varepsilon}^*), \text{tr} \underline{\sigma} = 3K_f \text{tr}(\underline{\varepsilon} - \underline{\varepsilon}^* - \alpha_f(\theta - \theta^*)\underline{I}). \quad (1.8)$$

Тут нижній індекс f показує, що параметри відносяться до матеріалу нарощуваного об'єму. Таким чином, щоб задовольнити умову нарощування (1.6), всі елементи, які нарощуються, повинні мати визначальні рівняння, індивідуалізовані тими конкретними значеннями деформації $\underline{\varepsilon}^*$ і температури θ^* , при яких відбувалося їх заповнення. Тому стан $(\underline{\varepsilon}_{ij}^*, \theta^*)$ для цих елементів можна трактувати як «власний», оскільки він не викликає напружень.

Постановка задачі для тіл, що ростуть. З урахуванням результатів, викладених в попередньому пункті, математична задача включає наступні співвідношення:

– рівняння рівноваги (1.2) і теплопровідності (1.1)

– визначальні рівняння для основного матеріалу

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^0, \quad (1.9)$$

$$s_{ij} = 2Ge_{ij}, \quad \sigma_{kk} = 3K_V(\varepsilon_{kk} - \varepsilon_{kk}^0), \quad (1.10)$$

– визначальні рівняння для матеріалу, що нарощується, в компонентній формі

$$s_{ij} = 2G(e_{ij} - e_{ij}^*), \quad \sigma_{kk} = 3K_f(\varepsilon_{kk} - \varepsilon_{kk}^{\theta^*} - \varepsilon_{kk}^*). \quad (1.11)$$

де G і K – модулі зсуву та об'ємного стиснення; Q – джерело тепла; λ і c_v – коефіцієнти теплопровідності і об'ємної теплоємності

$$\varepsilon_{ij}^0 = \alpha(\theta - \theta_r)\delta_{ij}, \quad \varepsilon_{ij}^{\theta^*} = \alpha(\theta - \theta^*)\delta_{ij}. \quad (1.12)$$

тут θ – поточна температура; θ_r – деяка відлікова температура; α – коефіцієнт лінійного теплового розширення.

Чисельна методика розв'язування задачі. *Варіаційне формулювання задачі.* Тривимірна задача про термомеханічний стан нарощених деталей розв'язується чисельно за допомогою методу скінченних елементів [9]. Лагранжеве варіаційне формулювання задачі в декартовій системі $Oxyz$ координат має вигляд

$$\delta I = \int_F \left[\lambda \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \delta \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial y} \delta \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial \theta}{\partial z} \delta \left(\frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \right) + \right. \\ \left. + (c_v \dot{\theta} - Q) \delta \theta \right] dx dy dz + \\ + \int_S (-q + \gamma(\theta - \theta_c)) \delta \theta ds = 0, \quad (2.1)$$

$$\delta \Phi = \int_F (\sigma_{xx} \delta \varepsilon_{xx} + \sigma_{yy} \delta \varepsilon_{yy} + \sigma_{zz} \delta \varepsilon_{zz} + \\ + 2\sigma_{xy} \varepsilon_{xy} + 2\sigma_{yz} \varepsilon_{yz} + 2\sigma_{zx} \varepsilon_{zx}) dx dy dz - \\ - \int_S (t_{nx} \delta u_x + t_{ny} \delta u_y + t_{nz} \delta u_z) ds = 0. \quad (2.2)$$

де δI – варіація функціонала для задачі теплопровідності; $\delta \Phi$ – варіація функціонала для завдання механічної рівноваги; t_{nr} і t_{nz} – компоненти вектора напружень на контурі; u_r , u_z – радіальна і осьова компоненти вектора переміщень; V і S – об'єм і поверхня тіла.

Рівняння теплопровідності інтегрується за часом з використанням неявної схеми. При цьому лінеаризація задачі досягається за рахунок того, що залежні від температури характеристики обчислюються для попереднього часового кроку. Розрахований для часу розподіл температури використовується для розв'язання задачі механіки. З умови стаціонарності функціоналу $\delta \Phi = 0$ (2.2)

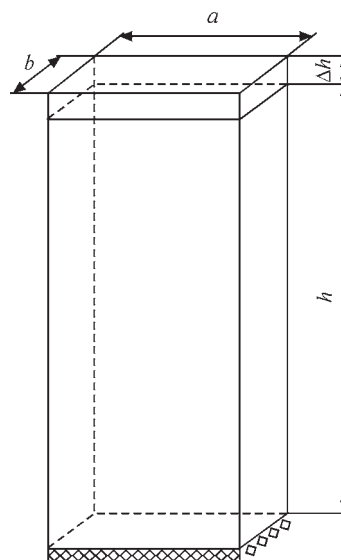


Рис. 2. Нарощуваний елемент

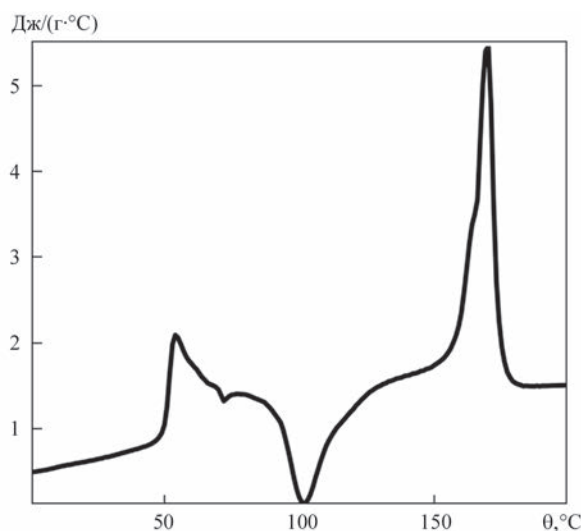


Рис. 3. Залежність питомої теплоємності від температури

отримуємо систему алгебраїчних рівнянь для переміщень у вузлових точках. При цьому температура, що входить у функціонал, приймається постійною по елементу і не варіюється. По знайденим вузловим переміщенням обчислюються деформації та напруження в точках інтегрування, які потім усереднюються по скінченному елементу.

З умови стаціонарності функціоналу $\delta I = 0$ для визначення вузлових значень температури θ_i отримуємо систему лінійних диференційних рівнянь першого порядку за часом. Точність розрахунку залежить від кількості скінченних елементів. Необхідна густина сітки елементів визначається шляхом порівняння розв’язків задачі при різній кількості скінченних елементів.

Об’єкт дослідження. Конфігурація нарощуваного елемента показана на рис. 2.

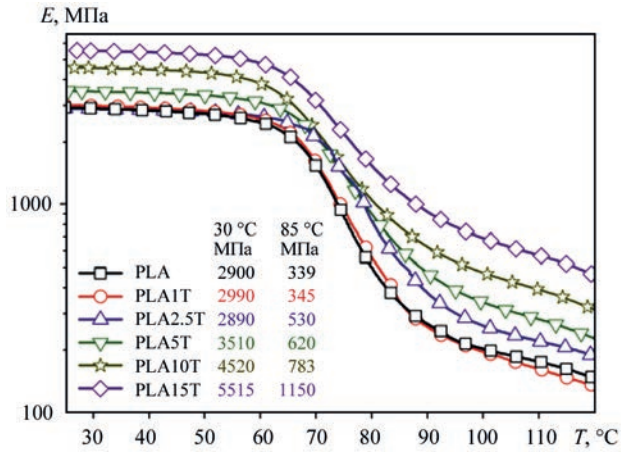


Рис. 4. Залежність модуля пружності Юнга E від температури

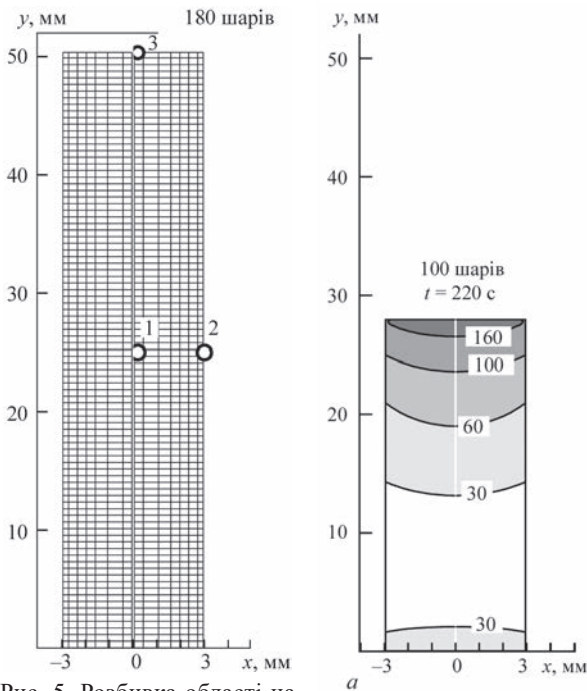


Рис. 5. Розбивка області на скінченні елементи

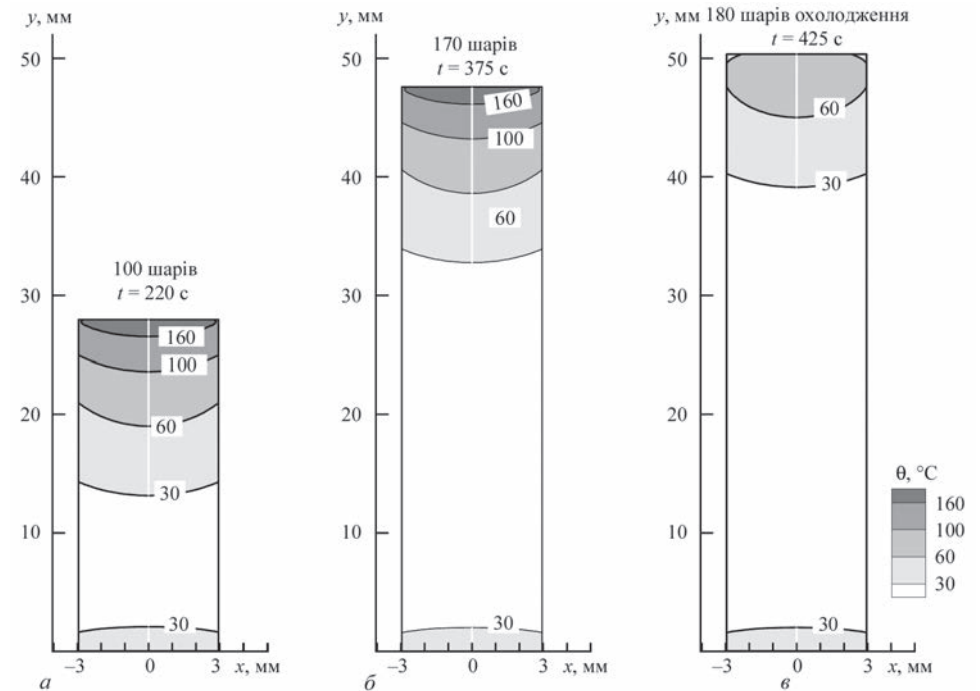


Рис. 6. Ізолінії розподілу температури θ в різні моменти нарощування

Розміри елемента: $a = 6$ мм, $b = 2$ мм, $h = 0 \dots 50$ мм, $\Delta h = 0,14 \dots 0,42$ мм.

Приймаємо, що один шар $\Delta h = 0,14$ мм нарощується за 1,1 с (із розрахунку: швидкість нарощування елемента $0,14$ мм $\times 0,14$ мм – 80 мм/с, тобто час нарощування одного шару $0,14$ мм на торці – 1,1 с). Далі будемо розглядати три випадки нарощення: шарами $0,14$ мм за 1,1с шар, 360 шарів; $0,28$ мм за 2,2с шар, 180 шарів; $0,42$ мм за 3,2с шар, 120 шарів, тобто швидкість нарощування (збільшення висоти) у цих трьох випадках однакова.

На нижній поверхні задані умови закріплення: $u_y = 0, \sigma_{xy} = 0, y = 0$.

Термомеханічні властивості матеріалу. Матеріал об’єкта – полімер PLA з температурно залежними властивостями.

Залежність питомої теплоємності від температури показана на рис. 3.

Залежність модуля пружності Юнга від температури, взята з роботи [10], показана на рис. 4. Інші параметри: $\rho = 1210$ кг/м³ – щільність, $\nu = 0,35$ – коефіцієнт Пуассона, $\alpha = 41 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹ – коефіцієнт термічного розширення, $\lambda = 0,13$ Вт/м²·К – коефіцієнт теплопровідності. На вільних поверхнях відбувається теплообмін з оточуючим середовищем температури $\theta_c = 20$ °C з коефіцієнтом тепловіддачі $\gamma = 30$ Вт/м²·К.

Під час нарощування температура основи підтримується 50 °C. Нарощування відбувається розплавом матеріалу при 200 °C.

Результати розрахунків. На рис. 5 показана розбивка області на скінченні елементи при $\Delta h =$

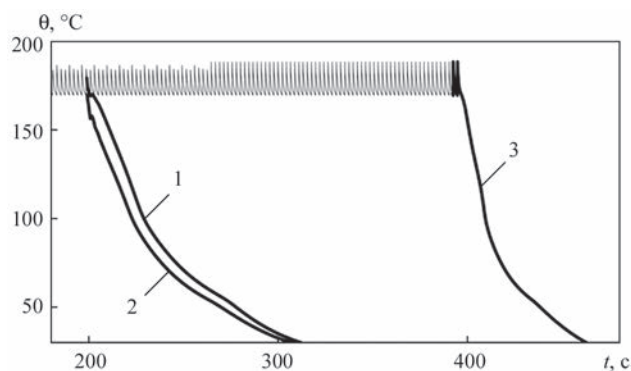
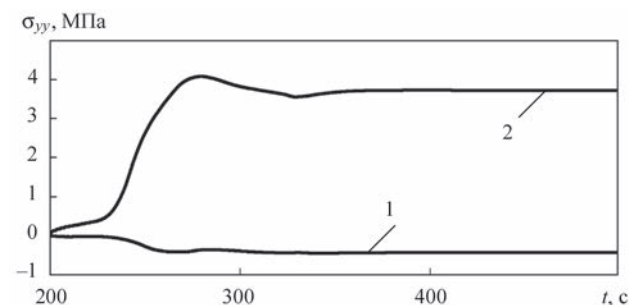
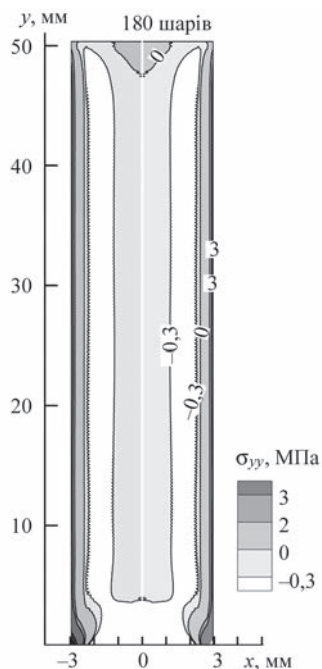


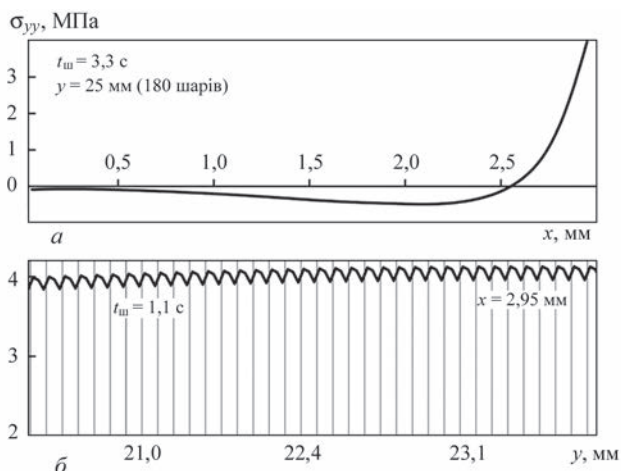
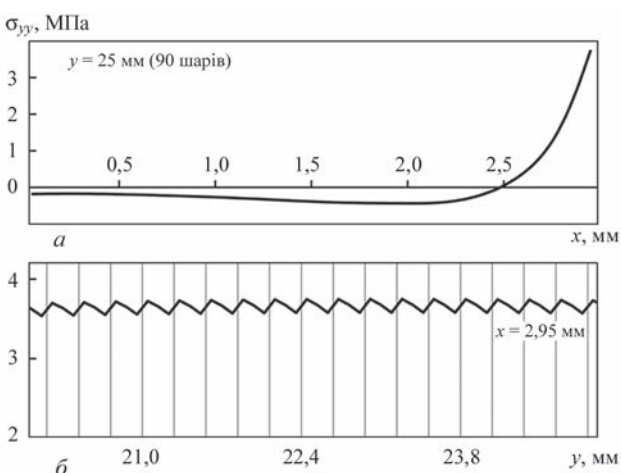
Рис. 7. Зміна температури за часом в точках 1, 2 і 3

Рис. 8. Змінювання напруження σ_{yy} за часом в точках 1 і 2Рис. 9. Залишковий розподіл поздовжнього напруження σ_{yy} = 0,28 мм. Тут показана результуюча розбивка, коли всі шари вже нарощені.

На рис. 6 показані ізолінії розподілу температури в різні моменти нарощування (рис. 6, а, б) і в момент остигання (рис. 6, в).

На рис. 7 показане змінювання за часом температури в точках 1, 2 і 3, показаних на рис. 5. Точки 1 і 2 з'являються в момент нарощення 90-го шару. Точка 3 відповідає вищій точці елемента у різні моменти часу.

На рис. 8 надані аналогічні криві для напруження σ_{yy} в точках 1 і 2.

Рис. 10. Нарощування шарами 0,14 мм, 360 шарів: а – σ_{yy} в перерізі $y = 0,02$ м; б – в перерізі $x = 0$, вздовж осі y Рис. 11. Нарощування шарами 0,28 мм, $t = 2,2$ с, 180 шарів: а – σ_{yy} в перерізі $y = 0,02$ м; б – в перерізі $x = 0$, вздовж осі y

Відзначимо, що залишкові напруження в термодинамічній задачі формуються внаслідок надання розігрітого шару на вже остиглий раніше накладений шар. Класична задача: насадження розігрітої втулки на вал (гарячепресова посадка), коли залишкові напруження обтискнення можуть виникати без пластичних деформацій.

Видно, що залишковий розподіл напружень формується при зміні температури від 80°C до 50°C. Це пов'язане з температурною залежністю модуля Юнга (див. рис. 4). В цьому інтервалі температур відбувається підвищення жорсткості матеріалу.

На рис. 9 надані ізолінії залишкового розподілу σ_{yy} в площині Oxy .

Вивчимо вплив товщини нарощуваного шару матеріалу на залишкові напруження. Розглянемо три випадки.

1. Нарощування шарами 0,14 мм. Результати розрахунку наведено на рис. 10. На рис. 10, б показано зміни σ_{yy} в масштабі шарів.

2. Нарощування шарами 0,28 мм. Результати розрахунку наведено на рис. 11.

3. Нарощування шарами 0,42 мм. Результати розрахунку наведено на рис. 12.

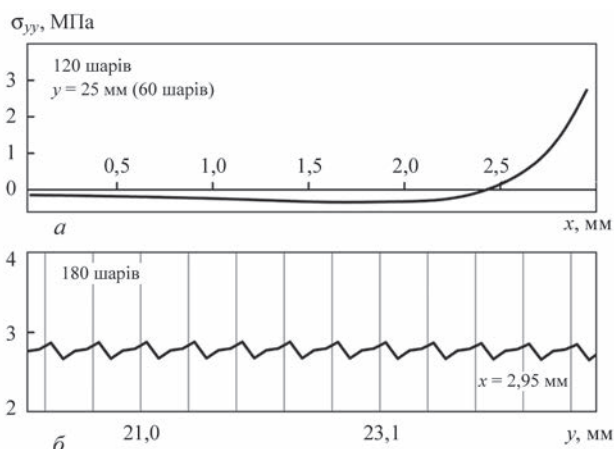


Рис. 12. Нарощування шарами 0,42 мм, $t = 3,3$ с: a – σ_{yy} в перерізі $y = 0,02$ м; b – в перерізі $x = 0$, вздовж осі y

Видно, що рівень напружень σ_{yy} зменшується зі збільшенням товщини шару нарощування (рис. 10, a ; 11, a ; 12, a). Чим менше товщина нарощування, тим більше середній рівень напруження, при цьому коливання в границях нарощеного шару відрізняються несуттєво (рис. 10, b ; 11, b ; 12, b).

Висновки

1. В даній роботі була розвинута термомпружна модель напружено-деформованого стану елементів, що виготовляються методом адитивного формування за технологією FDM 3D друку, а саме – розроблено модель багат шарового нарощування тіл, яка базується на теорії тіл, що ростуть, і запропоновано скінченно-елементну методику розрахунку термомпружного стану пошарово сформованих об'єктів.

2. Результати проведених досліджень та здійснених розрахунків поточного і залишкового термомеханічного стану конкретного нарощуваного пластинчастого елемента в різні моменти нарощування і в момент охолодження свідчать про те, що залишковий розподіл напружень формується при

зміні температури від 80 до 50 °С, що пов'язано з температурною залежністю модуля Юнга досліджуваного матеріалу і підвищенням його жорсткості у вказаному проміжку температур.

3. Оцінка впливу товщини нарощуваного шару матеріалу (0,14; 0,28; 0,42 мм) на залишковий напружений стан елементів показала, що рівень напружень σ_{yy} зменшується зі збільшенням товщини шару нарощування.

Список літератури/References

- (2016) *Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*. Wohler's Associates, Inc.
- Masiuchok, O.P., Yurzhenko, M.V., Kolisnyk, R.V., Korab, M.H. (2020) *Adyativni tekhnolohii polimernykh materialiv (Ohliad)*. *Avtomatychne zvariuvannia*, **5**, 53–60. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.05.08>
- Turner, B.N., Strong, R., Gold, S.A. (2014) A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. *Rapid Prototyping Journal*, **20**, **3**, 192–204.
- Wong, K., Hernandez, A. (2012) A Review of Additive Manufacturing, International Scholarly Research Network (ISRN). *Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.5402/2012/208760>.
- 3D-pechat` dlya «chajnikov» ili «chto takoe 3D-printer»? [Elektronnij resurs]. Rezhim dostupu: http://3dtoday.ru/wiki/3dprint_basics/. [in Russian].
- Sapronov, O.O., Buketov, A.V., Marushchak, P.O. et al. (2019) Research of crack initiation and propagation under loading for providing impact resilience of protective coating. *Functional materials.*, **26**(1). 114–120. Doi: <https://doi.org/10.15407/fm26.01.114>.
- Arutyunyan, N.Kh., Drozdov, A.D., Naumov, V.E'. (1987) *Mekhanika rastushhikh vyazkouprugoplasticheskikh tel.*, Moscow, Nauka.
- Senchenkov, I.K. (2005) Termomekhanicheskaya model' rastushhikh czilindricheskikh tel iz fizicheskii nelinejny'kh materialov. *Prikl. Mekhanika*, **41**, **9**, 118–126.
- Motovilovec, I.A., Kozlov, I.I., (1987) *Mekhanika svyazanny'kh polej v materialakh i e'lementakh konstrukcij v 5-ti t. T.I. Termouprugost'*. Kiev, Naukova Dumka.
- Battegazzore, D., Bocchini, S., Frache, A. (2011) Crystallization kinetics of poly(lactic acid)-talc composites. *eXPRESS Polymer Letters*, **5**, **10**, 849–858.

NUMERICAL MODELLING OF STRESS-STRAIN STATE OF ELEMENTS MANUFACTURED BY 3D PRINTING

I.K. Senchenkov¹, M.V. Iurzhenko², O.P. Chervinko¹, O.P. Masiuchok², M.G. Korab²

¹S.P. Timoshenko Institute of Mechanics of NAS of Ukraine, 3 Nesterov Str., 02000, Kyiv, Ukraine

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kyiv.ua

Manufacture of parts by the method of 3D printing, in particular, applying FDM (Fusing Deposition Modeling) technology, is a promising trend in many branches of mechanical engineering, architecture, construction, medicine, etc. This range of problems challenges three main directions of studies: FDM 3D printing technology, materials science and mathematical modeling of processes for evaluation of functional qualities, in particular, strength of products. This work is devoted to the third direction: evaluation of stress-strain state of products manufactured by 3D printing using FDM technology. The paper considers three stages of solving this problem: 1 – mathematical formulation of the problem, which includes universal balance relations, determining equations of mechanical behaviour of the material; 2 – method of numerical solution of the problem; 3 – solving specific problems in order to determine patterns of thermomechanical processes and provide recommendations for technological parameters of 3D printing. 10 Ref., 12 Fig.

Keywords: additive technology, FDM 3D printing, mathematical modeling, stress-strain state

Надійшла до редакції 11.06.2021

СТРУКТУРА ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ З'ЄДНАНЬ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ 2219-T87, ОТРИМАНИХ КОНТАКТНИМ СТИКОВИМ ЗВАРЮВАННЯМ ОПЛАВЛЕННЯМ

С.І. Кучук-Яценко, К.В. Гушин, І.В. Зяхор, С.М. Самотрясов, М.С. Завертанний, А.М. Левчук

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

При проєктуванні і виготовленні конструкцій літальних апаратів з сучасних термічнозміцнених алюмінієвих сплавів існує проблема отримання зварних з'єднань з задовільними механічними властивостями без подальшої термічної обробки великогабаритних виробів. В роботі досліджували формування з'єднань термомеханічнозміцненого сплаву 2219-T87 при контактному стиковому зварюванні оплавленням. Встановлено, що низькотемпературний підігрів опором в поєднанні з короткочасним нагрівом оплавленням забезпечують формування бездефектних зварних з'єднань. Металографічними дослідженнями встановлено, що з'єднання формуються через тонкий шар розплаву, що є необхідною умовою якісного зварювання алюмінієвих сплавів. Досліджено вплив інтенсивної пластичної деформації при осадці з примусовим формуванням на морфологію часток θ -фази (CuAl_2). Встановлено зниження показників твердості в зоні з'єднання, що обумовлено розчиненням і коагуляцією зміцнюючої θ -фази. Міцність зварних з'єднань як уздовж, так і впоперек ліній прокату становить 76 % міцності основного металу. Бібліогр. 20, табл. 2, рис. 7.

Ключові слова: алюмінієвий сплав 2219, контактне стикове зварювання оплавленням, зварне з'єднання, механічні властивості.

У конструкції виробів космічної та авіаційної техніки широко використовуються термічнозміцнені алюмінієві сплави системи Al-Cu [1]. Сплав 2219 та його аналог сплав 1201 успішно застосовано для елементів конструкцій, що працюють при низьких температурах, зокрема для виготовлення паливних баків і несучих елементів конструкції ракет Saturn V, Apollo, Space Shuttle, Ariane V, «Буран» [2].

Для досягнення максимального рівня міцності заготовки сплаву 2219 поставляються в термомеханічнозміцненому стані T87, який досягається термічною обробкою на твердий розчин, деформаційним зміцненням і подальшим штучним старінням [3-6].

При виготовленні виробів авіаційної і космічної техніки зі сплаву 2219 використовують різні способи зварювання (електронно-променевого [7], аргонодугового плавким [8-10] і неплавким електродом [11, 12], тертям з перемішуванням (ЗТП) [12-18], контактне стикове оплавленням [19, 20]), які відрізняються термічним циклом і рівнем зниження показників механічних властивостей металу у зоні термічного впливу. Наприклад, з'єднання сплаву 2219-T87, виконані аргонодуговим зварюванням плавким і неплавким електродом і ЗТП, мають межу міцності 0,6...0,65 від рівня показників основного металу [8-18], що обумовлено повним розчиненням часток нанорозмірної зміцнюючої θ -фази у шві і зоні термічного впливу.

Крім того, термічний цикл зварювання виробів із сплаву 2219 може знижувати корозійну стійкість з'єднань внаслідок коагуляції (укрупнення) часток θ -фази (CuAl_2) у наволошовній зоні. Проблема зниження показників механічних властивостей і характеристик корозійної стійкості зварних швів внаслідок ліквідації у зоні сплавлення при способах зварювання плавленням досліджувалась в роботах [7-12], а при ЗТП – в роботах [13-18].

Зокрема, у роботах [8-12] встановлено, що при аргонодуговому зварюванні плавким електродом сплаву 2219 у наволошовній зоні має місце евтектична реакція між частками θ -фази (CuAl_2) і α -матрицею сплаву: $\alpha + \theta \rightarrow L_E$ з утворенням рідкої фази L_E при евтектичній температурі $T_E = 548^\circ\text{C}$ і вище. Ліквідація навколо великих θ -частинок призводить до збільшення їх розмірів і утворення з боку α -матриці сплаву ділянок із зниженою концентрацією міді. Ліквідація міді на границях зерен призводить до появи розділеної евтектики, яка складається із смуг з високою концентрацією Cu (до 33% ат.) і суміжних ділянок α -фази з низьким вмістом Cu, що обумовлює зниження характеристик корозійної стійкості та показників механічних властивостей зварних швів [8-10]. Аналогічні проблеми мають місце і при ЗТП сплаву 2219 [13-15].

Термічна обробка (загартування і старіння) виробів із сплаву 2219 після зварювання дозволяє в значній мірі відновити структуру і механічні власти-

вості швів, однак при виробництві великогабаритних конструкцій її виконання є важкоздійсненним завданням. Тому актуальною проблемою є розробка технологій зварювання сплаву 2219, що забезпечують без подальшої термічної обробки більш високий рівень міцності з'єднань, який задовольнить технічні вимоги розробників космічної техніки.

Ефективною технологією виготовлення силових елементів літальних апаратів (стрингери, обичайки, шпангоути) з пресованих профілів розвиненого і компактного перерізу є контактне стикове зварювання оплавленням (КСЗО). Цей спосіб забезпечує високу стабільну якість з'єднань, об'єднує в єдиному циклі складальні та зварювальні операції, не вимагає застосування допоміжних витратних матеріалів [19, 20]. При зварюванні заготовок товщиною до 12 мм технологія КСЗО забезпечує високі показники міцності алюмінієвих сплавів при незначній ширині зони термічного впливу (ЗТВ).

При КСЗО профілів більшої товщини необхідно виконувати попередній підігрів заготовок опором, що обумовлює збільшення ширини ЗТВ та, імовірно, виникнення проблем, характерних для способів зварювання плавленням і ЗТП.

Мета роботи полягала у встановленні особливостей формування з'єднань при КСЗО товстостінних пресованих профілів із сплаву 2219-T87, дослідженні їх мікроструктури і визначенні показників механічних властивостей.

Методика проведення робіт.

Дослідження проводилися на зразках сплаву 2219-T87 прямокутного перерізу товщиною 15 мм, шириною 60 мм. Довжина зразків становила не менше 200 мм. Хімічний склад досліджуваного сплаву наведено в табл. 1.

Оскільки для пресованих профілів із алюмінієвих сплавів характерною є анізотропія структури і механічних властивостей, то експерименти по КСЗО зразків сплаву 2219-T87 проводилися при різному напрямку ліній прокату (рис. 1), які є скупченнями часток θ -фази. При зварюванні заготовок з поздовжнім розташуванням волокон прокату з'єднання формується в площині, перпендикулярній напрямку волокон прокату (далі шов впоперек прокату). При зварюванні заготовок з поперечним розташуванням волокон прокату з'єднання формуються в площині, паралельній напрямку волокон прокату (далі шов уздовж прокату).

Дослідні зварювання проводили на лабораторній стиковозварювальній машині К607, обладнаній зварювальним трансформатором потужністю 75 кВ·А і приводом осадки з зусиллям до 1000 кН. Процес КСЗО включав кілька стадій: попередній підігрів

опором, оплавлення, осадку. Деформація при осадці відбувається в умовах об'ємного стиснення за рахунок застосування формуючих пристроїв (рис. 2).

Параметри процесу КСЗО встановлювали в межах: напруга оплавлення $U_{\text{опл}} = 5 \dots 6$ В, швидкість оплавлення $V_{\text{опл}} = 2 \dots 18$ мм/с, швидкість осадки $V_{\text{ос}} \geq 200$ мм/с. Загальний припуск на оплавлення і осадку $l_{\text{зв}} = 60$ мм.

Макроструктуру зварних з'єднань оцінювали візуальним оглядом з використанням лупи Levenhuk Zeno Multi ML7 при збільшенні $\times 3 \dots 10$. Металографічні дослідження проводили з використанням оптичного мікроскопа Neophot-32 при збільшенні $\times 25, \times 100, \times 400$. Підготовку поверхні шліфів проводили на шліфувально-полірувальному верстаті Struers LaboPol-5. Для виявлення структури використовували реактив Келлера ($0,5\text{HF}-1,8\text{HCl}-2,7\text{HNO}_3-95\text{H}_2\text{O}$ (об.%) та 0,5 %-ий водний розчин плавикової кислоти. Дослідження розподілу твердості HRB в зоні з'єднань проводили за допомогою стаціонарного твердоміра NOVOTEST ТС-БПР при навантажен-

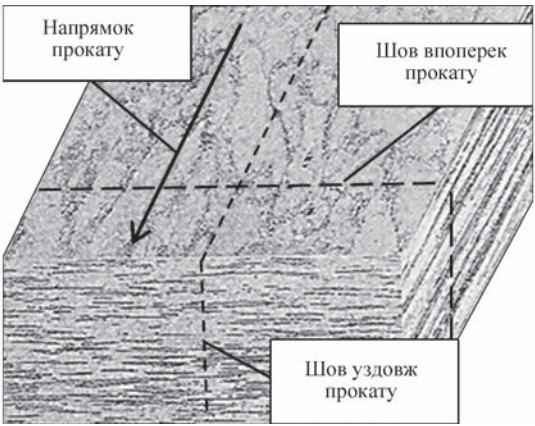


Рис.1. Схема розташування ліній прокату у зразках сплаву 2219-T87 при КСЗО

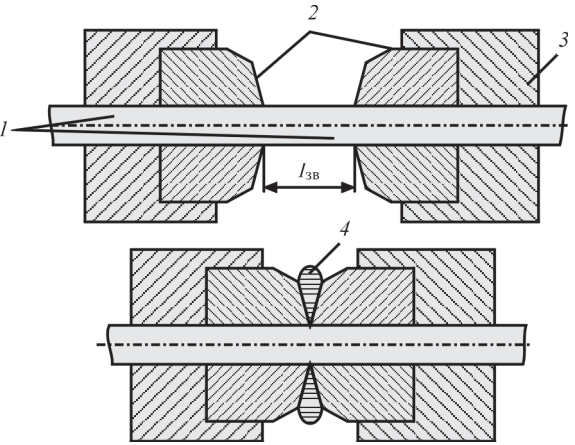


Рис. 2. Схема КСЗО з формуванням з'єднання: 1 – деталі; 2 – формуючі пристрої; 3 – струмопідвід; 4 – екструдований метал, $l_{\text{зв}}$ – припуск на зварювання.

Таблиця 1. Хімічний склад (мас. %) сплаву 2219 [4,5]

Al	Cu	Mn	Mg	Si	Zr	V	Zn	Fe	Ti
Основа	5,8...6,8	0,2...0,4	<0,2	<0,2	0,1...0,25	0,05...0,15	<0,1	<0,3	0,02...0,1

ні 600 Н (діаметр кульки 1/16") з кроком 1...2 мм. Механічні випробування зразків зварних з'єднань на розтяг проводили на машині ЦДМ-10 з максимальним зусиллям 100 кН.

Результати досліджень.

При зварюванні застосовували попередній підігрів опором до 200 °С, струм попереднього підігріву $I_{\text{під}} = 20$ кА. Нагрів до даної температури не призводить до втрати міцності сплаву 2219-T87. Подальше підвищення температури попереднього підігріву призводить до збільшення ширини зони, в якій спостерігається повне розчинення і коагуляція часток нанорозмірної зміцнюючої θ' -фази у процесі КСЗО, що обумовлює зниження показників міцності сплаву.

В процесі відпрацювання режимів зварювання проводився «експрес-аналіз» якості зварних з'єднань – загин зразків з надрізом по лінії з'єднання до руйнування. Якість з'єднань оцінювали за наявністю (відсутністю) дефектів типу оксидних плівок

при візуальному огляді зламів зруйнованого зразка (рис. 3, а). При відпрацюванні режимів КСЗО прагнули мінімізувати час зварювання з метою зменшення ширини ЗТВ з'єднань сплаву 2219-T87.

За такою методикою визначені режими КСЗО, які забезпечують відсутність дефектів (рис. 3, б) по лінії з'єднання. Встановлено, що низькотемпературний нагрів опором до 200 °С з подальшим оплавленням протягом 15 с і деформація при значенні тиску осадки не нижче 500 МПа забезпечують формування якісних з'єднань. Після отримання позитивних результатів були зварені партії зразків для металографічних досліджень і механічних випробувань.

Результати дослідження мікроструктури основного металу (ОМ) і зварних з'єднань (ЗЗ), виконаних КСЗО, наведені на рис. 4–6. Основний метал сплаву 2219-T87 (рис. 4) характеризується вираженою текстурою з деформованими в напрямку прокату зернами і великою кількістю розташованих у вигляді

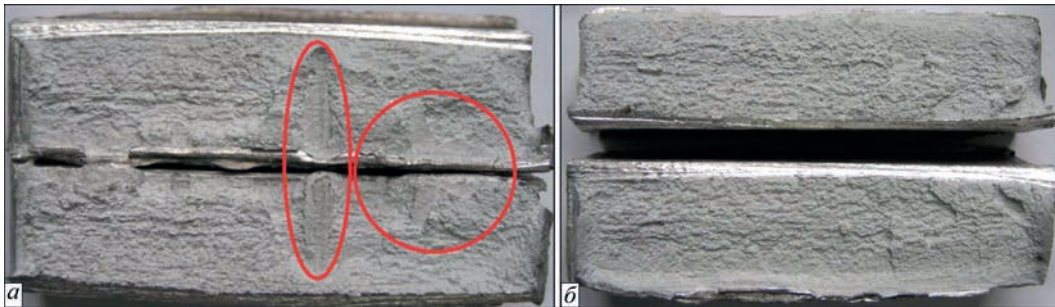


Рис. 3. Злами зварних з'єднань: а - з дефектами (оксидні плівки); б - без видимих дефектів

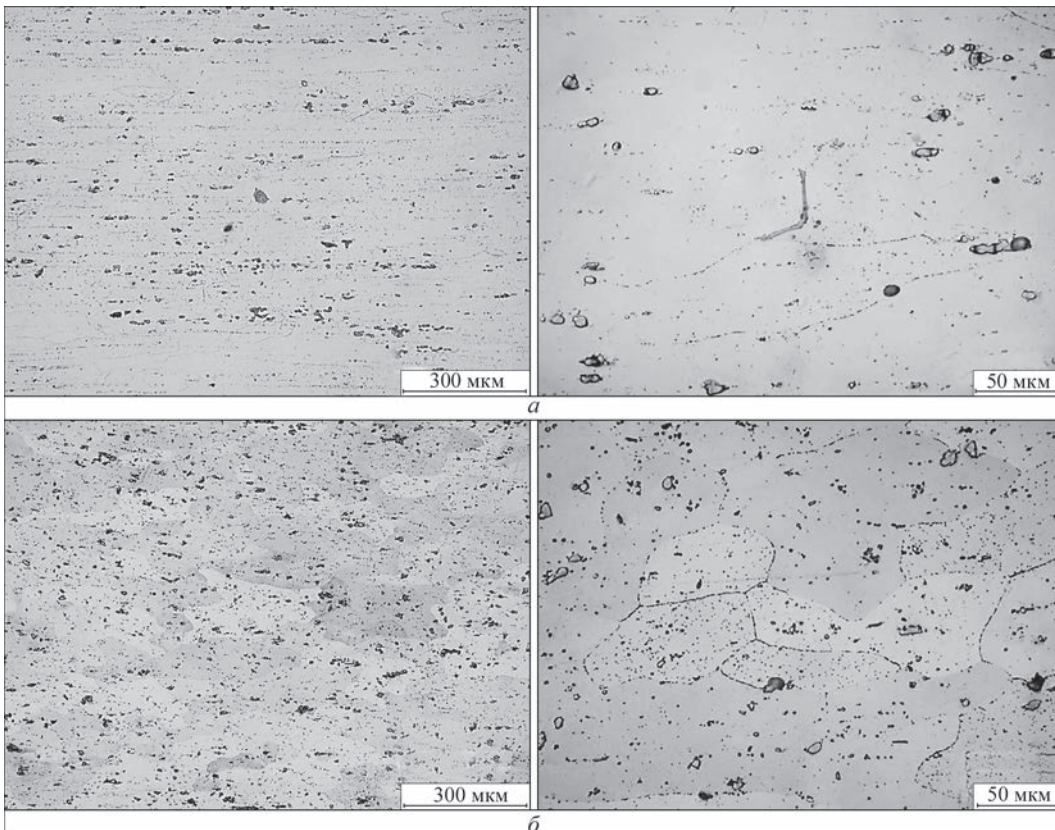


Рис. 4. Мікроструктура основного металу сплаву 2219-T87 уздовж (а) і впоперек (б) прокату

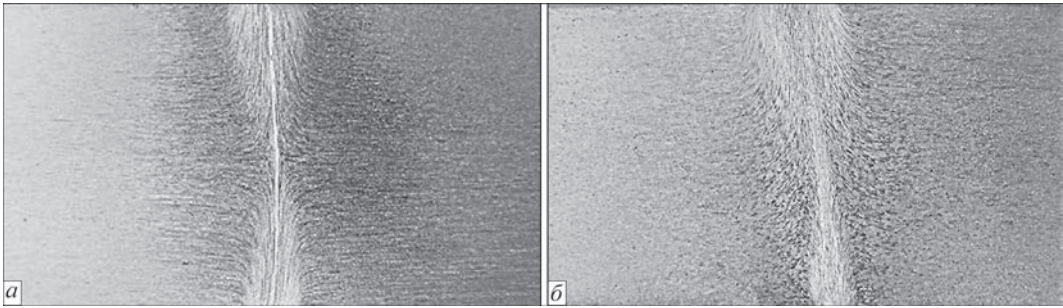


Рис. 5. Структура зварного з’єднання зразків зі сплаву 2219-T87: товщиною $\delta = 15$ мм: а – шов впоперек прокату, б – шов уздовж прокату

Таблиця 2. Механічні властивості основного металу і зварних з’єднань сплаву 2219-T87 в залежності від напрямку прокату

Зразок	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ_5 , %	Кут загину α°	KCV, Дж/см ² ($T = 20^\circ\text{C}$)	Коефіцієнт міцності $\sigma_{\text{в33}}/\sigma_{\text{в0М}}$
Шов впоперек прокату						
ОМ	486	413	10,9	37	13,9	–
33	372	263	4,3	33	16,6	0,76
Шов уздовж прокату						
ОМ	486	410	8,0	21	6,9	–
33	372	249	5,0	31	20,5	0,76

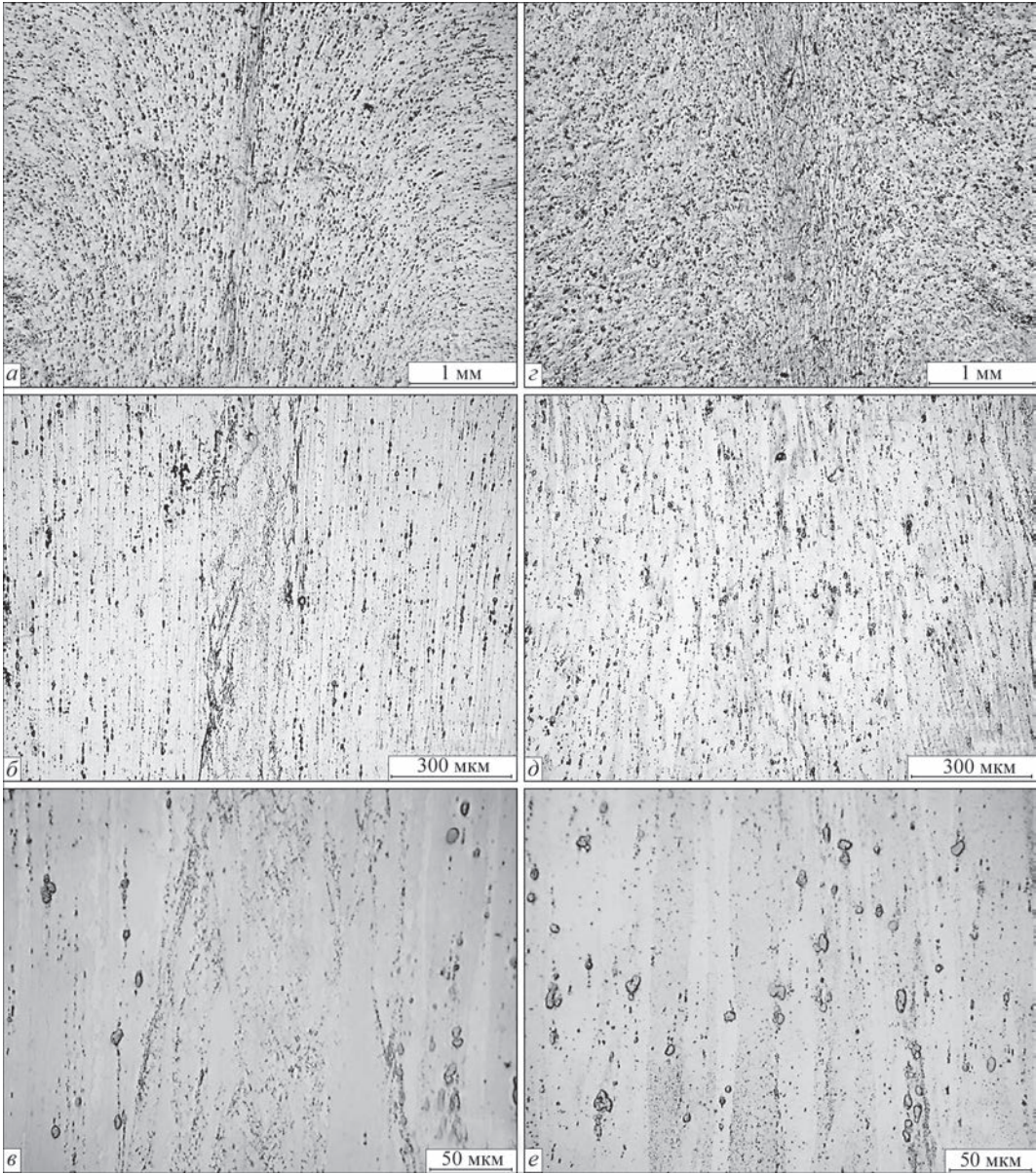


Рис. 6. Мікроструктура зварного з’єднання сплаву 2219-T87 шов впоперек прокату (а–в) та уздовж прокату (г–е)

«ланцюжків» часток θ' -фази (CuAl_2) різної величини, найбільші частки мають розмір 10...15 мкм.

З наближенням до лінії з'єднання спостерігається зміна орієнтації зерен, причому напрямок волокон прокату в зоні термомеханічного впливу (ЗТМВ) поступово змінюється до 90° в порівнянні з вихідним напрямком зерен ОМ і збігається з напрямком екструзії металу в процесі деформації при осадці (рис. 6). Внаслідок екструзії металу в зазор між формуючими пристроями відбувається часткове розчинення виділень θ -фази в ЗТМВ – їх розмір зменшується, скупчення у вигляді «ланцюжків» частково руйнуються, частки стають відокремленими. Така структура свідчить про істотний вплив інтенсивної пластичної деформації при осадці з примусовим формуванням (екструзії) на морфологію виділень вторинних фаз.

У зварному з'єднанні як впоперек (рис. 6, а–в), так і уздовж прокату (рис. 6, з–е) відсутні дефекти типу оксидних плівок, розшарувань та евтектичних утворень. В ЗТВ не спостерігається укрупнення часток θ -фази (CuAl_2) і виникнення розділеної евтектики, що є характерним для способів зварювання плавленням [7-12] і ЗТП [13-18] сплаву 2219.

Розмір часток θ -фази в центрі стику (зона з'єднання шириною 150...200 мкм) становить 1...2 мкм, що значно менше такого для ОМ сплаву, і свідчить про повне розчинення часток при зварюванні та повторне їх виділення у більш дисперсному вигляді при охолодженні. Аналіз мікроструктури (рис. 6) свідчить про формування з'єднання через тонкий шар розплаву, що є необхідною умовою якісного зварювання алюмінієвих сплавів.

Аналіз розподілу твердості в зоні з'єднання сплаву 2219-T87 (рис. 7) показує, що ширина зони термічного впливу становить близько 28 мм. Зниження показників твердості обумовлено структурними перетвореннями в зоні з'єднання сплаву 2219-T87 під впливом термічного циклу КСЗО, а саме розчиненням і коагуляцією нанорозмірної зміцнюючої θ' -фази.

Результати випробувань на розтяг ОМ сплаву 2219-T87 і зварних з'єднань наведені в табл. 2. Отже, межа міцності σ_B зварних з'єднань пластин товщиною 15 мм із сплаву 2219-T87, отриманих КСЗО,

HRB (P = 600 Н, $\phi 1/16''$)

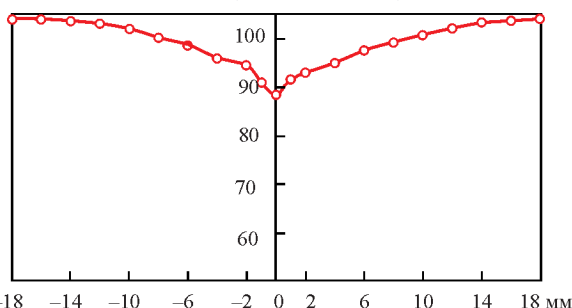


Рис. 7. Розподіл твердості в зоні зварного з'єднання зразків товщиною 15 мм зі сплаву 2219-T87

становить 76 % показників міцності ОМ сплаву, як з розташуванням шва уздовж, так і впоперек прокату.

Висновки:

1. Встановлено, що попередній підігрів опором зразків сплаву 2219-T87 до температури 200°C і проведення КСЗО з примусовим формуванням при значенні тиску при осадці не нижче 500 МПа, забезпечують формування якісних (бездефектних) з'єднань.

2. Мікроструктура металу в ЗТМВ з'єднання сплаву 2219-T87 свідчить про істотний вплив інтенсивної пластичної деформації при осадці з примусовим формуванням на морфологію часток θ -фази (CuAl_2). В результаті екструзії металу в зазор між формуючими пристроями відбувається часткове розчинення часток θ -фази – їх розмір зменшується, скупчення у вигляді «ланцюжків» частково руйнуються.

3. Розмір часток θ -фази в центрі зони з'єднання шириною 150...200 мкм становить 1...2 мкм, що пов'язано з повним розчиненням θ -фази при зварюванні та повторним виділенням у більш дисперсному вигляді при охолодженні. Така трансформація часток CuAl_2 свідчить про формування з'єднання через тонкий шар розплаву, що є необхідною умовою якісного зварювання алюмінієвих сплавів.

4. Межа міцності з'єднань пластин товщиною 15 мм із сплаву 2219-T87, отриманих за розробленою технологією КСЗО, становить 76 % від показників основного металу сплаву, як з розташуванням шва уздовж, так і впоперек прокату. Зниження показників твердості в зоні з'єднання обумовлене розчиненням і коагуляцією нанорозмірної зміцнюючої θ' -фази.

Література/References

- Гуреева М.А., Грушко О.Е. (2009) Алюминиевые сплавы в сварных конструкциях современных транспортных средств. *Машиностроение и инженерное образование*, 3, 27–41.
- Gureeva, M.A., Grushko, O.E. (2009) Aluminium alloys in welded structures of modern transport vehicles. *Mashinostroenie i Inzhenernoe Obrazovanie*, 3, 27–41 [in Russian].
- Сетюков О.А. (2013) Алюминиевый сплав 1201 в конструкции космического корабля «Буря». *Авиационные материалы и технологии. Спецвыпуск*, 15–18.
- Setyukov, O.A. (2013) 1201 aluminium alloy in structure of spacecraft «Buran». *Aviats. Materialy i Tekhnologii, Special Issue*, 15–18 [in Russian].
- Federal Aviation Administration Flight Standards Service (2018) *Aviation Maintenance Technician Handbook*. [online] Available at: <https://www.faa.gov/regulations/policies/handbooks_manuals/aircraft/> [Accessed 01 July 2021].
- ASTM International – Standards Worldwide, (2014) *ASTM B209M - 14 Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate (Metric)*. [online] Available at: <<https://www.astm.org/Standards/B209M.htm>> [Accessed 02 July 2021].
- George, E., Totten, G.E. (2003) *Handbook of Aluminum. Volume 1: Physical Metallurgy and Processes*, Marcel Dekker Inc. New York, NY, USA.
- An, L.H., Cai, Y., Liu, W. et al. (2012) Effect of pre-deformation on microstructure and mechanical properties of 2219 aluminum alloy sheet by thermomechanical treatment. *Trans. Nonferr. Met. Soc. China.*, 22, 370–375. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(12\)61733-6](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(12)61733-6).
- Lu, Y., Wang, J., Li, X. et al. (2018) Effects of pre-deformation on the microstructures and corrosion behavior of 2219 aluminum alloys. *Mater. Sci. Eng. A*, 723, 204–211. doi: [10.1016/j.msea.2018.03.041](https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.03.041).

8. Sobih, M., Elseddig, Z., Almazy, K., Sallam, M. (2016) Experimental Evaluation and Characterization of Electron Beam Welding of 2219 Al-Alloy. *Indian Journal of Materials Science*, Article ID 5671532, DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/5671532>
9. Huang, C., Kou, S. (2000) Partially melted zone in aluminum welds – Liquation mechanism and directional solidification. *Weld J.*, 79 (5), 113–120.
10. Huang, C., Kou, S. (2001) Partially melted zone in aluminum welds: solute segregation and mechanical behavior. *Ibid*, 80 (1), 9–17.
11. Huang, C., Kou, S. (2001) Partially melted zone in aluminum welds planar and cellular solidification. *Ibid*, 80 (2), 46–53.
12. Srinivasa, Rao P., Sivadasan, K.G., Balasubramanian, P.K. (1996) Structure-property correlation on AA 2219 aluminium alloy weldments. *Bull Mater Sci*, 19 (3), 549–557.
13. Poklyatsky, A.G., Chajka, A.A., Klochkov, I.N., Yavorskaya, M.R. (2009) Strength and structure of aluminium alloy welded joints made by friction stir and non-consumable electrode welding. *The Paton Welding J.*, 9, 9–12.
14. Venkateswarlu, D. (2017) Analysing the friction stir welded joints of AA2219 Al–Cu alloy in different heat-treated-state. *IOP Conf. Series: Mater Sci and Eng*. Hyderabad, India, 1–2 June 2017. IOP Publishing. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/330/1/012074>.
15. Kang, J., Feng, Z.C., Frankel, G.S. et al. (2016) Friction stir welding of Al alloy 2219-T8: Part I – Evolution of precipitates and formation of abnormal Al₂Cu agglomerates. *Metall Mater Trans A*, 47 (9), 4553–4565. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3648-7>.
16. Kang, J., Feng, Z.C., Li, J.C. et al. (2016) Friction stir welding of Al alloy 2219-T8: Part II – mechanical and corrosion. *Ibid*, 47 (9), 4566–4577. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-016-3646-9>.
17. Kang, J., Liang, S., Wu, A. et al. (2017) Local liquation phenomenon and its effect on mechanical properties of joint in friction stir welded 2219 Al alloy. *Acta Metall. Sin.*, 53(3), 358–368. DOI: <https://doi.org/10.11900/0412.1961.2016.00311>.
18. Rivera, O.G., Allison, P.G., Brewer, L.N. et al. (2018) Influence of texture and grain refinement on the mechanical behavior of AA2219 fabricated by high shear solid state material deposition. *Mater. Sci. Eng. A*, 724, 547–558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.03.088>.
19. Кучук-Яценко С.И. (1992) Контактная стыковая сварка оплавлением. Киев, Наукова думка.
20. Кучук-Яценко С.И. (1992) Flash butt welding. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
20. Кучук-Яценко С.И., Чвертко П.Н., Семенов Л.А. и др. (2010) Особенности контактной стыковой сварки высокопрочного алюминиевого сплава 2219. *Автоматическая сварка*, 3, 9–12.
- Кучук-Яценко, С.И., Чвертко, П.Н., Семенов, Л.А. et al. (2010) Peculiarities of flash butt welding of high-strength aluminium alloy 2219. *The Paton Welding J.*, 3, 9–12.

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF 2219-T87 ALUMINUM ALLOY JOINTS PRODUCED BY FLASH BUTT WELDING

S.I. Kuchuk-Yatsenko, K.V. Hushchyn, I.V. Ziakhov, S.M. Samotryasov, M.S. Zavertannyi, A.M. Levchuk

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

E-mail: office@paton.kyiv.ua

During designing and manufacture of aircraft structures from modern thermomechanically strengthened aluminium alloys, there is a problem of producing welded joints with satisfactory mechanical properties without further heat treatment of large-sized products. In the work the formation of joints of thermomechanically strengthened 2219-T87 alloy during flash butt welding was investigated. It was found that a low-temperature resistance heating in combination with a short-term heating by flashing provide the formation of defect-free welded joints. Metallographic examinations showed that the joints are formed through a thin layer of melt, which is a necessary condition for a high-quality welding of aluminium alloys. The influence of intense plastic deformation during upsetting with a forced formation on the morphology of θ -phase (CuAl_2) particles was studied. A decrease in the values of hardness in the joint area as a result of dissolution and coagulation of a strengthening θ' -phase was established. The strength of welded joints both along and across the rolled metal lines amounts to 76 % of the strength of the base metal. 20 Ref., 2 Tabl., 7 Fig.

Key words: aluminium 2219 alloy, flash butt welding, welded joint, mechanical properties.

Надійшла до редакції 05.07.2021

Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики
Міжнародна Асоціація «Зварювання»

II МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ та МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

6–10 вересня 2021

Одеса, Аркадія, готель «Аркадія»

Генеральний спонсор
ПрАТ «УкрНДІНК»



Офіційний спонсор
ТОВ «НВФ «Діагностичні
прилади»



ОРГАНІЗАТОР КОНФЕРЕНЦІЇ

Міжнародна Асоціація «Зварювання»
вул. Казимира Малевича 11, м. Київ, 03150
тел. +38 (044) 200-82-77, (050) 352-73-50
journal@paton.kiev.ua
posypaiko.yurii@gmail.com
<http://pwi-scientists.com/ukr/nktd2021>

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ АПАРАТНИХ ЗАТИСКАЧІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗВАРЮВАННЯ ВИБУХОМ

Л.Д. Добрушин, А.Г. Бризгалін, П.С. Шльонський, Є.Д. Пекар, С.Д. Венцев

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

В електротехнічній промисловості досить часто застосовується з'єднання мідних і алюмінієвих струмопровідних елементів. Прямий контакт таких елементів без зварювання супроводжується протіканням електрохімічної корозії і підвищенням в результаті цього перехідного опору під час експлуатації. Будь-який вид зварювання даних матеріалів призводить до утворення інтерметалідів типу Al_nCu_m , які можуть вплинути (або не вплинути) на електротехнічні властивості з'єднання. Зварювання вибухом є найбільш ефективним способом отримання мідно-алюмінієвих електричних провідників з підвищеними експлуатаційними властивостями. Необхідність отримання біметалевих мідно-алюмінієвих виробів різних форм за допомогою зварювання вибухом вимагає розробки відповідних технологічних процесів. Бібліогр. 4, табл. 5, рис. 10.

Ключові слова: електричний провідник, електроопір, біметалевий перехідник, композитне з'єднання, зварювання вибухом, мідно-алюмінієвий перехідник

Однією з найбільш важливих властивостей електроконтактних деталей і вузлів, необхідних для з'єднання різнорідних елементів силових електричних ланцюгів (з'єднання мідних підводів силових електричних машин з алюмінієвими струмопровідними шинами, кабелями, накінцівниками апаратних затискачів), є висока надійність при мінімальному перехідному електричному опорі [1].

Найбільш простий спосіб отримання таких з'єднань за допомогою притиснення деталей, що з'єднуються, наприклад, болтами, характеризується проявом електрохімічної корозії, внаслідок чого з'єднання швидко втрачає експлуатаційні властивості через зростання перехідного опору і подальшого його перегріву аж до розплавлення.

Існують різні способи підвищення якості таких з'єднань: пакетна прокатка, напилення, контактне і дифузійне зварювання, зварювання вибухом. Останній, на відміну від інших, характеризується більш міцним і щільним з'єднанням шарів з близьким до нуля перехідним опором, відсутністю міжшарової електрокорозії. Ефективність впровадження конструкцій композитних струмопровідних вузлів, одержуваних зварюванням вибухом, підтверджується зниженням перехідного опору в 1,7...2,5 рази і збільшенням терміну служби в 5...7 разів [2].

Мета цієї роботи – дослідити можливість виготовлення мідно-алюмінієвих перехідних елементів за допомогою зварювання вибухом та розробити технології їх виготовлення.

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розглянуті три способи виготовлення апаратного затискача з використанням зварювання вибухом.

Перший – виготовлення шляхом зварювання вибухом біметалевих ($Al + Cu$) листів, їх подаль-

ша прокатка до необхідної товщини і розрізання на вставки для з'єднання мідного та алюмінієвого шинопроводу (рис. 1).

Другий – виготовлення апаратного затискача складної конфігурації (рис. 2) шляхом сплавлення алюмінієвої трубки з плоскою алюмінієвою частиною і плакування плоскої частини міддю за допомогою зварювання вибухом. У цьому випадку доцільно проводити сплавлення і плакування вибухом відразу декількох виробів з подальшим розрізанням на окремі апаратні затискачі.

Третій – зварювання вибухом біметалевого листа, вирізка з нього плоских заготовок необхідного розміру і подальша приварка плавленням до алюмінієвого шару трубок з алюмінію.

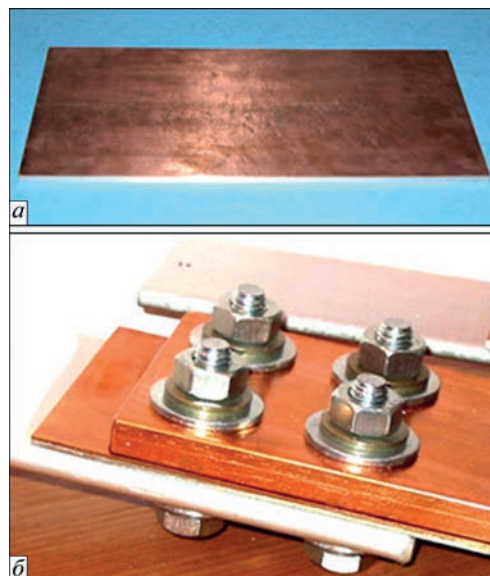


Рис. 1. Біметалева $Al-Cu$ пластина (а) і загальний вигляд з'єднання алюмінієвої і мідної шини через вставку (б)

Бризгалін А.Г. – <https://orcid.org/0000-0001-5886-3069>, Шльонський П.С. – <https://orcid.org/0000-0002-3566-1752>, Пекар Є.Д. – <https://orcid.org/0000-0001-5025-4445>

© Л.Д. Добрушин, А.Г. Бризгалін, П.С. Шльонський, Є.Д. Пекар, С.Д. Венцев, 2021

Відпрацювання зазначених технологічних процесів проводили з використанням наступних матеріалів: прокат міді та алюмінію у вигляді ли-

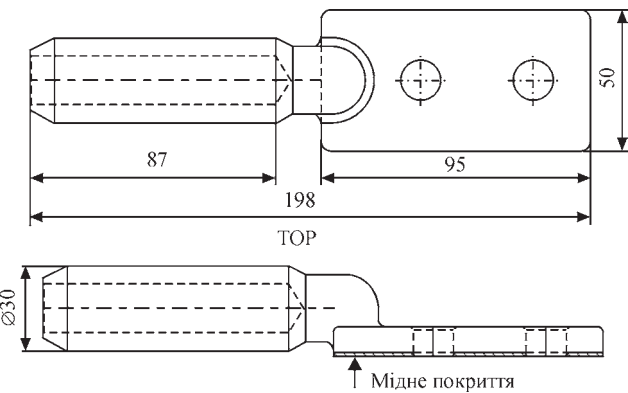


Рис. 2. Загальний вигляд апаратного затискача

ста і заготовки з литого алюмінію. Всі матеріали технічно чисті, призначені для електричних провідників. Хімічний склад і механічні властивості мідних та алюмінієвих листів в стані поставки наведені в табл. 1–3 [3].

Механічні властивості з'єднання Al–Cu після зварювання вибухом (міцність на відрив і зріз) повинні бути не нижче, ніж у алюмінію в стані поставки.

Для дослідження механічних характеристик отриманого вибухом біметалу Al–Cu проводились випробування на відрив і зріз [4].

Випробування при статичних навантаженнях роблять на розривних машинах. При випробуванні на відрив по кільцевому контуру (рис. 3) зразок встановлюють на кільцеву опору і пуансоном прикладають навантаження до відриву нижнього шару.

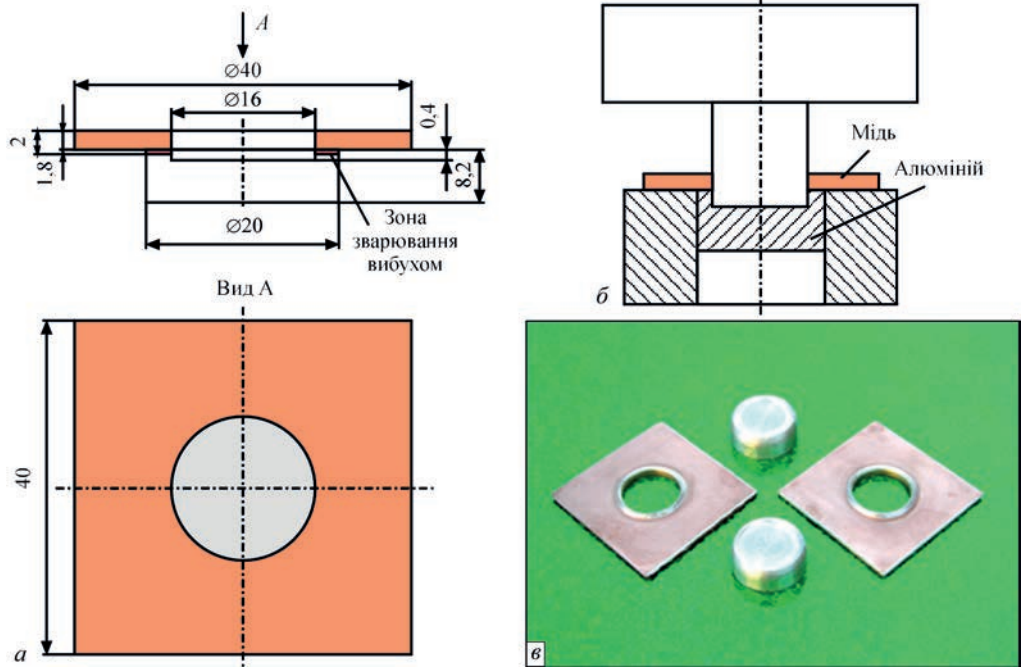


Рис. 3. Випробування на відрив шарів: а – геометрія зразка; б – схема випробування; в – зразок після випробування

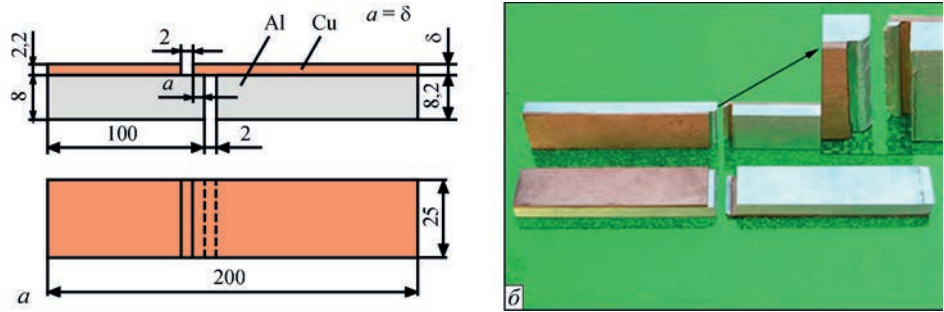


Рис. 4. Випробування зразків на зріз: а – геометрія зразка; б – зразок після випробування

Таблиця 1. Хімічний склад алюмінію, мас. %

Матеріал	Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Ti	Zn	Ga
Алюміній (99,61 %)	0,08	0,27	0,006	0,002	0,0008	0,011	0,005	0,01

Таблиця 2. Хімічний склад міді, мас. %

Матеріал	Fe	Sb	Ag	Ni	Pb	Sn	O
Мідь (99,918 %)	0,0002	0,0014	0,015	0,0141	0,0069	0,0084	<0,01

Таблиця 3. Механічні властивості алюмінію і міді

Матеріал	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$ %, МПа	δ , %
Al	60	-	25
Cu	235	-	45,5

Видно, що відрив стався на основному матеріалі (алюмінії), що є свідченням міцності з'єднання.

Випробування міцності біметалу на зріз проводилося шляхом розтягування плоских зразків з поперечними надрізами шарів (рис. 4).

Крім дослідження механічних властивостей проводилися випробування біметалу на вигин (рис. 5). При таких випробуваннях в разі поганої якості зварювання відбувається розшарування зразка по зоні з'єднання.

Також проводився ультразвуковий контроль біметалу відповідно до стандарту DIN 54 123. Використовувався прилад Ейнштейн 2 з прямим ультразвуковим датчиком. Для тарювання приладу був виготовлений зразок із штучними дефектами. Слід зазначити, що при проведенні цих досліджень ні в одному випадку не було виявлено дефектів на кордоні з'єднання мідь-алюміній, які були отримані зварюванням вибухом.

Металографічні дослідження проводилися за стандартною методикою за допомогою мікроскопа Неофот-32. Фотографування мікроструктур здійснювалося за допомогою камери CMOS (фірма KONUS, Італія) з розеткою USB.

Розглянемо особливості запропонованих способів отримання перехідників для з'єднання мідних і алюмінієвих струмопроводів.

1. Біметалеві Al–Cu вставки для з'єднання алюмінієвого та мідного шинопроводів.

Біметалеві вставки використовуються для забезпечення контакту між однойменними металами (Al + Al, Cu + Cu) при з'єднанні шин з алюмінію і міді. Вони зазвичай виготовляються зварюванням вибухом з товщиною листа 8...10 мм, потім виконують прокатку на холодну до необхідної товщини (2,0...2,5 мм), внаслідок чого поверхня біметалу стає чистішою без зниження його міцності та електрофізичних властивостей. З отриманих смуг вирубуються вироби з потрібною для замовника геометрією. Наприклад, біметал з товщиною алюмінію 8 мм і товщиною міді 2 мм прокатується до товщини 2,5 мм зі збереженням співвідношення шарів.

Неплощинність біметалевого листа розміром 500×250 мм після зварювання вибухом і прокатки становила не більше 3 мм, відхилення по товщині не більше 0,25 мм.

2. Розробка технології плакування апаратних затискачів складної конфігурації.

Одним з можливих варіантів використання зварених вибухом мідно-алюмінієвих деталей в силових електричних ланцюгах можуть служити алюмінієві кабельні накінцівники, плаковані тонким шаром міді, що використовуються для з'єднання плоских мідних шин електричних машин з багатожилевими алюмінієвими кабелями круглого перетину.

З метою підвищення продуктивності і зниження вартості кінцевої продукції вісім елементів

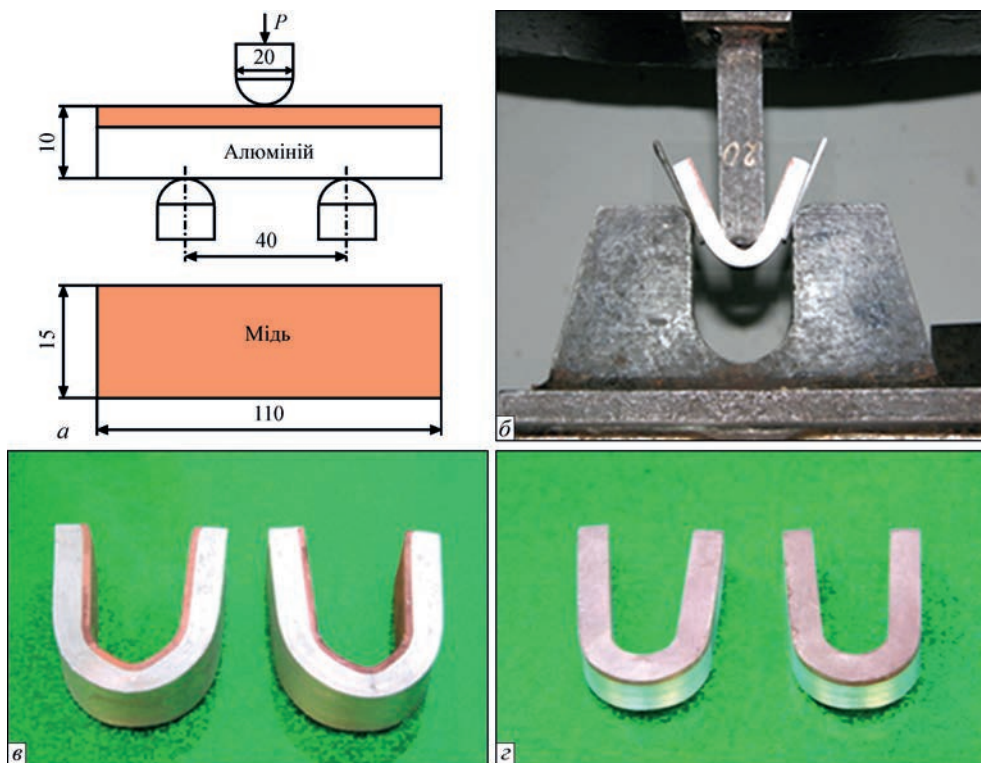


Рис. 5. Випробування на вигин: а – схема випробування; б – процес випробування; в, г – зразки після випробування в двох перетинах біметалу

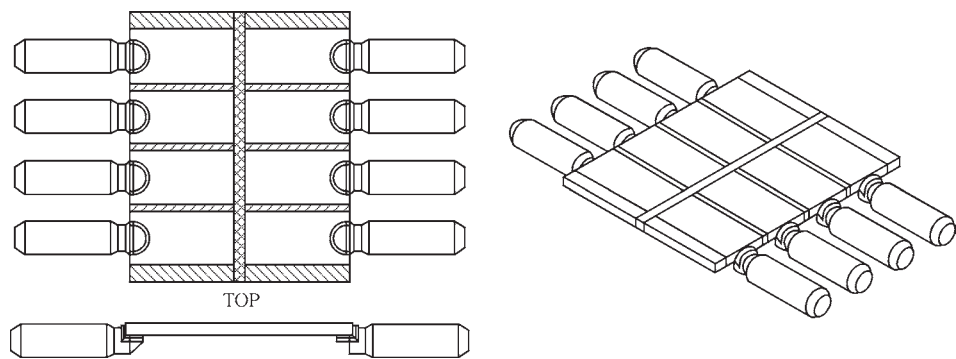


Рис.6. Вісім заготовок апаратних затискачів, відлиті разом

були залиті розплавленим алюмінієм в одну заготовку (рис. 6).

Плакування вибухом плоскої частини такої алюмінієвої заготовки мідною пластиною без вжиття заходів щодо запобігання деформування під час вибуху призвело до негативного результату, сталося руйнування заготовки (рис. 7).

У зв'язку з цим було запропоновано зміцнювати заготовку, заливаючи її сплавом Вуда. В цьому випадку процес підготовки і плакування вибухом повинен здійснюватися в наступній послідовності:

- виготовлення сталевोї матриці (коробки) з розмірами, що дозволяють розміщувати всередині неї алюмінієву заготовку з зазором 5...10 мм від краю. Висота матриці повинна дорівнювати висоті алюмінієвої заготовки;
- підігріти матрицю до 120 °С. Розплавити сплав Вуда, який був обраний завдяки його низькій температурі плавлення (69 °С), простір між алюмінієвою заготовкою і матрицею заповнити розплавом Вуда і охолодити на повітрі;

- плоску поверхню алюмінієвої заготовки очистити від забруднень механічно, протерти розчинником;
- підготувати мідну пластину на 20...30 мм довше алюмінієвої плоскої частини для забезпечення нависання, що знижує деформацію при зварюванні вибухом;
- зварювання вибухом;
- виплавити сплав Вуда і очистити заготовку (рис. 8). Розрізання заготовки на окремі апаратні затискачі.



Рис. 7. Відрив трубних елементів під час зварювання вибухом

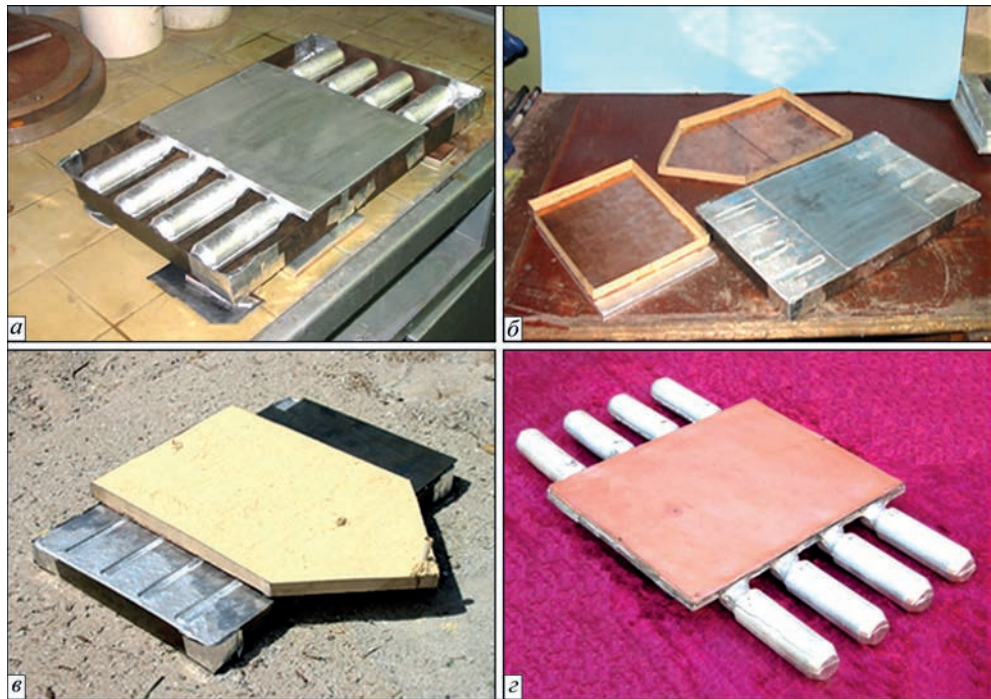


Рис. 8. Загальний вигляд до (а) і після (б) заливки сплавом Вуда, який повністю заповнив простір між матрицею і алюмінієвою заготовкою і тим самим утворив монолітну заготовку для зварювання вибухом; в – установка мідної пластини з вибуховою речовиною для подальшого плакування вибухом; г – заготовка з декількох обтискних клем перед розрізанням



Рис. 9. Апаратні затискачі, виготовлені за комбінованою схемою – зварювання вибухом + дугове зварювання

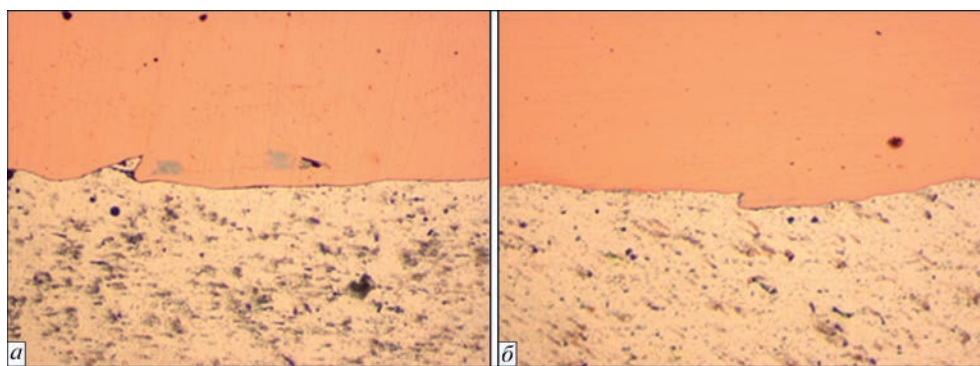


Рис. 10. Типова мікроструктура межі з'єднання Al-Cu: *а* – після зварювання вибухом; *б* – після прокатки біметалу

Вироби, отримані таким способом, мають достатню якість, проте висока трудомісткість робить його малопродуктивним.

3. Комбінована технологія.

Апаратні затискачі можуть бути виготовлені шляхом приварки зварюванням плавленням трубних елементів з алюмінію до алюмінію біметалевого листа (рис. 9). В цьому випадку техпроцес зварювання вибухом спрощується і зводиться до зварювання листів міді та алюмінію без використання додаткових пристосувань і матеріалів. Додаткова операція, дугова зварка алюмінію, вимагає спеціального обладнання і високої кваліфікації зварника. Нагрівання понад 180 °С протягом більше 30 хв створює умови для зростання інтерметалідів на кордоні з'єднання Al–Cu. При цьому таке зростання інтерметалідів спостерігається на малій площі поблизу дугового зварного з'єднання і не впливає на загальну провідність апаратного затиску.

Результати механічних випробувань показані в табл. 4 та 5.

Мікроструктура отриманого з'єднання показана на рис. 10.

Проведені випробування показали, що механічні характеристики біметалу не нижче алюмінію в стані поставки, що відповідає висунутим вимогам. Високу якість з'єднання підтверджено випро-

Таблиця. 4. Результати випробувань біметалу на розтягнення

Позначення зразка	Величина навантаження, Н	Площа випробуваного кільця, мм ²	Межа міцності, МПа
T1	12528	109,9	114
T2	12830	108,9	117,8
T3	13130	113,1	116
T4	13177	108,9	121

Таблиця 5. Результати випробувань біметалу на зріз

Позначення зразка	Величина навантаження, Н	Площа випробуваної зони, мм ²	Межа міцності, МПа
S1	4600	49,8	92
S2	3820	49,8	77
S3	4020	49,8	80,7
S4	4300	49,8	86,3

буваннями на вигин, не відбулося жодного випадку розшарування біметалу. На кордоні з'єднання Al–Cu спостерігається незначна кількість інтерметалідів (сірі плями на тлі міді, рис. 10), які в невеликій кількості не можуть впливати на електропровідність біметалу в цілому.

Слід зазначити, що зварювання вибухом є досить ефективним і в багатьох випадках безальтернативним способом виготовлення біметалевих перехідників високої якості для електротехнічних потреб.

При необхідності зварювання вибухом може забезпечити практично будь-яке поєднання металів в біметал, від м'якого срібла до одержуваних порошковою металургією листів вольфраму.

Список літератури

1. Рыжов С.Б., Зубченко А.С., Каширский Ю.В., Банюк Г.Ф. (2004) *Стали и сплавы энергетического оборудования*. Москва, Машиностроение.
2. Лысак В.И., Кузьмин С.В. (2005) *Сварка взрывом*. Москва, Машиностроение.
3. (2008) *Цветные металлы и сплавы. Справочник*. Москва, Машиностроение.
4. Коновалов Д.А., Веретенникова И.А. (2018) Исследование механических свойств биметалла, полученного сваркой взрывом, при поэтапной пластической деформации. *Письма о материалах*, 8, 2, 215–219.

References

1. Ryzhov, S.B., Zubchenko, A.S., Kashirsky, Yu.V., Banyuk, G.F. (2004) *Steels and alloys of power engineering equipment*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].

- Lysak, V.I., Kuzmin, S.V. (2005) *Explosion welding*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- (2008) *Non-ferrous metals and alloys: Refer. book*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- Kononov, D.A., Veretennikova, I.A. (2028) Study of mechanical properties of bimetal produced by explosion welding at step-by-step plastic deformation. *Pisma o Materialakh*, 8(2), 215–219 [in Russian].

DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF MANUFACTURING HARDWARE CLAMPS, USING EXPLOSION WELDING

L.D. Dobrushin, A.G. Bryzgalin, P.S. Shlonskiy, E.D. Pekar, S.D. Ventsev

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Joining copper and aluminium current-conducting elements is quite often applied in electrical industry. Direct contact of such elements without welding is accompanied by running of electrochemical corrosion and resultant increase of transient resistance, which rises during operation. Any kind of welding these materials leads to formation of intermetallics of AlCu type, which can affect (or not affect) the electrical properties of the joint. Explosion welding is the most efficient method to produce copper-aluminium electric conductors with higher performance. The need to manufacture bimetal copper-aluminium products of various shapes by explosion welding requires development of the respective technological processes. 4 Ref., 5 Tabl., 10 Fig.

Keywords: electric conductor, electric resistance, bimetal transition piece, composite joint, explosion welding, copper-aluminium transition piece

Надійшла до редакції 03.07.2021

Прилад для безконтактного вимірювання механічних напружень у виробках із феромагнітних сталей

Призначення: безконтактне вимірювання залишкових і робочих напружень конструкцій із феромагнітних сталей.

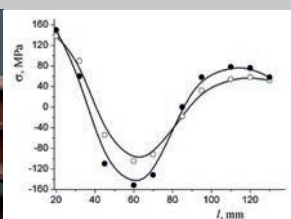
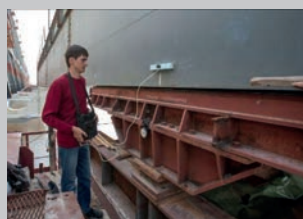
Основні технічні характеристики та переваги:

- прилад дозволить вимірювати залишкові і робочі механічні напруження магнітоанізотропним методом;
- робочі частоти збудження магнітоанізотропного вихрострумового давача від 1 до 50 кГц залежно від глибини контрольованої зони;
- на відміну від методу свердлення отворів є неруйнівним;
- на відміну від резистивного методу є безконтактним і мобільним.

Особливості функціонування:

- магнітоанізотропний метод базується на застосуванні зворотного магнітострикційного ефекту;
- в розробці буде використано новий спосіб, що зменшує вплив гістерезису на результати вимірювання;
- прилад може бути використаний під час будівництва та експлуатації мостів, для визначення залишкових напружень зварних швів, для контролю залишкових напружень залізничних рейок та коліс тощо.

Стан розробки: створено експериментальні макети приладів і магнітоанізотропних перетворювачів, які випробовувано під час насування пролітної будови моста методом насування.



Розподіл залишкових напружень в зоні кільцевих швів труб, отриманий магнітоанізотропним методом (○) і методом свердлення отворів (●)

Пропозиції по співробітництву. Прилад може знайти застосування в будівництві, на МК «Азовсталь», ДП «Укрзалізниця», трубопровідному транспорті, підприємствах нафтогазової галузі тощо.

Вихрострумовий дефектоскоп з автоматичним налаштуванням на заданий рівень чутливості

Призначення: безконтактне виявлення поверхневих дефектів (в тому числі втомного і корозійного походження, в різних конструкційних магнітних і немагнітних матеріалах за допомогою вихрострумового давача локального типу.

Основні технічні характеристики та переваги:

- виявлення коротких тріщин довжиною більше 1 мм з глибиною більше 0,2 мм (залежно від вибраного типу давача), в тому числі через лакофарбове покриття товщиною до 0,5 мм;
- нечутливість до впливу зміни зазору та нахилу давача відносно контрольованої поверхні під час сканування;
- автоматичне налаштування;
- можливість відстроювання від впливу краю;
- зручна світлова і звукова сигналізація про наявність дефекту.

Особливості функціонування:

- в дефектоскопі реалізовано запатентовані способи реалізації режиму переривчастої генерації автогенератора;
- інтелектуалізація процесів налаштування дозволяє збільшити достовірність виявлення дефектів за рахунок часткової заміни процедур, що виконуються оператором;
- на відміну від попередніх розробок має можливість автоматичного налаштування на попередньо визначений рівень чутливості, який висвітлюється додатковим індикатором;



Вихрострумовий контроль вузлів авіаційної техніки

- має можливість контролювати з відлаштуванням від краю виробу, в тому числі зону заклепок;
- забезпечує можливість контролювати литво за допомогою спеціального давача.

Галузі застосування: авіація, космічне машинобудування, хімічна промисловість, нафтогазова галузь, машинобудування, енергетика тощо.

Стан розробки: виготовлено діючий зразок дефектоскопа, випробувано в умовах ДП «АНТОНОВ».

Пропозиції по співробітництву. Дефектоскоп та розроблені на його основі методики можуть знайти застосування на авіаремонтних підприємствах, енергогенеруючих компаніях тощо.



Фізико-механічний інститут
ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, вул. Наукова, 5
E-mail: vuchanin@gmail.com

КОМПЛЕКС УПЕ-500 ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОКРИТИХ ЕЛЕКТРОДІВ

О.М. Костін¹, О.О. Ярос², Ю.О. Ярос², О.В. Савенко³

¹Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова. 54025, м. Миколаїв, просп. Героїв України, 9.
E-mail: kostin.weld@gmail.com

²Товариство з обмеженою відповідальністю «АМІТ». 54028, м. Миколаїв, вул. Новозаводська, 42. E-mail:
yaros.amity.mk.ua@gmail.com

³Приватне акціонерне товариство «ПлазмаТек». 21036, м. Вінниця, вул. Максимовича, 18. E-mail: alexsv62@gmail.com

Представлено методику кількісної оцінки зварювально-технологічних характеристик покритих електродів з використанням комплексу УПЕ-500, який забезпечує високу стабільність процесу контрольованого зварювання в усіх просторових положеннях в автоматичному режимі. Комплекс оснащений вимірювальною системою PicoScore 4444 з програмним забезпеченням PicoScore 6, які фіксують та статистично обробляють з високою достовірністю параметри стабільності процесу зварювання, що забезпечує контроль в онлайн режимі якості виготовлення промислових партій електродів. Бібліогр. 8, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: електрод, стабільність плавлення, методика оцінки, автоматичний режим

Сучасна технологія виготовлення покритих електродів, з моменту їх винаходу Оскаром Кельбергом у 1904 р., пройшла складний шлях вдосконалення та забезпечує якісне зварювання широкого спектру конструкційних матеріалів. Переважна більшість властивостей електродів, такі як механічні характеристики наплавленого металу, його хімічний та структурний склад, вміст шкідливих домішок та газів, корозійна стійкість та інші, регламентуються та легко контролюються виробниками за кількісними показниками. Однак зварювально-технологічні характеристики покритих електродів, які мають вирішальне значення для забезпечення стабільності процесу зварювання, традиційно контролюють, покладаючись на суб'єктивну якісну оцінку висококваліфікованого зварника. Це не є в повній мірі об'єктивним та потребує вдосконалення.

Не зважаючи на те, що наукове середовище активно використовує кількісні показники стабільності горіння дуги при розробці нових складів покриттів та вдосконаленні технології виготовлення електродів, виробники не мають серійного обладнання, яке б могло за кількісними критеріями оцінювати зварювально-технологічні характеристики при виготовленні промислових партій покритих електродів. Використання такого обладнання в електродному виробництві дозволить в автоматичному режимі з високою точністю оцінювати якість виготовлення електродів, що є вкрай актуальним. В цьому зв'язку науково-промислова фірма ТОВ «АМІТ» (м. Миколаїв), за замовленням

компанії ПрАТ «ПлазмаТек» (м. Вінниця) спроектувала та виготовила лабораторний комплекс УПЕ-500 (ТУ У 27.9-20864642-003:2021), за допомогою якого виробник може в онлайн режимі контролювати якість продукції. Робота виконувалась за методичною допомогою експертів Українського атестаційного комітету зварників та за сприянням Товариства зварників України.

Аналіз та методика досліджень. Стабільність процесу зварювання є складним та багатофакторним поняттям та не має стандартизованого визначення. Найбільш вдалим формулюванням цього фізичного явища, на думку багатьох авторів, є визначення Ю.М. Ланкіна, яке він навів в статті [1]: «Процес зварювання, відхилення параметрів якого від середніх значень не перевищує заданого рівня, називається стабільним. Мірою стабільності є відхилення від параметра середнього значення. Як відхилення параметра від середнього значення приймається його дисперсія, середньоквадратичне відхилення або коефіцієнт варіації». Таким чином, стабільність процесу зварювання можна контролювати цілком кількісними показниками.

В цьому зв'язку, основними параметрами режиму зварювання, які традиційно використовуються для оцінки стабільності масопереносу, є тривалість короткого замикання дугового проміжку ($\tau_{к.з.}$, мс), тривалість циклу – період утворення та перенесення краплі ($T_{к.з.}$, мс), значення струму (максимальне I_{max} та мінімальне I_{min} , А); швидкість наростання струму ($V_{наростання}$ та $V_{спад}$, А/с) [1, 2]. При цьому, наприклад, в роботі [3] автори

Костін О.М. – <https://orsid.org/0000-0002-4739-660X>, Ярос О.О. – <https://orsid.org/0000-0002-5274-3514>,

Савенко О.В. – <https://orsid.org/0000-0001-9214-3014>

© О.М. Костін, О.О. Ярос, Ю.О. Ярос, О.В. Савенко, 2021

пропонують в якості критерію стабільності використовувати середньоквадратичні відхилення тривалості короткого замикання ($\sigma \tau_{к.з.}$) та їх частоти ($\sigma T_{к.з.}$), а авторами робіт [2, 4] – середньоквадратичне відхилення амплітудного значення струму ($\sigma I_{зв.}$), струму короткого замикання ($\sigma I_{зв.макс}$) та коефіцієнт варіації швидкості наростання струму короткого замикання ($K_v I_{зв.макс}$).

Вибір конкретних параметрів стабільності процесу залежить від виду масопереносу, оскільки стабільність масопереносу і є стабільністю процесу. Академік Патон Б.Є. чітко описав граничні види масопереносу як крупнокрапельний (з короткими замиканнями або без них) та туманоподібний [5]. Для кожного типу покриття електродів характерний свій вид масопереносу. Наприклад, для електродів з основним типом покриття характерне крупнокрапельне перенесення (як правило, з короткими замиканнями), тому критеріями стабільності процесу є критерії стабільності коротких замикань (перенесення краплі) – дисперсія і коефіцієнт варіації частоти коротких замикань або їх періоду. Для електродів з рутилово-целюлозним покриттям характерне дрібнокрапельне і навіть туманоподібне перенесення, при якому коротке замикання є виключенням і не може служити критерієм стабільності процесу і навпаки – малі відхилення зварювального струму є показником стабільного дрібнокрапельного переносу. Тому для оцінки стабільності процесу плавлення електродів з рутилово-целюлозним покриттям застосовують дисперсію та коефіцієнт варіації зварювального струму [4]. Таким чином, єдиної стандартизованої методології визначення стабільності процесу зварювання не існує і вибір методики досліджень залежить від параметрів об'єкту досліджень.

Перш за все, треба зауважити, що переважна більшість сертифікованих електродів, які забезпечують наплавлення металу з низьким вмістом шкідливих домішок та газів, гарантують працездатність зварних конструкцій, що працюють в умовах граничного динамічного навантаження, особливо при від'ємних температурах, мають покриття основного типу. В цьому зв'язку робота була зосереджена на дослідженні стабільності процесу зварювання електродами з основним типом покриття. На основі аналізу існуючих публікацій з цього приводу та попередніх досліджень нами були обрані наступні критерії оцінки стабільності процесу масопереносу: середня частота коротких замикань (масопереносу) – $f_{ср.}$; середньоквадратичне відхилення частоти коротких замикань (масопереносу) – σ ; коефіцієнт варіації частоти коротких замикань (масопереносу) – $K_{vf} = \sigma/f_{ср.}$; розрахункова маса краплі, що визначається як фізично очевидне відношення масової

швидкості плавлення до частоти масопереносу $m_{ср.} = dM/f_{ср.}$.

Розрахункова маса краплі необхідна для порівняння з критичною масою краплі $m_{кр.}$, що є одним із граничних критеріїв оцінки стабільності процесу. Критичною масою краплі автори прийняли масу краплі діаметром, який рівний діаметру електрода (наприклад, для електрода діаметром 4 мм $m_{кр.} = 0,26$ г). Фізично очевидно, що подальше перевищення розміру, а, отже, і маси краплі призводить до її недостатнього захисту шлаком, викликає підвищене розбризкування і повну дестабілізацію процесу зварювання. Отримані іншими авторами дані про вплив розміру краплі на стабільність процесу зварювання підтверджують правомірність застосування цього критерію [6]. Реальна маса краплі буде дещо менше розрахункової, враховуючи процеси вигорання, випаровування та часткового диспергування рідкого металу, що дає дослідникам запас в безпечну сторону. Таким чином, першою умовою стабільності процесу є нерівність $m_{ср.} < m_{кр.}$.

Наведені статистичні показники масопереносу (коротких замикань) характеризують стабільність процесу, однак не в повній мірі визначають зручність та якість зварювання. Всі попередні дослідники відзначають важливість збільшення частоти та зменшення маси краплі для підвищення зручності та якості зварювання, в тому числі й повноти протікання обмінних реакцій [6]. Таким чином, зварник, при однаковій стабільності процесу, інтуїтивно надає перевагу електродам, які забезпечують більш високу частоту масопереносу та менший розмір крапель. В цьому зв'язку, враховуючи той факт, що середня частота коротких замикань не може бути абсолютно об'єктивною для порівняння, оскільки вона змінюється в межах, що описується коефіцієнтом варіації, в роботі вперше введено новий показник – критична частота масопереносу, яка дорівнює різниці середньої частоти і середньоквадратичного відхилення частоти $f_{кр.} = f_{ср.} - \sigma$. Математично, критична частота масопереносу відповідає властивостям нормального розподілу, що описується конкретними значеннями середньої частоти коротких замикань та середньоквадратичного відхилення частоти коротких замикань, фізично – визначає нижню границю частоти масопереносу, при цьому 82 % переходу крапель відбувається з більшою частотою. Відповідно, в таких умовах можливо утворення крапель з середнім максимальним розміром $m_{макс} = dM/f_{кр.}$, що можна додатково враховувати для порівняння з критичною масою краплі $m_{кр.}$.

Достовірність отриманих результатів залежить в першу чергу від методів отримання та обробки результатів. В цьому зв'язку вимірювання та фіксацію електричних параметрів, а також їх

статистичних характеристик виконували за допомогою вимірювальної системи PicoScore 4444 та програмного забезпечення PicoScore 6. При вимірюваннях використовується вбудований в PicoScore 4444 цифровий частотний фільтр з частотою 40 Гц [4], що виключає вплив мережі 50 Гц. У порівнянні з більшістю вимірювальних систем PicoScore 4444 в комплекті з PicoScore 6 має ряд переваг. Розглянемо їх детально, оскільки це визначає якість та достовірність отриманих даних.

Вимірювальна система PicoScore 4444 та програмне забезпечення PicoScore 6 дозволяють в автоматичному режимі визначати середньоарифметичне значення і середньоквадратичне відхилення не тільки зварювального струму та напруги, а й частоти масопереносу. При цьому автоматичне застосування амплітудно-частотного аналізу, що засноване на перетворенні Фур'є і враховує застосований цифровий частотний фільтр, дозволяє в автоматичному режимі достовірно визначити частоту та інші характеристики масопереносу, навіть при частковій або повній відсутності коротких замикань при масопереносі, що особливо важливо для отримання характеристик при великій довжині дуги. Крім того, автоматичне визначення та реєстрація середньоарифметичного значення та середньоквадратичного відхилення частоти масопереносу дозволяють суттєво збільшити час процесу, що аналізується, чим істотно підвищується достовірність отриманих результатів. В нашому випадку ми обмежили час автоматичного аналізу до 50 с, що навіть при частоті 3 Гц забезпечує 150 циклів масопереносу. Достовірність отриманих даних підвищує також застосування автоматичної обробки осцилограм. Отримана достовірність результатів дозволяє в повній мірі застосовувати один з принципів математичної статистики: «Якщо значення коефіцієнта варіації не перевищує 33 %, то сукупність вважається однорідною, а якщо більше 33 %, то – неоднорідною». В нашому випадку: якщо значення коефіцієнта варіації частоти масопереносу не перевищує 33 %, то процес стабільний, а якщо більше 33 %, то – нестабільний. Таким чином, другою умовою стабільності процесу є нерівність $K_y < 33 \%$.

Для реалізації всіх переваг наведеної методики комплексної оцінки зварювально-технологічних характеристик покритих електродів було сконструйовано та виготовлено лабораторний комплекс УПЕ-500, який відповідає потребам сучасного виробництва зварювальних матеріалів.

Лабораторний комплекс УПЕ-500. Комплекс УПЕ-500 призначений для визначення та оптимізації зварювально-технологічних характеристик покритих електродів та зварювального дроту в комбінації із захисними газами при зварюванні в усіх просторових положеннях. В роботі комплексу реалізовано принцип Bi-Auto, який передбачає автома-

тичну фіксацію, обробку та реєстрацію отриманих даних з одночасною стабілізацією режимів зварювання, яке виконується також в автоматичному режимі. Такий принцип роботи дозволяє отримувати автентичні характеристики стабільності плавлення електродів, без суб'єктивного втручання оператора.

Комплекс дозволяє виконувати зварювання із застосуванням різних джерел живлення, як постійного, так і змінного струму. Категорично забороняється використовувати зварювальні джерела живлення з осциляторами, стабілізаторами або іншими імпульсними високовольтними пристроями для стабілізації дуги. Комплекс складається з трьох частин: пульта управління з портом для підключення персонального комп'ютера, блоку вимірювання і комутації, з можливістю підключення осцилографа і безпосередньо маніпулятора. Зовнішній вигляд маніпулятора показано на рис. 1.

Маніпулятор забезпечує в автоматичному режимі характерні для зварника переміщення зварювального інструмента поперек та уздовж шва і подачу електрода при зварюванні покритим електродом. При цьому функція динамічного регулювання швидкості його подачі із зворотним зв'язком стабілізує напругу дуги, що з високою точністю фіксує її довжину. В комплексі також передбачена цифрова фіксація параметрів і відеофіксація процесу зварювання. Крім того, комплекс підключено до центрального серверу підприємства, що дозволяє в онлайн режимі контролювати якість виготовлення електродів. Вся отримана інформація архівується, що дає можливість мати банк даних для подальшого статистичного аналізу з метою визначення оптимальних шляхів вдосконалення електродного виробництва.



Рис. 1. Зовнішній вигляд маніпулятора

Основні робочі характеристики комплексу УПЕ-500:

Габарити робочого місця:	
довжина, мм	450
ширина, мм	400
висота, мм	400
Подача покритого електрода в зону зварювання із плавним регулюванням напруги зварювання в діапазоні, В	12...50
Переміщення виробу або зварювального інструмента з плавним регулюванням швидкості в діапазоні, см/хв	0...87
Плавне регулювання переміщення зварювального інструмента поперек зварного шва: лінійний та круговий рух для всіх просторових положень	
амплітуда коливань, мм	0...55 (0...100 %)
окремо регульовані (ліво/право) затримки по краях, с	0...5 (0...100 %)
швидкість коливань, см/хв.....	17,8...178 (0 ... 100 %)
Позиціонування зварювального інструмента в усіх просторових положеннях:	
діапазон лінійного позиціонування поперек шва, мм.....	0...400
діапазон лінійного позиціонування по вертикалі, мм.....	0...400
діапазон кругового позиціонування в поперечній площині шва, град	0...360
діапазон нахилу в поздовжній площині шва, град.....	0...45
максимальна допустима довжина електрода, мм.....	500

Для забезпечення якісного тестового зварювання з використанням комплексу УПЕ-500 було розроблено специфікації процесів зварювання (WPS) для стикових та кутових зварних з'єднань, а також для наплавлення в усіх просторових положеннях. Специфікації процесів зварювання оформлено у відповідності до вимог стандарту ДСТУ ISO 15609-1:2019. Технології зварювання та наплавлення атестовано у відповідності до вимог стандартів ДСТУ EN ISO 15614-1:2019 та ДСТУ EN ISO 15614-7:2019. Характерний зовнішній вигляд зварних швів,

що були виконані з використанням комплексу УПЕ-500, наведено на рис. 2.

Можливості комплексу дозволяють кількісно оцінювати показники стабільності плавлення електродів, які серійно виробляються, та порівнювати їх в автоматичному режимі з еталонними значеннями, що дозволяє забезпечувати потрібну якість виготовлення електродів. Крім того, лабораторний комплекс можна використовувати для оцінки ефективного діапазону параметрів режиму зварювання конкретних марок електродів, еластичності дуги (рекомендований діапазон довжини дуги при зварюванні), впливу складових покриття та їх стану на стабільність плавлення електродів, тестування нових марок електродів з метою запровадження їх у серійне виробництво, рішення питань рекламацийного характеру, які пов'язані із спірною оцінкою якості електродної продукції споживачем та багато іншого, що супроводжує сучасне електродне виробництво.

Приклад використання. Компанія ПрАТ «ПлазмаТек» з успіхом виробляє електроди УОНИ-13/55 «ПЛАЗМА», які мають великий попит у споживача завдяки збалансованому відношенню ціни до якості. Однією з переваг цих електродів, які відносяться до типу Е 7018 за стандартом AWS A5.1, є наявність в обмазці порошку заліза [7, 8], що підвищує ефективність їх використання на 20 %. При цьому компенсуються втрати металу на вигорання та розбризкування, знижуються витрати електродів на 10...15 %, збільшується продуктивність наплавлення на 8...10 % та поліпшується формування шва та відокремлення шлакової кірки. Традиційно для виготовлення цих електродів на підприємствах компанії використовували суміш порошків заліза

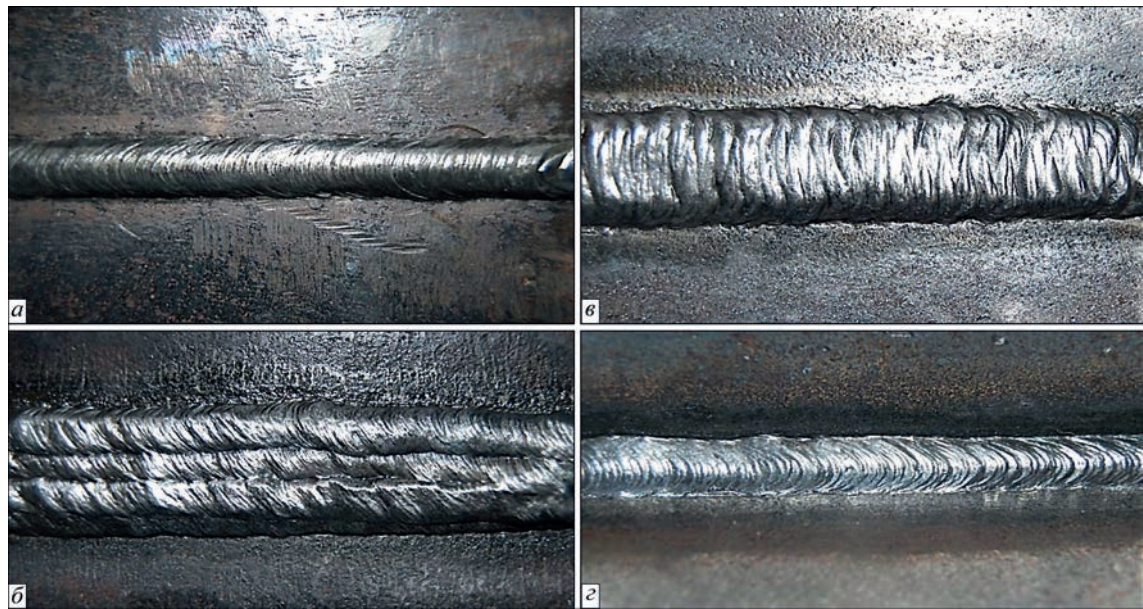


Рис. 2. Зовнішній вигляд стикових (а, б, в) та кутового (з) швів в просторових положеннях: а – нижнє; б – горизонтальне; в – стельове; з – горизонтально-стельове

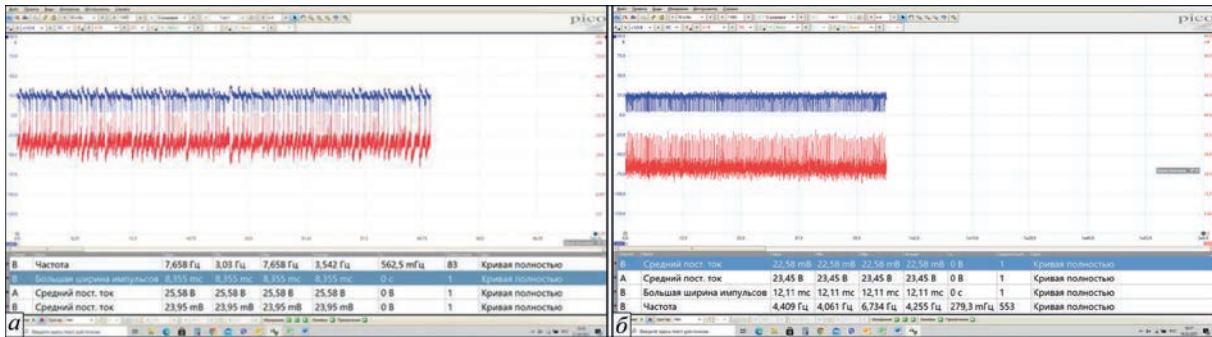


Рис. 3. Осцилограми процесу зварювання: а – традиційна технологія; б – вдосконалена технологія

Критерії стабільності процесу зварювання

Технологія виготовлення електрода	Середня частота $f_{\text{сер.}}$, Гц	Критична частота $f_{\text{кр.}}$, Гц	Коефіцієнт варіації $K_{\text{в}}$, %	Маса каплі середня $m_{\text{сер.}}$, г	Маса каплі максимальна $m_{\text{max.}}$, г
Традиційна	3,7	3,53	6,2	0,161	0,168
Вдосконалена	4,14	3,92	5,3	0,148	0,156

ПЖРВ 2.200.28 (ТУ 14-1-5365-98) та DIP 400 30W (EN 10204 3.1). Після придбання комплексу обладнання у компанії Atomising System Ltd (Англія) з'явилась можливість випуску залізного порошку власного виробництва.

Для визначення впливу методу отримання та складу порошку заліза на характеристики стабільності плавлення електродів УОНИ-13/55 «ПЛАЗМА», було виготовлено дві партії електродів діаметром 4 мм за традиційною та вдосконаленою технологією, що основана на використанні порошку власного виробництва на обладнанні фірми Atomising System Ltd. Роботі передували масштабні дослідження з оптимізації гранулометричних характеристик та хімічного складу залізного порошку власного виробництва.

Електроди випробовувались на комплексі УПЕ-500. Зварювання виконували в нижньому положенні в рамках вимог специфікації процесу зварювання WPS № 111-01-20 на наступних режимах: зварювальний струм 160 А, напруга на дузі 24 В, швидкість зварювання 14 см/хв. З кожної партії електродів було довільно відібрано по п'ять штук електродів, які пройшли випробування. Характерні осцилограми та обчислені в автоматичному режимі робочі показники масопереносу процесів зварювання з використанням електродів традиційної та вдосконаленої технології виготовлення показано на рис. 3. Отримані середні показники критеріїв стабільності плавлення електродів в наведених умовах зварювання наведено в таблиці.

Аналіз отриманих результатів показав, що в обох випадках забезпечуються умови стабільності процесу ($m_{\text{сер.}} < m_{\text{кр.}}$ та $K_{\text{в}} < 33\%$), але зварювання електродами, які містять в покритті оптимізований залізний порошок власного виробництва, дозволяє суттєво підвищити стабільність процесу та збільшити частоту масопереносу. В абсо-

лютих одиницях середня частота масопереносу збільшилась на 10,6 %, критична частота масопереносу збільшилась на 9,9 %, а коефіцієнт варіації зменшився з 6,2 до 5,3 %. Характерно, що середня маса каплі зменшилась на 8,1 %, при цьому максимальна середня маса краплі (0,156 г), менше, ніж середня маса краплі (0,161 г) для традиційної технології виготовлення електродів, що є суттєвим позитивним ефектом та дозволяє значно покращити зварювально-технологічні властивості електродів та підвищити якість зварювання.

Таким чином, використання комплексу УПЕ-500, на відміну від якісного стандартного методу оцінки у вигляді опитувального листа зварника, дозволяє з високою достовірністю кількісно оцінити параметри стабільності процесу зварювання.

Висновки

1. Запропонована методика оцінки критеріїв стабільності процесу зварювання покритими електродами з основним типом покриття (середня частота коротких замикань, середньоквадратичне відхилення частоти коротких замикань, коефіцієнт варіації частоти коротких замикань, розрахункова середня маса краплі та, додатково, критична середня частота коротких замикань) дозволяє з високою достовірністю кількісно оцінити параметри стабільності процесу зварювання.

2. Лабораторний комплекс УПЕ-500 в автоматичному режимі виконує зварювання в усіх просторових положеннях, з одночасною стабілізацією процесу, та здійснює автоматичну фіксацію, обробку та реєстрацію отриманих даних, що дозволяє кількісно оцінювати зварювально-технологічні характеристики покритих електродів без суб'єктивного втручання оператора.

Список літератури

1. Ланкин Ю.Н. (2011) Показатели стабильности процесса дуговой сварки плавящимся электродом. *Автоматическая сварка*, **1**, 7–15.
2. Походня И.К. (1990) *Металлургия дуговой сварки. Процессы в дуге и плавление электродов*. Киев, Наукова думка.
3. Ильященко Д.П. (2017) *Влияние энергетических параметров инверторных источников питания на структуру и свойства неразъемных соединений при ручной дуговой сварке*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Томск, Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук.
4. Летягин И.Ю. (2010) *Разработка методов оперативной оценки стабильности горения и повторного возбуждения дуги при ручной дуговой сварке*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь, Пермский государственный технический университет.
5. Патон Б.Е. (ред.) (1974) *Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением*. Москва, Машиностроение.
6. Жизняков С.Н., Сидлин З.А. (2006) *Ручная дуговая сварка. Материалы. Оборудование. Технологии*. Киев, Экотехнология.
7. Dudit Sumardiyanto, Sri Endah Susilowati (2019) Effect of Welding Parameters on Mechanical Properties of Low Carbon Steel API 5L Shielded Metal Arc Welds. *American Journal of Materials Science*, **9**(1), 15–21.
8. Santhosh, S., Jaganathan, S., Anantha Raman, L., Balmurugan, M. (2018) Experimentation and comparative study of E6013 and E7018 weldments using shielded metal arc welding. *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, **8**, 169–174.

References

1. Lankin, Yu.N. (2011) Indicators of stability of the GMAW process. *The Paton Welding J.*, **1**, 6–13.
2. Pokhodnya, I.K. (1990) *Metallurgy of arc welding. Processes in arc and melting of electrodes*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
3. Ilyashchenko, D.P. (2017) Influence energy parameters of inverter power sources on structure and properties of permanent joints in manual arc welding. In: *Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree*. Tomsk, RF [in Russian].
4. Letyagin, I.Yu. (2010) Development of methods of rapid evaluation of arc burning stability and repeated arc ignition in manual arc welding. In: *Syn. of Thesis for Cand. of Techn. Sci. Degree*. Perm, PSTU [in Russian].
5. (1974) *Technology of electric fusion welding of metals and alloys*. Ed. by B.E. Paton. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
6. Zhiznyakov, S.N., Sidlin, Z.A. (2006) *Manual arc welding. Materials. Equipment. Technology*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
7. Dudit Sumardiyanto, Sri Endah Susilowati (2019) Effect of welding parameters on mechanical properties of low carbon steel API 5L shielded metal arc welds. *American J. of Materials Sci.*, **9**(1), 15–21.
8. Santhosh, S., Jaganathan, S., Anantha Raman, L., Balmurugan, M. (2018) Experimentation and comparative study of E6013 and E7018 weldments using shielded metal arc welding. *Int. J. of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, **8**, 169–174.

UPE-500 COMPLEX FOR DETERMINING WELDING AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF COATED ELECTRODES

O.M. Kostin¹, O.O. Yaros², Y.O. Yaros², O.V. Savenko³

¹Geroiv Ukraine Av., 54025, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: kostin.weld@gmail.com

²42, Novozavodska Str., 54028, Mykolaiv, Ukraine. E-mail: yaros.amity.mk.ua@gmail.com

³18, Maksymovycha Str., 21036, Vinnytsia, Ukraine. E-mail: alexsv62@gmail.com

The article presents the methodology of quantitative evaluation of welding-technological characteristics of coated electrodes using the UPE-500 complex, which provides a high stability of the control welding process in all spatial positions in the automatic mode. The complex is equipped with the measuring system PicoScope 4444 with the software PicoScope 6 which fix and statistically process high reliability parameters of welding process stability that provides online-control of quality of manufacturing industrial batches of electrodes. 8 Ref., 1 Tabl., 3 Fig.

Keywords: electrode, melting stability, evaluation methodology, automatic mode

Надійшла до редакції 11.05.2021



Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Десята міжнародна конференція

ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЗВАРЮВАННІ та ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ

6 – 11 вересня 2021 р., Україна, Одеса

Голова програмного комітету – академік І.В. Кривцун

Тематика конференції

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

АДРЕСА ОРГКОМІТЕТУ

Україна, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Тел./факс: (38044) 200-82-77

E-mail: journal@paton.kiev.ua | http://pwi-scientists.com/rus/ltwmp2021

Welding in the World

Volume 65, issues 7–8, 2021

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

July 2021, issue 7

Огляд променевих процесів із високою енергетичною щільністю пучків та 3D застосувань. *T. Patterson, J. Hochanadel, J. Lippold*

Безконтактне вимірювання температури при 3D електронно-променевому виробництві на основі дроту Ti-6Al-4V. *F. Pixner, R. Buzolin, N. Enzinger*

Дослідження з'єднань із обробленого лазером порошку та звичайних марок нікелевої сталі 18MAR300. *W. Tillmann, L. Wojarski, T. Henning*

Багатоцільове оптимізаційне моделювання властивостей зварювальних з'єднань з нержавіючої сталі 301 при лазерному зварюванні з надвузким зазором. *Long Chen, Tao Yang, WeiLin Chen*

Лазерне зварювання контейнера з рідкою рідиною для супутника KRAKSat із аусенітної сталі. *Rafal Janiczak, Krzysztof Pańcikiewicz*

Розширення технологічних меж лазерно-променевого зварювання товстостінних деталей за допомогою багатопрхідного зварювання в вузький зазор (Laser-MPNG) на прикладі нікелевого матеріалу. *Benjamin Kessler, Dirk Dittrich, Christoph Leyens*

Експериментальна характеристика сплаву нержавіючої сталі 316L, виготовленої з комбінованим плавленням порошкового шару та спрямованим осадженням енергії. *Kumaran M, Senthilkumar V*

Вплив прошарку AlSi12 на мікроструктуру та механічні властивості лазерних зварних з'єднань 5A06 / Ti6Al4V. *Xiongfeng Zhou, Xiaobing Cao, Ji'an Duan*

Моделювання на основі обчислювальної гідродинаміки фазового перетворення в низьковуглецевій сталі при зварюванні лазером. *Aleksander Siwek*

Дослідження зварюваності виготовлених за технологією 3D аустенітних компонентів з нержавіючої сталі 316L. *S. Huysmans, E. Peeters, K. De Prins*

Лазерне зварювання різнорідних пластмас: 3D FE моделювання та експериментальне підтвердження. *Vappa Acherjee*

August 2021, issue 8

Попереднє дослідження нового процесу: синергетичне двостороннє беззондове зварювання тертям з перемішуванням. *Q. Chu, W. Y. Li, Y. F. Zou, X. W. Yang, S. J. Hao, X. C. Liu & W. B. Wang*

Повторне точкове зварювання тертям з перемішуванням аерокосмічних сплавів у присутності міжповерхневого герметика. *Pedro de Sousa Santos, Anthony R. McAndrew, Joao Gandra & Xiang Zhang*

Створення розрахункової моделі видалення тепла при в'язкопластичному русі в процесі зварювання тертям з перемішуванням. *Fang Yan, YuCun Zhang, XianBin Fu & Songtao Mi*

Міцність і поведінка руйнування зварних з'єднань, отриманих тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів AA2A14-T6. *Yue Wang, He Ma, Peng Chai & Yanhua Zhang*

Чисельне моделювання розподілу температур за дев'ятиточковою схемою скінченних різниць для вивчення властивостей зварних швів фрикційних зварювальних з'єднань AA1100. *N. Pallavi Senapati & Rajat Kumar Bhoi*

Підхід до пластичної деформації та швидкості деформації в процесі зварювання тертям з перемішуванням. *Elizabeth Hoyos, Yesid Montoya, Ricardo Fernández & Gaspar González-Doncel*

Метод вимірювання температури зварного шва та позиціонування інструмента в процесі зварювання тертям з перемішуванням. *Song-tao Mi, Yucun Zhang, Xian-bin Fu, Fang Yan & Jiu-li Shen*

З'єднання нержавіючої сталі та алюмінію за допомогою двопровідного CMT. *Wanghui Xu, Huan He, Yaoyong Yi, Haiyan Wang, Chen Yu & Weiping Fang*

Вплив різних варіантів металу-наповнювача S Ni 6625 на властивості та мікроструктуру присадного шару, виготовленого методом CMT. *M. Zinke, S. Burger, J. Arnhold & Sven Jüttner*

Моделювання тепловіддачі, потоку рідини та морфології геометрії у 3D виробництві на основі дугового зварювання. *Wenyong Zhao, Yanhong Wei, Jinwei Long, Jicheng Chen, Renpei Liu & Wenmin Ou*

Розробка покриттів для високоміцних заповнювальних дротів з низьколегованої сталі та їх вплив на мікроструктуру та властивості металу шва. *T. Gehling, K. Treutler & V. Wesling*

Розробка присадного металу для MARBN – нових вдосконалених сплавів, що протистоять повзучості при використанні на ТЕС. *Zhuyao Zhang & Vincent van der Mee*

Прогнозування твердості ЗТВ сталей із додаванням бору. *T. Kasuya, M. Inomoto, Y. Okazaki, S. Aihara & M. Enoki*

Вигідне використання гіпербаричних умов процесу для зварювання алюмінію та мідних сплавів. *K. Treutler, S. Brechelt, H. Wiche & V. Wesling*

Гетерогенна поведінка деформації повзучості функціонально градуїзованих перехідних з'єднань. *Mohan Subramanian, Jonathan Galler, John DuPont, Boopathy Kombariah, Xinghua Yu, Zhili Feng & Sudarsanam Suresh Babu*

Зварювання високоентропійних та композиційно складних сплавів (Огляд). *Michael Rhode, Tim Richter, Dirk Schroepfer, Anna Maria Manzoni, Mike Schneider & Guillaume Laplanche*

УСЕ ЗАЛИШАЄТЬСЯ ЛЮДЯМ

19 серпня 2020 р. припинило битися серце видатного вченого, президента Академії наук України, директора Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, академіка Патона Б.Є.

Більше ніж 40 років тому, з ініціативи Бориса Євгеновича та міністра хімічної промисловості СРСР Леоніда Аркадійовича Костандова «у царстві металу», тобто в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона (ІЕЗ), був створений відділ зварювання пластмас (далі відділ № 80). Керівником відділу № 80 був призначений канд. техн. наук Кораб Г.М.

Борис Євгенович сказав Корабу Г.М., що «буде всіляко допомагати – направляти всім листи з проханням: виділення тимчасового приміщення (ангарів) для співробітників відділу № 80, придбання обладнання (у тому числі зарубіжного виробництва) для зварювання пластмас, різних приладів, наприклад, для дослідження структури зварних з'єднань та матеріалів і рішення різних проблем для успішної роботи відділу № 80».

Патон Б.Є. виконав свої обіцянки і відділ № 80 у 1979 р. зміг отримати перший ангар, а у 1980 р. – другий. Було придбано необхідне обладнання та прилади, наприклад, оптичний дифрактометр типу «MODEL LD-10»; оптичний мікроскоп типу 4B1 «MODEL–VERSAMET-2» та електронний мікроскоп типу JEM-100 CX (Японія).

Але крім наукових проблем, Борисом Євгеновичем була поставлена задача по розробленню комплексних заходів для якнайшвидшої газифікації сільських населених пунктів України, із застосуванням зварювання поліетиленових труб.

Протягом 1980–1985 рр. були проведені наступні заходи:

- за участю Міністерства сільського господарства України, в Новоодеському районі Миколаївської області був організований полігон, який оснащений розробленим в ІЕЗ дослідним обладнанням для зварювання поліетиленових труб;
- була розроблена нормативно-технічна документація на дослідне зварювання поліетиленових труб;
- ІЕЗ направляв у відрядження співробітників відділу № 80 для проведення робіт зі зварювання поліетиленових труб.



Співробітники відділу №80 ІЕЗ біля «першого» ангара

За ініціативи Бориса Євгеновича в 1983 р., у Новоодеському районі Миколаївської області була проведена всесоюзна конференція зі зварювання поліетиленових труб, а у 1984 р. – засідання секції «Ради економічної допомоги» за темою зварювання поліетиленових труб за участю вчених з Болгарії, Німеччини, Чехословаччини, Угорщини та Радянського Союзу.

Інші регіони України також зацікавились зварюванням поліетиленових труб при будівництві газопроводів і за особистою вказівкою Бориса Євгеновича відділ № 80 (в установленому порядку) передавав різним підприємствам технологію зварювання та дослідне, а потім і серійне обладнання для зазначеного зварювання.

У 1985 р. в ІЕЗ був побудований (фірмою з Фінляндії) лабораторний корпус, в який переїхали співробітники відділу № 80.

Борис Євгенович доручив Корабу Г.М. перевірити роботу обладнання для зварювання нагрітим інструментом встик поліетиленових труб у різних кліматичних умовах СРСР.

Ця вказівка збіглася зі зверненням дирекції Інституту золота і рідкісних металів (ВНДІ-1, м. Магадан) з проханням, для видобутку золота передати технологію зварювання поліетиленових труб та сприяти отриманню серійного обладнання.

У 1985–1990 роках ІЕЗ активно співпрацював з ВНДІ-1 зі зварювання поліетиленових труб у складних умовах Північного Сходу СРСР. На підставі проведених робіт були отримані винаходи для оцінки якості зварних з'єднань поліетиленових труб, а також були уточнені технологічні параметри цього зварювання.

Борис Євгенович доручив Корабу Г.М. популяризувати технологію зварювання поліетиленових труб – були опубліковані 5 збірників статей зі зварювання пластмасових виробів.

На підставі проведених робіт (з 1979 по 1987 рр.) вченими відділу № 80 та з ініціативи і під редакцією Бориса Євгеновича у 1988 р. було видано «Словарь-справочник по сварке и склеиванию пластмасс».

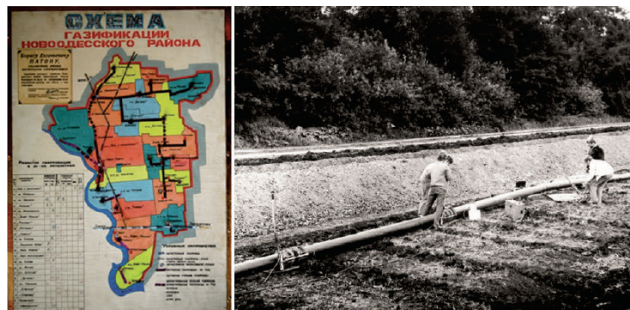


Схема газифікації та будівництво трубопроводу з поліетиленових труб у Новоодеському районі Миколаївської області



Б.Є. Патон і Г.М. Кораб демонструють обладнання для зварювання поліетиленових труб делегації Ради Міністрів Української РСР (ліворуч, 1986) і директору Центрального інституту зварювання НДР (праворуч, 1989)



Зварювання нагрітим інструментом встик поліетиленових труб зовнішнім діаметром 800 мм із застосуванням модернізованої установки конструкції ІЕЗ при реконструкції сталевого дюкера діаметром 900 мм, проложеного по дну Південного Бугу біля м. Вінниці

Борис Євгенович приділяв велику увагу, щоб проведення досліджень щодо вдосконалення технології зварювання поліетиленових труб і визначення якісних зварних з'єднань закінчувалися захистом дисертацій. За ці роки 6 співробітників відділу № 80 захистили дисертації.

Після розпаду Радянського Союзу у відділі № 80 склалася важка ситуація. За кілька років більше 40 % співробітників відділу № 80 пішли з ІЕЗ. Були розформовані конструкторський відділ № 218 ОКТБ ІЕЗ, який виконував розроблення документації на виготовлення обладнання для зварювання поліетиленових труб та Інженерний центр «Зварювання пластмас», який впроваджував зварювальне обладнання на території Радянського Союзу.

Борис Євгенович доручив Корабу Г.М. активізувати роботи по газифікації сільських населених пунктів України.

У 1991 р. були розроблені РСН 358–91 «Республиканские строительные нормы. Сварка полиэтиленовых труб при строительстве газопроводов. Госстрой УССР».

Одночасно, починаючи з 1991 р., співробітниками відділу № 80 були розроблені:

- «Положення про атестацію зварювального обладнання, яке застосовується під час зварювальних робіт при будівництві та ремонті газопроводів з поліетиленових труб»;
- «Положення про атестацію зварників пластмас на право виконання зварювальних робіт при будівництві та ремонті газопроводів з поліетиленових труб».

Зазначені положення у 1993 р. були затверджені постановою колегії Держнаглядохоронпраці України і отримали позначення (відповідно) ДНАОП 1.1.23–4.06–93 та ДНАОП 1.1.23–4.07–93.

Найбільш активно роботи по атестації проводилися у 1995–2006 рр., в яких щорічно було атестовано близько 90 одиниць зварювального обладнання, а також близько 120 робітників з професії «Зварник пластмас» та кожні три роки необхідна кількість інженерно-технічних працівників з будівництва і експлуатації систем газопостачання.

За участю співробітників відділу № 80 у 1998 р. було також розроблено державний стандарт України – ДСТУ Б В.2.7–73–98 «Труби поліетиленові для подачі горючих газів. Технічні умови».

У період з 1999 до 2008 рр. лабораторія полімерів ІЕЗ проводила випробування гідравлічних та механічних характеристик настановної партії поліетиленових труб, які були виготовлені на 31 підприємстві України.

Усі заходи, що проводились з 1980-х до 2014-х років за ініціативою Бориса Євгеновича Патона, дозволили практично провести газифікацію сільських населених пунктів України із застосуванням зварювання поліетиленових труб.

Наведено лише один з прикладів як Борис Євгенович ставився до життя людей, які живуть в сільських населених пунктах України, щоб побут цих людей був на рівні побуту громадян, які живуть в містах.

ПРИСТРІЙ «ВВК/ТВА-1» ДЛЯ ШВИДКОГО І ТОЧНОГО ВІЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЮ ПРОТЯЖНИХ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ

Утворення тріщини, корозійна поразка та старіння металу є основними проблемами довгоексплуатованих металоконструкцій. Наявність цих грубих поверхневих дефектів [1] може вказати на характер і місце можливого руйнування конструкції, з огляду на те, що різні дефекти мають певні домінуючі причини їх утворення.

Візуально-вимірювальний контроль (ВВК) є основним методом з усіх видів неруйнівного контролю (НК). Після цього формуються усі вимоги до подальших робіт, вирішуються організаційні питання виконання інших методів НК. ВВК є оперативним методом НК. За допомогою простого, на перший погляд, зовнішнього огляду контролюють усі зварні з'єднання, а також інші промислові

об'єкти, які знаходяться в роботі. За результатами візуально-вимірювального контролю оцінюється якість і стабільність технологічного процесу, виготовлення або ремонту металоконструкцій та інших об'єктів. Перевагою візуального контролю є простота використання даного методу, а проблематика – фіксування результатів проведення робіт. Трапляються випадки, коли описуються дефектні зони без додавання фото- або відео- матеріалу у вигляді додатка замовнику [2, 3]. Подалі це може бути причиною непорозуміння між замовником та виконавцем або в випадку низької кваліфікації дефектоскопіста чи фізичної втоми людини, яка в результаті дасть недостовірні результати, це може привести до трагічних наслідків. Тому проблематика даного методу діагностики – висока залежність від людського фактору.

Наведений на рис. 1 прилад [4, 5] візуального контролю має веб-камеру і смартфон (планшет) в якості монітора для спостереження, відображення, запису та для передачі інформації через Інтернет. На сьогодні процедури візуальної діагностики пов'язані з монотонними однотипними діями, що призводить до пропусків дефектів. Достовірність візуального контролю в значній мірі залежить від людського фактору – уважності, стомлюваності, а також залежності, зацікавленості, тобто немає об'єктивності. Застосування даного пристрою [6] допоможе класифікувати шви за стандартами ISO 5817:2014 «Зварювання. Зварні шви під час зварювання плавленням сталі, нікелю, титану та інших сплавів (крім променевого зварювання). Рівні якості залежно від дефектів».

На рис. 2 в якості монітора та реєстратора показаний смартфон, який утримується на приладі за допомогою магнітної пластини, вмонтованої в його чохол. На рис. 2 позначено: 1а, 1б – світло-лазерне підсвічування ширини зварного шва околошовної зони; 2а, 2б, 2в – регулювальні гвинти для регулювання ширини та висоти світло-лазерного підсвічування; 3 – відеокамера з підсвічуванням, розташування якої регулюється по висоті; 4 – тумблер включен-



Рис. 1. Пристрій для візуального контролю ВВК/ТВА-1

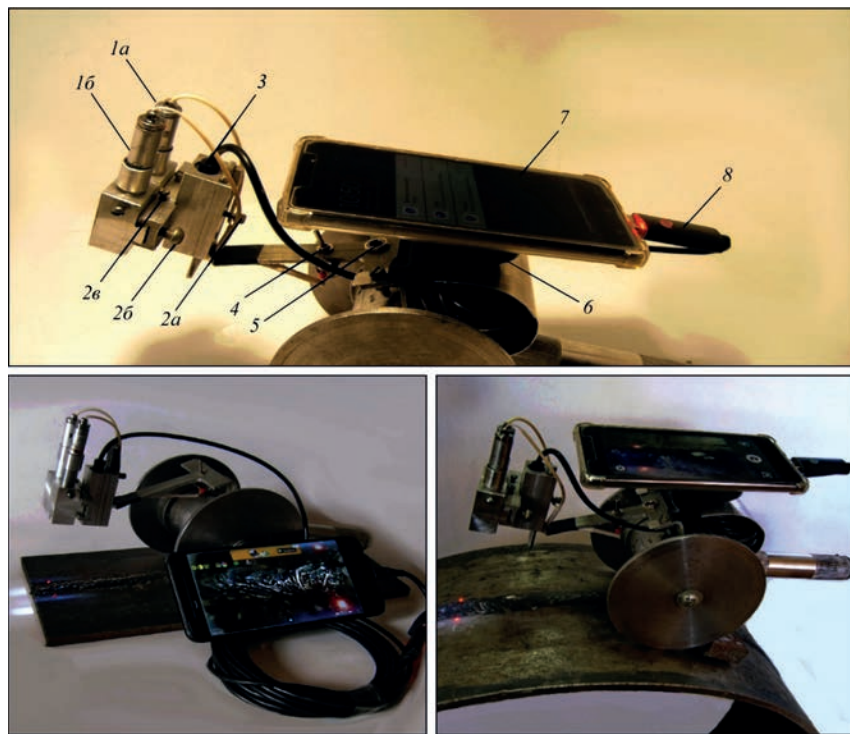


Рис. 2. Зовнішній вигляд ВВК/ТВА-1

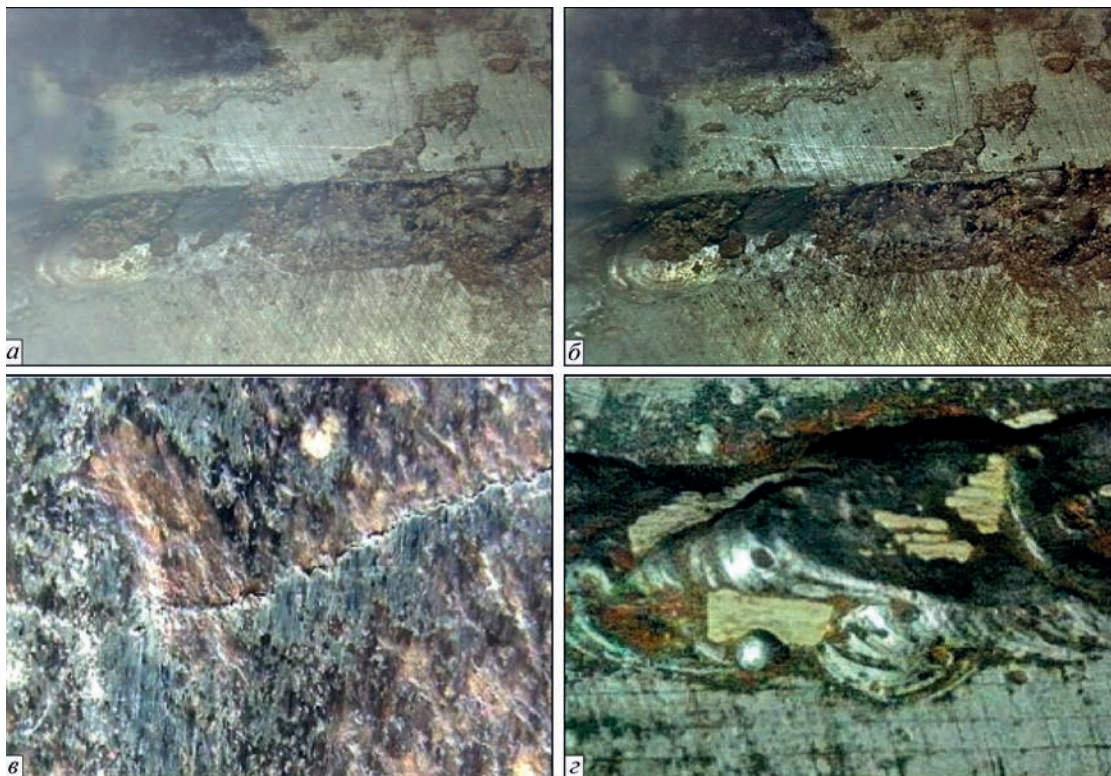


Рис. 3. Результати дослідження BVK/TBA-1: а – оригінал зображення зварного з'єднання; б – після обробки зображення; в – оригінал зображення дефекту типу тріщина; г – зварне з'єднання після обробки зображення. Роздільна здатність 1600×1200 пікселів

ня світло-лазерного підсвічування; 5 – роз'єм для зарядки акумулятора; 6 – магнітний тримач для смартфона (планшета); 7 – смартфон; 8 – роз'єм USB/microUSB з підсвічуванням, що вмикається; 9 – ручка-контейнер, всередині якої знаходяться акумулятори. За допомогою запропонованого пристрою спрощується і прискорюється візуальний контроль. Цей пристрій легко переміщується вздовж зварного з'єднання. Конструкція платформи приладу може виготовлятися з урахуванням геометричних особливостей об'єкта. Прилад дозволяє записувати з коментарями всю інформацію про поверхні зварного шва з подальшим архівуванням і передачею цієї інформації замовнику.

Запис фото і відео процесу відбувається за допомогою стандартної програми виробника смартфона (планшета). При виконанні збору даних камера перебуває на відстані від поверхні зварного шва близько 5...8 см, при цьому зображення шва має дворазове збільшення. Відеозапис відбувається при швидкості не більше 3 м/хв. Роботу пристрою в режимі фото необхідно проводити при повній зупинці над передбачуваним дефектом. Результати проведення дослідження показані на рис. 3.

Застосування систем рухомих оптико-електронних перетворювачів, за допомогою яких легко встановлюється оцінка відповідності за ДСТУ ISO 5817, дає можливість:

– зменшити вплив людського фактора, присутнього при BVK, за допомогою фото та відеозапису в ручному варіанті;

– підвищити надійність і точність контрольно-діагностичного процесу на основі аналізу автоматизованого BVK;

– забезпечити захист інформації, архівування та аналіз за допомогою цифрових комп'ютерних програм;

– здійснити бездротову передачу звітності по Wi-Fi, Bluetooth, Інтернет каналам і забезпечити розмітку на об'єкті контролю місць, де необхідно використовувати радіографічний та ультразвуковий НК.

Використані джерела:

1. ДСТУ EN ISO 17637:2017 *Неразрушающий контроль сварных швов. Визуальный контроль соединений, выполненных сваркой плавлением* (EN ISO 17637:2016, IDT; ISO 17637:2016, IDT).
2. ДСТУ EN ISO 6520-1:2015 *Сварка и родственные процессы. Классификация геометрических дефектов в металлических материалах. Часть 1. Сварка плавлением* (EN ISO 6520-1:2007, IDT; ISO 6520-1:2007, IDT).
3. ДСТУ ISO 5817:2016 *Зварювання. Зварні шви під час зварювання плавленням сталі, нікелю, титану та інших сплавів (крім променевого зварювання). Рівні якості залежно від дефектів*.
4. Троицкий В.А. (2018) Визуально-измерительный контроль протяженных металлоконструкций на основе подвижных магнитных систем. *Методы та прилади контролю якості*, 1(40), 5–14.
5. Троицкий В.А. (2013) *Подвижное намагничивающее устройство для дефектоскопии протяженных конструкций*. Украина, Пат. 82447 от 12.08.2013.
6. Троицкий В.А., Литвиненко В.А. (2019) Устройства для быстрого и точного визуального контроля протяженных металлоконструкций. *Сварщик*, 4, 38–40.

Троїцький В.О., Литвиненко В.А.,
ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ

ДО 100-РІЧЧЯ З ДНЯ НАРОДЖЕННЯ АКАДЕМІКА НАН УКРАЇНИ ДУДКА ДАНИЛА АНДРІЙОВИЧА (28.07.1921–02.02.2009)



Дудко Д. А. – видатний вчений в галузі матеріалознавства та електрозварювання, представник всесвітньо відомої наукової школи академіків Є. О. Патона та Б. Є. Патона з нових методів технології електрозварювання матеріалів та металознавства,

винахідник та інженер-конструктор інноваційного зварювального обладнання та технологічних процесів. Він є автором більш як 1000 наукових робіт та винаходів з нових методів зварювання матеріалів, нанесення покриттів та спеціальної електрометалургії. Його роботи були відзначені найвищими преміями СРСР, УРСР, міжнародними призами та відзнаками: Ленінською премією СРСР (1963), Сталінською премією (1950), Державними преміями УРСР (1972, 1983), премією Ради Міністрів СРСР (1986), премією ім. Є. О. Патона НАН України (1997), багатьма орденами та медалями СРСР та зарубіжних країн.

Дудко Д. А. народився в с. Попелюхи Мурованокриловецького району Вінницької області в сім'ї сільських вчителів Дудка Андрія Петровича та Віри Олексіївни, які здобули освіту на вчительських курсах в буремні роки після громадянської війни та були направлені в село для відновлення системи народної освіти в 1920-ті роки. Як представники сільської інтелігенції та провідники рішень радянської влади на місцях вони були і громадськими діячами, активно проводили політику колективізації в 1930-ті роки, а у роки великого терору стали жертвами великих чисток. Андрій Петрович, на той час директор Успенської середньої школи Ворошиловградського району, був заарештований у 1938 р., і вважався ворогом народу аж до 1959 р., коли його справа була переглянута, і за рішенням Генеральної Прокуратури СРСР він був реабілітований посмертно за відсутністю складу злочину.

Сімейні обставини змусили осиротілу родину шукати притулку у родичів м. Рубіжне (нині Луганська обл.) та завадили Данилу Андрійовичу здобути вищу освіту в Київському політехнічному інституті, куди він успішно склав екзамени у 1939 р.

Йому запропонували передати документи до вступу у Хіміко-технологічний інститут м. Рубіжне, де він навчався до 1943 р., а пізніше перевівся в Уральський індустріальний інститут (пізніше Уральський політехнічний інститут, Свердловськ, нині Єкатеринбург, Росія). Там і сталася доленосна зустріч випускника цього інституту з академіком Євгеном Оскаровичем Патonom, який проводив співбесіди зі студентами старших курсів, підбираючи молоді кадри для Інституту електрозварювання, що був евакуйований у 1941 р. з Києва до м. Нижній Тагіл (Свердловська обл., Росія). Там, в цехах 183-го танкового заводу, була розгорнута величезна робота по застосуванню новітнього способу автоматичного зварювання під флюсом танкової броні для прискорення виробництва танків Т-34. Саме там у 1943 р. увінчалася успіхом багаторічна творча робота Інституту електрозварювання під керівництвом академіка Є. О. Патона, завдяки якій був запущений перший в світовій практиці конвеєр з 19 унікальними установками для автоматичного зварювання корпусів танків Т-34. Танки почали випускати поточним методом майже в п'ять разів швидше, застосовуючи працю малокваліфікованих операторів.

У 1944 р. академік Є. О. Патон запросив на роботу в Інститут випускника УПІ і саме з цього року життя та діяльність Данила Андрійовича Дудка були нерозривно пов'язані з Інститутом електрозварювання, а його довгий трудовий шлях – більше 65 років – був спільним шляхом здобутків та перемог колективу славного Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ.

Майже кожна розробка нових технологій та техніки нового покоління була відзначена найвищими нагородами СРСР та міжнародними призами.

Сталінську премію (1950) колектив співробітників – Б. Є. Патон, Д. А. Дудко, П. Г. Гребельник та І. Н. Рублевський – отримав за розробку способу та апаратури для напівавтоматичного зварювання під шаром флюсу. Так, були закладені основи нового наукового напрямку – автоматичного регулювання дуги та параметрів шва через систему електричного живлення. З 1952 по 1998 рр. Д. А. Дудко незмінно очолював відділ нових фізико-хімічних методів зварювання.

Ленінська премія (1963) була присуджена Д. А. Дудку та А. Г. Потапєвському за участь у розробці та впровадженні в промисловість інноваційного



На початку великого шляху: В.К. Лебедєв, Д.А. Дудко, Б.Є. Патон (1950 р.)

процесу автоматичного і напівавтоматичного зварювання у вуглекислому газі плавкими електродами. Цей процес дав можливість різко збільшити застосування процесу автоматичного зварювання в CO_2 в енергетичному, транспортному машинобудуванні, в суднобудівництві та автомобільній промисловості. За дослідження наукових основ цього процесу для зварювання різноманітних конструктивних матеріалів та широке впровадження його у виробництво, а також вагомий вклад в розвиток металургійних процесів електрошлакового зварювання Д.А. Дудко здобув науковий ступінь доктора технічних наук (1964), а в 1967 р. був обраний членом-кореспондентом АН УРСР. З 1962 по 1987 рр. він виконував роботу заступника директора з наукових питань ІЕЗ ім. Є.О. Патона та проводив величезну роботу в напрямку науково-технологічних розробок першого в країні міжвідомчого науково-технічного комплексу (МНТК), який створив нові можливості для прискорення науково-технічного прогресу в багатьох галузях промисловості.

Державні премії УРСР у галузі науки і техніки: 1972 р. – за розробку високопродуктивних технологій плазмової обробки металів та 1978 р. – за впровадження способу детонаційного нанесення покриттів, а також Премія Ради Міністрів СРСР (1986) – за розробку безвідходної екологічно чистої технології, що замінює хімічні та гальванічні технології, відзначили успіхи Д.А. Дудка по створенню і дослідженню композиційних матеріалів для складних умов експлуатації (високі температури, газоабразивне зношування, ударні навантаження), по дослідженням у галузі плазмового оброблення: зварювання, напилення та переплавлення, фізичних процесів у газовому розряді у вакуумі, осадження матеріалів у плазмі газових розрядів. За розвиток фундаментальних досліджень

в галузі матеріалознавства та електрозварювання Д.А. Дудко був обраний академіком АН УРСР (1978).

Увінчалися вагомими результатами проведені у відділі, очолюваному Д.А. Дудком, дослідження зі створення нових зварювальних технологій, випробуваних у космосі у 1969 р. на борту корабля «Союз-6» на установці «Вулкан». Вперше в світовій історії у 1985 р. космонавтами С.Є. Савицькою та В.А. Джанибековим в умовах відкритого космосу на протязі 3,5 год. проводились зварювання, пайка, різка та напилення за допомогою інструментів, розроблених в Інституті електрозварювання під керівництвом Б.Є. Патона та Д.А. Дудка. А вже у 1987 р. на борту станції «Мир» запрацювала апаратура промислового типу «Янтар», що дозволила наносити покриття на реальні поверхні космічних конструкцій.

Досягнення академіка Д.А. Дудка в галузі космічних технологій були відзначені званням «Заслужений діяч науки і техніки України» (1991), премією ім. Є.О. Патона НАНУ (1997), орденами СРСР, Золотою медаллю імені С. Корольова та медаллю «25 років космічній ери».

Протягом багатьох десятиліть академік Д.А. Дудко активно займався науково-організаційною, суспільною та педагогічною діяльністю. Він був членом Координаційної ради по зварюванню та Наукової ради Держкомітету СРСР з науки і технологій, членом експертної ради ВАК, Головою Президії Української республіканської спілки машинобудівників, членом редколегії журналу «Автоматичне зварювання» та багатьох суспільних організацій. До наукової школи академіка Д.А. Дудка відносять майже 45 докторів та кандидатів наук, яких він підготував як в Україні, так і в союзних республіках та за кордоном. Він нагороджений іменною медаллю Народної Республіки Болгарія за внесок у будівництво «Кольо Фічето» та болгарським орденом Кирила і Мефодія I ступеня (1987).

Академік Д.А. Дудко докладав великих зусиль для збереження і розвитку міжнародної наукової співпраці, зовнішньоекономічних зв'язків інституту з діловими партнерами зарубіжних країн. Наприкінці 1990-х років він організував дистриб'юторство новітніх технологій та обладнання Інститута електрозварювання у США та допомагав в широкому обміні інформацією, участі в міжнародних виставках, укладанні ліцензійних угод і контрактів, зокрема для поширення технології магнітно-імпульсного зварювання.

До останнього дня свого творчого життя академік Д.А. Дудко працював як радник дирекції Інституту та пішов з життя вранці 2 лютого 2009 р., направляючись на Загальні збори НАН України.

Пам'ять про цю достойну людину, сина свого часу та великого трудівника увіковічено меморіальною дошкою на стіні біля входу в Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України в Києві.

ПАМ'ЯТІ В.Д. ШЕЛЯГІНА



на НАН України, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Шелягін Володимир Дмитрович.

В.Д. Шелягін прийшов в ІЕЗ ім. Є.О. Патона за розподілом, після закінчення у 1962 р. електроенергетичного факультету Київського політехнічного інституту. Володимир Дмитрович присвятив Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона майже 60 років свого життя, працюючи на посадах інженера (з 1962 р.), старшого інженера-керівника групи (з 1965 р.), молодшого наукового співробітника (з 1973 р.), старшого наукового співробітника (з 1975 р.), провідного наукового співробітника (з 1986 р.), завідувача лабораторією (з 1987 р.), завідувача відділом «Спеціалізованої високовольтної техніки та лазерного зварювання» (з 1997 р.).

Протягом своєї наукової діяльності В.Д. Шелягіним було виконано багато теоретичних і експериментальних досліджень в галузі створення і вдосконалення джерел живлення різних технологічних процесів наземного і космічного призначення: електронно-променевого зварювання, лазерного зварювання, електронно-променевого напilenня і переплаву, радіочастотного зварювання, підводного зварювання, технологічних робіт і фізичних експериментів в космосі. Фундаментальні дослідження і винахідницька діяльність В.Д. Шелягіна сприяли створенню технологічного апарату для зварювання в космосі «Вулкан», який в жовтні 1969 р. був вперше в світі використаний в умовах космосу на орбітальній станції «Союз-6» В. Кубасовим і Г. Шоніним. Подальші розробки В.Д. Шелягіна для серії апаратів типу «Испа-

ритель» та «Испаритель-М», на замовлення НВО «Енергія», мали визначальний вплив на успіх при проведенні унікальних наукових експериментів на космічних орбітальних станціях «Союз-6», «Союз-7» і космічної орбітальної станції «МИР» в 1979–1989 роках. Роботи В.Д. Шелягіна сприяли створенню високовольтного прискорювача електронів апарату «УРИ», всебічні дослідження і випробування якого в наземних умовах дозволили космонавту С. Савицькій вперше в світі провести у 1984 р. на ОС «Салют-7» важливі експерименти з електронно-променевого різання, зварювання і напilenня у відкритому космосі. Значного успіху і визнання набула робота В.Д. Шелягіна у фізичних експериментах в космосі, які виконувались у рамках вітчизняних та міжнародних проєктів «Зарница», «АРАКС», «АПЕКС».

У 1982 р. за розробку серії джерел живлення наукових і технологічних апаратів для зварювання та наукових досліджень в космосі він стає лауреатом Державної премії Української Радянської Соціалістичної Республіки. У 2004 р. В.Д. Шелягіну було присвоєно почесне звання «Заслужений діяч науки і техніки України».

Під керівництвом і за безпосередньої участі В.Д. Шелягіна були створені і введені в експлуатацію на підприємствах України, Росії, США та Канади розробки у різноманітних галузях промисловості: системи живлення для електронно-променевого напilenня; радіочастотні джерела живлення для виготовлення поздовжньошовних труб; системи живлення та збудження активного середовища CO₂-лазерів різної потужності; обладнання та технології лазерного зварювання та поверхневої обробки.

За роки наукової діяльності В.Д. Шелягін підготував понад 200 наукових праць, серед них понад 30 патентів і авторських свідоцтв на винаходи.

Світла пам'ять про Володимира Дмитровича, фахівця, вченого, керівника та наставника, доброї і чуйної людини надовго збережеться в серцях тих, хто з ним працював і спілкувався.