

Автоматическая сварка

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

3MICT

МЕТАЛУРГІЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА НАПЛАВЛЕННЯ

ЗВАРЮВАННЯ В ТВЕРДІЙ ФАЗІ

ПРОМЕНЕВІ ПРОЦЕСИ ЗВАРЮВАННЯ

Піскун Н.В., Вржижевський Е.Л., Костін В.А., Таранова Т.Г., Богайчук І.Л., Статкевич І.І. Вплив часу існування розплавленої ванни при електронно-променевих процесах на випаровування елементів з високою пружністю пару.......26

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ

ЕЛЕКТРОШЛАКОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

ІНФОРМАЦІЯ

Ахоніну С.В. – 60	.54
ХХ Міжнародний промисловий форум	.56
Пам'яті О.Д. Размишляєва	.59
Календар січня	.60

Automatic Welding

Published 12 times per year since 1948

CONTENT

METALLURGY AND TECHNOLOGY OF WELDING AND SURFACING

SOLID PHASE WELDING

PROCESS MODELING

ELECTROSLAG TECHNOLOGIES

INFORMATIONS

Akhonin S.V. is 60	.54
XX International Industrial Forum	.56
In memory of O.D. Razmyshlyaev	.59
Calendar of January	.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

EWF

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України Міжнародний науково-технічний та виробничий журнал E.O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine International Scientific-Technical and Production Journal Автоматичне зварювання

Автоматическая сварка Automatic Welding

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені IE3 ім. Є.О. Патона НАНУ: І.В. Крівцун (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. Пащин, 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. Пілярчік, Інститут зварювання, Глівіце, Польща

Засновники

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

Адреса

IE3 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 КВ 4788 від 09.01.2001 ISSN 0005-111X DOI: http://dx.doi.org/10.37434/as

Передплата 2022

Передплатний індекс 70031. 12 випусків на рік (видається щомісячно). Друкована версія: 2880 грн. за річний комплект з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю. Електронна версія: 2880 грн. за річний комплект (випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера передплатника надається доступ до архіву журнала). Передплата можлива на попередні випуски за любий рік.

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

За зміст рекламних матеріалів редакція журналу відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

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

Founders

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

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

The Journal is included in the list of publications approved by the Ministry of Education and Science of Ukraine for the publication of works of applicants for academic degrees in specialties 131, 132, 151. Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for printing editorial board of the Journal

Certificate of state registration of KV 4788 dated 09.01.2001 ISSN 0005-111X DOI: http://dx.doi.org/10.37434/as

Subscription 2022 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.

> Підписано до друку 23.12.2021. Формат 60×84/8. Офсетний друк. Ум. друк. арк. 7,44. Друк ТОВ «ДІА». 03022, м. Київ-22, вул. Васильківська, 45.

ДВОДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ ПІД ФЛЮСОМ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПРИСАДНОГО ХОЛОДНОГО ДРОТУ

Л.Й. Файнберг, В.В. Щеголь, Л.В. Гончаренко

IE3 ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Розглянута можливість покращення властивостей зварних з'єднань шляхом подачі холодного дроту в зварювальну ванну для збільшення швидкості її охолодження. На прикладі дводугового зварювання під флюсом низьколегованої сталі 10Г2ФБ досліджена техніка процесу при застосуванні холодного дроту. На зразках типу IX з гострим надрізом за ГОСТ 6996 визначена ударна в'язкість металу шва і ЗТВ в залежності від параметрів процесу зварювання, а також досліджені структури зварних з'єднань. Бібліогр. 6, табл. 5, рис. 5.

Ключові слова: низьколегована сталь, термічний цикл, ударна в'язкість, холодний дріт, зварювання під флюсом

Вступ. Проблема забезпечення надійності магістральних газопроводів шляхом підвищення властивостей зварних з'єднань залишається актуальною. Одним із можливих напрямків її вирішення є спосіб, запропонований фірмою ESAB (Швеція), стосовно процесів зварювання під флюсом [1–3] з подачею в зварювальну ванну холодного дроту (ХД). Ідея способу полягає в підвищенні швидкості охолодження зварного з'єднання з відповідним поліпшенням його структури і механічних властивостей.

Метою дослідження була оцінка ефективності вказаного процесу на прикладі дводугового зварювання під флюсом на режимах, характерних для труб середньої товщини (12...25 мм). Окрім механічних властивостей зварних з'єднань процес мав забезпечити заданий провар та якісне формування швів шириною 22...25 мм з висотою підсилення 0,5...3,0 мм і плавним його переходом до основного металу (ОМ).

Орієнтиром при виборі параметрів досліду була робота [1], де зовнішній шов двостороннього стикового з'єднання товщиною 13 мм із сталі X70 зварювали двома дугами при наявності або відсутності ХД. Застосувався зварювальний дріт діаметром 4 мм марки BA S2 Мо та флюс BF 6.4 з основністю 1,7.

Наведено хімічний склад ОМ (мас. %): 0,046 С; 1,76 Mn; 0,24 Si; 0,21(V, Mo, Nb, Ti); 0,54 (Cu, Ni, Cr), а також склад холодного та електродного дротів (мас. %): 0,10 С; 1,04 Mn; 0,1 Si; 0,56 Mo; 0,02 Ni; 0,03 Cr; 0,03Cu.

Відносно високий вміст вуглецю в зварювальному дроті повинен був знизити температуру перетворення аустеніту, щоб збільшити долю голчастого фериту і відповідно покращити структуру шва.

Параметри процесу зварювання згідно [1] були наступні:

Файнберг Л.Й. – https://orcid.org/0000-0003-2029-7983 © Л.Й. Файнберг, В.В. Щеголь, Л.В. Гончаренко, 2022 дуга 1 – 1040/30, постійний струм зворотної полярності;

дуга 2 – 830/34, змінний струм прямокутної форми;

швидкість зварювання – 160 см/хв (96 м/г);

швидкість подачі XД – 25,4 см/хв (15,2 м/г).

За нашими даними, для такого режиму швидкість подачі зварювальних дротів на дугах 1 і 2 дорівнює 135...140 м/г, звідки доля ХД відносно кожного з цих дротів має складати ~0,11. В наших дослідах для максимальної ефективності процесу цю долю збільшували наскільки це дозволяла якість формування швів.

ХД встановлюють перед передньою дугою, між дугами або за останньою дугою [2]. В роботі [1] ХД був розташований за останньою дугою, що видається оптимальним, оскільки при цьому не зменшується глибина проплавлення і максимально охолоджується зварювальна ванна.

У вказаній роботі ЗТВ випробували на ударний загин, використовуючи зразки розміром 5×10×55 мм з гострим надрізом, одна половина якого проходила через зону крупного, а друга – через зону дрібного зерна. При температурах 20 °C і –30 °C застосування ХД підвищувало роботу удару металу ЗТВ на 10 Дж, а при –45° на 20 Дж. Більш суттєві результати щодо властивостей ЗТВ показали випробування за методикою SENT.

Завдяки зменшенню тепловкладення на 9 % і підвищенню швидкості охолодження на 10 % структура ЗТВ покращилась за рядом показників:

 – зменшення розмірів первинного аустенітного зерна с 68 до 55 мкм внаслідок скорочення часу перебування в аустенітному діапазоні температур 1400...1100 °С;

- зменшення долі крупних часток МАК-фази
 розміром більше 2 мкм від 3,2±0,2 до 1,0±0,1 %;

– зменшення розмірів феритно-бейнітного зерна в ЗТВ с 17,6±5,0 до 15,3±4,5 мкм (для сталі X70 розмір вказаного зерна становив 4,1±0,5 мкм); – збільшення кутів дезорієнтації зерен.

Матеріали і методики. В наших лабораторних дослідах в якості ОМ використовували пластини з низьколегованої холодостійкої сталі $10\Gamma 2\Phi Б$ товщиною 19 мм, електродний і холодний дріт марки Св-08Г1НМА діаметром 4,0 мм, а також флюс ОР 132 французького виробництва. Живлення першого і другого електродів здійснювалось відповідно від випрямляча ВСЖ-1600 і лабораторного трансформатора з прямокутною формою струму. Нахил першого і другого електродів до вертикалі становив -7° та 20°, а відстань між ними 20 мм. Зварювання виконували по V-подібних розробках розміром 5 мм × 90°.

В ході роботи визначали вплив швидкості подачі ХД і його розташування на стабільність горіння дуг і якість формування швів з коригуванням параметрів процесу.

Для оцінки ефективності нового процесу у підвищенні властивостей зварних з'єднань проводили порівняльні іспити при застосуванні ХД і без нього. З цією метою зразки металу швів і ЗТВ типу IX за ГОСТ 6996 розміром 10×10×75 мм випробували на ударний загин при температурах –20 та –40 °C, а також виконували металографічний аналіз структури з'єднань.

За міжнародним стандартом на виготовлення труб для підводних газопроводів [4] вказані зразки відбирались від верхньої частини шва при відстані 2 мм від поверхні ОМ.

На зразках для іспитів ЗТВ надріз наносили перпендикулярно поверхні ОМ через середину лінії сплавлення (ЛС) так, що одна його половина проходила по шву, а друга – по ЗТВ. За такої методики значна частина надрізу опиняється в зоні крупного зерна, що погіршує показники ударної в'язкості.

При наявності асиметрії швів надріз наносили з боку більш крутої ЛС, уникаючи штучного завищення результатів іспитів.

Аналіз мікроструктури зварних з'єднань виконувався з використанням оптичного мікроскопу на мікрошліфах, протравлених у 4%-му розчині HNO₃.

Результати.

Серія 1 дослідів.

ХД встановлювали за останньою дугою кутом вперед під 37° до вертикалі так, що в закороченому на ОМ стані кінці ХД и останнього електрода контактували між собою.

Випробували дві швидкості подачі ХД, котрі відносно швидкості подачі електродного дроту другої дуги (коефіцієнт Ψ) складали 0,14 і 0,21 (табл. 1). При збільшенні коефіцієнту Ψ до 0,21 погіршувалось формування шва – зменшувалася його ширина від 24...25 до 23...22,7 мм і зростала висота підсилення з 2,4...2,8 до 3,0...3,5 мм (рис. 1).

Внаслідок близькості ХД до дуги 2 виникав ефект саморегулювання із зростанням її струму приблизно на 50 А. Збільшення швидкості подачі ХД призводило до скорочення довжини кратеру.

Серія 2 дослідів (коригування режиму).

Для поліпшення формування швів на дузі 2 була зменшена швидкість подачі електрода, а також з метою більшого охолодження зварювальної ванни випробувана можливість підвищення подачі ХД при коефіцієнті Ψ = 0,46 (шов № 603, табл. 2).

Harran	Hoven	$V \rightarrow n r/10$ a		$V \rightarrow m/10$	л.	I NOV	Розміри швів, мм				
помер шва	помер дуги	<i>V</i> _{п хд} , MM/10 с	$I_{_{3B}}/U_{_{\mathcal{A}}}, A/B$	<i>V</i> _{п e} , MM/10 С	T	<i>L</i> _{кр.} , ММ	h	b	а		
600	1	105	1100/36	485	0.21 195		0.21 195		146 149	22 7 22 1	20 25
000	2	105	1010/38 498 0,21 185		165	14,014,0	22,723,1	5,05,5			
601	1	70	1100/36	485	0.14	105	15.0	22.0 24.0	26 20		
001	2	70	980/38	498	0,14	195	~13,0	23,924,9	2,02,8		
602	1	0	1100/36	485	0	220	15.0	24.0 25.0	21 26		
002	2	0	960/38	498	0	230	~13,0	24,023,0	2,42,0		

Таблиця	1.	Параметри	процесу	i	розміри	швів
				-	P P	

Примітка. Швидкість зварювання 65 м/г (I_{sb} – зварювальний струм; U_{x} – дугова напруга; V_{nxn} – швидкість подачі ХД; V_{nc} – швидкість подачі електродних дротів; Ψ – відношення швидкостей подачі холодного і електродного (на дузі 2) дротів; L_{kp} – довжина кратера; h, b – провар і ширина шва; a – висота його підсилення).



Рис. 1. Макрошліфи швів, зварених із застосуванням ХД (№ 600) та без нього (№ 602), ×2,7

							Розміри шва, мм						
Номер шва	Номер дуги	V _{п хд} , мм/10 с	$I_{_{3B}}/U_{_{\rm J}}, {\rm A/B}$	$V_{_{\rm 3B,}}{\rm M/\Gamma}$	$M/\Gamma V_{\pi e}, MM/10 c$		$M/\Gamma V_{\pi e}, MM/10 c$		$V_{_{3B}}$ M/r $V_{_{\Pi e}}$, MM/10 c		h	Ь	а
602	1	205	1100/36	65	485	0.46	146 149	217 210	22 25				
003	2	203	980/38-39	05	443	0,40	14,014,0	21,721,7	5,25,5				
(05	1	1(0	1100/36	()	497	0.24	125 127	22.0 24.4	20.22				
003	2	100	900/42-43	02	467	0,54	15,515,7	25,024,4	2,95,2				
(0)	1	202	1100/36	()	497	0.42	14.2 14.5	22.1 24.1	27 21				
000	2	202	900/42-43	02	467	0,43	14,514,5	23,124,1	2,73,1				

Таблиця 2. Параметри процесу і розміри швів

Вказане зростання подачі дроту окрім зменшення ширини шва і очікуваного збільшення висоти підсилення призвело до хвилястості його країв.

Покращення формування шва за режимом № 603 було досягнуто шляхом збільшення міжелектродної відстані від 20 до 25 мм, зменшення швидкості зварювання з 65 до 62 м/г і підвищення напруги другої дуги (шви №№ 605, 606).

Серія 3 дослідів (збільшення відстані між ХД і другим електродом).

Для стабілізації режиму горіння другої дуги і більш ефективного охолодження зварювальної ванни випробувано збільшення відстані між ХД і другим електродом (рис. 2). При цьому вона має бути обмежена в залежності від режиму зварювання і швидкості подачі ХД, щоб запобігти нерозплавленню («примерзанню») ХД до зварювальної ванни з аварійною зупинкою процесу. Попередньою ознакою наближення цієї ситуації є поява на поверхні шлакової кірки поздовжніх виступів і поглиблень, що залишає ХД при підгрібанні їм напіврозплавленої шлакової кірки і флюсу до другої дуги з погіршенням стабільності її горіння (рис. 3). В даному випадку аварійна ситуація виникала при вказаній відстані більше12 мм. Тому для подальших дослідів з огляду надійності процесу ії зменшували до 8 мм (шви №№ 700, 701).

Досліди показали, що «примерзання» ХД до ванни не відбувається при зростанні швидкості його подачі принаймні до 215 мм/10 с (шов № 701), але супроводжується неприпустимим підвищенням висоти підсилення шва (табл. 3), що потребуватиме коригування площі розробки. *Серія 4 дослідів* (розміщення ХД між електродами).

Випробування варіанту з подачею ХД між дугами у зв'язку з особливістю конструкції апарату вимагало деяких змін установчих параметрів електродів (рис. 2). При цьому якість формування шва (№ 703) покращилась внаслідок позитивного формуючого ефекту від дії другої дуги на надлишок металу від розплавлення ХД (див. табл. 3). Відомо, що таку установку ХД застосовують для підвищення продуктивності процесу [5].

Хімічний склад металу швів на сталі 10Г2ФБ був типовим для газопровідних труб (табл. 4), за-



Рис. 2. Варіанти розміщення ХД

II.a. com unpo	Harran munu)T/	$V \rightarrow nr/10$ a		V	Pe	озміри швів, м	ИМ				
помер шва помер дуги		Ψ	<i>V</i> _{п XД} , MM/10 с	$I_{_{3B}}, A/U_{_{\mathcal{I}}}, B$	V _{п e} , MM/10 с	h	b	а				
	Контрольний шов без застосування ХД											
702	1	0	0	1050/36	470	12.5	22 7 22 0	10 20				
/02	2	0	0	900/42	445	15,5	25,725,9	1,02,0				
			Контрольні шви з	подачею ХД за	останньою дуго	Ю						
700	1	0.27	165	1050/36	470		22.5 24.6	22 41				
/00	2	0,37	105	900/42	445	н/д	23,524,0	3,24,1				
701	1	0.49	215	1050/36	470	12.6	22.2.22.0	22 40				
/01	2	0,48	215	900/ 42	445	15,0	25,525,9	5,54,0				
Контрольний шов з подачею ХД між дугами												
703	1	0.44	215	1050/36	470	12.0	24 8 25 7	26 41				
703	2	0,44	213	950/42	485	13,0	24,023,7	5,04,1				

Таблиця 3. Вплив ХД і його розташування на розміри швів

МЕТАЛУРГІЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА НАПЛАВЛЕННЯ



Рис. 3. Нерівності на поверхні шлакової кірки, що виникають при надмірному віддаленні ХД від останнього електрода

безпечивши їх високу ударну в'язкість (табл. 5). Для подальшого підвищення ударної в'язкості металу швів може бути застосоване додаткова легування Ті–В.

Випробування на ударну в'язкість металу швів не виявили переваг процесу із застосуванням ХД (табл. 5). Щодо металу ЗТВ, то аналогічні Випробування показали дуже великий розкид результатів, який не дозволив об'єктивно оцінити можливі переваги застосування ХД за цим показником.

Проведено аналіз мікроструктури зварних з'єднань №№ 701,703, зварених із застосуванням ХД у порівнянні із з'єднанням, виконаним на тому ж режимі, але без застосування ХД (зразок № 702). Фотографії структур зони крупного зерна наведено на рис. 4, 5.

Таблиця 4. Хімічний склад металу шва, мас. % та ОМ

Структура зразка № 702 звичайна для з'єднань зі сталі X70. У зоні крупного зерна вона бейнітного типу з різними формами утворень другої фази (рис. 4). Це феритні зерна в більшості зі щільним розподіленням упорядкованої та неупорядкованої другої фази. Біля ЛС спостерігаються окремі крупні феритні зерна, деякі з яких мають видовжену форму і розташовані паралельно вказаній лінії з рідким розподіленням пластинчастих форм другої фази. В зоні, прилягаючої до ЛС, крупне зерно відповідає номеру 3-4 за ГОСТ 5639.

Таких крупних зерен біля ЛС може бути три рядки. Найбільша протяжність зони крупного зерна складає біля 0,5 мм. На границях первинних аустенітних зерен присутня сітка суцільного полігонального доевтектоїдного фериту.



Рис. 4. Мікроструктура (×100) зони крупного зерна зварного з'єднання (№ 702), виконаного без застосуванням ХД

4 1)								
Місце аналізу	C	Si	Mn	S	Р	Ni	Mo	V	Al	Nb	Ti
Шов	0,086	0,33	1,60	0,009	0,018	0,19	0,19	0,058	0,025	0,02	0,010
OM	0,103	0,245	1,57	0.005	0,013	0,02	<0,01	0,081	0,030	0,03	0,013

Таблиця 5. Вплив ХД на ударну в'язкість зварного з'єднання

			KCV, J	Дж/см ²									
Номер шва	Ψ, %	Ш	OB	3	BTB								
_		−20 °C	−40 °C	−20 °C	−40 °C								
	Серія 1												
602	0,00	<u>166,2185,2</u> 173,6	<u>87,5145,6</u> 122,9	<u>83,1144,3</u> 110,1	<u>55,894,7</u> 84,7								
600	0,21	<u>159,7172,5</u> 166,2	<u>97,6144,4</u> 123,4	<u>62,1245,9</u> 126,7	<u>38,590,5</u> 60,5								
			Серія 2										
603	0,46	<u>169,6256,1</u> 199,6	<u>106,0157,9</u> 129,0	<u>63,1219,0</u> 133,0	<u>42,8142,2</u> 78,4								
605	0,34	н/д	н/д	<u>158,2220,7</u> 190,1	<u>75,3202,2</u> 135,6								
606	0,43	н/д	н/д	<u>68,3245,6</u> 158,1	<u>107,6153,4</u> 127,5								
			Серії 3, 4										
701	0,48	<u>151,4215,8</u> 197,9	<u>80,9184,6</u> 143,3	<u>62,9173,1</u> 107,9	$\frac{43,4117,1}{70,1}$								
703	0,44	<u>167,5197,1</u> 182,3	<u>99,4179,4</u> 129,1	<u>100,7218,1</u> 157,2	<u>58,6190,0</u> 106,1								
702	0,00	<u>174,4226,3</u> 193,8	<u>87,7166,7</u> 122,9	<u>67,4226,4</u> 120,7	<u>37,5186,1</u> 92,3								
Примітка. Кі	лькість ви	пробуваних зразків на коз	жний варіант 5 шт.										

ISSN 0005-111X АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ, №1, 2022

Тип мікроструктури зони крупного зерна зварного з'єднання зразка № 701, де ХД подавався за останньою дугою, аналогічна зразку № 702. Але в ній спостерігається більше зерен з переважаючою долею структури з упорядкованою формою другої фази у вигляді паралельних пластинчастих пакетів, розташованих через все зерно, а в зоні, прилягаючої до ЛС, помітна тенденція до утворення більшості зерен розміру № 4, а окремих № 3. Сітка полігонального фериту на границях первинних аустенітних зерен несуцільна. Протяжність зони крупного зерна не перевищує 0,42 мм.

На зразку № 703 застосування ХД призвело до деяких більш помітних позитивних змін у зоні крупного зерна (рис. 5). Вони стосуються протяжності (ширини) зони крупного зерна, його максимальної величини, типу структури. Так, зона крупного зерна скорочується з 0,5 до 0,4 мм, а максимальний розмір зерна зменшується від № 3-4 до № 4-5 за ГОСТ 5639. ХД сприяє також покращенню структури крупного зерна, а саме зменшенню об'єму рейкового бейніту у вигляді протяжних пакетів, поширених через все зерно, та збільшенню об'єму бейніту з дезорієнтованими і глобулярними карбідними утвореннями. При цьому більша частина крупних зерен біля ЛС складається з окремих дезорієнтованих блоків. Також спостерігається зменшення об'єму оторочки доевтектоїдного фериту на границях крупного зерна ЗТВ.

На всіх досліджених зразках у зоні перегріву по границях зерен були присутні ланцюжки МАК-фази.

Таким чином, застосування ХД сприяло деякому поліпшенню структури зварних з'єднань, яке в найбільшій мірі було виявлено на окремих ділянках ЗТВ шва № 703.

Обговорення результатів. Порівняння режимів зварювання швів №№ 600 і 602 (див. табл. 1) дозволило оцінити енергію, яка витрачається на розплавлення ХД, а також визначити параметр $t_{8/5}$. Якщо у вихідному варіанті № 602 швидкість подачі дроту на дузі 2 збільшити на величину швидкості подачі ХД у варіанті № 600, то, вихо-



Рис. 5. Мікроструктура (×100) зони крупного зерна зварного з'єднання (\mathbb{N} 703), виконаного із застосуванням ХД ($\psi = 0.44 \%$)

дячи із припущення про пропорційне зростання зварювального струму, він би зріс приблизно на 200 А. Отже, енергія, потрібна для розплавлення ХД при коефіцієнті $\Psi = 0,21$, орієнтовно дорівнює $U \cdot I \approx 36 \cdot 200 \text{ B} \cdot \text{A}$. Якщо усунути саморегулювання дуги 2 в процесі № 600, віддаливши від неї ХД, то ця енергія буде відібрана зварювальною ванною з відповідним її охолодженням і без вказаного підвищення її струму. За таких умов зменшення тепловкладення вихідного процесу № 602 при застосуванні ХД становитиме біля 10 %.

Параметр $t_{8/5}$ часу охолодження шва в діапазоні температур 800...500 °С пропорційний тепловкладенню процесу [6]. Отже, застосування ХД при $\Psi = 0,21$ зменшить параметр $t_{8/5}$ також на 10 %, що узгоджується з даними [1].

Прискорення швидкості охолодження зварювальної ванни за допомогою ХД виявилось недостатнім для суттєвого поліпшення структури і помітного підвищення ударної в'язкості металу швів. Так, шви №№ 701, 703, зварені зі застосуванням ХД при досить високому коефіцієнті Ψ = 0,44...0,48 в одній серії зі швом № 702, де ХД не вживався, показали приблизно однакову ударну в'язкість (див. табл. 5).

Стосовно металу ЗТВ спостерігається великий розкид показників ударної в'язкості. Значною мірою він обумовлений методикою нанесення надрізу за стандартом для підводних газопроводів [5], згідно якій значна його частина проходить через зону крупного зерна.

Як відомо, ця зона характеризується великою неоднорідністю структури і зниженням в'язких властивостей металу. При цьому найменша зміна крутизни ЛС впливає на долю надрізу, який проходить через вказану несприятливу зону, збільшуючи розкид показників ударної в'язкості.

Слід також зазначити, що при розташуванні ХД за останньою дугою спостерігається збільшення крутизни ЛС з вірогідним зниженням показників ударної в'язкості ЗТВ.

Новий процес показав деяку тенденцію до покращення структури металу ЗТВ.

Висновок. Показана можливість реалізації процесу із застосуванням ХД в умовах дводугового зварювання під флюсом. Подача ХД здійснюється за останньою дугою або між дугами. Відношення маси ХД до маси електродного дроту другої дуги (коефіцієнт Ψ) не повинно перевищувати 0,14..0,20. Збільшення цього відношення потребуватиме коригування вихідних параметрів процесу.

Спосіб не забезпечує суттєвого підвищення механічних властивостей з'єднань, але дещо покращує структуру металу ЗТВ і може значно збільшити продуктивність наплавлення.

МЕТАЛУРГІЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА НАПЛАВЛЕННЯ

Список літератури/References

- 1. Mohammadijoo, M., Collins, L., Lazor, R. et al. (2018) Influence of Cold-Wire Submerged Arc Welding on the Toughness of Microalloyed Still. Welding J., 12, 338 s-352 s.
- 2. Raundsepp et al. (2018) Method and System for Submerged Arc Welding. Патент США № 10137521. 27.11.2018.
- 3. Andersson, M., Johansson, T., Jungkvist, R., Raudsepp, H. (2015) Method and system for submerged arc welding. Πam . США № 020150202709А1. 23.07.2015.
- 4. DNV Offshore Standard for Submarine Pipeline Systems, DNV-OS-F101.
- 5. Raudsepp, H. (2021) Tandem arc welding head and a welding arrangement for overlapping arcs to a cold wire electrode. США Пат. № 10,994,362. 04.05.2021
- 6. Uver, D., u. Degenkolbe, J. (1977) Kennzeichnung von Schweißtemperaturzyklen hinsichtlich ihrer Auswirkung die mechanischen Eigenschaften von Schweißverbindungen. Stahl u. Eisen 97, H.24, 1201–1208.

TWO-WIRE SUBMERGED-ARC WELDING WITH COLD WIRE APPLICATION

L.J. Feinberg, V.V. Shchegol, L.V. Honcharenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The possibility for improvement of welded joint properties by feeding cold wire into the weld pool to increase its cooling rate was considered. The technique of the process was investigated in the case of two-wire submerged-arc welding of low-alloyed 10G2FB steel at application of cold wire. Impact toughness of the metal of the weld and HAZ was determined on IX type specimens with a sharp notch to GOST 6996, depending on welding process parameters, and welded joint structures were studied. 6 Ref., 5 Tabl., 5 Fig.

Keywords: low-alloyed steel, impact toughness, cold wire, submerged-arc welding

Надійшла до редакції 29.10.2021

Düsseldorf, Germany



join the best: 09 - 13 May 2022

WIRE AND TUBE

Підготовка до Wire and Tube 2022 йде повним ходом. 9 травня 2022 р. Wire and Tube відкриє свої двері в Дюссельдорфі. Ці провідні світові торгові ярмарки є родзинкою для індустрії обробки дроту, кабелю і труб: платформа для прогресу, стартова площадка для бізнесу. Кожен, хто приймає рішення або експерт, має бути на найважливішому світовому шоу для цих галузей. Які останні розробки в техніці, технології, продуктах і процесах? Тут можуть зустрітися лідери світового ринку та початківці. Якими є поточні реакції в області цифровізації та розумного виробництва, від штучного інтелекту до робототехніки? Виставки дадуть відповіді на ці та багато інших запитань, які виникають на практиці.

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

Ш МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ та МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

12-16 вересня 2022

Одеса, Аркадія, готель «Аркадія»

Контрольні дати

Надання заявок на участь та тез доповідей до 19.08.2022 р.

ОРГАНІЗАТОР КОНФЕРЕНЦІЇ Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Розсилка другого інформаційного повідомлення

та підтвердження участі

Оплата реєстраційного внеску

до 05.09.2022 р. до 12.09.2022 р. 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/nktd2022

БАГАТОДРОТОВЕ ДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ ДРІБНОЗЕРНИСТИХ СТАЛЕЙ ПІД ФЛЮСОМ

S. Gook¹, B. El-Sari¹, M. Biegler¹, M. Rethmeier¹, F. Lichtenthäler², M. Stark²

¹Fraunhofer Institute for Production Systems and Design Technology, Pascalstrasse 8 – 9, 10587, Berlin, Germany. E-mail: sergej.gook@ipk.fraunhofer.de

² SMS group GmbH, Hirtenwiese 4, 57578, Elkenroth Germany.

Забезпечення необхідних механіко-технологічних властивостей зварних швів є критичним питанням при застосуванні багатодротових процесів дугового зварювання під флюсом високоміцних дрібнозернистих сталей. Надмірне введення тепла є однією з головних причин появи мікроструктурних зон із погіршеними механічними властивостями зварного з'єднання, такими як знижена ударна в'язкість та нижча міцність конструкції. Запропоновано варіант процесу, який зменшує об'єм зварювання, а також тепловіддачу за рахунок регулювання конфігурації зварювального дроту, а також енергетичних параметрів дуги, зберігаючи при цьому переваги багатодротового зварювання під флюсом, такі як висока стабільність процесу та продуктивність. Бібліогр. 16, рис. 6.

Ключові слова: дугове зварювання під флюсом, високоміцні дрібнозернисті сталі, механічні властивості з'єднань, енергетичні параметри дуги

Вступ. Зварювання під флюсом (SAW) дротяними електродами має широке застосування у виробництві численних вузлів різних галузей, таких як виробництво труб великого діаметра, нафтогазова промисловість, суднобудування, нафтохімічна промисловість, гідроелектростанції та морська вітрова енергія. Завдяки високій швидкості плавлення в цьому процесі можна досягти безперервного виробництва з високою економічною ефективністю. Для сортаменту сталі товщиною до 10 мм достатньо однопрохідного SAW. Деталі з більшою товщиною вимагають підвищеної швидкості плавлення, що може бути досягнуто шляхом застосування декількох дротяних електродів [1]. Особливо успішними виявилися багатодротові SAW-процеси з використанням до п'яти дротяних електродів [2].

Однак застосування таких високоефективних варіантів процесу SAW на сучасних високоміцних сталях (межа плинності вище 355 МПа) є складним через надмірне введення тепла через великий об'єм рідкої зварювальної ванни [3] і пов'язане з цим розміцненням на окремих ділянках зони теплового впливу (ЗТВ) [4]. Ці ділянки страждають від зниження в'язкості, а також від зниження міцнісних властивостей зварного з'єднання [5, 6]. Зокрема, ця проблема стосується високоміцних, термомеханічно оброблених дрібнозернистих сталей, високі механіко-технологічні властивості яких досягаються за допомогою спеціально налаштованого процесу термомеханічної прокатки. Дрібнозерниста мікроструктура цих сталей може незворотно руйнуватися в ЗТВ, так що ширина зони розміцнення істотно залежить від використаного процесу зварювання та питомої енергії [7, 8].

Для порівняння, однопровідний процес SAW має типову швидкість плавлення близько 8 кг/год, тоді як п'ятипровідний SAW процес може досягти швидкості плавлення 90 кг/год [2, 9]. Питоме тепловкладення для обох варіантів процесу становить приблизно 2,5 та 10 кДж/мм відповідно. У DIN EN 10225:2009 [10] рекомендована номінальна енергія на одиницю довжини 3,5±0,2 кДж/мм для виробів з дрібнозернистої конструкційної сталі для стаціонарних морських споруд. Однак максимально допустима енергія тепловкладання може становити 5±0,2 кДж/мм, якщо вимоги до матеріалу не відповідають 3,5±0,2 кДж/мм. При виробництві труб великого діаметра для нафтогазової промисловості збільшення товщини стінки труби понад 21 мм призводить до збільшення тепловведення понад 5 кДж/мм під час зварювання, що призводить до сильного перегріву та повільного охолодження металу в ЗТВ. Таким чином, зазначена тепловіддача для п'ятипровідного процесу SAW значно перевищує рекомендовані значення.

Наведені параметри процесу зварювання, а також вимоги стандарту вказують на суперечність застосування багатодротового процесу SAW. Ця суперечність пояснюється тим, що, з одного боку, багатодротове зварювання під флюсом є надзвичайно цікавим для металообробної промисловості через свою економічність. З іншого боку, через його технологічні властивості використання цього процесу призводить до того, що негативно впливає на механіко-технологічні показники зварних з'єднань.

Метою даної роботи є дослідження технологічних меж п'ятидротового зварювання під флюсом щодо максимальної швидкості зварювання,

© S. Gook, B. El-Sari, M. Biegler, M. Rethmeier, F. Lichtenthäler, M. Stark, 2022

глибини проплавлення та тепловведення за допомогою випробувань зварювання товстостінних труб. Крім того, повинні бути показані можливості зменшення введення тепла шляхом регулювання конфігурації процесу.

Зварювальне обладнання та матеріали. Зварювальні експерименти проводилися на повномасштабній промисловій зварювальній системі (SMS group GmbH) для поздовжньої п'ятидротяної SAW на трубах великого діаметра. Дуги живляться від п'яти джерел струму з електронним керуванням типу PERFECTarc® 1500 AC/DC (SMS group GmbH) із сумарним струмом до 7500 А. Отримані переваги не обмежуються високою швидкістю плавлення та швидкістю зварювання. Завдяки програмованій формі сигналу для струму та напруги результат зварювання можна моделювати з урахуванням різних факторів (наприклад, геометрії зварного шва) [11]. До системи можна пристосовувати як плоскі екземпляри довжиною 2 м, так і великі труби довжиною до 6 м. Транспортну каретку з виробом, що зварюється, можна переміщати зі швидкістю до 6 м/хв. П'ятипровідна система SAW з двома різними геометріями зразків показана на рис. 1.

У проведених зварювальних випробуваннях були використані відрізки труб з трубопровідної сталі марки X70 за API 5L або L485MB за DIN EN 10208-2 (матеріал № 1.8977). Використаними зварювальними матеріалами були суцільний дріт ВА S2Mo згідно EN ISO 14171-А (EN 756) та агломерований зварювальний флюс типу BF 5.1 на основі алюмінату.

Методика експерименту та результати. Випробування зварювання проводилося на шестиметрових ділянках труб із зовнішнім діаметром 914,4 мм (36") і товщиною стінки 39 мм методом зварювання під флюсом з п'яти дротів. Використані труби являли собою поздовжньо зварені ділянки труб, які були забезпечені прихваткою, а також внутрішнім шаром. Тому досліджувані зварні шви були виконані як зовнішні зварні шви в V-подібному з'єднанні глибиною 15 мм з кутом розкриття 70°. За цільову була встановлена швидкість зварювання ≥1 м/хв, яка відповідала б для даної підготовки кромки. Розрахунок об'єму зварного шва, що підлягає заповненню, показав, що для забезпечення замкнутого профілю зварного шва необхідно досягти швидкості плавлення не менше 72 кг/год. Крім того, була визначена глибина проплавлення зварного шва щонайменше 22 мм, щоб розплавити існуючий прихватний шов (GMA) і гарантувати надійне з'єднання між зовнішнім шаром і раніше нанесеним внутрішнім шаром.



Рис. 1. П'ятидротовий стенд для зварювання листів і труб у Fraunhofer IPK у Берліні



Рис. 2. Зовнішній вигляд і поперечний переріз зварного шва SAW. Зовнішній шар зварений з такою конфігурацією дроту: $d_{1,2} = 4,8$ мм і $d_{3,4,5} = 4$ мм; V = 1,1 м/хв, $I_1 = 1480$ A, $U_1 = 34$ B; $I_2 = 1200$ A, $U_2 = 38$ B; $I_3 = 760$ A, $U_3 = 38$ B; $I_4 = 650$ A, $U_4 = 38$ B; $I_5 = 650$ A, $U_5 = 38$ B

МЕТАЛУРГІЯ І ТЕХНОЛОГІЯ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА НАПЛАВЛЕННЯ



Рис. 3. Зовнішній вигляд і поперечний переріз зварного шва SAW. Зовнішній шар зварений з такою конфігурацією дроту: $d_1 = 3,2$ мм і $d_{2,3,4,5} = 4$ мм; V = 1,2 м/хв, $I_1 = 1200$ A, $U_1 = 32$ B; $I_2 = 1150$ A, $U_2 = 36$ B; $I_3 = 780$ A, $U_3 = 42$ B; $I_4 = 760$ A, $U_4 = 44$ B; $I_5 = 760$ A, $U_5 = 44$ B

Серія зварних швів була виконана за традиційною для промислової практики конфігурацією дроту, при цьому перші два пальники були оснащені дротом 4,8 мм, а третій, четвертий і п'ятий дроти мали діаметр 4 мм. У другому експерименті на першій дузі використовували дротяний електрод діаметром 3,2 мм. Наступні чотири дроти мали діаметр 4 мм. Зовнішній вигляд зварного шва, металографічні перерізи та параметри зварювання для обох варіантів процесу показані на рис. 2 і 3.

Система управління джерелами зварювального струму дозволила записувати всі відповідні технологічні дані, такі як зварювальний струм, напруга, швидкість зварювання та подачі дроту під час зварювання з частотою дискретизації 50 Гц і використовувати їх для подальшого аналізу процесу зварювання. Записані дані процесу зварювання наведені як приклад на рис. 4.

Плавний прогрес сигналів зварювального струму та напруги для всіх п'яти проводів свідчить про стабільність процесу зварювання. Фактична швидкість плавлення зварювальних процесів може бути визначена з записаних швидкостей подачі дроту.

Оцінка результатів показала, що процес зварювання в конфігурації, представленій на рис. 2, можна виконувати зі швидкістю зварювання 1,1 м/хв для досягнення швидкості плавлення 83 кг/год. Таким чином, V-подібне з'єднання було повністю заповнено. На швах виявлена невелика увігнутість верхнього бортика 0,7 мм. При глибині зварювання 20,5 мм можна було отримати наскрізний зварний шов, щоб переріз шва був повністю закритий. Однак досягнуту глибину зварювання слід розглядати як граничну, оскільки внутрішній шар можна було досягти не завжди. Варіант процесу з провідником 3,2 мм демонструє інший результат (див. рис. 3). Тут була досягнута більша глибина проплавлення зварного шва 24,5 мм, ніж у конфігурації процесу з провідним дротом 4,8 мм. Завдяки більшій глибині проплавлення зварний шов мав більш тонкий профіль, що призвело до зменшення поперечного перерізу зварного шва з 425,8 до 379,8 мм² (на 10,8 %). Швидкість зварювання можна було збільшити до 1,2 м/хв, що дозволило отримати плоский зварний шов без увігнутості. Енергія тепловкладання знизилася до 9,1 кДж/мм (на 4,2 %).

Температурні цикли під час зварювання вимірювали термопарами (К). Оскільки ширина зварного шва становила близько 40 мм, термопари розміщували на відстані близько 20 мм від центру V-подіб-



Рис. 4. Записані технологічні дані під час зварювання товстостінної труби з п'яти дротів

ISSN 0005-111Х АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ, №1, 2022



Рис. 5. Температурні цикли зварювання для п'ятидротового зварювання (E = 9,5 та E = 9,1 кДж/мм, зовнішній шов, товщина стінки труби 39 мм)

ного з'єднання. Таким чином, було можливим записати час $t_{8/5}$ в зоні з'єднання, в безпосередній близькості від лінії з'єднання. Результати вимірювання температури для двох варіантів процесу можна побачити на рис. 5. Тепловкладання 9,5 кДж/мм привело до часу $t_{8/5}$, дорівнюючим 92 с. Для варіанту процесу з енергією 9,1 кДж/мм час $t_{8/5}$ зменшився до 83 с. Відповідні швидкості охолодження становлять 3,2 та 3,6 °С/с. Однак якщо розглянути рекомендації щодо швидкості охолодження для поздовжнього зварювання під флюсом труб великого діаметра, то виявимо, що вона повинна бути в діапазоні від 10 до 60 °С/с [12–15].

Розглянуті тут значення далекі від рекомендованих швидкостей охолодження. Негативний вплив занадто високих енергій тепловкладання на пластичні властивості ЗТВ продемонстрували випробування на твердість. Використовуючи тест на твердість (HV1), було виявлено (рис. 6), що зварні шви, отримані при 9,5 кДж/мм, мали відносно велике падіння твердості ЗТВ (0,79 від твердості основного металу). При зварюванні з лінійною енергією 9,1 кДж/мм зварні шви мають менше падіння твердості в ЗТВ (0,91 від твердості основного ме-



Рис. 6. Профіль твердості HV1 у зварному шві при п'ятидротовому зварюванні САШ (E = 9,5 та 9,1 кДж/мм, зовнішній шов, товщина стінки труби 39 мм)

талу), але це може означати втрату міцності приблизно на 10 %.

Для обох розглянутих варіантів процесу можна помітити, що енергія на одиницю довжини для п'ятидротяної SAW є занадто високою і її необхідно знижувати далі, щоб уникнути утворення несприятливих мікроструктур і зниження пластичних властивостей у 3TB.

Обговорення. У багатодротовій SAW зазвичай на перший дріт подається позитивний постійний струм, щоб досягти максимальної глибини проплавлення зварного шва. Наступні дроти живляться змінним струмом зі зсувом фази на 90°, щоб мінімізувати взаємні ефекти магнітного дуття. У розглянутих тут варіантах процесу струм першого дроту 4,8 мм становив 1480 А і був на верхній межі потужності джерела струму. Щільність струму на кінці дроту досягала 98 А/мм², що є типовим значенням для SAW із суцільним дротяним електродом. У другому варіанті процесу на першій дузі використовували дротяний електрод діаметром 3,2 мм. Завдяки значно вищій щільності струму на кінці дроту 3,2 мм, що становить 125 А/мм², можна було досягти глибини проплавлення зварного шва приблизно на 20 % більше, ніж у конфігурації процесу з дротом 4,8 мм попереду.

На основі цього ефекту можна запропонувати технологічну рекомендацію для багатодротяної SAW при зварюванні термочутливих дрібнозернистих сталей. В основному, щоб досягти меншого введення тепла, підготовку кромки необхідно відповідно змінити. Це означає, що кут розкриття з'єднання необхідно зменшити, щоб з'єднання було надійно заповнене при заданих параметрах зварювання. Таким чином, кількість присадного металу, необхідного для заповнення V-подібного з'єднання, зменшується, і введення тепла при багатодротовому зварюванні під флюсом може бути знижено. Отже, енергія тепловкладання не перевищує задану межу. Зменшуючи таким чином тепловіддачу під час SAW товстостінних труб, можна досягти швидкості охолодження до 10 °С/с і вище [16]. Для зварювання зовнішнього шару на трубі з товщиною стінки 39 мм це означає, що кут розкриття V-образного з'єднання необхідно зменшити з 70 до 60°, а глибину V-подібної канавки – на один міліметр від 15 до 14 мм. Необхідна швидкість плавлення при швидкості зварювання 1,2 м/хв буде приблизно 67 кг/год, а енергія лінійного тепловкладання 6,5 кДж/мм.

Порівняння форми внутрішнього шва показує, що зварний шов з більш товстим провідним дротом має напівкруглу лінію сплавлення, більш вигідну форму, ніж шов з тоншим дротом 3,2 мм попереду (див. рис. 2 та рис. 3). Ширина шва співвідноситься з глибиною шва як 1:1 для шва з дротом 4,8 мм попереду. Для тоншого провідного дроту це співвідношення має несприятливе значення ≤ 1, оскільки шов занадто глибокий. Тут слід зазначити, що зварний шов з дротом 3,2 мм попереду не має паралельних боків або ліній розплаву, що вказує на несприятливий фронт кристалізації. Зварний шов скоріше трикутної або фальцевої форми. Можна помітити, що кристалізація відбувається перпендикулярно лінії плавлення, а кристали орієнтовані до верхньої області зварного шва, тобто до області зварного шва, де виникають найменші механічні напруження через термоусадку. З цієї точки зору критерій «відношення ширини до глибини» необхідно розглядати критично, особливо для зварних швів, де не можна спостерігати класичних напівкруглих або майже прямих ліній сплавлення.

Ще одна перевага технологічного варіанту з більш тонким провідним дротом, яку не слід недооцінювати, полягає в тому, що площа розплавленого перерізу зварного шва становить приблизно на 10 % менше, ніж у варіанті з дротом 4,8 мм. Ця перевага виражається в тому, що при меншому перерізі зварного шва змішування присадного металу з основним також нижче. З практики відомо, що високий ступінь змішування несприятливий для високоміцних сортів, тому його необхідно підтримувати якомога нижчим.

Висновки

Сучасні багатодротові технології SAW при зварюванні товстостінних труб із високоміцних дрібнозернистих сталей характеризуються високою енергією процесу до 9,5 кДж/мм і, таким чином, не забезпечують швидкість охолодження в 3TB у межах рекомендованого діапазону 10...60 °C/с. Це обмежує застосування багатодротового зварювання під флюсом у виробництві труб, особливо при обробці сталей вищих класів міцності X70 і вище відповідно до API 5L.

На основі зварювальних випробувань п'ятидротовим методом SAW на трубі з товщиною стінки 39 мм було показано, що при зменшенні діаметра провідного (на постійному струмі) зварювального дроту глибина проплавлення дуги, а отже, і глибина проникнення зварного шва збільшується на 20 % порівняно зі звичайною конфігурацією зварювального дроту. Зварний шов стає тоншим і має профіль проплавлення зварного шва у формі галтели.

На основі цього ефекту запропоновано технологічну рекомендацію для мінімізації енергії лінії та збільшення швидкості охолодження в зоні ЗТВ. Зменшення кута розкриття V-подібного з'єднання в поєднанні зі зменшенням глибини V-подібної канавки призведе до зменшення поперечного перерізу зварного шва. Необхідна кількість наповнювача зменшується і енергія процесу зменшується. За допомогою цієї конфігурації процесу також можна перейти до чотирьохпровідного процесу зварювання UP, оскільки використання п'ятого дроту більше не є необхідним через знижену швидкість осадження.

Список літератури

- Brensing, K. H., Sommer. B. Herstellverfahren f
 ür Stahlrohre. Salzgitter Groβrohre GmbH, www.wv-stahlrohre.de/ fileadmin/pdf/Stahlrohre Herstellverfahren.pdf
- DVS Merkblatt 0915 (02/2000) Unterpulver-Mehrdrahtschweißen
- Moeinifar, S., Kokabi, A.H., Hosseini, H.M. (2011) Role of tandem submerged arc welding thermal cycles on properties of the heat affected zone in X80 microalloyed pipe line steel. *Journal of materials processing technology*, 211(3), 368–375.
- 4. Hochhauser, D.I.F., Rauch, M.R. (2012) Influence of the soft zone on the strength of welded modern HSLA steels. *Welding in the World*, 56(**5-6**), 77–85.
- Maurer, W., Ernst, W., Rauch, R. et al. (2013) Einfluss der Weichen Zone auf die mechanischen Eigenschaften hochfester Schweißverbindungen. Schweiss- & Prüftechnik, 10–15.
- Bang, K.S., Kim, W.Y. (2002) Estimation and prediction of HAZ softening in thermomechanically controlled-rolled and accelerated-cooled steel. *Welding Journal-New York*, 81(8), 174–S.
- Sirin, K., Sirin, S.Y., Kaluc, E. (2016) Influence of the interpass temperature on t8/5 and the mechanical properties of submerged arc welded pipe. *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 152–159.
- 8. Viano, D.M., Ahmed, N.U., Schumann, G.O. (2000) Influence of heat input and travel speed on microstructure and mechanical properties of double tandem submerged arc high strength low alloy steel weldments. *Science and technology of welding and joining*, 5(1), 26–34.
- Aichele, G. (1994) Leistungskennwerte für Schweißen und Schneiden. Fachbuchreihe Schweißtechnik. DVS-Verlag GmbH Düsseldorf.
- Norm DIN EN 10225:2009-10. Schweißgeeignete Baustähle für feststehende Offshore-Konstruktionen – Technische Lieferbedingungen; Deutsche Fassung EN 10225:2009
- Wietrzniok. H., Lichtenthäler. F. (2014) Moderne Großrohrfertigung – Neue Hochleistungs-Schweißstromquelle für alle Lichtbogenschweißverfahren. *DVS Berichte*, 306, 19–25, DVS-Verlag, Düsseldorf 2014
- 12. Hulka, K. (2005) The role of niobium in low carbon Bainitic HSLA Steel. *Proseedings of the 1st international conference on super-high strength steels. Rome, Italy, November 2005.*
- 13. Knoop, F.M., Bremer S., Flaxa V. et al. (2011) The processing of helical-welded large diameter pipes of grade X80 with 23,7 mm wall thickness and their properties. *Proseedings of international seminar on welding of high strength pipeline steels. Araxa, Brazil, November*, 209–229.
- 14. Frantov, I., Permyakov, I., Bortsov, A. (2011) Improved weldability and criterion for reliability of high strength pipes steels. *Proseedings of international semi-nar on welding of high strength pipeline steels. Araxa, Brazil, November*, 247–260.
- Chengia, Shang, Xiaoxiang, Wang, Quingyou, Liu, Janyan, Fu. (2011) Weldability of higher niobium X80 pipeline steel. Proseedings of international seminar on welding of high strength pipeline steels. Araxa, Brazil, November, 435–453.
- Khudyakov, A.O., Korobov Yu.S., Danilkin P.A., Kvashnin V.D. (2019) Finite element analysis of heat distribution for multiple-electrode submerged arc welding of high-strength pipe steels. 13th Int. Conf. on the Mechanical Behaviour of Materials (ICM-13). Melbourne, Australia, 190–197.

Надійшла до редакції 23.12.2021

МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНЕ ЗВАРЮВАННЯ МІДНИХ КІЛЕЦЬ ЗІ СТАЛЕВИМИ ДЕТАЛЯМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ОДНОВИТКОВОГО ІНДУКТОРА

М. Полєщук¹, І. Матвеєв¹, В. Бовкун¹, Я. Селех², А. Тунік¹, О. Черкашин¹, Л. Кистерська³, К. Секерський⁴

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

²Познаньська політехніка. 60-965, м. Познань, площа М. Склодовської-Кюрі, 5, Польща

³Українсько-американське СП «Маркетинг надтвердих матеріалів». 04074, м. Київ, вул. Автозаводська, 2, Україна

⁴NxTechnologies, 60-125, Познань, вул. Боза, 4/6-24, Польща

Магнітно-імпульсне зварювання – це інноваційний метод з'єднання, який дозволяє сполучати різнорідні метали. У статті обговорюється зварюваність мідних кілець зі сталевими стрижнями з метою вивчення можливості застосування одновиткового індуктора. Усі зразки було зварено з енергією розряду 18 кДж. Спостерігалися значні деформації мідних кілець. Металографічне дослідження зварних швів виявило відсутність дефектів. Відзначено якісне з'єднання металів у зоні зварювання з характерною хвилястою межею розділу. Однак щоб отримати більше інформації про точні механізми формування зварного шва рекомендується чисельне моделювання процесу. Бібліогр. 11, рис. 8, табл. 2.

Ключові слова: магнітно-імпульсне зварювання, холодне зварювання, зварювання у твердому стані, мідь, сталь, кільця, мікроструктура, мікротвердість

Вступ. Магнітно-імпульсні технології знаходять все більш широке застосування в сучасній промисловості та, зокрема, в зварюванні. Для них характерні більш динамічне зростання науково-технічних публікацій в порівнянні з багатьма традиційними методами зварювання [1, 2].

Магнітно-імпульсне зварювання (MI3) – це зварювання в твердій фазі, яке здійснюється в результаті зіткнення з'єднуваних поверхонь під дією імпульсного магнітного поля індуктора та наведеного цим полем струму у металевих деталях. При взаємодії струму індуктора (рис. 1) з індукованим струмом у деталі виникають сили відштовхування між індуктором і деталлю. Внаслідок цього деталь на ділянці під індуктором, отримуючи високу швидкість руху, переміщується до нерухомої деталі. Утворення зварного з'єднання забезпечується за рахунок пластичних деформацій в результаті зіткнення поверхонь. Швидкість зіткнення сягає сотень м/с, а тиск у зоні контакту – тисяч МПа [3, 4]. Загальна схема процесу МІЗ циліндричних деталей приведена на рис. 1.

Виділяють наступні переваги технології: зварювання між собою як однорідних, так і різнорідних металів; відсутність термічних деформацій; висока швидкість зварювання (тривалість імпульсу ~ 30 мкс); висока якість зварювання і повторюваність результатів; низька енергоємність (приблизно у 10 разів менше, ніж при МІG зварюванні); можливість автоматизації процесу; можливість виконувати прямолінійні зварні з'єднання протяжністю до 3 м. При процесі МІЗ немає необхідності в операції очищення деталей, витратних матеріалах (зварювальний дріт, гази) та локальній витяжній вентиляції через відсутність шкідливих викидів. Також слід зазначити, що традиційні способи зварювання кілець з циліндричними деталями не задовольняють потреби сучасної промисловості в плані технологічності, якості, продуктивності, ціни та впливу на оточуюче довкілля. З цієї точки зору технологія МІЗ для багатьох випадків є технологією вибору. Особливо це стосується випадків, коли деталі працюють у трибологічній парі тертя «мідне кільце – сталевий циліндр» і де є високі вимоги до відсутності твердих включень у матеріалі кілець та вимоги до продуктивності процесу.

Все це ініціювало цілу низку заходів у рамках ООН та Євросоюзу та викликало створення масш-



Рис. 1. Схема процесу МІЗ циліндричних деталей

Полещук М.А. – htps://orcid.org/0000-0002-5992-4641, Матвеев І.В. – htps://orcid.org/0000-0003-0683-0761, Бовкун В.О. – htps://orcid.org/0000-0001-7019-8671, Тунік А.Ю. – htps://orcid.org/0000-0001-6801-6461, Черкашин О.В. htps://orcid.org/0000-0001-9978-6848

© М. Полещук, І. Матвеєв, В. Бовкун, Я. Селех, А. Тунік, О. Черкашин, Л. Кистерська, К. Секерський, 2022

табного міжнародного проекту JOIN'EM, що націлений на вивчення деяких аспектів магнітно-імпульсного зварювання [5–7].

Більшість науково-технічних публікацій по цій темі присвячені МІЗ циліндричних деталей (труба-труба, труба-стрижень) [8, 9] з використанням багатовиткових індукторів та концентраторів магнітного поля. З урахуванням деяких відмінностей протікання процесів деформування труб та кілець при МІЗ та підвищених втрат енергії при використанні таких індукторів з концентраторами поля, авторами запропоновано для зварювання деталей типу «мідне кільце – сталевий стрижень/труба» використання одновиткових індукторів (рис. 2), що дозволяє отримувати якісне з'єднання при енергії розряду менше ніж 35 [9] та 20 кДж [8].

Актуальність має також реалізація процесу МІЗ на металах і сплавах вітчизняного виробництва, склад та властивості яких часто відрізняються від тих аналогів, що виробляються за кордоном.

Матеріали, обладнання та методика досліджень. Дослідження проводили з використанням модифікованої установки H-126A. Ця установка була розроблена в IE3 ім. Є.О. Патона і була першою сертифікованою у ЄС установкою для MI3, виробленою промисловою партією.

При проведенні металографічних досліджень застосовували методику, що включає металографію – оптичний мікроскоп «NEOPHOT-32», дюрометричний аналіз – твердомір М-400 фірми «LECO» при навантаженні 0,098 та 0,249 Н.

Структурна схема побудови Н-126А показана на рис. 3.

Процес виміру струму проводився за новим способом, запропонованим в IE3 ім. Є.О. Патона і який оцінюється як альтернатива традиційному способу, де використовується так званий пояс Роговського. При вимірах використовувався швидкісний USB осцилоскоп DATAMAN 570 та відповідне програмне забезпечення для обробки та постобробки отриманих даних.

Для дослідження з'єднань різнорідних металів методом МІЗ були підготовлені циліндричні зразки зовнішнім діаметром $\mathcal{A}_{_{30B}} - 26,3$ мм зі сталі Зсп (табл. 1) та кільця з міді марки М1 (табл. 2) зовнішнім діаметром $\mathcal{A}_{_{30B}} - 30,6$ мм, внутрішнім діаметром $\mathcal{A}_{_{30B}} - 28,6$ та шириною 7 мм.

Також був виготовлений лабораторний одновитковий індуктор (рис. 4), ізолятори та центратори зразків.

Результати досліджень і обговорення. Процес приварювання кілець з міді марки М1 до сталевих зразків зі сталі Зсп (рис. 5) здійснювали при напрузі заряду на батареї конденсаторів 18 кВ. Загальна ємність конденсаторів становила 115 мкФ. Комутація струму проводилася за допомогою керованого дугового розрядника типу «тригатрон». Ширина робочого витка індуктора дорівнювала 6 мм. З досвіду попередніх експериментів встановлено, що для даної геометричної конфігурації деталей оптимальний зазор між ними становить 1,15 мм. Перед процесом зварювання зразків провели реєстрацію



Рис. 2. Схема одновиткового індуктора з заготовками перед зварюванням: 1 – індуктор; 2 – ізолятор; 3 – мідне кільце; зад 4 – сталева заготовка–мішень ден

Рис. 3. Структурна блок-схема побудови установки H126: *l* – керований мережевий розмикач; *2* – високовольтний випрямляч; *3* – керований газорозрядний комутатор (тригатрон); *4* – робочий індуктор; *5* – блок автоматики з ручним задатчиком напруги; *6* – блок силових високовольтних конденсаторів; *7* – керований блок підпалу дуги (осцилятор)

Таблиця 1. Хімічний склад (мас. %) матеріалу сталь 3сп ДСТУ 4484:2005/ГОСТ

С	Si	Mn	Ni	S	Р	Cr	N	Cu	As
0,140,22	0,150,3	0,40,65	≤0,3	≤0,05	≤0,04	≤0,3	≤0,008	≤0,3	≤0,08

Таблиця 2. Хімічний склад (мас. %) матеріалу мідь М1 ДСТУ EN 1057:2016

Fe	Ni	S	As	Pb	Zn	0	Sb	Bi	Sn	-
≤0,005	≤0,002	≤0,004	≤0,002	≤0,005	≤0,004	≤0,05	≤0,002	≤0,001	≤0,002	Cu+Ag min 99.9





Рис. 5. Зразки, з'єднані за допомогою MI3



Рис. 6. Осцилограми струмів при МІЗ при енергії заряду конденсаторної батареї 18 кДж: *І* – індуктор без заготовки; *2* – індуктор із заготовкою

Рис. 4. Лабораторний індуктор



Рис. 7. Макро- (a) та мікроструктура (б, в) з'єднань мідь-сталь, отриманих методом МІЗ

імпульсного струму на індукторі без заготовки та з заготовкою (рис. 6).

Зовнішній вигляд зразків після зварювання вказує на наявність суттєвої пластичної деформації мідних кілець (див. рис. 5).

Металографічними дослідженнями виявлено, що при з'єднанні мідних кілець з товщиною стінки 1 мм, шириною 7 мм з циліндричними сталевими поверхнями спостерігаються ділянки лінійного з'єднання розміром 2,3...5,0 мм з хвилясто-зубчастою лінією зони цього з'єднання. Рельєфні та геометричні характеристики лінії зони з'єднання залежать від параметрів процесу зварювання (енергія розряду, зазор між деталями та ін.) та конструкції індуктора [10, 11]. Висота зубців в зоні з'єднання становила 10...30 мкм (рис. 7, *a*). Товщина привареного мідного шару становила 0,96...1,16 мм. Ця різниця по товщині викликана впливом нерівномірного магнітного поля робочої зони індуктора. У зоні з'єднання з боку міді зафіксовані зміни в структурі металу – спостерігаються округлі зерна діаметром 20...80 мкм на відстані 270...500 мкм від зони з'єднання. Округлі зерна розташовуються поблизу зони з'єднань. По мірі віддалення від цієї ділянки їх кількість зменшується і структура переходить у



Рис. 8. Графік зміни мікротвердості зразка мідь-сталь після МІЗ

великі деформовані зерна міді з двійниками (рис. 7, *в*).

Мікротвердість міді в зоні з'єднання становить 1344 МПа (рис. 8), що майже не відрізняється від загальної твердості мідного шару – 1361 МПа, мікротвердість округлих зерен на 3...5 % вище (~1382 МПа), ніж великих деформованих зерен (~1361 МПа).

У зоні з'єднання з боку сталі на глибину ~ 50 мкм зафіксована феритна смуга. ЇЇ середня мікротвердість в зоні з'єднання складає 2058 МПа, що на 16 % вище в порівнянні з мікротвердістю в центрі сталевої деталі 1777 МПа. Подалі змін у смугастій феритно-перлітній структурі не спостерігається (рис. 7, δ).

Висновки

Досліджено зварюваність мідних кілець до сталевих стрижнів з метою вивчення можливості застосування одновиткового індуктора. Отримано якісне з'єднання мідних кілець з товщиною стінки 1 мм зі сталевими циліндрами з використанням при енергії розряду до 18 кДж.

Металографічний аналіз зафіксував якісне з'єднання мідних кілець зі сталевими деталями з двозоновою формою з'єднання, а також структурні зміни у зварній зоні, при цьому мікротвердість сталі в межах цієї зони зростає в середньому на 16 %.

В подальшому будуть проводитись дослідження для вивчення впливу різних параметрів процесу (зазор між деталями, енергія та частота розряду) на міцність та металографічні характеристики зварних швів Cu–Fe.

Щоб отримати більше уявлень про точні механізми зварювання, вплив товщини стінки кільця на формування зварного шва та деформацію компонентів також слід провести чисельне моделювання.

Список літератури/References

- Полещук М.А., Матвеев И.В., Бовкун В.А. (2012) Области применения магнитно-импульсной сварки (обзор). *Автоматическая сварка*, 4, 47–52.
 Poleshchuk, М.А., Matveev, I.V., Bovkun, V.A. (2012) Fields of application of magnetic-pulse welding (Review). *The Paton Welding J.*, 4, 42-46.
- Полещук М.А., Матвеєв І.В., Бовкун В.О., Адєєва Л.І. (2020) Використання магнітно-імпульсного зварювання для з'єднання пластин з однорідних та різнорідних сплавів. Автоматичне зварювання, 8, 45–50. DOI: https:// doi.org/10.37434/as2020.08.07 Polieshchuk, М.А., Matveiev, I.V., Bovkun, V.O. et al. (2020) Application of magnetic-pulse welding to join plates from similar and dissimilar alloys. The Paton Welding J., 8,
- 41-45. DOI: ttps://doi.org/10.37434/as2020.08.07
 3. Lueg-Althoff, J., Schilling, B., Bellmann J. et al. (2016) Influence of the wall thicknesses on the joint quality during magnetic pulse welding in tube-to-tube configuration. 7th International Conference on High Speed Forming 2016 https://core.ac.uk/download/pdf/46917088.pdf
- Miranda, R.M., Tomás, B., Santos, T.G., Fernandes, N. (2014) Magnetic pulse welding on the cutting edge of industrial applications. *Soldag. Insp. São Paulo*, 19, 1, 69–81, Jan/ Mar 2014, http://www.scielo.br/pdf/si/v19n1/a09v19n1.pdf
- 5. Process analysis for magnetic pulse welding of copper tubes to stainless steel rods. *I²FG workshop on impulse metalworking 2017, November 29th, 2017, Berlin, Germany. http://www.join-em.eu/documents/I2FG%202017%20Join_EM.pdf*
- 6. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_ en#tab-0-1 (30.01.2018)
- United Nations (Editor), Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development, *A/RES/70/1*, https:// sdgs.un.org/2030agenda
- Simoen, B., Faes, K., De, Waele, W. (2017) Investigation of the weldability of copper to steel tubes using the electromagnetic welding process. October 2017. *International Journal Sustainable Construction & Design* 8(1):7, DOI: https://doi.org/10.21825/ scad.v8i1.6811 https://ojs.ugent.be/SCAD/article/view/6811
- Satendra, Kumar, Kulkarni, M.R., Saroj, P.C., Mittal, K.C. (2013) Metallurgical and mechanical testing of electromagnetically welded copper and iron sample. NDT.net Issue: 2014-02. Asia Pacific Conference on Non-Destructive Testing (14th APCNDT), Mumbai, India, November 18–22, 2013 (APCNDT 2013) Session: NDE for Quality Control & Quality Assurance, https://www.ndt.net/article/apcndt2013/papers/099.pdf
- Kore, S.D., Date, P.P., Kulkarni, S.V. Effect of process parameters on electromagnetic impact welding of aluminum sheets. *International Journal of Impact Engineering*, 34, 1327–1341.
- Khandaei, M., Vahidshad, Y., Ayaz, M. (2020) Improvement of weld quality in electromagnetic welding of aluminum-stainless steel sheets. *Materialwiss. Werkstofftech*, 51, 1372–1388, DOI 10.1002/mawe.201900205

MAGNETIC PULSE WELDING OF COPPER RINGS WITH STEEL PARTS WITH THE USE OF SINGLE-TURN INDUCTOR

M. Poleschuk¹, I. Matveev¹, V. Bovkun¹, J. Selech², A. Tunik¹, O. Cherkashin¹, L. Kisterska³, K. Siekierski⁴

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

²Poznan University of Technology. 60-965, 5 M. Skłodowska-Curie Square, Poznan, Poland

³Ukrainian-American JV «Marketing of Superhard Materials». 04074, 2, Avtozavodskaya Str., Kyiv, Ukraine ⁴NxTechnologies. 60-125, ul. Bosa, 4/6-24, Poznań, Poland

Magnetic pulse welding is an innovative joining method that allows combining dissimilar metals. The article discusses weldability of copper rings with steel rods in order to study the possibility of using single-turn inductor. All specimens were welded with a discharge energy of 18 kJ. Significant deformations of copper rings were observed. Metallographic examination of welds revealed no defects. High-quality joining of metals in the welding zone with a characteristic wavy boundary interface was noted. However, to obtain more information on the exact mechanisms of weld formation, it is recommended to carry out numerical modeling of the process. 11 Ref., 8 Fig., 2 Tabl.

Keywords: magnetic pulse welding, cold welding, solid state welding, copper, steel, rings, microstructure, microhardness

Надійшла до редакції 29.10.2021

УДК 621.791.72:621.375.826

IMPROVEMENT OF THE MECHANICAL PROPERTIES AND CORROSION RESISTANCE OF LASER WELDS ON THICK DUPLEX PLATES BY LASER CLADDED BUTTERING

ПОЛІПШЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ШВІВ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ ЗВАРЮВАННІ ДУПЛЕКСНИХ СТАЛЕЙ З ПЛАКОВАНИМИ КРОМКАМИ

A. Straße, A. Gumenyuk, M. Rethmeiera

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Unter den Eichen 87, 12205 Berlin, Germany. E-mail: andrey.gumenyuk@bam.de

Because of its excellent corrosion resistance, high tensile strength and high ductility, duplex stainless steel 2205 offers many areas of application. Though laser beam welding accompanied by high cooling rates, duplex steels tend to perform higher ferrite contents in weld metal as the base metal, which leads to a reduction of ductility and corrosion resistance of the weld joint. To overcome this problem, a solution, based on buttering the plate edges by laser metal deposition (LMD) with material containing higher Ni concentrations prior to laser welding was suggested. In this context different process parameters for LMD process were investigated. In a second step the possibility of welding those edges defect free while achieving balanced austenite-ferrite ratio was verified with metallographic analysis, Electron Backscatter Diffraction (EBSD) and impact testing according to Charpy. The improved corrosion resistance was observed with ASTM G48 standard test method. 6 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Завдяки відмінній корозійної стійкості, високій міцності на розрив та високій пластичності дуплексна нержавіюча сталь 2205 має багато сфер застосування. Хоча лазерне зварювання супроводжується високою швидкістю охолодження, вміст фериту в металі шва при цьому більший, ніж основного у металу, що призводить до зниження пластичності та корозійної стійкості зварного з'єднання. Для подолання цієї проблеми було запропоновано рішення, засноване на плакуванні кромок пластини матеріалом з більшою концентрацією нікелю за допомогою лазерного напилення металу (LMD). У цьому контексті були досліджені різні параметри LMD-процесу. На другому етапі можливість зварювання без дефектів при досягненні збалансованого співвідношення аустеніт-ферит була перевірена за допомогою металографічного аналізу, дифракції зворотного розсіювання електронів (EBSD) та випробування на удар по ІШарпі. Покращену корозійну стійкість спостерігали за допомогою стандартного методу випробування ASTMG48. Бібліогр. 6, табл. 1, рис. 7.

Keywords: Laser Metal Deposition; Laser Beam Welding; Duplex Stainless Steel Ключові слова: лазерне осадження металу, лазерне променеве зварювання, дуплексна нержавіюча сталь

1. Introduction

Laser beam welding of thick plates has great relevance for applications in the chemical and the offshore industry, were defect free weld seams with a homogenous microstructure are crucial. But often it is necessary to add filler materials to achieve the desired properties. A known problem with laser beam welding of thick plates is the decreasing detectability of the elements of said filler materials in the depth of the welds. Gook et al. [1] proved that up to a depth of 14 mm the elements are traceable, even if they are not transported uniformly through the molten pool, which results in weld seams with different properties between the upper and the lower part. An example for this is the duplex stainless steel 2205. Those steels are characterized by a balanced austenite-ferrite ratio, which is accompanied by the combined properties of both microstructures, an excellent ductility and tensile strength. Welding, especially laser beam welding, of those materials leads to a massive change of the austenite-ferrite ratio to a much higher ferrite content, up to 90 % and with that to changed properties of the weld seam in comparison to the base material, e.g. a reduced ductility as reported by Kotecki [2]. A solution for this problem is the usage of nitrogen for a better formation of the austenite phase. Lai et al., suggested the usage of nitrogen as shielding gas for laser welding processes, as the gas stabilizes the forming of austenite [3]. Another approach to reduce the ferrite content of the welds is the usage of filler materials in form of electrodes with a higher Ni-content. This leads to a higher austenite ratio in the microstructure. Muthupandi et al. studied the influence of such electrodes for laser beam and electron beam

welding processes [4]. Wu et al. used a powder nozzle to distribute nickel powder into the molten pool [5]. As mentioned, the filler material only reaches a depth of maximal 14 mm, this solution is only feasible for thinner plates. For thick plates Westin et al. [6] proposed nickel foils which were placed between both welding partners before the tacking, but the handling of foils is complicated and time consuming. In this paper another approach for the homogenous distribution of the filler material by laser cladded buttering is proposed.

In the last years Laser Metal Deposition (LMD) became more important for different types of applications, for repair of components, e.g., of the tip of turbine blades and in the additive manufacturing of whole parts as well. Another common application is cladding of components with corrosion or wear resistant layers. In this study the edges of the welding partners were coated with a duplex steel and nickel powder mixture before the laser welding to ensure a homogenous distribution of the alloying elements in the laser weld seams, which must display a balanced duplex microstructure.

2. Experimental setup

1.1. Base plates with the dimensions 300 mm x 100 mm x 15 mm were of the duplex stainless steel 2205. For the LMD process, duplex powder 2205 with a grain size of 53 - 250 μ m and nickel powder with a grain size of 45 - 125 μ m were used.

Table 1 shows the chemical composition of the base material and the powders. The resulting powder mixture contained a 12 % total amount of nickel. The coatings of the plates'edges were produced in a five-axis laser cell (TruLaser Cell 3000, Trumpf), that is coupled with a 16 kW Yb:YAG-disk laser (TruDisk 16002, Trumpf) with a wavelength of 1030 nm. A three-jet nozzle with a working distance of 16 mm and a powder feeder (Flowmotion Twin, Medicoat) were used.

The cladding was done with a laser spot diameter of 1.6 mm, a constant powder mass flow of 15 g·min⁻¹, a laser power of 0.8 kW, a velocity of 0.8 m·min⁻¹ and a stepover of 1.5 mm. For all experiments the carrier gas was helium with a gas flow of 4 l·min⁻¹ and shielding gas was argon with 10 l·min⁻¹. The experimental setup is shown in Fig. 1 and chemical composition in Table 1.

For a longer coverage of the edges with shielding gas, protection sheets were used on either side of the plate. Those were clamped in the vice about 1 - 2 mm under the base plate. One layer per edge was cladded

using a bidirectional strategy. The stepover was chosen in respect with the intention to produce preferably smooth coatings for the following laser beam welding process. The tacking was done with a cladding track on the upper and the lower side of the weld seam. For those tack welds the welding parameters were the same as for the clad layers.

The laser beam welding was performed with a 20 kW Yb-fiber laser (YLR-20000, IPG) with a wavelength of 1064 nm, a focus diameter of 0.56 mm and a beam parameter product of 11.2 mm·mrad.



Fig. 1. Experimental setup for the coatings Рис. 1. Експериментальна установка для нанесення покриттів



Fig. 2. Experimental setup for the laser welds Рис. 2. Експериментальна установка для лазерного зварювання



Fig. 3. Cross section of buttering of edges Рис. 3. Макрошліф плакування

Table 1. Chemical composition (wt.-%) of the investigated materials Таблиця 1. Хімічний склад (мас. %) досліджуваних матеріалів

	. ,	e		-							
Material	Form	Fe	Cr	Ni	Mo	Nb	Mn	N	C	Si	Р
Duplex (1.4462)	Base Material	Bal.	22.96	5.18	3.00	-	1.82	0.17	0.02	0.29	0.03
Duplex (1.4462)	Powder	Bal.	22.80	5.57	3.16	-	1.09	0.16	0.02	0.68	0.02
Nickel (24.053)	Powder	-	-	Bal.	-	-	-	-	0.05	-	-



Fig. 4. Microsection of weld seam with LMD-tacking Рис. 4. Макрошліф зварного шва після плакування

After the coating of the edges and the tacking, the plates were welded with different welding gases. Shielding gas and the gas in the dragging nozzle was always argon, for the root shielding nozzle the influence of argon was tested as well as nitrogen. The laser power was 14.3 kW by a speed of $1.5 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ with a defocusing of -5 mm. The experimental setup is shown in Fig. 2.

Different destructive and non-destructive tests were executed on both kinds of weld seams, with and without coating, to ensure the quality of the coatings and the welds. Cross sections as well as electron backscatter diffraction (EBSD), impact testing according to Charpy and corrosion testing according to the ASTM G48- 11 Method A were used to characterize their properties.

3. Results and Discussion

The buttering of edges with twenty single tracks is shown in Fig. 3. The optical analysis of the microstructure showed that the austenite-ferrite ratio of the coatings was balanced due to the higher nickel content of the powder.

The LMD-tracks were set closer than the usual overlap of 30 % to realize an even surface. Other stepovers with a more moderate space between the lines were tested as well, but they resulted in surfaces, that were too uneven for the laser welding process. However, the edges display a certain waviness and a dipping at the corners, which proved to be problematic with the laser beam welding, were a technical zero-gap is preferred. Thus, the weld seams showed irregularities in the upper and the root side. To overcome this problem, LMD-tacking with the same parameter set as the buttering was applied on both sides of the coated plates to fill the gaps instead of



Fig. 5. EBSD-analysis of weld seam with argon as root shielding gas (blue (dark): austenite, red (light): ferrite)

Рис. 5. EBSD-аналіз зварного шва, виконаного при захисті аргоном (синій (темний) – аустеніт, червоний (світлий) – ферит)

the typical tacking with laser beam at the beginning, in the middle and at the end of the plates. The weld seam with this tacking showed a good appearance with only minimal relapse on the root side, shown in Fig. 4.

The optical and EBSD-analysis of the weld seams with coated edges displayed a significantly better austenite-ferrite ratio than the ones which were welded without any filler material. For the last ones, the seams showed an austenite content below 10 %, whereas the austenite-ferrite ratio of the welds with the coated edges was balanced, with 40 % - 50 % austenite, depending on the root shielding gas. Fig. 5 shows a part of an EBSD-analysis of one of the weld seams. The ferrite phase was colored red, while the austenite is shown in blue. The amount of austenite measured with EBSD for this weld was 41.8 %. Those, that were performed with nitrogen as root shielding gas, displayed a higher austenite content up to 56.8 %, which affirms the discoveries of Lai et al.

Impact testing was executed by means of undersize Charpy-V samples with the dimensions 7.5 mm x 10 mm x 55 mm. The notch was placed in the middle of the weld seam and the testing performed at a temperature of -20 °C. Specimens welded with and without buttering were compared. The surface of the unbuttered ones implied brittle fractures (Fig. 6 *a*) with an average impact toughness of 29 J·cm⁻², whereas the buttered ones displayed a far more ductile fracture behavior with values of 140



Fig. 6. Broken impact testing specimen; with coated edges (a), without coating (b)

Рис. 6. Зразок після випробування на удар: з покритими кромками (*a*), без покриття (*b*)



Fig. 7. Corrosion specimens; without coated edges (*a*) and (*b*), with coating (*c*) and (*d*) Рис. 7. Зразки після корозійних іспитів: без покритих кромок (*a*, *b*), з покриттям (*c*, *d*)

 $J \cdot cm^{-2}$ (Fig. 6 *b*). The results show, that due to the buttering the weld seams show satisfactory ductility in contrast to that of unbuttered ones.

The corrosion testing was done with the standard testing method according to ASTM G48 for pitting corrosion for stainless steels in chlorite containing environments. The testing was done at 25 °C for 24 hours in a FeCl₃ · $6H_2O$ (6% FeCl₃ by mass) -testing solution. The specimen size was 55 mm × × 25 mm × 15 mm. No corrosion was observed in the base metal in any of the tests. The ferritic weld seam of the uncoated specimen (Fig. 7. *a* and *b*) showed corrosion in the weld metal. While the coated test pieces showed no corrosion, neither in the base metal nor in the weld seam (Fig. 7. *c* and *d*). The proposed two-step process with the LMD-coated edges of the plates with a powder mixture containing 12 % nickel is able to form weld seam that are corrosion resistant.

4. Conclusions

Laser beam welding of 15 mm thick duplex plates LMD-coated with a powder mixture containing 12 % nickel was performed. The cross-sections as well as the EBSD-analysis showed a balanced duplex structure throughout the whole weld seam. The austenite content in the welds with nitrogen as shielding gas was higher by 15 %. The impact testing of the specimen confirmed the better ductility of the weld seams with coated edges and the defect free corrosion testing specimen confirmed the superiority of the mechanical properties as well.

Acknowledgements

This work was supported by the Federation of Industrial Research Association (AiF, project number 19.228N) and the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi-Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) based on a resolution of the Deutscher Bundestag. The authors want to thank Butting GmbH and personally Mr. M. Schlundt kindly for providing the base material as well as for performing the corrosion testing.

Additionally, the authors want to thank Mr. R. Saliwan Neumann (Department 5.1 - Materialography, Fractography and Ageing of Engineered Materials, BAM) for the EBSD measurements.

References

- 1. Gook, S., Gumenyuk, A., Rethmeier, M., 2014. Hybrid laser arc welding of X80 and X120 steel grade, *Science and technology of Welding and Joining* 19, p.15
- Kotecki, D. J., 1986. Ferrite Control in Duplex Stainless Steel Weld Metal, Welding Research Supplement, 10, p. 273
- Lai, R., Cai, Y., Wu, Y., Li, F., Hua, X., 2016. Influence of absorbed nitrogen on microstructure and corrosion resistance of 2205 duplex stainless steel joint processed by fiber laser welding, *Journal of Materials Processing Technology* 231, p. 397
- Muthupandi, V., Bala Srinivasan, P., Shankar, V., Seshadri, S. K., Sundaresan, S., 2005. Effect of nickel and nitrogen addition on the microstructure and mechanical properties of power beam processed duplex stainless steel (UNS 31803) weld metals, *Materials Letters* 59, p. 2305
- Wu, H.C., Tsay, L.W., Chen, C., 2004. Laser Beam Welding of 2205 Duplex Stainless Steel with Metal Powder Additions, *ISIJ International* 44, p.1720
- Westin, E. M., Stelling, K., Gumenyuk, A., 2011. Single-Pass Laser-GMA Hybrid Welding of 13.5 mm thick duplex stainless steel, *Welding in the World* 55, p. 39

Надійшла до редакції 28.10.2021



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

> Замовлення на книги прохання надсидати до редакції журналу. Тел.: (044) 200-82-77, E-mail: journal@paton.kiev.ua

ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОГО ЗВАРЮВАННЯ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ 1570 ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЙОГО З'ЄДНАНЬ ПРИ КРІОГЕННИХ ТЕМПЕРАТУРАХ^{*}

В.В. Скрябінський¹, В.М. Нестеренков¹, А.В. Микитчик²

¹IE3 ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. Е-mail: office@paton.kiev.ua ²ДП «Міжнародний центр електронно-променевих технологій IE3 ім. Є.О. Патона НАН України». 03150, м. Київ, вул. Антоновича, 68

Вивчали особливості електронно-променевого зварювання сплаву 1570 та досліджували механічні властивості його зварних з'єднань в інтервалі температур 20...293 К. Встановлено, що при електронно-променевому зварюванні у сплаві 1570 ширина зони термічного впливу не перевищує 4 мм від лінії сплавлення, що у 4 рази менше ніж у сплаві АМґ6Н. У зварному шві, зоні сплавлення та ЗТВ тріщини, скупчення евтектичних прошарків та інші дефекти не виявлені. Тимчасовий опір з'єднань сплаву 1570 при зниженні температури випробувань з 293 до 20 К збільшується з 325 до 525 МПа. Умовна межа плинності також підвищується з 210 до 270 МПа, а пластичність змінюється незначно. У той самий час ударна в'язкість знижується з 38 до 9 Дж/см². Коефіцієнт міцності зварних з'єднань при зниженні температури випробувань з 293 до 20 К збільшується з 0,85 до 0,95. В цілому сплав 1570 добре зварюється електронним променем і спосіб електронно-променевого зварювання можна рекомендувати при виготовленні з нього зварних конструкцій ракет та космічних апаратів. Бібліогр. 6, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: електронно-променеве зварювання, алюмінієвий сплав, механічні властивості, зварні з'єднання, кріогенні температури

Вступ. Високоміцний сплав 1570 системи Al-Mg призначений для заміни сплаву АМг6 у зварних конструкціях ракет та космічних апаратів. Використання сплаву АМг6 пояснюється такими його перевагами як висока пластичність та корозійна стійкість при задовільній зварюваності. Основним недоліком цього сплаву є відносно низька міцність [1]. Відмінність сплаву 1570 від АМг6 полягає в тому, що він додатково легований елементом скандієм в кількості 0,17...0,27 % і має вищі механічні властивості. Для сплавів системи Al-Mg найефективнішим зміцнювачем є скандій [2]. Високі механічні властивості сплаву обумовлені утворенням дрібнодисперсних зміцнювальних частинок фази Al₂Sc, що виділяються при нагріванні та деформації з пересиченого твердого розчину. По межі плинності напівфабрикати зі сплаву 1570 перевершують аналогічні напівфабрикати зі сплаву АМг6 в 1,5...2,0 рази в залежності від виду напівфабрикату. Застосування сплаву 1570 замість сплаву АМг6 дає виграш по масі до 20 % [1].

Добавка скандію до сплавів системи Al-Mg покращує їх зварюваність. Наприклад, суттєво збільшується їх стійкість до утворення гарячих тріщин при зварюванні плавленням [1, 3]. Коефіцієнт міцності зварних з'єднань сплаву 1570 становить 0,85...0,95 залежно від типу напівфабрикату. Встановлено, що короткочасні нагрівання навколошовної зони сплаву 1570 до 450 °С не супроводжуються зменшенням твердості [4]. Навіть при тривалих нагріваннях (2...10 год) рекристалізаційні процеси в сплаві 1570 починаються при температурах вище 400...500 °С залежно від виду напівфабрикату [5]. Пояснюється це високою термічною стабільністю нерекристалізованої структури, обумовленої виділенням вторинних частинок фази Al₃Sc з пересиченого твердого розчину при термомеханічній обробці сплаву.

Одним з основних способів з'єднання елементів конструкцій ракетної техніки з алюмінієвих сплавів є електронно-променеве зварювання (ЕПЗ). Метою даної роботи є вивчення особливостей ЕПЗ сплаву 1570 та дослідження механічних властивостей його зварних з'єднань в інтервалі температур 20...293 К.

Методи дослідження та обладнання. Дослідження проводили на штампованих напівфабрикатах сплаву 1570 товщиною 30, 40 та 60 мм. Напівфабрикати зварювали на електронно-променевій зварювальній установці УЛ 209М з джерелом живлення ЕЛА 60/60 з прискорюючою напругою 60 кВ. Вимірюваннями твердості оцінювали зміни міцності металу шва і ширину зони термічного впливу (ЗТВ). Використовували прилад «Роквел»

^{*} За матеріалами доповіді на X міжнародній конференції «Променеві технології в зварюванні та обробці матеріалів», Одеса, 6–10 вересня 2021 р.

В.В. Скрябінський - https://orcid.org/0000-0003-4470-3421, В.М. Нестеренков - https://orcid.org/0000-0002-7973-1986,

A.B. Микитчик – https://orcid.org/ 0000-0002-9761-9429

[©] В.В. Скрябінський, В.М. Нестеренков, А.В. Микитчик, 2022

Режими ЕПЗ для зварювання напівфабрикатів сплаву 1570 різної товщини

Tanuna va	Режими ЕПЗ сплаву 1570								
товщина на- півфабрикату, мм	U _{приск} , кВ	V _{3B} , MM/с	I _{променя} , мА	Амплітуда розгортки променя, мм					
30	60	1417	220280	1,01,5					
40	60	1417	270330	1,01,5					
60	60	1012	360420	1,52,0					

з навантаженням на сталеву кульку 600 Н за шкалою «В». Мікроструктури зварних з'єднань досліджували на поперечних шліфах за допомогою оптичного мікроскопа Neophot.

Механічні властивості штампованого напівфабрикату сплаву 1570 та його зварних з'єднань визначали при температурах 20, 77, 196 і 293 К. На розрив випробовували стандартні зразки ГОСТ 11150-84 тип 1 № 2 (для випробувань при знижених температурах) та зразки з надрізом із таким же діаметром робочої частини. Ударну в'язкість визначали при випробуваннях зразків із надрізом Шарпі.

Експериментальні дослідження та результати. При зварюванні струм променя та струм фокусуючої лінзи вибирали з умови гарантованого проплавлення та формування зворотного валика шва.



Рис. 1. Макрошліфи з'єднань напівфабрикатів сплаву 1570 товщиною 30, 40 та 60 мм



штампованих напівфабрикатів сплаву 1570

ISSN 0005-111Х АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ, №1, 2022

Режими ЕПЗ для напівфабрикатів різної товщини наведені у таблиці.

Зварні шви мали ширину від 3 до 5 мм при практично паралельних межах зони проплавлення в центральній і нижній частині (рис. 1). Розбризкування, виплески та витікання рідкого металу під час процесу ЕПЗ не спостерігалися.



Рис. 3. Мікроструктура (×200) металу зварного шва штампованого напівфабрикату сплаву 1570: a – центральна частина шва; δ – лінія сплавлення



Рис. 4. Залежність механічних властивостей штампованого напівфабрикату сплаву 1570 товщиною 60 мм від температури випробувань.

ПРОМЕНЕВІ ПРОЦЕСИ ЗВАРЮВАННЯ



Рис. 5. Характер руйнування зразків, вирізаних зі зварних з'єднань штампованого напівфабрикату сплаву 1570 при різних температурах випробувань

При ЕПЗ сплаву 1570 ширина зони термічного впливу не перевищує 4 мм від лінії сплавлення (рис. 2) незалежно від товщини зварених напівфабрикатів (див. таблицю). Це у 4 рази менше, ніж при ЕПЗ сплаву АМг6Н [6].

Метал шва має однорідну високодисперсну комірчасто-дендритну структуру (рис. 3). У зварному шві, зоні сплавлення та ЗТВ тріщини, скупчення евтектичних прошарків та інші дефекти не виявлені.

Тимчасовий опір основного металу сплаву 1570 при зниженні температури випробувань з 293 до 20 К збільшується з 385 до 535 МПа (рис. 4). Умовна межа плинності також підвищується з 245 до 310 МПа. Відносне подовження зменшується з 24 до 15 %, а ударна в'язкість знижується з 25 до 10 Дж/см². Тимчасовий опір зразків із надрізом становить близько 525 МПа і практично не залежить від температури випробувань.

Особливістю випробувань зварних з'єднань сплаву 1570 є те, що при температурах випробу-



Рис. 6. Залежність механічних властивостей зварних з'єднань сплаву 1570, виконаних способом ЕПЗ, від температури випробувань



Рис. 7. Вплив температури випробувань на коефіцієнт міцності з'єднань та чутливість до концентраторів напружень штампованого напівфабрикату сплаву 1570

вань 20 і 77 К зразки руйнуються по основному металу за межами ЗТВ (рис. 5). Тимчасовий опір гладких зразків при цьому стає вищим, ніж тимчасовий опір зразків з надрізом і при 20 К досягає 525 МПа (рис. 6). У той самий час ударна в'язкість металу шва знижується з 38 до 9 Дж/см². Тимчасовий опір розривних зразків з надрізом металу шва становить близько 443 МПа при всіх температурах випробувань.

Коефіцієнт міцності зварних з'єднань при зниженні температури випробувань з 293 До 20 К збільшується з 0,85 до 0,95 (рис. 7). Оцінкою чутливості металу до концентраторів напружень служить відношення тимчасового опору зразка з надрізом до тимчасового опору гладкого зразка ($\sigma_{\rm BH}/\sigma_{\rm B}$). Чутливість до надрізу основного металу та металу шва невисока. Відношення $\sigma_{\rm BH}/\sigma_{\rm B}$ при температурах 293 і 196 К становить не менше 1,3. Зі зниженням температури чутливість основного металу до надрізу збільшується, але навіть при температурі 20 К відношення $\sigma_{\rm BH}/\sigma_{\rm B}$ становить близько одиниці.

Висновки

Проведені дослідження мікроструктури та механічних властивостей з'єднань штампованих напівфабрикатів сплаву 1570, виконаних способом ЕПЗ. Дефектів у зварних з'єднаннях не виявлено. Ширина зони термічного впливу становить до 4 мм від лінії сплавлення і практично не залежить від товщини напівфабрикату, що зварюється. Коефіцієнт міцності зварних з'єднань при зниженні температури випробувань від 293 до 20 К підвищується з 0,85 до 0,95.

Таким чином встановлено, що сплав 1570 добре зварюється електронним променем і спосіб ЕПЗ можна рекомендувати при виготовленні з нього зварних конструкцій ракет та космічних апаратів.

Список літератури

- 1. Овчинников В.В. (2017) Перспективы развития высокотехнологичных деформируемых алюминиевых сплавов для сварных конструкций. Часть 3. *Машиностроение и инженерное образование*. **4**, 44–60. https://old. mospolytech.ru/mio/rus_1547816839.pdf
- 2. Филатов Ю.А. (2014) Сплавы системы Al-Mg-Sc как особая группа деформируемых алюминиевых сплавов. *Технология легких сплавов*, **2**, 34–41.
- Пантелеев М.Д., Бакрадзе М.М., Скупов А.А. и др. (2018) Технологические особенности сварки плавлением алюминиевого сплава B-1579. Авиационные материалы и технологии, 3, 52, 11–17. https://journal.viam.ru/en/system/ files/uploads/pdf/2018/2018_3_2_1.pdf
- Nesterenkov, V.M., Skryabinsky, V.V., Rusynyk, M.O. (2021) Effect of thermal cycles in electron beam welding of aluminum 1570 alloy on mechanical properties of welded joints. *The Paton Welding J.*, **5**, 40–45. DOI: https://doi. org/10.37434/as2021.05.06
- Корягин Ю.Д., Ильин С.И. (2017) Особенности рекристаллизации деформируемых алюминий-магниевых сплавов со скандием. Вестник ЮУрГУ, Металлургия, 17, 1, 65–72. https://cyberleninka.ru/article/n/osobennostirekristallizatsii-deformiruemyh-alyuminiy-magnievyhsplavov-so-skandiem/viewer
- 6. Бондарев А.А., Скрябинский В.В. (1985) Влияние технологических факторов на зону разупрочнения сплава АМг6НН при электронно-лучевой сварке. *Автоматическая сварка*, **3**, 40–42.

References

- Ovchinnikov, V.V. (2017) Prospects of development of high-technological wrought aluminium alloys for welded structures. Pt 3. *Mashinostroenie i Inzhenernoe Obrazovanie*, 4, 44–60 [in Russian]. https://old.mospolytech.ru/mio/ rus_1547816839.pdf
- 2. Filatov, Yu.A. (2014) Alloys of Al-Mg-Sc system as a special group of wrought aluminium alloys. *Tekhnologiya Lyogkikh Splavov*, **2**, 34-41 [in Russian].
- Panteleev, M.D., Bakradze, M.M., Skupov, A.A. et al. (2018) Technological peculiarities of fusion welding of aluminium alloy V-1579. *Aviats. Materialy i Tekhnologii*, 3(52), 11–17 [in Russian]. https://journal.viam.ru/en/system/files/uploads/ pdf/2018/2018 3 2 1.pdf
- pdf/2018/2018_3_2_1.pdf
 4. Nesterenkov, V.M., Skryabinskyi, V.V., Rusynyk, M.O. (2021) Effect of thermal cycles in electron beam welding of aluminum 1570 alloy on mechanical properties of welded joints. *The Paton Welding J.*, **5**, 35-40. DOI: https://doi.org/10.37434/as2021.05.06
- Koryagin, Yu.D., Iliin, S.I. (2017) Peculiarities of recrystallization of wrought aluminium-magnesium alloys with scandium. *Vestnik YuUrGU*, *Metallurgiya*, 17(1), 65–72 [in Russian]. https://cyberleninka.ru/article/n/osobennostirekristallizatsii-deformiruemyh-alyuminiy-magnievyhsplavov-so-skandiem/viewer
- Bondarev, A.A., Skryabinsky, V.V. (1985) Influence of technological factors on softening zone of AMg6NN alloy in electron beam welding. *Avtomatich. Svarka*, 3, 40–42 [in Russian].

ELECTRON BEAM WELDING OF ALUMINUM 1570 ALLOY AND MECHANICAL PROPERTIES OF ITS JOINTS AT CRYOGENIC TEMPERATURES

V.V. Skryabinsky¹, V.M. Nesterenkov¹, A.V. Mikitchik²

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

²SE «International Center for Electron Beam Technologies of the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine». 03150, Kyiv, 68 Antonovych Str.

The features of electron beam welding of 1570 alloy were studied and mechanical properties of its welded joints in the temperature range of 20...293 K were investigated. It was found that during electron beam welding in the 1570 alloy, the width of the heat-affected-zone does not exceed 4 mm from the fusion line, which is 4 times lower than in the AMg6N alloy. In the weld, fusion zone and crack HAZ, accumulation of eutectic layers and other defects were not detected. The ultimate strength of the joints of the 1570 alloy at a decrease in the test temperature from 293 to 20 K increases from 325 to 525 MPa. The conditional yield strength is also increased from 210 to 270 MPa, and the ductility changes slightly. At the same time, the impact toughness decreases from 38 to 9 J/cm². The coefficient of strength of welded joints with a decrease in the test temperature from 293 to 20 K increases from 0.85 to 0.95. In general, the 1570 alloy is well welded by electron beam and the method of electron beam welding can be recommended in the manufacture of welded structures of rockets and spacecrafts. 6 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Key words: electron beam welding, aluminum alloy, mechanical properties, welded joints, cryogenic temperatures

Надійшла до редакції 04.11.2021



ВПЛИВ ЧАСУ ІСНУВАННЯ РОЗПЛАВЛЕНОЇ ВАННИ ПРИ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ ПРОЦЕСАХ НА ВИПАРОВУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ З ВИСОКОЮ ПРУЖНІСТЮ ПАРУ

Н.В. Піскун, Е.Л. Вржижевський, В.А. Костін, Т.Г. Таранова, І.Л. Богайчук, І.І. Статкевич

IE3 ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

В роботі досліджено інтерметалідний сплав Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %), що був розроблений і виплавлений в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. Досліджено процеси випаровування елементів з високою пружністю пара, таких як алюміній та хром для двох електронно-променевих процесів: плавлення та зварювання. Експериментально доведено і підтверджено дослідженнями, що використання спрямованої кристалізації методом електронно-променевої плавки, який відбувається в умовах глибокого вакууму, не дозволяє забезпечити рівномірність структури за довжиною зливка, що пов'язано з випаровуванням елементів з високою пружністю пара, таких як алюміній і хром. Встановлено, що при електронно-променевому зварюванні зразків інтерметалідного сплаву Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %) з'являлися тріщини, але, як доведено рентгеноспектральними дослідженнями, при цьому випаровування елементів не відбувається. Проведено порівняння параметрів цих двох процесів та показано, що на рівень випаровування елементів з високою пружністю пару при електронно-променевих процесах впливає час перебування матеріалу в рідкому стані та розміри розплавленої зони. Бібліогр. 17, табл. 1, рис. 9.

Ключові слова: інтерметалідний сплав системи TiAl, електронно-променева плавка, електронно-променеве зварювання, випаровування, елементи з високою пружністю пару, розплавлена зона, час кристалізації

Вступ. Відомо, що жароміцні інтерметалідні сплави мають високу міцність, жароміцність, повзучість та корозійну стійкість при високих температурах [1]. Через низьку щільність і питому міцність інтерметаліди на основі γ -ТіАІ є привабливими для застосування в газотурбінних двигунах [2]. Завдяки своїм унікальним властивостям вони також є перспективними для застосування в різних інших галузях промисловості. Наприклад, виготовлення лопатей турбіни низького тиску з цих сплавів дозволяє заощадити 180 кг на кожному двигуні в порівнянні з традиційними матеріалами [3]. Це, в свою чергу, дозволяє знизити вартість виробів аерокосмічної промисловості, що є дуже важливим.

Однак низька пластичність при кімнатній температурі і пов'язана з цим низька технологічність ускладнює, а в ряді випадків виключає можливість виготовлення напівфабрикатів і виробів з цих матеріалів. Широке використання алюмінідів титану в конструкціях різного призначення значною мірою залежить від створення ефективних способів їх отримання та наступних процесів їх механічної та механікотермічної обробки.

Оскільки використання алюмінідів титану TiAl є перспективним для широкого застосування його в конструкціях турбін авіаційних двигунів, деталях автомобільної промисловості і деяких інших галузях [4], то впровадження інтерметалідних сплавів значною мірою залежить від розробки технологій їх з'єднання. В деталях і вузлах газотурбінних двигунів можливе використання зварювання з метою спрощення їх виготовлення. Найбільш придатним способом отримання з'єднання інтерметаліду є електронно-променеве зварювання [5], яке дозволяє зварювати вироби різних геометричних форм і виконувати шви різної протяжності. Крім того, в порівнянні з іншими видами зварювання плавленням має переваги: по-перше, оскільки воно проводиться у високому вакуумі, то повністю забезпечує захист такого активного матеріалу, яким є титан; по-друге, при електронно-променевому зварюванні формується вузький шов і дуже незначна зона термічного впливу, що, в свою чергу, повинно призводити до мінімальних деформацій зварювального з'єднання.

Тому відпрацювання та оптимізація технології зварювання, створення нових підходів до процесу зварювання з метою отримання бездефектних з'єднань вельми актуальна.

Основною проблемою при використанні електронно-променевих процесів для виробництва та обробки титанових сплавів є випаровування у вакуумі елементів з високою пружністю пари [6, 7]. До таких елементів відносяться, в першу чергу, алюміній та хром. Оскільки алюміній є одним кий Е. I. – https://orcid.org/0000-0001-8651-8510

```
Піскун Н.В. – htps://orcid.org/0000-0003-1459-2310, Вржижевський Е.Л. – htps://orcid.org/0000-0001-8651-8510, Костін В.А. – htps://orcid.org/0000-0002-2657-4667, Таранова Т.Г. – htps://orcid.org/0000-0002-2656-4693,
```

```
Статкевич I.I. – htps://orcid.org/0000-0001-9403-2123
```

© Н.В. Піскун, Е.Л. Вржижевський, В.А. Костін, Т.Г. Таранова, І.Л. Богайчук, І.І. Статкевич, 2022

Хімічний склад дослідного сплаву

Сплав	Ti	Al	Nb	Cr	Zr
мас. %	52,82	28,8	11,72	3,51	3,16
ат. %	45,92	44,54	5,26	2,82	1,46

з основних елементів сплаву, його випаровування впливає на структуру і, відповідно, на механічні властивості сплаву.

Метою роботи є дослідження впливу режимів електронно-променевої зонної плавки та електронно-променевого зварювання інтерметалідного сплаву Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %) на процеси випаровування легуючих елементів, формування мікроструктури та властивості.

Матеріал та методика досліджень. В роботі досліджувався інтерметалідний сплав складу: Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %) (таблиця), який був розроблений і виплавлений в IE3 ім. Є.О. Патона НАН України [8].

Зразки для дослідження було отримано після електронно-променевої безтигельної зонної плавки (рис. 1) та після електронно-променевого зварювання (рис. 2).

Литі інтерметалідні сплави системи TiAl при кімнатній температурі є малопластичними матеріалами і при випробуванні їх на одновісьовий розтяг крихке руйнування зразка настає відразу в пружній області після розтягування.

Відомо, що перед використанням литого інтерметаліду для усунення зазначених дефектів його необхідно піддавати газостатичному ізотермічному пресуванню (ГІП), багатогодинній термічній обробці або прокатці [9]. Одним із способів поліпшення структури і підвищення механічних характеристик інтерметаліда є спрямована кристалізація.

Рис. 1. Схема методу безтигельної електронно-променевої зонної плавки: 1 – зразок, що переплавляється; 2 – верхній утримувач; 3 – нижній утримувач; 4 – розплавлена зона; 5 – переплавлена ділянка; 6 –електронно-променевий нагрівач; 7 – катод; 8 – фокусуючий пристрій; 9 – електронний пучок

Для проведення досліджень нами був застосований метод безтигельної електронно-променевої зонної плавки (рис. 1).

Використання методу безтигельної електронно-променевої зонної плавки на наш погляд є досить перспективним для зазначених цілей, тому що він має ряд відмінних особливостей:

 висока термічна ефективність (ККД процесу досягає 90 %), у зв'язку із цим невелика споживана потужність;

зазначений метод дозволяє легко регулювати
 і утримувати задану довжину розплавленої зони,
 що є істотним при розробці як наукових основ,
 так і практичної реалізації процесу;

 обробка матеріалів може здійснюватися в широкому діапазоні температур – 250...2200 °С, що дозволяє переплавляти інтерметалідний сплав, який має температуру плавлення 1460 °С;

 даний метод дозволяє легко керувати променем при його безпосередньому впливі на зразок.
 Скануючи промінь уздовж розплавленої зони з певною частотою і амплітудою, можна, відповідно, змінювати температурний градієнт зразків у процесі плавки.

Відзначимо також, що після спрямованої перекристалізації не потрібна ГІП-обробка, тому що в отриманих зливках відсутні мікродефекти – несуцільності, мікротріщини та інше; відсутня пористість, тому що усадка йде направлено на фронті кристалізації, а не в об'ємі зливка. Вона дозволяє забезпечувати її рівномірність структури за довжиною зливка. Крім того, умовами процесу забезпечується чистота матеріалу, який виплавляється (немає взаємодії з матеріалом тигля).

Як вказувалося вище, для подальшого використання цього сплаву в промисловості була розроблена технологія електронно-променевого зварювання (ЕПЗ) інтерметаліду наступного номінального складу Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %) – того ж сплаву, який намагалися обробляти методом електронно-променевої плавки.

Експерименти зі зварювання електронним променем інтерметаліду проводилися в зварювальній камері установки УЛ-144 по схемі, яка представлена на рис. 2.

Електронно-променеве зварювання проводили без підігріву на наступному режимі: $U_{\text{приск.}} = 60 \text{ kB}$; $I_{\text{п}} = 35 \text{ MA}$; $v_{\text{зв}} = 7 \text{ MM/c}$; $P = 5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$.

При отриманні зварних з'єднань інтерметалідів системи ТіА1 методом ЕПЗ істотним їх недоліком є можливість формування холодних тріщин, що виникають при температурах нижче 700 °С.

Результати досліджень. Електронно-променева безтигельна зонна плавка. При проведенні технологічних експериментів по електронно-променевій безтигельній плавці інтерметаліду системи

Рис. 2. Схема процесу електронно-променевого зварювання пластин інтерметалідного сплаву Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %) в зварювальній камері установки УЛ-144: *1* – електронно-променева гармата; *2* – основний матеріал; *3* – зона локальної термічної обробки; *4* – зварний шов; *5* – зона термічного впливу; *6* – розгорнутий пучок електронів; *7* – електронний зварювальний пучок

TiAl відбувалося сильне випаровування з розплавленої зони і ділянок твердої поверхні, що нагріваються. На жаль, елементи, що випаровувалися, осідали на вузлах електронно-променевого нагрівача, у тому числі і на такому важливому вузлі, як танталова спіраль, що імітує електрони; шибках ілюмінатора; стінках камери; арматури, що приводило до неможливості закінчення процесу. Мікрорентгеноспектральними дослідженнями встановлено, що в процесі електронно-променевої плавки інтерметаліду системи Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %) відбувається сильне випаровування алюмінію – одного з основних складових сплаву, який має високу пружність пари. Це відбувається з розплавленої зони і ділянок твердої поверхні, що нагріваються. Крім цього, досить інтенсивно випаровується також хром, що входить до складу алюмініду титану як легуючий елемент. Дослідження хімічного складу алюмініду титану, підданого перекристалізації при безтигельній електронно-променевій плавці, показали, що з матеріалу випаровується до 20 % алюмінію і до 18 % хрому.

Дослідження структури зливків алюмініду титану, отриманих за допомогою електронно-променевої безтигельної зонної плавки (рис. 3) показали, що структура містить ділянки двох типів: світло- та темнотравлених великих рівновісних зерен (рис. 3, *a*).

Дослідження мікроструктури зливка показало наявність ділянок зразка, на якій колонії ламелей γ -фази розташовані в різних напрямках (рис. 3, δ). На рис. 3, ϵ представлена макроструктура поперечного перерізу зразка. Спостерігаються дрібні пори, від яких поширюються мікротріщини в центральну частину зразка, що викликано, очевидно, інтенсивним випаровуванням алюмінію. На протилежному краю поперечного перерізу зразка

Рис. 3. Структура зливків алюмініду титану, отриманих за допомогою електронно-променевої безтигельної зонної плавки: *a* – макроструктура досліджених зразків; *б* – ділянка зразка, на якій видно колонії ламелей γ-фази, розташованих в різних напрямках; *в*, *c* – макро- та мікроструктура поперечного перерізу зразка після зонного переплаву

Рис. 4. Фрактографічні дослідження зразків інтерметалідного сплаву Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %) після електронно-променевої зонної плавки: *а*-*в* – ділянки дна пори інтерметаліду; *г* – поверхня зламу дна пори інтерметаліду

(рис. 3, *г*) розташовані ділянки крупних зерен, що складаються з суміші γ+α,-фази.

Мікрорентгеноспектральний аналіз дна пори, проведений на електронному растровому мікроскопі JSM-840, показав, що вище зроблені припущення були вірні (рис. 4). Фрактографічні дослідження зразків інтерметалідного сплаву Ti–44Al–5Nb–3Cr–1,5Zr (ат. %) після електронно-променевої зонної плавки показали наявність великої кількості пор (рис. 4, *6*).

Дослідження показали, що на границях пори вміст алюмінію падає до 18...20 ат. % у порівнянні з 46...47 ат. % у матриці. На дні пор виявлені ділянки плівки з підвищеним вмістом алюмінію. У деяких точках вміст алюмінію доходив до 59 ат. %. Можливо, у цих місцях відбулося утворення оксидів алюмінію (рис. 4, δ). При детальному дослідженні зламів знайдено ділянки у вигляді мікроскопічних часток. Як показав рентгеноспектральний аналіз, вміст хрому в цих виділеннях доходив до 18 %. Для порівняння – у сплаві вміст хрому 3 %.

Електронно-променеве зварювання інтерметалідного сплаву. Дослідження зварних стиків після електронно-променевого зварювання (ЕПЗ) показало, що у зварному шві спостерігаються поперечні холодні тріщини (рис. 5, a), які проходять через зварне з'єднання і закінчуються з двох сторін зразка на основному матеріалі. Необхідно відзначити неоднорідність структури металу шва у вигляді колоній ($\gamma+\alpha_2$)-фази, які розташовані уздовж зони сплавлення і мають мікротвердість 5110...5270 МПа. У цій області виявлені численні тріщини протяжністю від 100 до 300 мкм, розташовані паралельно лінії сплавлення (рис. 5, б).

Як було встановлено вище, якщо при електронно-променевій плавці відбувається значне випаровування алюмінію (до 20 %) і хрому (до 18 %), а при електронно-променевому зварюванні з'яв-

Рис. 5. Зразок зварного з'єднання інтерметалідного сплаву Ті–44Al–5Nb–3Cr–1,5Zr (ат. %), одержаний електронно-променевим зварюванням: a – загальний вигляд; δ – мікроструктура (×200) металу шва

ляються тріщини, то встала потреба визначити причини утворення холодних тріщин. Можливо це пов'язано з проблемою випаровування елементів при електронно-променевому зварюванню, яке призводить до зміни складу алюмінію або хрому.

З метою визначення можливого випаровування елементів сплаву у процесі електронно-променевого зварювання був проведений кількісний рентгеноспектральний аналіз зварного з'єднання інтерметаліду, одержаного методом ЕПЗ.

Результати кількісного аналізу елементів зварного з'єднання інтерметаліду Ті–44А1–5Nb–3Cr– – 1,5Zr (ат. %) представлено на рис. 6.

Дослідження випару елементів у процесі зварювання практично не спостерігається. Розбіжність за елементним складом відбувається у алюмінії на 2,2 % і хромі на 1 %. При цьому відбувається перерозподіл складових елементів у зварному шві і титані приблизно на 2,5 % більше, ніж у вихідному стані. Хром і алюміній – це елементи з високою пружністю пару, а алюміній, крім того, має низьку температуру кипіння і встигає частково випаритися у процесі зварювання.

На поверхні зварного з'єднання інтерметаліду системи Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %), виконаного ЕПЗ, спостерігаються паралельні утворення як в основному металі, так і в металі шва (рис. 7, a).

Рис. 6. Кількісний аналіз зони зварного з'єднання інтерметаліду системи Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %)

Товщина цих фаз становить 1,36...2,5 мкм. Розтріскування на цих фазах не спостерігається. Кількісний аналіз фаз показав, що вони збагачені титаном (рис. 7, δ).

Обговорення. Порівняння режимів процесу електронно-променевої плавки і електронно-променевого зварювання сплаву Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr. Таким чином, за даними хімічного аналізу і структурних досліджень, а також на основі детального вивчення літературних джерел, які присвячені темі випаровування елементів з високою пружністю пара при електронно-променевих процесах [6, 7], був зроблений висновок, що методом безтигельної електронно-променевої плавки не вдається одержати якісні зливки. У зв'язку з зазначеним вище, було прийнято рішення застосувати для зонної плавки інтерметаліду індукційний нагрів в середовищі аргону, який дозволив вирішити всі проблеми з випаровуванням елементів і отримати високоякісні зливки [10, 11].

Як показали результати попередніх досліджень, основним джерелом виникнення тріщин є низька пластичність інтерметаліду при кімнатних температурах (температура в'язко-крихкого переходу становить 700 °C) і неможливість чинити опір появі тріщин у результаті формування зварювальних напружень.

Для запобігання виникнення холодних тріщин в зварних з'єднаннях зразків алюмініду титану і формування якісного шва необхідно було проводити попередній підігрів зразків [12, 13] і наступну локальну термообробку електронним променем, розгорнутим в одну та іншу сторону. Чисельно показано і підтверджено експериментально, що використання розподіленого джерела попереднього нагріву зразка перед зварюванням дозволяє реалізувати сприятливі умови під час зварювання і при подальшому охолодженні, а саме, знизити на 30 % величину розтягуючих напруг. Крім того, при застосуванні цієї технології відбувається фазова трансформація, завдяки якій в структурі з'являється додаткова β-(В2)-фаза, що представляє собою впорядковану фазу на основі Ті. Вона розташову-

Рис. 7. Фази, що утворюються при ЕПЗ інтерметаліду системи Ti-44Al-5Nb-3Cr-1,5Zr (ат. %) у металі шва: *a* – мікроструктура; *б* – спектральний аналіз фаз

Рис. 8. Характеристики процесу електронно-променевої плавки: *а* – термічний цикл процесу зонної плавки інтерметаліду; *б* – розмір розплавленої зони в процесі зонної плавки становить 10 мм

Рис. 9. Характеристики процесу електронно-променевого зварювання: *a* – термічний цикл процесу ЕПЗ зварювання інтерметаліду; *б* – розрахунок розподілу температур в зварному шві інтерметаліду товщиною 3 мм в процесі ЕПЗ; *в* – розрахунок розподілу температур у зварному шві інтерметаліду через 1 с після закінчення процесу зварювання

ється на границях колоній і блокує зародження і поширення тріщин в α_2 -фазі внаслідок зниження напруги. Утворення в зварному шві сприятливої трикомпонентної структури: γ -фази, (γ + α_2)-фази і β -фази сприяє збільшенню його міцності і пластичності [14, 15].

Для відповіді на запитання, чому при двох електронно-променевих процесах у вакуумі одного і того ж сплаву абсолютно різна поведінка елементів з високою пружністю пари було проведено співставлення основних характеристик цих процесів. На рис. 8, 9 представлено характеристики процесу електронно-променевої плавки та електронно-променевого зварювання.

Як видно з рис. 7 при електронно-променевій плавці зі швидкістю 50 мм/год тривалість перебування матеріалу в рідкому стані становить 720 с. При малій товщині зварюваного матеріалу можна прийняти, що геометричні розміри зварювальної ванни при дуговому і електронно-променевому зварюванні приблизно рівні [16].

Для оцінки часу середньої тривалості перебування металу в рідкому стані при електронно-променевому зварюванні використовували формули, наведені в [17], а розміри зварювальної ванни, які зазвичай прийняті для дугового зварювання титану товщиною 3 мм. Розрахунками встановлено, що зварювальна ванна при електронно-променевому зварюванні перебуває в рідкому стані приблизно 0,7 с, що більш, як у 700 разів менше, ніж при електронно-променевій плавці.

Крім того, ширина розплавленої зони, яка кристалізується при електронно-променевій плавці, складає 10 мм (рис. 7, δ), що значно більше ніж в процесі електронно-променевого зварювання, при якому ширина зварного шва з зоною термічного впливу становить не більш 3 мм. А вже через секунду після закінчення процесу зварювання (рис. 9, ϵ) температура в зварному шві падає на 500 °C.

Висновки

Встановлено, що в процесі електронно-променевої плавки інтерметалідного сплаву Ті–44А1–5Nb– 3Cr–1,5Zr відбувається сильний випар елементів, які мають високу пружність пару: алюмінію до 20 % та хрому до 18 %. Оскільки алюміній це один з основних складових елементів сплаву, то його випар впливає на структуру. При електронно-променевому зварюванні такого явища не спостерігається. При порівнянні термоциклів двох електронно-променевих процесів виявилося, що тривалість перебування матеріалу в рідкому стані при електронно-променевій плавці становить 720 с, ширина розплавленої зони при цьому складає 10 мм, а при електронно-променевому зварюванні зварювальна ванна, яка кристалізується за 0,7 с має розміри приблизно 2 мм.

Таким чином, рівень випаровування елементів з високою пружністю пара при електронно-променевих процесах залежить від часу перебування матеріалу в рідкому стані та розмірів розплавленої зони.

Список літератури/References

- 1. Schwaighofer, E., Clemens, H., Mayer, S., et al. (2014) Microstructural design and mechanical properties of a cast and heattreated intermetallic multi-phase γ -TiAl based alloy. *Intermetallics*, 44, 128–140. DOI: https://doi.org/10.1016/j. intermet.2013.09.010
- Bewlay, B.P., Nag, S., Suzuki, A., Weimer, M.J. (2016) TiAl alloys in commercial aircraft engines. *Materials at High Temperatures*, 33, 549–559. DOI: https://doi.org/ 10.1080/09603409.2016.1183068
- Clemens, H., Mayer, S. (2016) Intermetallic titanium aluminides in aerospace applications processing, microstructure and propertie. *Mater: High Temp.*, 33, 560– 570. DOI: https://doi.org/10.1080/09603409.2016.1163792
- 4. Kablov, E.N., Lukin, V.I. (2008) Intermetallic based on titanium and nikil for advanced engineering product. *The Paton Welding J.*, **11**, 65–71.
- (2013) Welding of titanium aluminide alloys (Review). *Ibid*, 8, 25–30.
- Варич И.Ю., Ахонин С.В., Тригуб Н.П. и др. (1997) Испарение алюминия из сплавов на основе титана в процессе электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью. Проблемы специальной электрометаллургии, 4, 15–21. Varich, I.Yu., Akhonin, S.V., Trigub, N.P. et al. (1997) Evaporation of aluminium from titanium-based alloys during cold-hearth electron beam melting. Problemy Spets. Elektrometallurgii, 4, 15–21[in Russian].
- Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В. и др. (2006). Электронно-лучевая плавка титана. Киев, Наукова думка. Paton, B.E., Trigub, N.P., Akhonin, S.V. et al. (2006) Electron beam melting of titanium. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

- 8. Zhuk, G.V., Trigub, N.P., Zamkov, V.N. (2003) Producing of titanium gamma-aluminide ingots using EB'HM method. *Special Electrometallurgy*, **4**, 19–21.
- Ймаев В.М., Имаев Р.М., Хисматуллин Т.Г. (2008) Механические свойства литого интерметаллидного сплава Ті-43Al–7(Nb,Mo)–0.2В (ат. %) после термической обработки. Физика металлов и металловедение, 105, 5, 516–522. DOI: https://doi.org/10.1134/S0031918X08050098
 Imaev, V.M., Imaev, R.M., Khismatullin, T.G. (2008) Mechanical properties of intermetallic alloy Ti–43Al– 7(Nb,Mo)–0.2B (at. %) after heat treatment. Fizika Metallov i Metallovedenie, 105(5), 516–522.
- Kartavykh, A.V., Asnis, E.A., Piskun, N.V. et al. (2015) Microstructure and mechanical properties control of c-TiAl(Nb,Cr,Zr) intermetallic alloy by induction float zone processing. *Journal of Alloy and Compounds*, 643, 182–166. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.210
- Kartavykh, A.V., Asnis, E.A., Piskun, N.V. et al. (2017) Room-temperature tensile properties of float-zone processed β-stabilized γ-TiAl(Nb,Cr,Zr) intermetallic. *Journal Materials Letters*, 188, 88–91. DOI: https://doi. org/10.1016/j.matlet.2016.10.103
- Young-Won, Kim, Wilfried, Smarsly, Junpin, Lin et al. (2014) Electron beam joining of γ-titanium aluminide. Gamma Titanium Aluminide Alloys 2014. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 99–103.
- Vrzhyzhevskyi, E.L., Piskun, N.V., Taranova, T.G. et al. (2019) Prevention of gold cracks formation during electronbeam welding of alloy based on TiAl system intermetallic compound. *Tekhnologicheskie Sistemy*, 1(86), 43–49. DOI: https://doi.org/10.29010/86.6
- Bin, Tang, Xian, Sheng Qi, Hong, Chao Kou et al. (2016) Recrystallization Behavior at Diffusion Bonding Interface of High Nb Containing TiAl Alloy. *Advanced Engineering Materials*, 18, 4, 657–664. DOI: https://doi.org/10.1002/ adem.201500457
- 15. Yang, K.L., Huang, J.C., Wang, Y.N. (2013) Phase transformation in the β-phase of super a2 Ti3Al base alloys during static annealing and super plastic deformation at 700...1000 °C. Acta Mater., 51, 2577–2594. DOI: https:// doi.org/10.1016/S1359-6454(03)00057-0
- Патон Б.Е. (1987) Электронно-лучевая сварка. Киев, Наукова думка.
 Paton, B.E. (1987) Electron beam welding. Kiev, Naukova

Paton, B.E. (1987) *Electron beam welding*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

 Петров Г.Л., Тумарев А.С. (1977) Теория сварочных проиессов. Уч. для вузов. Изд. 2-е. Москва, Высш. шк. Petrov, G.L., Tumarev, A.S. (1977) Theory of welding processes: Manual for higher educ. inst., 2nd Ed. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].

INFLUENCE OF TIME OF EXISTENCE OF MOLTEN POOL IN ELECTRON RADIATION PROCESSES ON THE LEVEL OF EVAPORATION OF ELEMENTS WITH A HIGH VAPOR TENSION

N.V. Piskun, E.L. Vrzhizhevsky, V.A. Kostin, T.G. Taranova, I.L. Bogaichuk, I.I. Statkevich

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The intermetallic Ti - 44Al - 5Nb - 3Cr - 1.5Zr alloy (at.%), developed and smelted at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, was studied. The processes of evaporation of elements with a high vapor tension, such as aluminum and chromium for two electron beam processes: melting and welding were studied. It was experimentally proven and confirmed by investigations that the use of directional crystallization by electron beam melting, which takes place in deep vacuum conditions, does not allow providing uniformity of structure along the length of the ingot, which is associated with evaporation of elements with a high vapor tension, such as aluminum and chromium. It was found that during electron beam welding of samples of intermetallic Ti - 44Al - 5Nb - 3Cr - 1.5Zr alloy (at.%), cracks appeared, but, as was proved by X-ray spectral studies, evaporation of elements does not occur. The parameters of these two processes were compared and it is shown that the level of evaporation of elements with a high vapor tension in electron beam processes is influenced by the time of existence of the material in a liquid state and the size of the molten zone. 17 Ref., 1 Tabl., 9 Fig.

Keywords: intermetallic alloy of TiAl system, electron beam melting, electron beam welding, evaporation, elements with a high vapor tension, molten zone, crystallization time

Надійшла до редакції 25.10.2021

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ В КОМПОЗИТНИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАННЯХ КРИШКИ КОРПУСУ РЕАКТОРА ВВЕР-1000 З ПАТРУБКАМИ СУЗ

А.А. Макаренко, О.В. Махненко

IE3 ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Композитні зварні з'єднання (КЗЗ) кришки корпусу реактора BBEP-1000 з патрубками системи управління захисту (СУЗ) є об'єктом розрахунку міцності при обгрунтуванні подовження ресурсу енергоблоків АЕС. Проведено математичне моделювання методом скінченних елементів кінетики формування залишкових напружень при зварюванні КЗЗ кришки корпусу реактора BBEP-1000 з патрубками СУЗ, а також їх перерозподілу в результаті післязварювальної термоообробки. Досліджувався вплив попереднього підігріву на мікроструктурні фазові перетворення в ЗТВ основного матеріалу кришки і патрубка. Визначені основні особливості розподілу залишкових напружень в КЗЗ після зварювання і після термоообробки. Бібліогр. 14, табл. 1, рис. 12.

Ключові слова: композитне зварне з'єднання, кришка корпусу реактора, BBEP-1000, зона термічного впливу, мікроструктурні фазові перетворення, залишкові напруження, термообробка, математичне моделювання

Вступ. Одним з найважливіших питань безпечної експлуатації та продовження ресурсу обладнання атомних електростанцій (AEC) України є питання оцінки міцності, цілісності та працездатність вузлів зварних з'єднань, що потребує даних щодо залишкових напружень.

В елементах обладнання та трубопроводів діючих АЕС досить широко використовувались так звані композитні зварні з'єднання (КЗЗ) з різнорідних матеріалів, як правило, сталей феритно-перлітного (або бейнітного) і аустенітного класів. Особливість КЗЗ полягає в тому, що через різницю в хімічному складі основного і зварювальних матеріалів під час зварювального нагріву може відбуватися значна дифузія хімічних елементів в зоні з'єднання, що викликає хімічну і структурну неоднорідність металу КЗЗ [1, 2], а також за рахунок значної різниці в коефіцієнтах температурного розширення матеріалів складових компонентів у процесі зварювання та післязварювальної термообробки виникають значні нерелаксовані залишкові напруження [3, 4]. Структурна неоднорідність металу КЗЗ та нерелаксовані залишкові напруження помітно впливають на міцність, довговічність та корозійну стійкість елементів обладнання [5]. Значні труднощі з експериментального виміру нерелаксованих залишкових напружень ускладнюють їх облік при визначенні ресурсу елементів обладнання АЕС.

Корпус реактора є одним із головних елементів, від технічного стану якого залежить ресурс безпечної експлуатації ядерної енергетичної уста-Махненко О.В. – https://orcid.org/0000-0002-8583-0163 © А.А. Макаренко, О.В. Махненко, 2022 новки і який неможливо замінити. Зварні з'єднання корпусу реактора є проблемними місцями, де ризик утворення дефектів має підвищену вірогідність. Якщо зварним з'єднанням і наплавленням корпусу реактора ВВЕР-1000 приділялась велика увага, то КЗЗ кришки корпусу реактора з патрубками системи управління захисту (СУЗ) практично не досліджувались. Крім проведення оцінок структурної цілісності кришки корпусу в зонах КЗЗ при довготривалій експлуатації, також в перспективі представляє інтерес аналіз можливості ремонтної заміни патрубків за технологією зварювання у випадку її зношування.

Конструкція і технологія КЗЗ кришки корпусу з патрубками СУЗ. На рис. 1 представлена схема зварного з'єднання кришки корпусу реактора ВВЕР-1000, яке утворюється при з'єднанні патрубку СУЗ зі сталі 20 (перлітного класу) та кришки корпусу реактора зі сталі 15Х2НМФА (бейнітного класу) зварювальним матеріалом 10Х16Н25АМ6 (аустенітного класу), з попереднім наплавленням ЗІО-8 (аустенітного класу). Внутрішня поверхня патрубків СУЗ ізольована від контакту з теплоносієм привареними сорочками зі сталі 08Х18Н10Т. Приварювання сорочки до патрубків проводилося при нагріванні сорочки і патрубка до температури 100 °С. На нижній частині (торцях) патрубків наплавлений аустенітний шар. У таблиці наведені матеріали, використані при виготовленні кришки і патрубків верхнього блоку реактора енергоблоку ВВЕР-1000 [6-8].

Розробка математичної моделі НДС при зварюванні КЗЗ. Для розрахунку залишкових напружень була побудована 2D скінченно-елементна мо-

Рис. 1. Елемент кришки реактора з приєднаним патрубком СУЗ і схема КЗЗ

дель з'єднання кришки корпусу реактора з патрубком СУЗ при допущенні осьової симетрії (рис. 1). Схема моделі зварного з'єднання, граничні умови і скінченно-елементна сітка зображені на рис. 2, 3.

Температурна задача вирішувалася при допущенні швидкорухомого джерела нагріву, що дозволило використовувати двомірну скінченно-елементну модель в поперечному перерізі зварного з'єднання (рис. 2). Для моделювання температурних розподілів при виконанні зварювальних проходів застосовувалося рівняння нестаціонарної Матеріали, використані для зварного з'єднання кришки реактора з патрубками СУЗ реактора енергоблоку ВВЕР-1000 [6-8]

Деталі кришки з патрубками	Марка матеріалу		
Основні матеріа	ЛИ		
Кришка реактора	15Х2НМФА		
Патрубки СУЗ	20		
Сорочка патрубків СУЗ	08X18H10T		
Зварювальні (наплавні)	матеріали		
Шов приварки патрубків СУЗ до кришки (№ 3)	Св-10Х16Н25АМ6 и ЗИО-8		
Нижній шов приварки сорочки до патрубка з наплавленням (№ 8)	ЭА-400/10Т		
1-ий шар наплавлення «к» до патрубка	ЭА-395/9		
2-ий шар наплавлення «к» до патрубка	ЭА-400/10Т		
Наплавлення «е» на кришку	ЗИО-8		
1-ий шар наплавлення «б» на кришку	07X25H13		
2-ий шар наплавлення «б» на кришку	08Х19Н10Г2Б		

теплопровідності, яке включає врахування об'ємного зварювального джерела нагріву W(x,y,t) [9]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + W(x, y, t) = c \rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

де ρ – щільність матеріалу; *с* – питома теплоємність; λ – коефіцієнт теплопровідності; *T* – температура матеріалу,

$$W(x, y, t) = \frac{6Q}{ab\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-3(x-x_0)^2}{a^2} - \frac{-3(y-y_0)^2}{b^2}\right), (2)$$

де Q – ефективна потужність зварювального джерела нагріву; x_0 , y_0 – координати центру джерела нагріву; a, b – відповідні розміри (ширина і глибина) зони ефективного нагріву в напрямках x, y.

Рис. 2. Граничні умови і схема 2D моделі КЗЗ: (*a*) – обмежує переміщення в горизонтальній площині; (*b*) – обмежує переміщення в горизонтальній і вертикальній площині

Рис. 3. Скінченно-елементна сітка в зоні КЗЗ: *а* – до зварювання; *б* – після зварювання

Час нагріву металу кожного зварного або наплавного проходу в поперечному перерізі зварного з'єднання залежить від швидкості зварювання v_w і розміру зони ефективного нагріву *a*, тобто, в першому наближенні може дорівнювати $t_w = a/v_w$.

Параметри зварювального джерела нагріву обирались таким чином, щоб температура металу в зварному шві перевищувала температуру плавлення, а проміжку часу між проходами було достатньо для охолодження металу до температури супутнього підігріву.

Граничні умови на поверхнях елементів зварного з'єднання з урахуванням конвекційного теплообміну з навколишнім середовищем задавалися у вигляді:

$$q = -h(T_{\text{out}} - T), \tag{3}$$

де T_{out} – температура довколишнього середовища; q – тепловий потік; h – коефіцієнт теплопередачі з поверхні при конвекційному теплообміні з навколишнім середовищем.

Початкові умови при t = 0:

$$W(x,y,o) = 0, T_{\text{підігріву}} = 20...200 \,^{\circ}\text{C}, T_{\text{out}} = 20 \,^{\circ}\text{C}, (4)$$

де $T_{\text{підігріву}}$ – температура попереднього та супут-
нього підігріву.

З урахуванням гіпотези «плоскої деформації» розв'язок задачі з визначення розподілів просторових компонент напружень і деформацій отримано за допомогою двомірної моделі поперечного перерізу зварного з'єднання в пружньопластичній постановці, тобто тензор деформацій може бути представлений у вигляді суми тензорів:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p \quad (i, j = x, y, z), \tag{5}$$

де ε_{ij}^{e} – тензор пружних деформацій; ε_{ij}^{p} – тензор пластичних деформацій.

Компоненти тензорів напружень σ_{ij} та пружних деформацій ε^{e}_{ij} пов'язані один з одним законом Гука:

$$\varepsilon_{ij}^{e} = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma}{2G} + \delta_{ij}(K\sigma + \phi), \qquad (6)$$

де δ_{ij} – одиничний тензор (δ_{ij} = 0, якщо $i \neq j$, δ_{ij} = 1, якщо i=j); $\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})$; $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – модуль зсуву; $K = \frac{1-2\nu}{E}$ – податливість об'ємного

ISSN 0005-111Х АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ, №1, 2022

стиснення; *E* – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуассона; φ – функція вільних відносних подовжень (об'ємних змін), викликаних зміною температури і мікроструктурними фазовими змінами.

В простому випадку, коли структурних перетворень не відбувається:

$$= \alpha (T - T_0), \tag{7}$$

де α – коефіцієнт відносного температурного видовження матеріалу.

Φ

При зварюванні сталей, чутливих до термічного циклу зварювання, в ЗТВ можуть відбуватися структурні перетворення з помітними об'ємними змінами, врахування яких головним чином впливає на кінетику розподілу зварювальних напружень і деформацій. Сумарний ефект об'ємних змін від температури T_0 до T(t) визначається у вигляді [9]:

$$3\varphi = \frac{\sum V_{j}(T,t)\gamma_{j}(T) - \sum V_{j}(T_{0})\gamma_{j}(T_{0})}{\sum V_{j}(T_{0})\gamma_{j}(T_{0})}, \quad (8)$$

$$(j = a, \, \varphi \Pi, \, \delta, \, M)$$

де j – фази: аустеніт, ферито-перліт, бейніт, мартенсит; $\gamma_j(T)$ – об'єм одиниці маси j-ої фази при температурі T; $V_j(T)$ – частка (в долях від одиниці) j-ої фази при температурі T.

Величини $\gamma(T)$, (см³/г) для низьколегованих сталей приведені в залежності від вмісту вуглецю С, % [10]:

$$\begin{split} \gamma_{\alpha}(T) &= 0,12282 + 8,56 \cdot 10^{-6}(T-20) + 2,15 \cdot 10^{-3} \text{ C}, \\ \gamma_{M}(T) &= 0,12708 + 4,448 \cdot 10^{-6}(T-20) + 2,79 \cdot 10^{-3} \text{ C}, \\ \gamma_{6,\phi\pi}(T) &= 0,12708 + 5,528 \cdot 10^{-6}(T-20), (\text{cM}^3/\Gamma). \end{split}$$

Результати розрахунку масової частки кожної фази $V_j(T)$ в кінцевій мікроструктурі після охолодження залежать від швидкості охолодження в характерному інтервалі температур (швидкість охолодження від температури 800 до 500 °C).

Кінетика зміни величини $V_j(T)$ в інтервалі температур від T_s^j – початок появи *j*-ої фази до T_e^j – кінець появи *j*-ої фази при розпаді аустеніту визначається на основі співвідношень:

$$V_{j}(T) = V_{j}^{\max} \left[1 - \exp\left(a_{j} \frac{T_{sj} - T}{T_{sj} - T_{ej}}\right) \right]$$
(10)
$$a_{j} = -2,7 \ (j = M, \ \varphi \Pi, \ \delta);$$

$$V_a(T) = 1 - \sum_{\mathrm{M}, \phi \mathrm{II}, 6} V_j(T);$$
 (11)

де $V_a(T)$ – вміст залишкового аустеніту при температурі T.

Значення температур початку T_{sj} та кінця T_{ej} перетворень *j*-ої фази визначались згідно існуючих термокінетичних діаграм або діаграм анізотермічного розпаду аустеніту (АРА) відповідних сталей.

Пластичні деформації пов'язані з напруженим станом рівнянням теорії пластичної неізо-

термічної течії, асоційованої з умовою плинності Мізеса:

$$d\varepsilon_{ij}^{p} = d\lambda \cdot (\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) (i, j = x, y, z), \qquad (12)$$

де $d\varepsilon_{ij}^{p}$ – прирощення тензора ε_{ij}^{p} в даний момент часу *t*, обумовлений історією деформування, напруженнями σ_{ij} та температурою *T*; $d\lambda$ – скалярна функція, яка визначається умовами течії в наступному вигляді:

$$d\lambda = 0$$
, якщо $f = \sigma_i^2 - \sigma_T^2(T) < 0$ або $f = 0$,
при $df < 0$;
 $d\lambda > 0$, якщо $f = 0$ і $df > 0$;
стан $f > 0$ неприпустимий, (13)

де σ_i – інтенсивність напружень

$$\sigma_{i} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}\right)^{2} + \left(\sigma_{xx} - \sigma_{zz}\right)^{2} + \left(\sigma_{yy} - \sigma_{zz}\right)^{2} + 6\left(\sigma_{xy}^{2} + \sigma_{xz}^{2} + \sigma_{yz}^{2}\right)},$$

 $\sigma_T = (T)$ – межа плинності матеріалу при температурі *T*.

Рівняння (8) показує, що для отримання результатів щодо компонент залишкових напружень σ_{ij} і деформацій ε_{ij} необхідно розглядати процес розвитку пружнопластичних деформацій за часом, починаючи з деякого початкового стану. Для цього традиційно використовують метод послідовного простежування, коли для моменту *t* розв'язок шукається, якщо відомий повний розв'язок для моменту ($t - \Delta t$), де Δt – крок простеження розвитку пружнопластичних деформацій, в межах якого можна приблизно вважати, що розвиток відбувається за досить простою траєкторією навантаження. У цьому випадку зв'язок між кінцевими прирощеннями тензора деформацій $\Delta \varepsilon_{ij}$ і тензором напружень σ_{ij} відповідно до [9] можна записати у вигляді:

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \psi(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) + \delta_{ij}(K\sigma) - b_{ij}, \qquad (14)$$

де ψ – функція стану матеріалу в точці (*x*, *y*, *z*) в момент *t*.

$$\psi = \frac{1}{2G},$$
якщо $f < 0,$
 $\psi > \frac{1}{2G},$ якщо $f = 0,$ (15)

стан f > 0 є неприпустимим,

 b_{ij} – тензорна функція додаткових деформацій, яка визначається збільшенням $\Delta \varphi$ і відомими результатами попереднього етапу простеження:

$$b_{ij} = \left[\frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma}{2G} + \delta_{ij}(K\sigma)\right]_{t - \Delta t} + \delta_{ij}\Delta\varphi \ (i, j = x, y, z). \ (16)$$

Умови течії у вигляді (11) включають значну фізичну нелінійність в функції стану матеріалу ψ. Для реалізації такого типу фізичної нелінійності зазвичай використовують ітераційні процеси. В результаті на кожній ітерації фізично нелінійна задача переходить в лінійну задачу типу задачі теорії пружності зі змінним модулем зсуву, який дорівнює 1/2ψ, і додатковими деформаціями *b_{ij}*. Для розв'язку такої лінеаризованої задачі застосовують чисельні методи.

Розробка математичної моделі релаксації і перерозподілу залишкових напружень в КЗЗ під час термообробки. Зварні з'єднання відповідальних конструкцій піддаються післязварювальній термообробці. Згідно з вимогами нормативної документації [11] композитні зварні з'єднання конструкційних елементів обладнання АЕС після зварювання піддаються термообробці за режимом високого відпускання.

Згідно з п.13.18 [8] (на заміну [11]) виконання аустенітними присадними матеріалами зварних з'єднань деталей із сталями перлітного класу або з високохромистими сталями з деталями зі сталей аустенітного класу термічній обробці не підлягають за винятком випадків, обумовлених кресленнями і/або ПТД. Крім того, згідно п. 13.14 [12] температура відпуску зварних з'єднань деталей із сталей різних марок, для яких передбачена різна температура відпусток, встановлюється ПТД. Виходячи з вказаного вище, режими термообробки задавалися згідно вимог [6].

При проведенні математичного моделювання процесу післязварювальної термообробки КЗЗ (кришки КР) особливістю розробленої моделі визначення нестаціонарного температурного поля був конвекційний теплообмін на поверхнях за рахунок поступового нагрівання навколишнього середовища (повітря) в печі, витримки і подальшого досить повільного охолодження в печі, а потім на повітрі. Нестаціонарні граничні умови відповідали рівномірному підвищенню температури навколишнього середовища в процесі нагрівання і зниження температури до 20 °С при охолодженні.

Графік режиму термообробки, а саме, зміни температури навколишнього середовища T_{out} в процесі високого відпускання КР в печі при нагріванні зі швидкістю 30 °С/год, витримці протягом 9 год і охолодженні зі швидкістю 30 °С/год представлений на рис. 4.

Рис. 4. Графік зміни температури матеріалу КЗЗ в процесі термообробки за режимом високого відпуску при T = 650 °C: 1 - режим термообробки; 2 - розрахункова температура

Рис. 5. Результати моделювання залишкового мікроструктурного складу в зоні КЗЗ при $T_{\text{підігріву}}$ =100 °С: *а* – бейніт; *б* – ферито-перліт; *в* – мартенсит

Початкові і граничні умови крайової задачі визначення температурних розподілів в КЗЗ при термообробці за часом *t*:

при $T_{out}(0) = 20$ °C, T(0) = 20 °C $q = -h(T_{out}(t) - T), T_{out}(t) = 30$ °C/год · $t, T_{out}^{max} = 650$ °C.

Коефіцієнт тепловіддачі з поверхонь елементів КЗЗ при конвекційному теплообміні з навколишнім середовищем в печі і на повітрі приймався рівним значенню h = 30 Вт/м² °С в умовах природної конвекції і постійним у всьому діапазоні температури нагріву і охолодження. Променистий теплообмін в розробленій моделі окремо не моделювався, його вклад враховувався в деякому підвищенні значення коефіцієнта тепловіддачі.

Тривалий процес нагріву зварних конструкційних елементів до температури витримки 650 °С викликає процеси високотемпературної повзучості в матеріалі, що призводить до релаксації залишкових напружень в зоні зварних з'єднань.

У розробленій моделі задача визначення НДС при термообробці вирішувалася у в'язкопружнопластичній постановці [9]:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon^e_{ij} + \varepsilon^p_{ij} + \varepsilon^{cr}_{ij} \quad (i, j = x, y, z) , \qquad (17)$$

де швидкість деформацій повзучості визначалася за допомогою закону Бейлі-Нортона [13]:

$$\dot{\varepsilon}_{eq}^{cr} = A \cdot \sigma_{eq}^n \,. \tag{18}$$

Для аустенітної сталі 08Х18Н10Т при температурі 700 °С (973К) при визначенні швидкості деформацій температурної повзучості можуть бути прийняті наступні коефіцієнти: $A = = 6,948 \cdot 10^{-14}$ (МПа⁻ⁿ·год⁻¹), n = 6,22 [14].

Результати математичного моделювання температурних розподілів і мікроструктурних фазових перетворень. Результати моделювання мікроструктурних перетворень в металі КЗЗ під час зварювального нагріву ($T_{\text{підігріву}} = 100 \,^{\circ}\text{C}$) і подальшого охолодження показали (рис. 5) наявність локального утворення загартованих структур в ЗТВ металу патрубка (сталь 20) і в основному матеріалі кришки (сталь 15Х2НМФ). На рис. 6 представлені графіки зміни мікроструктурного фазового стану в характерній точці ЗТВ основного матеріалу кришки, де отримано максимальний залишковий вміст мартенситу, в залежності від температури підігріву. Застосування при зварюванні КЗЗ попереднього підігріву на рівні $T_{\text{підігріву}} = 200 \,^{\circ}\text{C}$ дозволяє знизити відносний вміст мартенситу в ЗТВ з 65 до 30 % у порівнянні зі зварюванням без підігріву.

Результати математичного моделювання залишкових напружень після зварювання і після термообробки. На рис. 7 представлені розподіли залишкових напружень після зварювання КЗЗ

Рис. 6. Кінетика мікроструктурних фазових перетворень в характерній точці ЗТВ основного матеріалу кришки (сталь 15Х2НМФА) для різних температур попереднього підігріву: a - 6ез підігріву; $\delta - T_{niдirpiby} = 100$ °C, $\epsilon - T_{nidirpiby} = 200$ °C; l - ферит; 2 - мартенсит; 3 - бейніт; 4 - аустеніт

Рис. 7. Залишкові напруження в КЗЗ після зварювання при Т_{підпріву} = 100 °С: а – радіальні; б – осьові; в – колові

Рис. 8. Залишкові напруження в КЗЗ після зварювання ($T_{\text{підігріву}} = 100 \text{ °C}$) і термообробки (T = 650 °C, $t_{\text{витримки}} = 15 \text{ год}$): $a - \text{раді$ $альні; } \delta - \text{осьові; } e - \text{колові}$

при температурі попереднього і супутнього підігріву $T_{\text{пілігріву}} = 100$ °C і наступного охолодження до T = 20 °C. Радіальна (відносно осі патрубка) компонента в зоні зварного з'єднання (рис. 7, а) характеризується в основному розтягувальними залишковими напруженнями до 200 МПа і локальними зонами максимальних напружень розтягу до 400 МПа в основному матеріалі кришки, який примикає до аустенітного металу шва, і в матеріалі патрубка, у верхній частині примикання до металу шву. Осьові (в напрямку осі патрубка) залишкові напруження (рис. 7, б) мають низький рівень в аустенітному матеріалі наплавки і зварного шва, а в основному матеріалі кришки і патрубка утворилися зони напружень стиску і розтягу до 400 МПа. Найбільш високі розтягувальні напруження (до 700 МПа) визначені для колової компоненти залишкових напружень (рис. 7, 6) в зоні основного матеріалу кришки, який примикає до аустенітного металу зварного шва.

Таким чином, після зварювання КЗЗ отримані досить високі залишкові напруження розтягу, які можуть негативно впливати на міцність кришки реактора при подальшій експлуатації. Тому застосування технологічної операції післязварювальної термообробки є цілком обґрунтованим. Після моделювання зварювання проводилось моделювання загальної термообробки за режимом високого відпуска при температурі 650 °С з часом витримки 15 год (див. рис. 4). Результати розрахунку приведені на рис. 8.

Аналіз впливу температури підігріву та режиму термообробки на залишкові напруження. З метою визначення впливу температури підігріву при зварюванні та режиму термообробки на залишкові напруження композитного (різнорідного) зварного з'єднання кришки корпусу реактора ВВЕР-1000 в представницьких перерізах (рис. 9) були побудовані графіки розподілу напружень по товщині зварного з'єднання (рис. 10–12).

Вплив температури підігріву при зварюванні на розподіл залишкових напружень незначний, у вибраному перерізі зварного з'єднання по глибині шва (рис. 10) максимальні залишкові напруження розтягу в радіальному напрямку при підвищенні температури підігріву помітно знижуються (з 220 до 120 МПа), інші компоненти (в осьовому та коловому напрямках) майже не змінюються.

Вплив термообробки (T = 650 °C) на розподіл залишкових напружень досить значний. Радіальні напруження помітно знижуються, особливо в зоні основного матеріалу кришки, з 300 до 30 МПа (рис. 11, *a*). Осьова компонента залишкових напружень в зоні матеріалу трубки і кришки знижується, а в аустенітному матеріалі зварного шва підвищується до 100 МПа (рис. 11, δ), що пов'язано з різницею в коефіцієнтах температурного розширення різних матеріалів КЗЗ.

Рис. 9. Перерізи для визначення напружень

Рис. 10. Вплив температури підігріву при зварюванні на розподіл залишкових напружень по глибині шва (переріз *b-b* рис. 9): *a* – радіальні; *б* – осьові; *в* – колові

Рис. 11. Вплив термообробки (*T* = 650 °C) на розподіл залишкових напружень по ширині шва (переріз *a-a* рис. 9): *a* – радіальні; *б* – осьові; *в* – колові: *I* – до термообробки; *2* – після термообробки

Рис. 12. Вплив часу витримки при термообробці (*T* = 650 °C) на розподіл залишкових напружень по ширині шва (переріз *a-a* рис. 9): *a* – радіальні; *б* – осьові; *в* – колові; *I* – 15 год; *2* – 9

Вплив часу витримки ($t_{витримки} = 15$ год) при термообробці (T = 650 °C) на розподіл залишкових напружень також незначний (рис. 12). Релаксація залишкових зварювальних напружень в значній мірі відбувається за першу годину витримки при максимальній температурі, а розподіл залишкових напружень після термообробки визначається в основному різницею теплофізичних властивостей різних матеріалів з'єднання.

Висновки

1. Аналіз результатів математичного моделювання НДС в композитному зварному з'єднанні кришки корпусу реактора ВВЕР-1000 з патрубком СУЗ показав, що розподіл залишкових напружень після зварювання має складний характер з властивими для з'єднань із різнорідних матеріалів високими напруженнями розтягу в зонах феритно-перлітних матеріалів (основного матеріалу кришки сталі 15Х2НМФА і патрубка сталь 20).

2. Визначено, що при зварюванні КЗЗ без підігріву залишковий вміст загартованих структур в ЗТВ металу патрубка (сталь 20) і в основному матеріалі кришки (сталь 15Х2НМФ) може досягати 65 %. Застосування попереднього (супутнього) підігріву дозволяє суттєво знизити відносний вміст мартенситу в основному матеріалі кришки і патрубка на границі сплавлення з аустенітним матеріалом шва.

3. Післязварювальна термообробка за режимом високого відпуску (T = 650 °C) знижує рівень залишкових напружень, але за рахунок значної різниці в коефіцієнтах температурного розширення різнорідних матеріалів з'єднання утворюються нові досить високі залишкові напруження розтягу в зонах аустенітних наплавних матеріалів.

Список літератури

- Махненко О.В., Сапрыкина Г.Ю. (2002) Роль математического моделирования в решении проблем сварки разнородных сталей (обзор). Автоматическая сварка, 3, 18–28.
- Махненко О.В., Козлитина С.С., Дзюбак Л.И., Кравец В.П. (2010) Риск образования карбидов и σ-фазы при сварке высоколегированных хромоникелевых сталей. *Там же*, **12**, 9–12.
- 3. Wenchun Jiang, Wanchuck Woo, Yun Luo, J.H. Li. (2017) Residual Stress Distribution in a Dissimilar Weld Joint by Experimental and Simulation study. *Journal of Pressure Vessel Technology*, **2**, 139, 011422-1-011422-10.
- 4. Dean, Deng, Kazuo, Ogawa, Shoichi, Kiyoshima et al. (2009) of residual stresses in a dissimilar metal welded pipe with considering cladding, buttering and post weld heat treatment. *Computational Material Science*, 47, 398–408.
- 5. Касаткин О.Г., Царюк А.К., Скульский В.Ю. и др. (2007) Способ повышения сопротивляемости локальным повреждениям сварных соединений трубопроводов АЭС. *Автоматическая сварка*, **3**, 32–35.
- 6. 1160.02.02.000 ПС. Паспорт сосуда. Блок верхний YC00B01. Зав. № 2.1
- 7. 1160.02.18.000ТБ1 Крышка. Таблица контроля качества.
- 8. 1160.02.18.000ТБ2 Крышка. Таблица контроля качества.
- Махненко В.И. (1976) Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. Киев, Наукова думка.
- Юрьев С.Ф. (1950) Удельные объемы фаз в мартенситном превращении аустенита. Москва, Металлургиздат.
- (1989) ПНАЭ Г-7-009-89. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварка и наплавка. Основные положения. Москва, ЭНЕРГАТОМИЗДАТ.
- СОУ НАЕК 159 Обеспечение технической безопасности. Сварка и наплавка оборудования и трубопроводов атомных электрических станций с реакторами ВВЭР. Технические требования.
- Работнов Ю.Н. (1966) Ползучесть элементов конструкций. Москва, ГИФМЛ.
- Margolin, B. Z., Gulenko, A. G., Kursevich, I. P., Buchatskii, A. A. (2006) Modeling for fracture in materials under longterm static creep loading and neutron irradiation. Part 2. Prediction of creep rupture strength for austenitic materials. *Strength of Materials*, 38(5), 449–457.

References

- 1. Makhnenko, O.V., Saprykina, G.Yu. (2002) Role of mathematical modeling in solving problems of welding dissimilar steels (Review). *The Paton Welding J.*, **3**, 14-25.
- Makhnenko, O.V., Kozlitina, S.S., Dzyubak, L.L., Kravets, V.P. (2010) Risk of formation of carbides and α-phase in welding of high-alloy chrome-nickel steels. *Ibid.*, 12, 5-8.
- Wenchun Jiang, Wanchuck Woo, Yun Luo, J.H. Li. (2017) Residual stress distribution in a dissimilar weld joint by experimental and simulation study. *J. of Pressure Vessel Technology*, 2(139), 011422-1-011422-10.
- Dean, Deng, Kazuo, Ogawa, Shoichi, Kiyoshima et al. (2009) Simplified methodology to compute the residual stresses in a dissimilar metal welded pipe with considering cladding, buttering and post weld heat treatment. *Computat. Mater. Sci.*, 47, 398–408.
- Kasatkin, O.G., Tsaryuk, A.K., Skulsky, V.Yu. et al. (2007) Method for improving local damage resistance of welded joints in NPP pipelines. *The Paton Welding J.*, **3**, 27-30.
- 6. 1160.02.02.000 PS: Certificate of vessel. Upper block YC00B01. 2.1 [in Russian].
- 7. 1160.02.18.000TB1: Cover. Table of quality control [in Russian].
- 8. 1160.02.18.000TB2: Cover. Table of quality control [in Russian].
- 9. Makhnenko, V.I. (1976) Calculated methods of investigation of welding stresses and strains. Kiev: Naukova Dumka [in Russian].
- 10. Yurjev, S.F. (1950) Specific volumes of phase in martensitic transformation of austenite. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
- 11. (1989) PNAE G-7-009-89: Equipment and pipings of nuclear power plants. Welding and surfacing. Fundamentals. Moscow, Energoatomizdat [in Russian].
- 12. SOU NAEK 159: Assurance of technical safety. Welding and surfacing of equipment and pipings of nuclear power plants with WWER reactors. Technical requirements.
- 13. Rabotnov, Yu.N. (1966) Creep of structural elements. Moscow, GIFML [in Russian.
- Margolin, B. Z., Gulenko, A. G., Kursevich, I. P., Buchatskii, A. A. (2006) Modeling for fracture in materials under long-term static creep loading and neutron irradiation. Pt 2. Prediction of creep rupture strength for austenitic materials. *Strength of Materials*, 38(5), 449–457.

MATHEMATICAL MODELING OF RESIDUAL STRESSES IN COMPOSITE WELDED JOINTS OF WWER-1000 REACTOR VESSEL COVER WITH CPS NOZZLES

A.A. Makarenko, O.V. Makhnenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The composite welded joints of the WWER-1000 reactor vessel cover with the nozzles of the control and protection system (CPS) are the object of the strength calculation when justifying the extension of the service life of NPP units. Mathematical modeling by the finite element method of the kinetics of residual stress formation during welding of the WWER-1000 reactor vessel cover with CPS nozzles and their redistribution as a result of post-welding heat treatment was performed. The effect of preheating on the microstructural phase transformations in HAZ of the main material of the cover and the nozzle was studied. The main features of the distribution of residual stresses in the composite welded joints after welding and heat treatment are determined. 14 Ref., 1 Tabl., 12 Fig.

Keywords: composite welded joint, reactor vessel cover, WWER-1000, HAZ, microstructural phase transformations, residual stresses, heat treatment, mathematical modeling

Надійшла до редакції 20.10.2021

VI МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ

Титан 2022: Виробництво та застосування

Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України 30 травня – 1 червня 2022 www.pwi-scientists.com/ukr/titan2022

ФОРМУВАННЯ ЗОНИ ПРОПЛАВЛЕННЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛУ ПРИ ДУГОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ З ДІЄЮ ПОЗДОВЖНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ

О.Д. Размишляєв¹, М.В. Агєєва²

¹ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет». 87500, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7. E-mail: razmyshljaev@gmail.com

²Донбаська державна машинобудівна академія. 84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.

E-mail: maryna_ah@ukr.net

В роботі експериментально підтверджено припущення, що поздовжнє магнітне поле (ПДМП) при дуговому наплавленні під флюсом може чинити гальмуючу дію на швидкість руху рідкого металу в зварювальній ванні. Розрахунковим методом і фізичним моделюванням встановлені значення гальмуючого зусилля в залежності від швидкості руху електропровідних тіл при дії ПДМП. Виконані експерименти при дуговому наплавленні дротом під флюсом показали, що при дії як постійного, так і знакозмінного ПДМП частотою 50 Гц товщина прошарку рідкого металу в ванні під дугою збільшується приблизно в 1,5...2,0 рази. Це дозволяє зробити висновок, що факт зниження глибини проплавлення основного металу при наплавленні з дією ПДМП обумовлений гальмуючою дією магнітного поля на швидкість потоків рідкого металу в ванні, збільшенням за рахунок цього товщини прошарку рідкого металу під дугою і погіршенням ефективності передачі тепла дуги до основного металу. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: дугове наплавлення, поздовжнє магнітне поле, індукція, гальмування потоків, глибина проплавлення

Вступ. В роботах [1, 2] показано, що при дуговому зварюванні і наплавленні дротом під флюсом з дією поздовжнього магнітного поля (ПДМП) має місце значне зменшення глибини і площі проплавлення основного металу і частки основного металу у наплавленому. При GMAW і ТІС-зварюванні з дією ПДМП [3-7] також відбувається зниження глибини проплавлення основного металу і це обумовлено зниженням зусилля плазми стовпа дуги на рідкий метал зварювальної ванни під дугою. В роботі [1] показано, що при дуговому наплавленні дротом Св-08ГА під флюсом АН-348А на пластини зі сталі ВМСт3сп і дротом Св-06Х18Н9Т на пластини зі сталі 12Х18Н10Т під флюсом АН-20С з дією постійного і знакозмінного частотою 50 Гц ПДМП відбувається не тільки зменшення глибини проплавлення, але й форми контуру (обрису) цієї зони. Зроблено припущення, що при наплавленні з дією ПДМП зменшується тиск дуги на рідкий метал під дугою, збільшується товщина прошарку рідкого металу під дугою, що призводить до зменшення глибини проплавлення основного металу. В цій же роботі зроблено припущення, що зростання товщини прошарку рідкого металу під дугою може бути обумовлено тим, що при дії ПДМП гальмується рух рідкого металу з під дуги до хвостової частини зварювальної ванни. Але ці припущення не мають експериментального підтвердження.

Метою даної роботи є встановлення особливостей руху рідкого металу в зварювальній ванні при дуговому наплавленні плавким електродом (дротом) з дією зовнішнього (керуючого) поздовжнього магнітного поля для встановлення причин його впливу на зниження глибини проплавлення і зміну форми зони проплавлення основного металу.

Матеріали і методики. В роботі [1] показано, що при дуговому наплавленні (зварюванні) з дією ПДМП в зварювальній ванні виникає сила, яка направлена зустрічно швидкості потоків рідкого металу. Ця сила діє як на рідкий метал, так і на метал в твердому стані. Для експериментального підтвердження гальмуючої дії ПДМП на рух електропровідних тіл виконаний пристрій для досліджень (рис. 1, а). Схема до розрахунку гальмуючої дії ПДМП представлена на рис. 1, б. Установка для досліджень представляла собою фізичний маятник. На жорстких нитках (мідних дротах діаметром 0,65 мм) (1) закріплювали диски (2) з припою марки ПОС-40. Розміри дисків з припою ПОС-40 становили: діаметр – 66 мм, товщина була у різних серіях різною та становила 1,5; 2,8 та 7 мм, при цьому вага цих дисків відповідно становила: 33,7; 67,44 і 126 г. Генерування ПДМП здійснювалось соленоїдом (3) з числом витків W = 144. Зазор між торцем цього соленоїда та масивною пластиною (4) з низьковуглецевої сталі (феромагнітної) товщиною 40 мм становив H = 30 мм. Дротики (1) кріпили до шарикопідшипника (5). Розподіл індукції у цьому зазорі був досить рівномірним, хоча був незначний градієнт (зниження) індукції ПДМП у бік пластини (4).

<u>Размишляєв О.Д.</u> – https://orcid.org/0000-0001-6616-7717, Агеева М.В. – https://orcid.org/0000-0001-8275-6781 © О.Д. Размишляєв, М.В. Агеева, 2022

Рис. 1. Схема пристрою для досліджень (*a*) і схема до розрахунку (*б*) гальмуючої дії ПДМП на рух електропровідних тіл (позначення див. у тексті)

Необхідно було враховувати сили тертя в шарикопідшипнику (5), а також дротиків (1) і диска (2) о повітря. Для визначення (обчислення) сили гальмування, пов'язаної з дією ПДМП на досліджуваний диск (2), необхідно від загальної гальмуючої сили відняти зазначені вище сили, пов'язані з тертям у підшипнику та опором повітря.

Вирішували це завдання в такий спосіб. Оскільки період *T* за весь час коливань (аж до зупинки диска) є незмінною величиною [8], тоді шлях, що проходить центр тіла – диска (2) пропорційний числу коливань. Наприклад, в межах загасання амплітуди маятника від відстані $x_1 = 6$ см до відстані $x_2 = 3$ см (за *n* коливань) пройдений шлях становить (середні значення):

$$S_{\rm cp} = 4 \frac{x_1 + x_2}{2} n \,. \tag{1}$$

Розрахунки без дії ПДМП. Тут діють лише сили опору $F_{00} = X_1$.

Приймемо, що кількість коливань, за які центр диска (2) зміститься на відстань від x_1 до $x_2 - n_1$. Тоді робота сил тертя, що припадає на зміни відстані Δx (від x_1 до x_2) – x_1n_1 . Тобто зменшення при цьому потенційної енергії:

$$\Delta E_{\rm m} = x_1 n_1. \tag{2}$$

Розрахунки з дією ПДМП. У цьому випадку діють дві сили: $F_{\rm on} + F_{\rm r}(F_{\rm r} - сила гальмування за рахунок дії ПДМП).$

Нехай $F_r = x_2$, а число коливань центру диска у цьому випадку – n_2 ($n_2 < n_1$). Тоді робота сил тертя дорівнює $x_1n_2 + x_2n_2$. Тобто зменшення потенційної енергії у цьому випадку:

$$\Delta E_{\rm m} = x_1 n_2 + x_2 n_2. \tag{3}$$

Тоді маємо систему рівнянь:

$$x_1 n_1 = \Delta E_{\rm n}, \tag{4}$$

 $x_1n_2 + x_2n_2 = \Delta E_n$. (5) З формули (4) отримуємо, що $x_1 = \Delta E_n/n_1$. Підставимо це значення x_1 до рівняння (5), тоді отримаємо:

$$X_1 = \Delta E_{\pi} \frac{n_1 - n_2}{n_1 n_2} = \Delta E_{\pi} \frac{\Delta n}{n_1 n_2}, \qquad (6)$$

де $\Delta n = n_1 - n_2$.

У цих міркуваннях у лівій частині рівнянь (4), (5) – робота сил тертя A, що припадає на зміни відстані Δx (від x_1 до x_2), або зниження центру ваги диска (2) на величину Δh (див. рис. 1, δ).

При цьому $A = F_{\Gamma}S_{cp} = P\Delta h = \Delta E_{\Pi}$ і тоді:

$$F_{\rm r} = \frac{\dot{P}\Delta h}{S_{\rm cp}} \cdot \frac{\Delta n}{n_1 n_2} \,. \tag{7}$$

З формули (7) виникає, що отриманий результат (F_r) є функцією, яка залежить від ваги диска P, тобто $F_r = f(P)$. Проведені експерименти показали, що F_r від ваги P практично не залежить.

Дугове наплавлення здійснювали дротом Cв-08ГА діаметром 4 мм під флюсом AH-348A на режимі: $I_{\rm H} = 700...750$ A, $U_{\rm g} = 32...33$ B, $v_{\rm H} = 27$ м/год і при значеннях індукції ПДМП 50, 100, 150 мТл.

Експериментальні дослідження та результати. Виконували серії експериментів по встановленню значень гальмуючого зусилля при дії ПДМП з дією постійної величини індукції на різних швидкостях руху диска (рис. 1, поз. 2). При цьому значення швидкості обчислювали за формулою [8]:

$$V = \sqrt{2gl\Delta\cos\varphi} , \qquad (8)$$

де $\Delta \cos \varphi = \cos \varphi - \cos \varphi_{o}; \varphi - поточний кут; \varphi_{o} - по$ $чатковий кут (рис. 1, <math>\delta$).

Встановлено, що постійне та частотою 50 Гц ПДМП аналогічно впливає на F_r (рис. 2). Однак за інших рівних умов сила F_r при дії ПДМП частотою 50 Гц дещо менша, ніж при дії постійного ПРМП (при рівній індукції). Сила гальмування F_r лінійно збільшується зі збільшенням швидкості руху диска (рис. 2, *a*). При збільшенні індукції ПДМП сили гальмування F_r збільшуються нелінійно, за квадратичною залежністю (рис. 2, *б*).

Досліджували гальмуючу дію ПДМП частотою 50 Гц на швидкість потоків у ванні фізичним моделюванням процесу. Схема пристрою, матеріали і методика експериментів були такими, які описані в роботі [9]. В головній частині модельної ванни на глибину 3...4 мм опускали штир 3 діаметром 7 мм з латуні (рис. 3). Торець цього штиря мав форму півсфери і був залужений припоєм ПОС-40. Після цього забезпечували протікання струму між штирем-електродом (рис. 3, 3), розплавленим припоєм – ванною (1) та пластиною–виробом (2) від зварювального випрямляча (включення відпові-

Рис. 2. Залежність сили гальмування *F*_г від максимальної швидкості переміщення диска (*a*) та від індукції *B*₂ ПДМП (*б*): *a* – *1*, 2 – *B*₂ = 150 мТл; 3, 4 – *B*₂ = 63…66 мТл; *1*, 3 – постійне ПДМП; 2, 4 – змінне частотою 50 Гц ПДМП; *б* – *1* – постійне ПДМП; 2 – знакозмінне частотою 50 Гц ПДМП

дало зворотній полярності). Струмопідведення до пластини–виробу (2) здійснювали з боку головної частини модельної ванни («перед дугою»).

Пристрій введення ПДМП розміщували співісно з електродом (3). Струм у котушці пристрою введення ПДМП (на рис. 3 не приведений) пропускали від трансформатора типу ТД-402. Швидкість руху рідкого металу у модельній ванні (в розплавленому припої) вимірювали зануренням в неї

Рис. 3. Схема модельної ванни для вивчення в ній руху рідкого металу: *І* – розплавлений припій – ванна; *2* – пластина–виріб; *3* – штир-електрод

в якості зонда тонкої прямокутної металевої пластинки розмірами 4×4 мм. При вимірюванні компоненти швидкості V_z зонд поміщали в т. А, а компоненти V_x – в точку В (рис. 3). Швидкість потоків обчислювали після вимірювання зусилля (напору) потоку рідкого металу на зонд за методикою, наведеною в роботі [9].

Експериментальні дані підтвердили положення про те, що змінне (у даному випадку частотою 50 Гц) ПДМП гальмує потоки рідкого металу ванни (рис. 4). При цьому компоненти швидкості потоку V_z і V_x практично лінійно зменшуються при збільшенні індукції B_z ПДМП.

Обговорення. Можна вважати, що при наплавленні дротом під флюсом дія ПДМП, як і при GMAW та TIG-зварюванні, призводить до змен-

Рис. 4. Залежність швидкості потоку $V_z(I)$ та $V_x(2)$ від індукції ПДМП частотою 50 Гц (I = 500 А)

шення тиску (зусилля) дуги на рідкий метал під зварювальною дугою, до зростання діаметра стовпа дуги [3–7]. На формування плоскої форми обрису зони проплавлення, яку спостерігали в роботі [9], впливають і особливості каплеперенесення при дуговому наплавленні з дією ПДМП.

При дії як постійного, так і знакозмінного частотою 50 Гц ПДМП краплі на торці електрода набувають імпульс сили та швидкості, спрямовані по дотичній до кола і вниз, тобто вони рухаються конусною поверхнею. Своїм тепловмістом та імпульсом краплі сприяють зростанню проплавлення металу по краях валика. Однак основний внесок у загальне зниження глибини $H_{\rm np}$ та площі проплавлення основного металу $F_{\rm np}$ при дії ПДМП вносить гальмуюча дія ПДМП на швидкість потоку (в хвостову частину ванни з головної її частини).

Вважали, що гальмуюча дія ПДМП частотою 50 Гц на швидкість потоків рідкого металу з головної частини ванни в хвостову її частину найкраще проявиться, якщо здійснювати дугове наплавлення «на підйом». Для перевірки цього припущення були виконані наплавлення як на горизонтальні пластини, так і з нахилом їх до горизонту на кут 8°.

Встановлено, що при наплавленні без дії магнітного поля нахил пластини (наплавлення на «підйом») збільшив глибину проплавлення з 7,8 до 12,2 мм. При наплавленні з дією ПДМП частотою 50 Гц на горизонтальну пластину глибина проплавлення зменшилась до 3,5 мм. При наплавленні «на підйом» з дією ПДМП частотою 50 Гц глибина проплавлення зменшилась і склала 3,6 мм.

Таким чином ПДМП частотою 50 Гц надає гальмуючу дію на рух рідкого металу з головної частини ванни в хвостову її частину при наплавленні «на підйом». Зменшення ефективності проплавлення металу при дії ПДМП слід пояснювати, виходячи з факту гальмування швидкості потоку рідкого металу з головної частини ванни в хвостову її частину, збільшенням товщини прошарку рідкого металу під дугою та погіршенням умов передачі тепла від зварювальної дуги до основного металу.

При дії постійного ПДМП ситуація більш складна. В роботі [9] показано, що при струмі Товщина прошарку рідкого металу під дугою при дуговому наплавленні (10⁻³ м)

	Характер наплавлення					
Нахил пластини	Без дії	3 дією ПДМП				
	ПДМП	постійне поле	частота 50 Ги			
Горизонтальна пластина	2,7	3,8	4,0			
Нахил пластини під кутом 8° до горизонту	2,5	3,8	4,1			

I = 500 А в модельній ванні на відстані $10 \cdot 10^{-3}$ м від вісі електрода (зварювальної дуги) в напрямку хвостової частини ванни швидкість потоку рідкого металу зростає при дії постійного ПДМП до значень індукції магнітного поля 50 мТл, і швидкість потоку не зростає, якщо індукція більша, ніж 50 мТл. Глибина проплавлення основного металу при дуговому наплавленні з дією постійного ПДМП також зростала, якщо індукція ПДМП була більша, ніж 50 мТл [1]. Слід вважати, що при індукції $B_{2} \leq 50$ мТл ПДМП збільшується швидкість потоків рідкого металу в зварювальній ванні через дію сил Лоренца, а якщо індукція значно більша, ніж 50 мТл (наприклад: 50, 100, 150 мТл), то постійне ПДМП вже гальмує рух рідкого металу в зварювальній ванні і це призводить до зростання товщини прошарку рідкого металу під зварювальною дугою і до зменшення глибини проплавлення основного металу при дуговому наплавленні.

Досліджували вплив ПДМП на товщину прошарку рідкого металу під дугою при дуговому наплавленні. Матеріали при наплавленні і режими наплавлення були такими ж, які були при виконанні досліджень впливу ПДМП на глибину проплавлення металу. Дослідження виконували за методикою, наведеною в роботі [10]. При наплавленні індукція в зоні основного металу під зварювальним електродом (під дугою) складала 100 мТл. Дані (таблиця) підтверджують зроблене раніше припущення, що при дії як постійного, так і знакозмінного ПДМП частотою 50 Гц товщина прошарку рідкого металу під дугою збільшується (вона значно зростає, приблизно в 2 рази).

Отримані в цій роботі дані дозволяють дати таку рекомендацію: для того, щоб при дуговому наплавленні ділянок «на підйом» (наприклад, при переході з горизонтальних ділянок) зберегти незмінним значення глибини проплавлення основного металу необхідно (доцільно) використовувати (включати) ПДМП частотою 50 Гц з індукцією в межах 100...150 мТл.

Заключення. Розрахунки і фізичне моделювання дозволили встановити, що значення гальмуючої сили на електропровідні тіла зростають при зростанні їх швидкості переміщення в постійному і знакозмінному частотою 50 Гц поздовжньому магнітному полі, а також при зростанні індукції цих магнітних полів.

Фізичне моделювання дозволило встановити, що при протіканні струму 500 А в рідкому металі модельної ванни збільшення індукції ПДМП частотою 50 Гц від нульових значень до 175 мТл знижує компоненту швидкості руху рідкого металу в 1,5...2,0 рази, тобто чинить значну гальмуючу дію на швидкість руху рідкого металу в зварювальній ванні. Встановлені експериментально дані про збільшення прошарку рідкого металу під зварювальною дугою при дуговому наплавленні з дією ПДМП підтверджують припущення, що зменшення глибини проплавлення металу при наплавленні з дією ПДМП обумовлено його гальмуючою дією на швидкість потоків в рідкому металі зварювальної ванни.

Список літератури/References

Ч

- Razmyshlyaev, A.D., Mironova, M.V. (2008) Peculiarities of base metal penetration in arc surfacing in longitudinal magnetic field. *The Paton Welding J.*, 8, 18–22.
- 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. Boldyrev, А.М., Birzhev, V.A., Chernykh, A.V. (1993)
- Control of penetration depth in arc welding and surfacing by longitudinal alternating magnetic field. *Svarochn. Proizvodstvo*, **6**, 30–31 [in Russian].
- 3. Chang, Y.-l., Bai, J., Liu, D., Mei ,Q. (2016) Influence of longitudinal magnetic field on welding arc and formation of

weld bead in CO, welding. *Journal of Shenyang University* of Technology, 38, 6, 612–617.

- Wang, L., Wu, C., Chen, J., Gao, J. (2018) Influence of the external magnetic field on fluid flow, temperature profile and humping bead in high speed gas metal arc welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 116, 1282–1291.
- Hua, A., Yin, S., Chen, S. et al. (2010) Behavior of arc and drop transfer of mag welding controlled by longitudinal magnetic field. *Journal of Mechanical Engineering*, 46, 14, 95–100.
- Yin, X., Gou, J., Ma, N. (2011) Numerical simulation of arc and weld pool for GTAW in external axial magnetic fields. *Transactions of JWRI, Special Issue on WSE 2011*, 17–27.
- Mou, G., Hua, X., Wang, M. et al. (2020) Effect of axial magnetic field on cold metal transfer arc-brazing of Ti6Al4V to 304L steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 275, 116322.
- 8. Яблонский А.А., Никифорова В.М. (2002) *Курс теоретической механики*. Санкт-Петербург, Лань.
- Razmyshlyaev, A.D., Mironova, M.V., Deli, A.A. (2010) Speed of metal flows in the pool in arc surfacing in a longitudinal magnetic field. *Welding International*, 24, 8, 627–630.
- Boldyrev, A.M., Birzhev, V.A., Chernykh, A.V. (1993) Calculation of hydrodynamic parameters of liquid metal at the bottom of the molten pool in arc welding. *Ibid*, 7(6), 481–483.

FORMATION OF THE PENETRATION ZONE OF THE BASE METAL IN ARC SURFACING WITH THE ACTION OF A LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD O.D. Razmyshlyaev¹, M.V. Ahieieva²

¹State Higher Educational Establishment «Pre-Azov State Technical University» (PSTU). 7, Universitetskaya Str., 87500, Mariupol, Ukraine. E-mail: razmyshljaev@gmail.com

²Donbass State Machine Building Academy, 72, Akademicheskaya Str., 84313, Kramatorsk, Ukraine. E-mail: maryna_ah@ukr.net

In the work, the assumption was experimentally confirmed that the longitudinal magnetic field (LMP) in submerged arc surfacing can have a braking effect on the speed of movement of liquid metal in the welding pool. Using the calculation method and physical modelling, the values of the braking force depending on the speed of movement of electric conductive bodies under the action of LMP were established. The performed experiments in arc surfacing using the submerged wire showed that at the action of both constant as well as alternating LMP of 50 Hz frequency, the thickness of the interlayer of liquid metal in the pool under the arc increases by approximately 1.5...2.0 times. This allows concluding that the fact of decrease in the penetration depth of the base metal during surfacing with the action of LMP is predetermined by the braking effect of the magnetic field on the speed of liquid metal flows in the pool, followed by increase in the thickness of the interlayer of liquid metal under the arc and deterioration of the efficiency of the arc heat transfer to the base metal. 10 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

Keywords: arc surfacing, longitudinal magnetic field, induction, flow braking, penetration depth

Надійшла до редакції 08.11.2021

УКАЗ ПРЕЗИДЕНТА УКРАЇНИ №660/2021

(витяг)

Про присудження Національної премії України імені Бориса Патона 2021 року.

На підставі подання Комітету з Державних премій України в галузі науки і техніки постановляю:

Присудити Національну премію України імені Бориса Патона 2021 року:

за роботу «Фізичні основи та інноваційні технології ультразвукового оброблення матеріалів»:

КЛОЧКОВУ Іллі Миколайовичу – кандидатові технічних наук, ученому секретареві Інституту

електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України;

СОЛОВ'Ю Сергію Олександровичу – кандидатові технічних наук, провідному науковому співробітникові Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України.

Президент України В. ЗЕЛЕНСЬКИЙ

16 грудня 2021 року

гЬ

ρ

ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ФУТЕРУВАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ В СТРУМОПІДВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ

А.В. Нетяга, Ю.М. Кусков, В.М. Проскудін, В.О. Жданов

IE3 ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. Е-mail: office@paton.kiev.ua Показано, що в умовах жорсткого абразивного зношування, властивого деталям обладнання гірничо-металургійного комплексу, необхідно використовувати наплавлення високозносостійкими матеріалами, зокрема, високохромистим чавуном. Такі футерувальні шари можна наносити за допомогою електрошлакового наплавлення в струмопідвідному кристалізаторі різного перерізу. При цьому можливе застосування як відновлювального, так і виготовлюваного наплавлення. Показано особливості наплавлення кожним із цих способів. Проводяться промислові випробування наплавлених футеровок стосовно деталей щокової дробарки СМД-11 і ковша навантажувача. Бібліогр. 7, табл. 1, рис. 3.

Ключові слова: електрошлакове наплавлення, струмопідвідний кристалізатор, футерувальні елементи, зношування

Вступ. За масою і розмірами устаткування, що використовується, гірничо-металургійний комплекс можна віднести до найбільш металомістких галузей промисловості. Зростання одиничної потужності дробильно-розмольного обладнання підвищує його продуктивність, збільшує час роботи внаслідок зменшення простоїв у ремонті. Потужна дорожньо-будівельна техніка дозволяє здійснювати вилучення, перенесення і навантаження великих мас різних типів порід, що розробляються.

Чорна металургія України виробляє близько 30 % обсягу промислової продукції та забезпечує майже половину валютних надходжень країни. За обсягами виробництва та експорту металопродукції Україна впевнено входить до першої десятки світових виробників сталі [1, 2].

Створення все більш потужного обладнання та інтенсивне його використання в жорстких умовах експлуатації призводить до великих втрат зношуваного металу робочих органів та їх передчасного виходу з ладу. Одним із способів продовження терміну його служби є електрошлакове наплавлення (ЕШН), яке отримало свій розвиток практично відразу ж з відкриттям електрошлакового процесу.

Однією з перспективних технологій виготовлення та відновлення деталей, що зношуються, є електрошлакове наплавлення в струмопідвідному кристалізаторі (СПК). Основою його є використання при ЕШН оригінальної конструкції порожнистого водоохолоджуваного невитратного електрода, що забезпечує одночасно виконання кількох функцій: підтримка електрошлакового процесу із забезпеченням формування наплавного металу і обертання шлакової та металевої ванни в горизонтальній площині [3].

Основний досвід його використання було отримано за відновлення валків прокатних станів на металургійних підприємствах України та Російської Федерації. В даний час накопичені знання дозволяють розширити його застосування і на інші об'єкти, що експлуатуються в умовах навіть складніших, ніж прокатні валки.

Метою даної роботи є обговорення особливості і можливості використання технології ЕШН в СПК стосовно деталей і вузлів обладнання, експлуатація якого супроводжується великими втратами металу робочих поверхонь і прискореним виходом їх з ладу, зокрема, щокових дробарок і ковшів кар'єрних екскаваторів і навантажувачів.

Обговорення. Враховуючи, що при експлуатації даного обладнання процес зношування відбувається з великою інтенсивністю, для його зниження робочі органи оберігають від зношування установкою захисних футеровок (броні), найчастіше виготовлених зі сталі 110Г13Л. Однак, як видно з таблиці, довговічність таких футеровок вимірюється кількома днями [4].

У разі переробки залізистих кварцитів Інгулецького ГЗК швидкість зносу броней дробарок КМДТ-2000 змінюється від 0,15 до 0,20 мм/ч [5].

ЕШН в СПК дозволяє використовувати як наплавні матеріали, сплави більш зносостійкі, ніж сталь 110Г13Л, зокрема, високохромисті чавуни з 15...30 % Сг.

Основною відмінністю даної технології наплавлення такого типу матеріалів від отримання футерувальних біметалічних листів методом дугового наплавлення порошковими стрічками [6] є повна відсутність у наплавленому металі тріщин, що визначається особливостями протікання теплових процесів за наявності високотемпературної шлакової ванни.

© А.В. Нетяга, Ю.М. Кусков, В.М. Проскудін, В.О. Жданов, 2022

		-		
Агрегат	Відливка	Маса відливок, кг	Термін служби, дні	Причини виходу із ладу
III.awana maƙanwa	Бронь средньої нижньої щоки	1145	68	Стирання, злам
цекова дробарка	Бронь крайньої нижньої щоки	690	68	Стирання
Кульовий млин	Футеровка	250	12	<>>
10	Бронь конусу	890	12	<<->>>
конусна дробарка	Бронь нерухома	900	12	<<->>>

Термін служби деяких футеровок (з бронею) зі сталі 110Г13Л гірничо-металургійного виробництва

Наплавні матеріали можуть виготовлятися у вигляді дискретних присадок [7] або у вигляді електродів великого перерізу.

В даний час найбільші випробування технології пройшло при наплавленні в СПК круглого перерізу 80...180 мм. У зв'язку з тим, що в більшості випадків ставиться завдання отримання футеровок з товщиною наплавленого шару не більше 30...50 мм, тому використовується техніка наплавлення в стаціонарному кристалізаторі. При таких наплавлюваних товщинах наплавлений шар має можливість кристалізуватися в формувальній секції СПК без порушення стабільності електрошлакового процесу. Крім того, відсутність при наплавленні відносного переміщення СПК і шару, що наплавляється, дозволяє виключити стеження за рівнем металевої ванни і спростити конструкцію СПК, перетворивши її з звичайно застосовуваного трисекційного пристрою в двосекційний (без наявності проміжної секції).

Незалежно від умов експлуатації зношувальних деталей та економічної ефективності технології їх зміцнення запропоновано кілька способів виконання наплавних робіт. Насамперед, це наплавлення зносостійких шарів на окремі сталеві заготовки з низьколегованої сталі з розмірами, що відповідають діаметру формувальної секції СПК. Надалі ці біметалічні «кнопки» локально приварюються по сталевій основі до робочих поверхонь деталі. Останні теж можуть бути виготовлені з того ж типу сталі (виготовлювальне наплавлення) або бути попередньо механічно обробленою поверхнею зношеної деталі (відновлювальне наплавлення). У другому випадку необхідно ретельний вибір зварювальних матеріалів, особливо якщо зношена поверхня є сталь 110Г13Л.

Рис. 1. Біметалічна заготовка діаметром 180 мм, призначена для приварювання до робочої поверхні, що зношується

На рис. 1 показана біметалічна заготовка діаметром 180 мм (сталь + високохромистий чавун), призначена для приварювання до робочої поверхні деталі.

Технологія дозволяє наносити локальні наплавлювані шари і безпосередньо на робочу поверхню деталі, призначену під відновлювальне або виготовлювальне наплавлення. Основна складність виконання такого наплавлення це накопичення зварювальних напруг і поява деформацій в деталі у разі порушення оптимального технологічного процесу. У зв'язку з тим, що часто наплавлювані деталі як за масою, так і розмірами досить великі і мають різноманітні форми, більш раціонально використовувати СПК, що забезпечують отримання біметалічних заготовок квадратного або прямокутного перерізу.

На рис. 2 показано двосекційний кристалізатор перерізом 200×200 мм. Наплавлений біметал,

Рис. 2. Струмопідвідний двосекційний кристалізатор перетином 200×200 мм

Рис. 3. Біметалеве футерування, отримане наплавленням в СПК перерізом 200×200 мм

отриманий у такому кристалізаторі, має добре сформований шар без наявності як у ньому, так і в зоні сплавлення з основним металом будь-яких дефектів (рис. 3).

В даний час обидва типи кристалізаторів знаходяться в експлуатації. З їх допомогою наплавлено футерування щокової дробарки СМД-111 та ковша навантажувача, які зараз проходять промислові випробування.

Висновок

Перспективним способом підвищення довговічності деталей гірничо-металургійного комплексу є забезпечення їх захисту від зношування шляхом виготовлення зносостійких футеровок методом електрошлакового наплавлення в стаціонарному струмопідвідному кристалізаторі.

При використанні захисних біметалічних футеровок може застосовуватися як відновлювальне, так і виготовлювальне наплавлення в залежності від умов експлуатації деталей, що зношуються, і економічної ефективності способу їх зміцнення.

Список літератури

- 1. Дюдкин Д.А. (2002) Конкурентоспособность металлопродукции – важнейший фактор развития черной металлургии Украины. *Металл и литье Украины*, **7-8**, 70–71.
- Мазур В.Л., Голубченко А.К. (2007) Анализ тенденций развития горно-металлургического комплекса Украины. Сталь, 4, 83–93.
- Кусков Ю.М. (1999) Наплавка в токоподводящем кристаллизаторе – перспективное направление развития электрошлаковой технологии. Автоматическая сварка, 9, 76–80.

- Крылова С.Е., Грызунов В.И., Фирсова Н.В., Соколов С.О. (2011) Условия формирования структуры экономнолегированных сталей, предназначенных для работы при повышенном износе. *Металловедение и терм. обработка металлов*, 5, 38–46.
- Баранов Е.Г., Корниенко Я.П., Беляев Ю.В., Шолудько Н.М. (1981) Оптимизация режима работы конусных дробилок мелкого дробления. Металлургическая и горнорудная промышленность, 45–46.
- Рябцев И.А., Демченко Ю.В., Панфилов А.И. (2020) Износостойкий и коррозионностойкий биметалл. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона.
- Кусков Ю.М. (2014) Дискретные присадочные материалы для наплавки в токоподводящем кристаллизаторе. Автоматическая сварка, 6-7, 101–106.

References

- Dyudkin D.A. (2002) The competitiveness of metal products

 the most important factor in the development of ferrous metallurgy of Ukraine. *Metall i Litio Ukrainy*, **7-8**, 70–71 [in Russian].
- 2. Mazur, V.L., Golubchenko, A.K. (2007) Analysis of development of mining-metallurgical complex of Ukraine. *Stal*, 4, 83–93 [in Russian].
- Kuskov, Yu.M. (1999) Surfacing in current-conducting mould - perspective direction of development of electroslag technology. *Avtomatich. Svarka*, 9, 76–80 [in Russian].
 Krylova, S.E. Gryzunov, V.I., Firsova, N.V., Sokolov, S.O.
- Krylova, S.E. Gryzunov, V.I., Firsova, N.V., Sokolov, S.O. (2011) Conditions of structure formation of sparcely-alloyed steels designed for operation at higher wear. Metallovedenie i Term. *Obrabotka Metallov*, 5, 38–46 [in Russian].
- Baranov, E.G., Kornienko, Ya.P. Belyaev, Yu.V., Sholudko, N.M. (1981) Optimization of operation mode of cone fine crushers. *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost*, 45–46 [in Russian].
 Ryabtsev, I.A., Demchenko, Yu.V., Panfilov, A.I. (2020)
- Ryabtsev, I.A., Demchenko, Yu.V., Panfilov, A.I. (2020) Wear- and corrosion-resistant bimetal. Kiev, PWI [in Russian].
 Kuskov, Yu.M.(2014) Discrete filler materials for surfacing
- 7. Kuskov, Yu.M.(2014) Discrete filler materials for surfacing in current-conducting mould. *The Paton Welding J.*, **6-7**, 101–106.

TECHNOLOGIES OF MANUFACTURING LINING ELEMENTS BY THE METHOD OF ELECTROSLAG HARDFACING IN A CURRENT-CONDUCTING MOULD

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

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

It is shown that under the conditions of hard abrasive wear, characteristic for parts of mining industry equipment, hardfacing with wear-resistant materials, in particular high-chromium cast iron, should be used. Such lining layers can be applied by electroslag hardfacing in a current-conducting mould of different cross-sections. Here, it is possible to apply both restorative and fabrication hardfacing. Features of hardfacing by each of these methods are shown. Industrial tests of deposited lining were performed in the case of components of jaw crusher SMD-11 and loader bucket. 7 Ref., 1 Tabl., 3 Fig.

Keywords: electroslag hardfacing, current-conducting mould, lining elements, wear

Надійшла до редакції 08.11.2021

ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗВАРНОГО ШВА ПРИ ЕШЗ З БІФІЛЯРНОЮ СХЕМОЮ ПІДКЛЮЧЕННЯ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ

В.Г. Соловйов, Ю.М. Ланкін, В.Г. Тюкалов, І.Ю. Романова

IEЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. Е-mail: hhsova@gmail.com Електрошлакове зварювання з біфілярною схемою живлення має багато позитивних властивостей. Результати аналітичних розрахунків і попередніх досліджень при живленні установки ЕШЗ за біфілярною схемою показують, що є реальна можливість управління процесом кристалізації зварного шва та величиною проплавлення кромок виробу. У роботі на розробленій математичній моделі проведений комплекс математичних експериментів по прогнозуванню основних параметрів якості зварного шва для біфілярної ЕШЗ зі зрівняльним дротом. В якості прогнозованих розглянуті такі параметри, як середнє значення глибини проплавлення кромок виробу, максимальне та мінімальне проплавлення кромок, доля основного металу в зварному шві, коефіцієнт форми металевої ванни. Запропоновано та проаналізовано на моделі параметр K_c , що характеризує рівномірність проплавлення кромок виробу. Отримано номограми прогнозованих параметрів. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: електрошлакове зварювання, біфілярна схема, глибина проплавлення кромок, металева ванна

Вступ. Електрошлакове зварювання (ЕШЗ) виконується різними способами, залежними в основному від типу електродів і схем підключення до джерела живлення. Напруга та швидкість зварювання, швидкість подання електродів і їх кількість, а також товщина виробу та величина проміжку визначаються для кожного конкретного випадку нормативною документацією. Основними параметрами зварного шва при ЕШЗ прийняті глибина проплавлення зварюваних кромок основного металу, що визначає ширину шва, і коефіцієнт форми металевої ванни (МВ), тобто відношення ширини шва до глибини MB. Зміна глибини проплавлення кромок зварюваного металу впливає на долю основного металу в металі шва, що змінює його хімічний склад і тим самим механічні властивості. З цього виходить, що оптимальний режим ЕШЗ повинен забезпечити проплавлення кромок зварюваного металу на таку глибину, яка виключає появу непроварів у зварному з'єднанні, а також необхідну долю основного металу в металі шва. Коефіцієнт форми МВ значною мірою визначає стійкість зварного шва проти кристалічних тріщин.

Великий досвід використання біфілярних схем підключення джерела живлення для установок електрошлакових процесів накопичений при електрошлаковому переплаві (ЕШП) [1–5]. Для ЕШЗ біфілярна схема підключення установки до джерела живлення використовувалася тільки для зварювання чотирма електродами великого перерізу, включаючи зварювання пластинчатими та стрічковими електродами [6].

Математичному опису процесу ЕШЗ на відміну від процесу ЕШП присвячена порівняно невелика кількість публікацій. Проте досвід використання існуючих математичних описів можна застосувати і для процесів ЕШЗ з біфілярною схемою підключення джерела живлення зі зрівняльним дротом. У роботах [6, 7] аналізується взаємозв'язок глибини проплавлення вертикальних кромок з параметрами режиму ЕШЗ, описується метод наближеного розрахунку термічного циклу у високотемпературній області навколошовної зони при ЕШЗ. Розрахунок температурного поля проводився за схемою трьох лінійних джерел. Завдяки деякому вдосконаленню схеми розрахунку з трьома джерелами вдалося приблизно визначити ширину зони проплавлення. Приведений алгоритм носить, мабуть, приватний характер через довільність визначення положення та потужності трьох початкових лінійних джерел нагріву. Його універсальність не підтверджена експериментально. Алгоритм досить громіздкий і його важко застосовувати в реальному масштабі часу для автоматичного регулювання процесу ЕШЗ. Крім того, в роботах приводяться рекомендації для підвищення рівномірності провару по товщині шва, використовуючи вибір відстані між зварювальними дротами.

До теперішнього часу біфілярне ЕШЗ дротяними електродами із зрівняльним дротом не застосовується у зв'язку з недостатністю досліджень. Проте є підстави вважати, що біфілярне ЕШЗ зі зрівняльним дротом має переваги перед біфілярною ЕШП зі зрівняльним дротом [8]. Оскільки площа перерізу плавких електродів в ЕШЗ і

Соловйов В.Г. – https://orcid.org/0000-0002-1454-7520, Ланкін Ю.М. – https://orcid.org/0000-0001-6306-8086, Тюкалов В.Г. – https://orcid.org/0000-0003-3491-193X, Романова І.Ю. –https://orcid.org/0000-0001-7154-1830 © В.Г. Соловйов, Ю.М. Ланкін, В.Г. Тюкалов, І.Ю. Романова, 2022

ЕШП значно відрізняється, то істотно відрізняються і теплофізичні процеси, що обумовлюють їх плавлення.

Передбачається, що модель, на якій проведено математичні експерименти у роботах [8, 9], доцільно використати і для вивчення взаємозв'язків параметрів глибини проплавлення зварюваних кромок виробу та режимів біфілярної ЕШЗ зі зрівняльним дротом. Для дослідження розподілу електричного поля, струму та потенціалу в шлаковій ванні, в зварюваному виробі, в шві, що утворюється, і в повзунах, а також розподілу тепла в об'ємі досліджуваної зони використовувалася її скінченно-елементна модель у складі шлакової і металевої ванни, двох повзунів, двох електродів, занурених в шлакову ванну, а також фрагментів виробу і зварювального шва.

Метою роботи є моделювання та прогнозування глибини проплавлення зварюваних кромок, рівномірності проплавлення кромок, долі основного металу в зварному шві та форми металевої ванни при біфілярній ЕШЗ зі зрівняльним дротом.

Схема ланцюгів живлення біфілярної ЕШЗ зі зрівняльним дротом, яка використана для моделювання процесу, представлена на рис. 1.

Моделювання. Модель [8], що використовусться, вдосконалена в частині формування металевої ванни та розрахунку глибини проплавлення кромок (ГПК) зварюваного виробу з урахуванням швидкості зварювання v_{38} . Оскільки ГПК визначається не лише тепловим станом шару шлаку, який межує з кромками та тепловим станом металевої ванни, але й швидкістю підвищення рівня металевої ванни відносно кромок виробу, швидкість зварювання для біфілярної схеми живлення визначалася співвідношенням:

$$v_{_{3B}} = 0,5\pi d_{e}^{2} \frac{v_{_{\Pi O \Pi}}}{bS}, \qquad (1)$$

Рис. 1. Схема біфілярного живлення установки ЕШЗ зі зрівняльним дротом (U – напруга джерела живлення; el i e2 – плавкі електроди; п1 і п2 – повзуни, охолоджувані водою; ШВ і МВ – шлакова і металева ванни)

де $d_{\rm e}$ – діаметр електрода (мм); $V_{\rm под}$ – швидкість подачі електрода в шлакову ванну (м/год); b – ширина проміжку зварюваного виробу (мм); S – товщина виробу (мм).

У роботі [7] використано рівняння теплового балансу для отримання алгоритму управління процесом ЕШЗ при змінному проміжку з метою стабілізації глибини проплавлення кромок $C_{\text{пров}}$ і коефіцієнта форми шва. Для прогнозування величини провару кромки $C_{\text{пров}}$ на основі теплового балансу було отримано залежність:

$$C_{\rm пров} = \frac{knUI}{2Mv_{\rm ab}S} - \frac{b}{2},$$
 (2)

де k – ефективний к.к.д. (k = 0,9); n = 2 – кількість електродів; U – напруга зварювання (B); I – струм зварювання (A); $M = C \gamma \Delta T + \gamma r$, де C, γ , r – теплоємність, щільність, питома теплота плавлення відповідно; ΔT – різниця температури плавлення та початкової температури.

При підстановці (1) в (2) отримаємо:

$$C_{\rm пров} = b \left(\frac{0,573UI}{MV_{\rm nog} d_{\rm e}^2} - 0,5 \right).$$
(3)

Як бачимо, після зроблених перетворень у формулі розрахунку $C_{пров}$ (3) відсутній один з параметрів, що впливає на глибину проплавлення – *S*. Крім того, автори не конкретизують, що характеризує отримане за (3) значення $C_{пров}$ (мінімальне, максимальне або середнє значення), але це важливо, оскільки глибина провару розподіляється по товщині виробу нерівномірно. У зв'язку з цим в моделі довелося відмовитися від обчислення за (3). Запропоновано введення залежності коефіцієнта теплопровідності χ_i кромок виробу від швидкості зварювання v_{3B} в розрахунок ГПК на моделі. Ця залежність повинна моделювати зв'язок ГПК як зі швидкістю зварювання, так і з тепловим станом шлакової та металевої ванни [10].

На рис. 2 представлені види моделі металевої ванни.

Математичний експеримент. В результаті математичного експерименту отримано залежність:

Рис. 2. Графічний вид моделі металевої ванни: *a* – загальний вигляд в ізометричній проекції; *б* – вид збоку повзунів (вид ліворуч); *в* – вид по товщині виробу (вид праворуч); *г* – вид зверху

$$\chi_i = \frac{p1X + p2}{X + q1}$$
, де
 $X = \frac{4\alpha d_e^2 UI}{v_{sp}S} - \frac{b}{2};$

 $p1 = -57,39; p2 = 9215; q1 = 19,23; \alpha = 2,336E-2.$

При параметрах ЕШЗ, що відповідають значенням: S = 80 мм; b = 30 мм; глибина шлакової ванни $h_{\rm m} = 50$ мм; U = 40 В; I = 922 А; $V_{\rm nog} = 200$ м/год; $v_{_{38}} = 1,17$ м/год, отримано зварне з'єднання і поперечний макрошліф (рис. 3, а). Характеристики глибини проплавлення кромки:

- середнє значення по товщині виробу $C_{\rm проп}^{\rm cep} = 3,9$ мм;

- максимальний провар $C_{\text{проп}}^{\text{max}}$ =6,9 мм; - мінімальний провар $C_{\text{проп}}^{\text{min}}$ =1,8 мм.

Середнє значення ГПК визначалося як відношення площі провару по всій товщині виробу до товщини виробу *S*. При тих же параметрах ЕШЗ на моделі розрахунковим шляхом отримано горизонтальний переріз в районі поверхні металевої ванни (рис. 3, δ), на якому видно контур провару кромки виробу. Характеристики глибини проплавлення кромки на моделі:

- середнє значення по товщині виробу $C_{\text{проп}}^{\text{сер}} = 4,11 \text{ мм};$

- максимальний провар $C_{\text{проп}}^{\text{max}}$ =5,27 мм; - мінімальний провар $C_{\text{проп}}^{\text{max}}$ =2,9 мм.

Цей приклад може свідчити, що запропонована модель характеризує залежність ГПК від значень основних параметрів ЕШЗ, а використання її в проведенні математичного експерименту дозволить виявити якість ГПК при різних співвідношеннях з $U,\,V_{_{\rm под}},S,\,b,\,h_{_{\rm III}}$ і відстанню електрода від охолоджуваного повзуна L1.

Відомий параметр, що характеризує ГПК – коефіцієнт форми провару $\Psi_{\rm np} = S / C_{\rm проп}^{\rm max}$. Розроблена модель дозволяє розрахувати розподіл ГПК уздовж усієї товщини виробу на відміну від наведених у

Рис. 3. Горизонтальний шліф зварного шва з позначеним проваром кромки виробу (а); горизонтальний переріз в районі поверхні металевої ванни, отриманий при моделюванні (б)

роботах [9, 10] залежностей. У зв'язку з цим запропонована більш точна універсальна характеристика ГПК, яка може бути використана при виборі параметрів необхідного режиму біфілярного ЕШЗ – коефіцієнт рівномірності проплавлення К.:

$$K_{c} = \frac{C_{\text{проп}}^{\text{max}} - C_{\text{проп}}^{\text{min}}}{C_{\text{проп}}^{\text{cep}}}$$

Одним з параметрів при моделюванні процесу ЕШЗ, який потрібний для управління процесом, вимір якого в реальному часі ускладнений, є величина заглиблення електродів. Тепло ШВ, яке є основним джерелом для плавлення при ЕШЗ, повинно бути найраціональніше використано як для плавлення електродів, оплавлення кромок виробу, необхідної взаємодії розплавленого присадного металу з розігрітим шлаком на шляху від електродів до металевої ванни, так і для підтримки необхідного теплового рівня та рівномірності нагріву металевої ванни. У зв'язку з цим при біфілярній схемі живлення особливе значення має підтримка величини заглиблення електродів на необхідному рівні, враховуючи, що основна концентрація тепла в ШВ зосереджена між електродами (за умови достатньої відстані між ними). На рис. 4 наведено номограму розподілу величини заглиблення електродів $l_{_3}$ залежно від U і $V_{_{\rm под}}$, побудовану за результатами математичного експерименту на моделі та розрахунку температури нижнього торця електрода до досягненні заданої температури його плавлення. На номограмі позначена робоча зона сплаву електродів в діапазоні температур 1500...2000 °С.

Для параметрів ЕШЗ, що знаходяться в межах цієї зони, проведено серію математичних експериментів для визначення характеристик ГПК. У таблиці наведено результати розрахунків характеристик якості ЕШЗ за результатами моделювання. До складу розрахованих характеристик, включаючи розглянуті вище, увійшли такі, як доля основного металу в зварному шві (ДОМ) і коефіцієнт форми металевої ванни у. ЕШЗ дозволяє в широких ме-

Рис. 4. Номограма заглиблення електродів в шлакову ванну з позначенням меж робочої зони сплавлення електродів

ЕЛЕКТРОШЛАКОВІ ТЕХНОЛОГІЇ

Результати розрахунків хар	актеристик якості ЕШЗ
----------------------------	-----------------------

Номер п/п	<i>S</i> , мм	<i>b</i> , мм	<i>d</i> _е , мм	<i>U</i> , В	V _{под} , м∕год	<i>L</i> 1, мм	<i>l_s</i> , мм	<i>V</i> _{зв} , м/год	<i>I</i> , A	<i>К_с,</i> відн. од	$C^{ ext{cep}}_{ ext{проп}},$	$C_{ ext{проп}}^{ ext{max}}, MM$	$C^{\min}_{{}_{\Pi}{ m po\pi}},$	ДОМ, %	ψ, відн. од.
1	70	30	3	80	200	18	35,5	1,35	807	0,42	3,1	3,93	2,62	17	3,52
2	80	30	3	115	60	20	8,4	0,35	451	0,96	3,44	4,94	1,65	19	3,27
3	80	30	3	65	260	20	38,3	1,53	785	0,47	3,47	4,26	2,62	19	3,19
4	80	30	3	50	300	20	43,6	1,77	677	0,33	3,95	4,63	3,31	21	2,86
5	90	30	3	90	160	23	24,5	0,84	806	0,94	4,06	6,76	2,96	21	3,48
6	80	30	3	100	250	20	32,3	1,47	1200	0,82	4,54	8,06	4,34	23	2,9
7	80	30	3	50	320	20	43,6	1,88	934	0,42	5,47	6,58	4,28	27	2,83
8	80	30	4	110	100	20	14,3	1,05	750	0,98	5,69	8,52	2,95	27	2,8
9	80	30	3	70	300	20	41,7	1,77	953	0,47	5,77	6,72	4,03	28	2,9
10	80	30	3	90	220	20	35	1,3	987	0,63	6,25	7,93	3,97	29	3,03
11	85	25	3	60	320	21	44,7	2,13	914	0,42	5,37	6,71	4,47	30	2,44
12	70	35	3	115	150	18	19,2	0,87	843	0,66	7,63	10,1	5,05	30	3,02
13	80	40	3	100	250	20	32,3	1,1	1080	0,67	8,88	11,5	5,57	31	2,98
14	75	35	4	105	200	19	26,4	1,91	1140	0,61	9,19	12,1	6,55	34	2,73
15	80	30	3	90	320	20	40,5	1,88	1290	0,56	9,46	11,9	6,61	39	2,7
16	80	30	3	85	360	20	44.8	2,12	1350	0,52	9,48	11,9	6,91	39	2,63
17	80	30	3	100	330	20	18,4	1,94	1410	0,57	12,2	15,5	8,6	45	2,63
18	90	20	3	110	150	23	20,1	1,18	978	0,98	10,7	15,8	5,26	52	2,98
19	80	20	3	100	300	20	36,8	2,65	1530	0,65	14,9	19,6	9,96	60	2,53

Рис. 5. Номограми залежностей прогнозованих параметрів: доля основного металу в зварному шві ДОМ, рівномірність проплавлення кромок виробу K_c , мінімальна глибина проплавлення кромки виробу $C_{\text{проп}}^{\min}$ і коефіцієнт форми металевої ванни ψ

жах регулювати розплавлення зварюваних кромок металу, тобто ДОМ. У наших математичних експериментах отримано шви з долею основного металу в межах 17...60 %. Для обмеження проникнення легуючих домішок з основного металу в шов мож-

на вибрати найбільш сприятливі режими. У таблиці усі режими згруповані за збільшенням параметру ДОМ. Для вибору режиму зварювання з найбільшим значенням рівномірності параметра «глибина проплавлення кромок» слід вибрати режим № 4. Для зменшення ймовірності отримання непровару кромки виробу не слід використовувати режим № 2 з найменшим $C_{\text{проп}}^{\min}$. Найкраще значення коефіцієнта форми металевої ванни з розглянутих в експерименті – при режимі № 1.

Для параметрів S = 80 мм, b = 30 мм, $d_e = 3$ мм і L1 = 20 мм можна отримати прогнозовані орієнтовні відомості про деякі параметри якості зварного шва, таких, як ДОМ, K_c , $C_{\text{проп}}^{\min}$ і ψ на графіках рис. 5.

Апроксимація шуканих функцій для номограм здійснена за допомогою многочлена типу $F = a1 + a2X + a3Y + a4XY + a5X^2Y + a6XY^2$, де F – шукана функція (ДОМ, K_c , $C_{\text{проп}}^{\text{min}}$, ψ); a1...a6 – постійні коефіцієнти, відповідні кожної з шуканих функцій.

За рис. 5 зручно оцінювати можливості вибраного режиму біфілярної ЕШЗ зі зрівняльним дротом для досягнення того або іншого поєднання параметрів зварювального шва. Приклади такої оцінки наведені на рис. 5 (позначені пунктирними лініями).

Висновки

За результатами роботи проведено комплекс математичних експериментів на розробленій моделі по прогнозуванню основних параметрів якості зварювального шва для біфілярної ЕШЗ із зрівняльним дротом.

В якості прогнозованих розглянуті такі параметри, як середнє значення глибини проплавлення кромок виробу, максимальне та мінімальне проплавлення кромок, доля основного метала в зварному шві, коефіцієнт форми металевої ванни. Запропонований та проаналізований на моделі параметр K_c , що характеризує рівномірність проплавлення кромок виробу.

Отримано номограми прогнозованих параметрів.

Запропонована модель може бути використана для аналізу процесів ЕШЗ з двохелектродною канонічною та біфілярною схемою підключення установок до джерел живлення.

Список літератури/References

- Медовар Б.И., Ступак Л.М., Бойко Г.А. и др. (1976) Электрошлаковые печи. Патон Б.Е. и Медовар Б.И. (ред.). Киев, Наукова думка. Medovar, B.I., Stupak, L.M., Bojko, G.A. et al. (1976) *Electroslag furnaces.* Ed. by B.E. Paton, B.I. Medovar. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
- 2. Jing, Xie (2008) Structure advantage of a 5-t double pole series circuit electroslag furnace. *Heavy Casting and Forging*, 5(3), 43–45. (In Chinese).
- 3. Kubin, M., Scheriau, A., Knabl, M. et al. (2013) Operational experience of large sized ESR plants and attainable quality of ESR ingots with diameter of up to 2600 mm. *Proceedings of the International Symposium on Liquid Metal Processing & Casting (LMPC). Austin (Texas, USA), 22–25 September* (2013), pp. 57–64.
- 4. Tezuka, M., Yamamoto, S., Takahashi, ? et al. (2014) Internal quality of 2150 mm-diameter ingot manufactured using new 150-ton ESR furnace. *Proceedings of the 19th International Forgemasters Meeting (IFM). Tokyo (Japan), 29.09–03.10, 2014*, pp. 90–94.
- Son, I., Lee, W., Sim, Kw. et al. (2014) Installation of 150-ton new ESR facility and production of 120-ton ESR ingot for 12Cr HIP rotor forgings. *Ibid*, Tokyo (Japan), 29.09–03.10, 2014, pp. 333–337.
- (1980) Электрошлаковая сварка и наплавка. Патон Б.Е. (ред.). Москва, Машиностроение. (1980) Electroslag welding and surfacing. Ed. by B.E. Paton. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
- Маришкин А.К. (1984) К вопросу о расчете глубины проплавления основного металла при ЭШС. Автоматическая сварка, 3, 71–72.
 Marishkin, A.K. (1984) To problem of calculation of base metal penetration depth in ESR. Avtomatich. Svarka, 3, 71– 72 [in Russian].
- Ланкін Ю.М., Соловйов В.Г., Тюкалов В.Г., Романова І.Ю. (2021) Порівняння процесів електрошлакового зварювання при підключенні електричного живлення за моно- та біфілярною схемами, 11, 28–34. DOI: https://doi. org/10.37434/as2021.11.05 Lankin, Yu.M., Soloviov, V.G., Tyukalov, V.G., Romanova, I.Yu. (2021) Comparison of the processes of electroslag welding at power connection by mono- and bifilar circuits. *The Paton Welding J.*, 11, 22-28.
- Ланкін Ю.М., Соловйов В.Г., Тюкалов В.Г., Романова I.Ю. (2021) Стабільність процесу електрошлакового зварювання з біфілярною схемою живлення без зрівняльного дроту. *Там само*, 12, 33–37. DOI: https://doi.org/10.37434/as2021.12.04
 Lankin, Yu.M., Soloviov, V.G., Tyukalov, V.G., Romanova, I.Yu. (2021) Stability of the process of electroslag welding with bifilar power circuit without equalizing wire. *Ibid.*, 12, 24-28.
- Негода Е.Н. (2008) *Тепловые процессы при сварке*. Владивосток, Дальневосточный ГТУ. Negoda, Е.N. (2008) *Thermal processes in welding*. Vladivostok, Dalnevostochny GTU [in Russian].

PREDICTION OF WELD PARAMETERS IN ESW WITH A BIFILAR CIRCUIT OF POWER SOURCE CONNECTION

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

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

E-mail: hhsova@gmail.com

Electroslag welding with a bifilar power circuit has many positive characteristics. Results of analytical calculations and preliminary research when powering the ESW unit by the bifilar circuit show that there is a real possibility of controlling the process of weld solidification and depth of item edge penetration. In the work, the developed mathematical model was used to conduct a set of mathematical experiments on prediction of the main parameters of weld quality for bifilar ESW with equalizing wire. Such parameters as average value of item edge penetration depth, maximum and minimum edge penetration, base metal share in the weld, metal pool form factor are considered as predicted parameters. Kc parameter characterizing the uniformity of item edge penetration was proposed and analyzed on the model. Nomograms of predicted parameters were derived. 10 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

Keywords: electroslag welding, bifilar circuit, edge penetration depth, metal pool

Надійшла до редакції 29.10.2021

АХОНІНУ С.В. - 60

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Результати робіт С.В. Ахоніна представлені в 304-х наукових працях, в тому числі 8-х монографіях і 18-х авторських свідоцтвах та патентах України. Сьогодні С.В. Ахонін успішно веде значну науково-організаційну роботу. Він є членом Спеціалізованої вченої ради ІЕЗ ім. Є.О. Патона по захисту докторських та кандидатських дисертацій за спеціальностями «Матеріалознавство» та «Металургія чорних та кольорових металів і спеціальних сплавів»; головним редактором фахового журналу «Сучасна електрометалургія»; членом редакційних колегій наукових журналів «The Paton Welding Journal» та «Металофізика та новітні технології».

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

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

> IE3 ім. Є.О. Патона НАН України, Редколегія та редакція журналу «Автоматичне зварювання»

ПЕРЕДПЛАТА 2022

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

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

** Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

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

Передплата на електронну версію журналів.

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

Передплата через сайт видавництва:

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

На сайті видавництва у 2022 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2020 рр.

РЕКЛАМА В ЖУРНАЛАХ

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках журналів.

Перша сторінка обкладинки – 200х200 мм.

Друга, третя і четверта сторінки обкладинки – 200х290 мм.

Перша, друга, третя, четверта сторінки внутрішньої обкладинки – 200х290 мм. Вклейка А4 – 200х290 мм. Розворот А3 – 400х290 мм.

А5 – 185х130 мм.

Розміри журналів після обрізу 200х290 мм.

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

видавництво

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

ХХ МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ

Мета Промислового Форуму — підтримка та розвиток промисловості України!

3 16 по 19 листопада 2021 р. у Києві в Міжнародному виставковому центрі в умовах ковід-пандемії та пов'язаних з цим обмежень був успішно проведений ювілейний XX Міжнародний Промисловий Форум, який вкотре продемонстрував свій високий статус, підтверджений масштабом та популярністю серед учасників та відвідувачів. Число учасників, у тому числі дебютантів виставок, акцент на українському виробнику, різноманітність представленого обладнання, нові технологічні рішення, унікальні розробки, тематичні конференції зробили форум ефектним, наповненим, цікавим та результативним. В роботі Форуму взяли участь 232 компанії та організації з України та 30 — з-за кордону на площі 15000 м². За чотири дні роботи біля 9000 відвідувачів змогли ознайомитись з останніми досягненнями, розгорнутими на виставках Форуму: Металообробка, Гідравліка, Пневматика, УкрЗварювання, Автоматизація та робототехніка, Підйомно-транспортне та складське обладнання, УкрЛиття, Безпека виробництва.

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

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

ЗВАРЮВАННЯ. Виставка «УкрЗварювання» продемонструвала сучасну продукцію цього напрямку з широким спектром обладнання та технологій для зварювання, різання, обробки поверхні, нанесення захисних покриттів. На стендах учасників — компаній MAGMAWELD, БІНЦЕЛЬ УКРАЇНА ГМБХ, ДЖЕЙСІК УКРАЇНА, ІДЕЛЬ, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, КОРСАЛ, ПАТОН ІНТЕРНЕШНЛ, CAMMIT, TESLAWELD, TRIADA-WELDING BIJвідувачі знайомилися з новинками в лінійці продукції. Вперше участь у виставці взяла компанія WELDMAN ОÜ (Естонія). Відвідувачам пропонували товари та послуги для диджиталізації зварювального виробництва у рамках Індустрії 4.0. На стенді IE3 ім. Є.О. Патона було представлено обладнання для зварювання труб різного сортаменту

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

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

Вітчизняні виробники представили такі напрямки:

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

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

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

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

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

Стенд компанії «ПАТОН ІНТЕРНЕШНЛ»

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

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

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

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

Стенд компанії «ВІТАПОЛІС»

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

Доповідь М.А. Яременка, IE3 ім. Є.О. Патона

Конкурс проходив за трьома номінаціями:

• ручне дугове зварювання покритим електродом;

• дугове зварювання плавким електродом в активних газах;

• дугове зварювання вольфрамовим електродом в інертних газах.

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

Конкурс традиційно проводився в два тури.

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

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

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

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

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

На стенді компанії «БІНЦЕЛЬ УКРАЇНА ГМБХ»

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

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

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

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

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

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

За матеріалами пост-релізу ТОВ «МВЦ»

ПАМ'ЯТІ О.Д. РАЗМИШЛЯЄВА

17 листопада 2021 р. на 82-му році життя передчасно помер відомий вчений у галузі зварювального виробництва, академік Академії інженерних наук України, доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації та механізації зварювального виробництва ДВНЗ «Приазов-

ський державний технічний університет» Олександр Денисович Размишляєв.

За період роботи у ПДТУ Олександр Денисович пройшов шлях від молодшого наукового співробітника до професора, академіка Академії інженерних наук України.

З 1965 р. Олександр Денисович – співробітник ДВНЗ «ПДТУ». У 1976 р. захистив кандидатську, а у 1996 р. – докторську дисертацію. У 1997 р. йому присвоєно звання професора. У 2003 р. був обраний дійсним членом Академії інженерних наук України. Протягом багатьох років був членом Вченої ради університету, членом спеціалізованої вченої ради ПДТУ із захисту кандидатських та докторських дисертацій.

Як вчений-дослідник Олександр Денисович зробив неоціненний внесок у розвиток технології зварювання і наплавлення, зокрема, у вивчення та дослідження гідродинамічних процесів у зварювальній ванні, процесів формування металу швів та валиків при дуговому зварюванні та наплавленні електродним дротом та стрічкою з дією зовнішніх керуючих магнітних полів.

Олександр Денисович був чудовим педагогом. Під його керівництвом успішно захищено 7 дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук та 3 дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Олександр Денисович був деканом зварювального факультету, вів велику науково-дослідну роботу. Ним опубліковано понад 230 статей у провідних наукових журналах за спеціальністю, отримано понад 20 авторських свідоцтв та патентів України на винаходи, видано 5 монографій.

Багатогранно освічена, широко ерудована, людина високої культури та моральності, Олександр Денисович користувався глибокою повагою та авторитетом серед викладачів, студентів та у колах наукової громадськості. До нього зверталися за консультаціями та допомогою з багатьох науковотехнічних питань.

Олександр Денисович залишиться в пам'яті друзів і колег по спільній роботі та численних учнів виключно культурною, принциповою та освіченою людиною, яка щедро ділилася своїми великими знаннями в галузі зварювання.

Світла пам'ять про прекрасного фахівця, працелюбного дослідника, доброї і чуйної людини Олександра Денисовича Размишляєва назавжди залишиться в серцях тих, хто його знав.

> Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет» Донбаська машинобудівна державна академія

Гортаючи старі номери

Новини піввікової давнини

1972

Семінар з нових способів зварювання і наплавлення у судоремонті

Клайпеда. 7–10 вересня 1971 р. відбувся третій Всесоюзний семінар з нових способів зварювання, наплавлення та газополуменевої обробки металів у судноремонті, скликаний Чорноморським ЦПКБ, Клайпедським дослідним судноремонтним заводом та Литовським морським пароплавством. На семінарі, у якому взяло участь близько 100 представників різних підприємств та організацій, було зроблено 38 доповідей і повідомлень.

На Клайпедському судноремонтному заводі та інших підприємствах учасникам семінару було продемонстровано низку нових методів зварювання та наплавлення, рекомендованих широкому впровадженню.

У Координаційній раді зі зварювання

Київ. 13 жовтня 1971 р. відбулася об'єднана сесія Наукової ради з проблеми «Нові процеси зварювання та зварні конструкції» Державного комітету Ради Міністрів СРСР з науки та техніки та Координаційної ради зі зварювання. Відкриваючи сесію, голова Наукової ради академік Б.Є. Патон зазначив, що в результаті виконання завдань, встановлених урядом, суттєво збільшився випуск зварних конструкцій, досягнуто значних успіхів у створенні міцної матеріально-технічної бази зварювального виробництва та підвищення якості робіт. Обсяг виробництва зварних конструкцій зріс у 1970 р. проти 1965 р. у півтора раза, а рівень механізації зварювання підвищився з 46 % майже до 55 %. Були виконані завдання щодо розширення застосування нових прогресивних способів зварювання.

Сесія затвердила план науково-дослідних, проектно-конструкторських та технологічних робіт на 1972 р., загальносоюзний план проведення конференцій та нарад у 1972 р. та план-графік підготовки матеріалів до огляду розвитку зварювального виробництва СРСР.

Календар січня*

1 січня 1947 року

Засновано Канадське зварювальне бюро – некомерційна організація сертифікації в галузі зварювання. Визнана однією з найбільших та найбільш інноваційних експертних організацій зі зварювання у світі. Штаб квартира знаходиться в Онтаріо, з представництвами по всій території Канади. Зварювальники в Канаді повинні проходити атестацію кожні два роки. Канадське зварювальне бюро є лідером у галузі сертифікації зварювальних робіт, регулюванні та контролю якості, безпеки та цілісності робіт. Сьогодні бюро надає послуги сертифікації понад 7600 компаній у 34 країнах.

2 січня 1934 року

Радою народних комісарів УРСР ухвалено рішення про створення Інституту електрозварювання, який у майбутньому став носити назву на честь свого засновника та першого директора – Євгена Оскаровича Патона. Інститут став унікальною у своєму роді науковою установою, яка займається дослідженнями у галузі зварювання та споріднених технологій. Вченими Інституту були розроблені такі технології, як автоматичне зварювання під флюсом, багатодугове швидкісне зварювання, електрошлакове зварювання, електрошлаковий переплав. Саме в ІЕЗ вперше були розроблені технології зварювання, різання, паяння та напилення у відкритому космосі, а також апарат для зварювання м'яких живих тканин.

3 січня 1927 року

Опубліковано один з патентів американської компанії Harnischfeger Corporation, що стосується модернізації екскаватора. Застосовуючи сучасні технології і зварювання, ця компанія вперше у світі реалізувала проект цільнозварного екскаватора в 1935 р. Роком пізніше ця компанія представила перший у світі цільнозварний підйомний кран зі стрілою коробчастого перетину.

4 січня 2004 року

Розпочато будівництво ракетного катера проекту 022 (класу Хубей), одного із серії 83 китайських катамаранів. Це перший у світі катамаран із ударним ракетним озброєнням, виконаний за технологією стелс. Примітно, що для створення ракетних установок застосовувалося зварювання тертям з перемішуванням.

5 січня 1935 року

Вільгельм Алерт запатентував удосконалений спосіб термітного зварювання для залізничних колій. У своєму пристрої він застосував більш високу температуру, створивши спеціальну конструкцію, яка відділяла зону зварювання з високою температурою від основного металу. В. Алерт значно спростив систему з'єднання, а також використав попередній підігрів кромок, що зварюються.

6 січня 1933 року

Народився Д.М. Калеко. Ним були розроблені наукові основи технології зварювання чорних та кольорових металів малого перерізу дугою, що горить при розряді конденсаторів, та засобів управління цим процесом. Брав участь у створенні установки для точкового зварювання алюмінієвих сплавів, автоматів для ударного конденсаторного зварювання деталей електронної техніки та радіопромисловості. Д. М. Калеко розробив також медичні імплантати та інструменти з металу з ефектом пам'яті форми.

* Матеріал підготовлено компанією ТОВ «СТІЛ ВОРК» (м. Кривий Ріг) за участю редакції журналу.

7 січня 1890 року

Американський винахідник і бізнесмен Чарльз Альберт Коффін подав патент на метод зварювання електродом, що не плавиться, в середовищі захисного газу (US419032A). Цей вид зварювання використовується для зварювання алюмінію, магнію та їх сплавів, нержавіючої сталі, нікелю, міді, бронзи, титану, цирконію та інших неферомагнітних металів. Застосування даного технологічного процесу дозволяє отримати зварні шви високої якості.

8 січня 1910 року

Початок застосування ацетиленового зварювання для будівництва трубопроводів для водопостачання, а саме при освоєнні природного джерела води на території США. Зведенням трикілометрового трубопроводу займалася фірма «Central Colorado Power Co.». Трубопровід складався з 200 сегментів різного діаметра. На роботу пішло більше року і було витрачено значну кількість карбіду та кисню.

9 січня 1928 року

Народився Б.О. Мовчан — відомий вчений у галузі матеріалознавства металевих та органічних матеріалів (аморфних, нанокристалічних, дисперснозміцнених, шаруватих та пористих) та захисних покриттів, а також розробки та реалізації електронно-променевих технологій, створення нових функціональних матеріалів. Б.О. Мовчан – академік НАН України, автор близько 360 наукових праць та понад 100 патентів на винаходи.

10 січня 1972 року

Виведено зі складу флоту США атомохід «Саванна» – експериментальне цивільне судно з ядерною силовою установкою. Його було створено для демонстрації можливості мирного застосування ядерної енергії. Побудований наприкінці 1950-х років у США з використанням технології дугового зварювання покритими електродами. Процес виготовлення детально контролювався з використанням рентгенівської установки. Судно експлуатувалося з 1962 по 1972 рр. Воно одне з чотирьох колись побудованих торгових суден з ядерною енергетичною установкою. У 1981 р. «Саванна» була передана в експозицію «Patriots Point Naval and Maritime Museum», Монте Плезант, Південна Кароліна, США.

11 січня 1805 року

Помер Феліче Фонтан (1730–1805) – італійський хімік і натураліст. Відкрив водяний (коксовий) горючий газ, що виходить при зрошенні водою розпеченого вугілля і складається з водню та оксиду вуглецю. Через півстоліття цей газ почали активно використовувати для нагрівання деталей, що зварюються. У 1930–1940-х рр. ковальське горнове зварювання та «зварювання водяним газом» визначалися як окремі різновиди виробничого процесу. У ті ж роки підтвердилося, що останнім із цих способів можна зварювати листи завтовшки від 4 до 80 мм за допомогою молота або рольгангів.

12 січня 1951 року

Вчені Інституту електрозварювання (М.М. Остапенко, В.К. Лебедєв, С.І. Кучук-Яценко, В.О. Сахарнов) вперше у світі розробили спосіб стикового контактного зварювання оплавленням з використанням кільцевих трансформаторів для з'єднання рейок, труб і інших виробів. Стикові машини з кільцевими трансформаторами мають у 10-20 разів менший опір короткого замикання порівняно зі стандартними.

ISSN 0005-111X ABTOMATИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ, №1, 2022

եթ

13 січня 1975 року

Початок проведення радянсько-французького наукового експерименту ARAKS, спрямованого на вивчення іоносфери і магнітного поля Землі. Технологія експерименту має багато спільного з технологією електронно-променевого зварювання, оскільки в ній також використовується кінетична енергія електронів в електронному пучку. Експеримент є одним із всесвітньо відомих досягнень Інституту електрозварювання.

14 січня 1943 року

Компанією Northrop Aircraft подано патент на технологію зварювання вольфрамовим електродом в середовищі гелію. Автор патенту Рассел Мередіт. Винайдений техпроцес зварювання придатний для зварювання магнію, алюмінію та нікелю. Завдяки цій технології відкрилися нові можливості для зварювання матеріалів, що використовуються в авіаційній промисловості, що особливо стало цінним при випуску військової техніки під час Другої світової війни.

15 січня 1958 року

Був замовлений атомний підводний човен ВМС США Thresher (SSN-593), який згодом затонув разом з усім екіпажем в Атлантичному океані. Thresher у супроводі рятувального судна ASR-20 Skylark вийшов в море для проведення глибоководних занурень. Метою занурень була перевірка міцності корпусу на граничних глибинах (360 м). Через тріщину в зварному шві трубопроводу забортної води машинний відсік субмарини почав заповнюватися водою. Розслідування аварії виявило численні випадки порушення технології зварювання, використання некондиційних матеріалів, поганий контроль якості зварних швів.

16 січня 1934 року

Інженер The Budd Company Ерл Регсдейл (Earl J. Ragsdale) отримав патент на метод імпульсного зварювання нержавіючої сталі. Імпульсне зварювання є різновидом дугового зварювання в захисних газах. У компанії його використовували для зварювання під час виготовлення потягу Pioneer Zephyr. Застосування цієї технології дозволило зменшити вагу складу, отже, збільшити його швидкісні параметри.

17 січня 1781 року

Народився Роберт Хейр (1781-1858) – американський хімік. Він розробив конструкцію киснево-водневого пальника. Паралельно з пошуком складу газів для зварювання велася робота щодо створення надійного обладнання. Насамперед необхідно було сконструювати пальник, який забезпечував би гарне змішування газів з киснем, високу концентрацію теплоти на виході із сопла та вибухобезпеку. Одним з перших пристроїв, що заслуговують на увагу, був пальник Хейра, запропонований у 1802 р.

18 січня 1861 року

Народився Йоганн Вільгельм Гольдшмідт (1861-1923) – відомий німецький хімік. Він увійшов до історії як винахідник способу термітного зварювання. Процес, що протікає при цьому способі, іноді називають «Гольдшмідта реакцією» або «Гольдшмідта процес». У 1898 р. Йоганн Гольдшмідт вперше здійснив термітне зварювання двох залізних брусків, попередньо заформувавши їх та заповнивши місце стику термітною сумішшю. Після згоряння суміші рідка ванна, що утворилася, була настільки перегріта, що підплавила кромки, а після застигання перетворилася на шов. Шлак виплив і легко відокремився від місця з'єднання.

19 січня 1833 року

Народився Генрі Уайлд – британський вчений інженер. У 1860-х роках Генрі Уайлд, застосовуючи теорії Вольта та Деві та використовуючи примітивні електричні джерела струму того часу, електричною дугою непрямої дії зварив торці проводів великого діаметра. Генрі Уайлд отримав патент на свій винахід, який в даний час визнається як патент електрозварювання.

20 січня 1925 року

Фірма «А.О. Smith» зареєструвала один із своїх патентів на зварювання труб. Компанія розробила метод контактного зварювання оплавленням та розпочала практичне використання технології у виробництві прямошовних труб з товщиною стінки 5 мм та діаметром 500 мм, які зварювалися по всій довжині (12 м) на машинах потужністю 5000 кВ·А. У 1920-і роки інженери компанії розробили покриття для зварювального стрижня, який вони використовували у виробництві до 1965 р., а також перше дугове зварювання труб високого тиску.

21 січня 1942 року

Виготовлено танк Т-34, корпус якого було вперше виконано із застосуванням автоматичного зварювання. Технологію зварювання було розроблено фахівцями Інституту електрозварювання. Продуктивність автоматичного зварювання виявилася в 10 разів вищою, ніж ручного.

22 січня 1971 року

Т.М. Слуцька (Інститут електрозварювання) розробила самозахисні активовані електродні дроти для дугового зварювання. Введення до складу дроту невеликих кількостей (5–7 мас. %) солей лужних та лужноземельних металів підвищує стійкість горіння дуги при зварюванні у вуглекислому газі або його сумішах.

23 січня 1975 року

24 січня 1927 року

Б.С. Касаткіну – відомому вченому в галузі металознавства зварювання, член-кор. НАН України присуджено Премію ім. Є.О. Патона НАН України за цикл робіт «Термозміцнені низьколеговані сталі високої міцності для зварних конструкцій». За його особистою участю розроблено та освоєно виробництво високоміцних сталей, які знайшли успішне застосування при виготовленні екскаваторів, автодорожніх мостів, шахтних скіпів, кріплень, гідроспоруд та інших відповідальних конструкцій. Автор понад 300 наукових праць, у тому числі восьми монографій.

Народився І.К. Походня – відомий вчений у галузі зварювання, академік НАН України, заслужений діяч науки та техніки. Він зробив значний внесок у теорію зварювальних процесів (плавлення та перенесення електродного металу, абсорбція та десорбція газів розплавленим металом, вплив типу електродних покриттів на плавлення та перенесення металу при зварюванні). Брав участь у створенні багатьох марок низькотоксичних та високопродуктивних електродів та порошкових дротів. Організував масове виробництво низькотоксичних зварювальних матеріалів на низці підприємств СРСР. Автор понад 900

25 січня 2004 року

На Марсі сів марсохід «Opportunity», доставлений ракетою-носієм «Дельта II». Ця модель ракети була першою, при виробництві якої застосували зварювання тертям з перемішуванням. Експериментальним використанням нового виду з'єднання зайнялася компанія «Боїнг». Завдяки надійності цього способу він набув поширення в ракетобудуванні.

наукових праць, у тому числі 28 монографій.

26 січня 1946 року

К.К. Хренову – відомому вченому в галузі зварювання, академіку НАН України, заслуженому діячеві науки та техніки присуджено Державну премію СРСР «За розробку та впровадження методів електрозварювання та різання під водою». У роки Другої світової війни лабораторією зварювання під керівництвом К.К. Хренова спільно зі спеціалізованими бригадами виконано великий обсяг робіт з ремонту під водою суден, зруйнованих мостів та портових споруд. Автор понад 200 наукових праць.

27 січня 1983 року

Закінчено проходження найдовшого підводного тунелю Сейкан, що сполучає японські острови Хонсю і Хоккайдо. Остаточна довжина цього залізничного тунелю становила 53,9 км, у тому числі підводна частина – 23,3 км. Тунель опускається на 100 м нижче за рівень морського дна. Рейки не мають болтових з'єднань. Можливо, це найдовше зварене залізничне полотно у світі.

28 січня 1951 року

Б.Є. Патоном та Г.З. Волошкевичем (Інститут електрозварювання) вперше створено принципово новий процес — електрошлакове зварювання металів. Він призначений для з'єднання виробів практично необмеженої товщини за один прохід. ЕШЗ набуло широкого поширення в СРСР і за кордоном, докорінно змінивши технологію виготовлення товстостінних металевих конструкцій.

29 січня 1907 року

Шведський інженер Оскар Кельберг винайшов зварювальні електроди з покриттям та отримав патент на цей винахід. Його увагу привернуло спостереження зварювальників, які відзначили, що властивість шва покращується в тих випадках, коли електроди або зони, що підлягають зварюванню, «забруднені» гашеним вапном, що засмічує зварювальні майданчики після отримання ацетилену з карбіду кальцію. Той самий ефект виникав і від забруднення, що залишалося на поверхні дроту після його волочіння, яке проводили із застосуванням вапна.

30 січня 1991 року

Помер Джон Бардін (1908-1991) – американський фізик. Після закінчення Другої світової війни Джон Бардін перейшов у компанію «Белл», де, працюючи спільно з Вільямом Шоклі та Волтером Браттейном, брав участь у створенні напівпровідникових приладів, які могли як випрямляти, так і посилювати електричні сигнали. Бардін розділив у 1956 р. Нобелівську премію з Шоклі та Браттейном «за дослідження напівпровідників та відкриття транзисторного ефекту». Транзистор є однією з найголовніших деталей зварювального інвертора.

31 січня 1964 року

Відомий вчений у галузі мостобудування, член-кор. НАН України, заслужений діяч науки і техніки України В.І. Труфяков (Інститут електрозварювання) запропонував та експериментально обґрунтував використання локального вибуху як методу зміцнення обробки з'єднань великогабаритних конструкцій. Ним також суттєво розвинені уявлення про вплив на опір втоми металу концентрації напруг, зварювальних залишкових напруг, дефектів зварювання, частоти та форми навантаження.