

З АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ 5 2023

Автоматическая сварка

Automatic Welding

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

Лауреати премій НАН України імені видатних учених 3

ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ

Зяخور І.В., Антіпін Є.В., Дідковський О.В., Кавуніченко О.В., Левчук А.М., Шило Ю.А., Ян Труска. Сучасні технології зварювання залізничних рейок (Огляд) 5

ЗВАРЮВАННЯ В ТВЕРДІЙ ФАЗІ

Покляцький А.Г., Мотруніч С.І., Федорчук В.Є., Фальченко Ю.В., Сагул М. Механічні властивості та структурні особливості стикових з'єднань, отриманих при ЗТП алюмінієвих сплавів різних систем легування 18

ЗВАРЮВАННЯ РІЗНОРІДНИХ СТАЛЕЙ

Німко М.О., Скульський В.Ю., Іваненко Т.В. Матеріали і технологічні підходи до зварювання комбінованих з'єднань між мартенситними і аустенітними сталями, які використовуються в енергомашинобудуванні (Огляд) 27

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ

Міленін О.С., Великоіваненко О.А., Розинка Г.П., Півторак Н.І. Чисельний метод мультимасштабного моделювання напружено-деформованого стану великогабаритних конструкцій при монтажному зварюванні 37

Лебедєв О.В., Дубко А.Г., Чвертко Н.А. Основи комп'ютерного мультифізичного моделювання контактного зварювання живих тканин 44

КОРОЗІЯ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ

Осадчук С.О., Ниркова Л.І., Гончаренко Л.В. Дослідження випадку корозії емальованих труб холодного водопостачання 48

ЗВАРЮВАННЯ У МИСТЕЦТВІ

Мінаков С.М., Чвертко Є.П., Стреленко Н.М., Мінаков А.С. Застосування присадки CuSi3 для з'єднання деталей художніх виробів електродуговим ТІГ зварюванням-паянням ... 54

ІНФОРМАЦІЯ

Ризики та небезпека під час проведення зварювальних робіт ... 59

Зварювання ТІГ стало простим – у чому ж секрет? 61

PrAT «Дніпрометиз» 63

CONTENT

Laureates of the National academy of sciences of Ukraine awards named after outstanding scientists 3

WELDING TECHNOLOGIES

Zyakhor I.V., Antipin E.V., Didkovsky O.V., Kavunichenko O.V., Levchuk A.M., Shilo Yu.A., Yan Truska. Modern technologies of welding railway rails (Review) 5

WELDING IN THE SOLID PHASE

Poklyatskyi A.G., Motrunich S.I., Fedorchuk V.Ye., Falchenko Iu.V., Sagul M. Mechanical properties and structural features of butt joints produced at FSW of aluminium alloys of different alloying systems 18

WELDING OF STEELS

Nimko M.O., Skulsky V.Yu., Ivanenko T.V. Materials and technological approaches to welding of combined joints between martensitic and austenitic steels used in power machine building (Review) 27

MODELING OF PROCESSES

Milenin O.S., Velikoivanenko O.A., Rozyinka G.P., Pivtorak N.I. A numerical method of multiscale modeling of the stress-strain state of large-sized structures in site welding 37

Lebedev O.V., Dubko A.G., Chvertko N.A. Fundamentals of computer multiphysics modelling of resistance welding of live tissues 44

CORROSION OF WELDED JOINTS

Osadchuk S.O., Nyrkova L.I., Goncharenko L.V. Investigation of corrosion of enamel cold water supply pipes 48

WELDING IN ART

Minakov S.M., Chvertko E.P., Strelenko N.M., Minakov A.S. CuSi3 Application for joining art products by arc TIG braze-welding ... 54

INFORMATION

Risks and dangers during welding 59

TIG welding made simple – what is the secret? 61

PrJSC «Dneprometiz» 63



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



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

Засновники

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

Адреса

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ
03150, Україна, Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11
Тел./факс: (38044) 205-23-90
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 2023

Передплатний індекс 70031.
12 випусків на рік (видається щомісячно).
Друкована версія: 3360 грн. за річний комплект
з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.
Електронна версія: 3360 грн. за річний комплект
(випуски журналу надсилаються електронною поштою
у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера
передплатника надається доступ до архіву журналу).
Передплата можлива на попередні випуски за будь-який рік.
Статті з журналу «Автоматичне зварювання» вибірково
перевідаються англійською мовою в журналі
«The Paton Welding Journal»:
www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

За зміст рекламних матеріалів
видавець 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, V.V. Knysh,
V.M. Korzhyk, Yu.M. Lankin,
L.M. Lobanov, S.Yu. Maksimov,
M.O. Pashchin, V.D. Poznyakov,
I.O. Ryabtsev;**
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
Executive Director – O.T. Zelnichenko,
International Association «Welding», Kyiv, Ukraine

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./fax: (38044) 205-23-90
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 2023

Subscription index 70031.

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

\$384, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.

\$312, 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.

Articles from «Автоматичне Зварювання» (Automatic Welding)
journal is republished selectively in English in
«The Paton Welding Journal»:

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

Publisher is not responsible
for the content of the promotional material.

Підписано до друку 15.05.2023.
Формат 60×84/8. Офсетний друк. Ум. друк. арк. 7,44
Друк ТОВ «ДІА».
03022, м. Київ-22, вул. Васильківська, 45.

ЛАУРЕАТИ ПРЕМІЙ НАН УКРАЇНИ ІМЕНІ ВИДАТНИХ УЧЕНИХ

27 квітня 2023 р. під час чергової сесії Загальних зборів Національної академії наук України було урочисто вручено *Золоті медалі ім. Б.Є. Патона НАН України*. Ця висока нагорода була присуджена вперше. Академія заснувала її 2020 р. задля увічнення пам'яті академіка Бориса Патона і присуджує за видатні досягнення у створенні інноваційних науково-технічних розробок, які знайшли широке практичне використання. За результатами конкурсу 2022 р. нагороду було присуджено:

– заступнику директора Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України академіку НАН України Леоніду Лобанову за створення технологій бездеформаційного зварювання виробів ракетно-космічної техніки та розроблення й впровадження методів лазерної

інтерферометрії для оцінювання якості зварних з'єднань;

– Генеральному директору Державного підприємства «Державне Київське конструкторське бюро «Луч»» члену-кореспонденту НАН України Олегу Коростельову – за розроблення та організацію серійного виробництва новітніх зразків озброєння і військової техніки.

Також під час сесії Загальних зборів президент НАН України академік Анатолій Загородній вручив дипломи лауреатам премій імені видатних учених України за підсумками конкурсу 2022 р.

Премію імені Євгена Оскарівича Патона – нагороду Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства НАН України за видатні наукові роботи в галузі створення нових металевих матеріалів і методів їх обробки – за цикл праць



Під час сесії Загальних зборів НАН України 27 квітня 2023 р.



Президент НАН України академік Анатолій Загородній поздоровляє Леоніда Лобанова (фото ліворуч) та Олега Коростельова (фото праворуч) з високими нагородами Національної академії наук України

«Фізичні процеси при зварюванні та обробці матеріалів» отримав директор Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона академік Ігор Кривцун.

Премію імені Олега Костянтиновича Антонова



Нагороду отримувє академік НАН України Ігор Кривцун

за видатні досягнення в галузі технічної механіки та літакобудування – за роботу «Удосконалення методів проектування та дослідження ефективних високонавантажених газових турбін двигунів літальних апаратів» отримали:

– керівник групи Конструкторського науково-дослідницького комплексу ДП «Івченко-Прогрес» ДК «Укроборонпром» кандидат технічних наук Сергій Хомилев;

– керівник бригади Конструкторського науково-дослідницького комплексу ДП «Івченко-Прогрес» ДК «Укроборонпром» Сергій Різник;

– завідувач відділу Інституту технічної теплофізики НАН України академік НАН України Артем Халатов.

Премію імені Георгія Степановича Писаренка

за видатні наукові роботи в галузі міцності матеріалів і конструкцій – за серію праць «Обчислювальні підходи та нелінійні моделі оцінки міцності та прогнозу надійності композитних та конструктивно складних елементів машинобудівних конструкцій» отримали:

– директор Інституту проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України член-кореспондент НАН України Анатолій Зіньковський (1949–2022);

– професор кафедри Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» доктор технічних наук Геннадій Львов;

– директор Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» доктор технічних наук Олексій Ларін.

Премію імені Івана Павловича Пулюя за видатні роботи в галузі прикладної фізики – за встановлення механізму утворення об'ємного нанокристалічного титану та отримання його зразків отримали:

– старший науковий співробітник Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України кандидат фізико-математичних наук Владислав Москаленко;

– науковий співробітник Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України кандидат фізико-математичних наук Олександр Смірнов;

– молодший науковий співробітник Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН України кандидат фізико-математичних наук Юлія Погрібна.

Премію імені Георгія Володимировича Карпенка за видатні наукові роботи в галузі фізико-хімічної механіки матеріалів і матеріалознавства – за цикл праць «Методологічні основи діагностування корозійно-механічного руйнування елементів конструкцій» отримали:

– директор Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України академік НАН України Зіновій Назарчук;

– заступник директора з наукової роботи Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України член-кореспондент НАН України Валентин Скальський;

– провідний науковий співробітник Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України доктор технічних наук Олександра Дацишин.



Нагороду отримувє академік НАН України Зіновій Назарчук

Щиро вітаємо лауреатів премій НАН України та бажаємо міцного здоров'я, творчої наснаги і подальших творчих успіхів на благо нашої науки!

За матеріалами сайту НАН України
<https://www.nas.gov.ua>

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК (Огляд)

І.В. Зяхор¹, Є.В. Антіпін¹, О.В. Дідковський¹, О.В. Кавуніченко¹, А.М. Левчук¹, Ю.А. Шило¹,
Yan Truska²

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

²SaZ s.r.o. Company. Koupelní 3908/6, 69501 Hodonín, Czech Republic

Проаналізовано відомі способи зварювання залізничних рейок з точки зору їх ефективності, продуктивності й можливості забезпечення показників якості зварних рейок відповідно до вимог діючих стандартів. При оцінці ефективності різних способів зварювання брались до уваги технологічні особливості формування зварних стиків, показники механічних властивостей, макро- та мікроструктура з'єднань, імовірність утворення дефектів, продуктивність та можливість автоматизації процесу зварювання. Показано, що практичне застосування отримали способи зварювання – термітне, автоматичне електродугове, газопресове, електроконтактне. Різновидами останнього є контактне стикове зварювання (КСЗ) безперервним оплавленням, КСЗ з попереднім підігрівом опором і КСЗ пульсуючим оплавленням. Технологія КСЗ пульсуючим оплавленням дозволяє забезпечити оптимальні термічні цикли при зварюванні сталей з різним хімічним складом і властивостями та забезпечує регламентовану діючими стандартами якість з'єднань. Наукові, технологічні та конструкторські розробки Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона (ІЕЗ) реалізовано в серії стаціонарних і мобільних рейкозварювальних машин, якими комплектуються пересувні рейкозварювальні комплекси, успішно впроваджені у багатьох країнах світу. Бібліогр. 53, табл. 3, рис. 14.

Ключові слова: термітне, електродугове, газопресове, контактне стикове зварювання оплавленням рейок

Сучасний стан і умови експлуатації залізниць України, необхідність їхньої інтеграції в міжнародну систему транспортних коридорів, необхідність підвищення швидкостей руху, забезпечення міжнародних нормативів по плавності й безпеці руху – все це вимагає постійного розвитку та удосконалення всього залізничного комплексу. Першою чергою це стосується шляхового господарства, що є одним з найважливіших елементів залізниць. Від стану верхньої будови колії залежить швидкість і безпека руху поїздів, припустимі навантаження на осі вагонів і локомотивів [1]. Аналіз продуктивності вантажних і пасажирських перевезень на європейських залізницях показує, що підвищення їх ефективності досягається, головним чином, за рахунок технічного прогресу [2, 3].

Однією з науково-технічних проблем, яка вимагає постійного вирішення, є удосконалення технологій і устаткування для зварювання суцільнозварної безстикової колії [4] з рейкових сталей сучасного виробництва [5–7]. Безстикова колія є найбільш прогресивною конструкцією верхньої будови колії в умовах сучасної експлуатації залізниць. Основна її перевага – майже повна ліквідація стиків з механічним кріпленням, які є причиною додаткових ударних динамічних впливів коліс на рейки.

З'єднання рейок при виготовленні довгомірних рейкових плітей (200...800 м) у стаціонарних

умовах, а також у польових умовах при їхньому укладанні в колію виконується зварюванням [3, 4]. Експлуатаційні показники залізничних рейок та їх зварних стиків є важливою складовою довговічності залізниць і регламентуються чинними вітчизняними і міжнародними стандартами [8–11]. Провідні світові виробники залізничних рейок постійно удосконалюють рейкові сталі з метою збільшення показників твердості, опору крихкому руйнуванню, зносостійкості, зокрема у головці рейки [12–17].

Для зварювання рейок при будівництві та ремонті залізничних колій застосовуються способи зварювання плавленням [18–26] і тиском [3, 4, 27–35]. Способи зварювання плавленням почали використовувати з 1920-х років, зокрема при ремонті, а згодом і спорудженні залізничних колій. Практичне застосування отримали способи – термітне [18–20], електродугове (ручне штучними електродами, напівавтоматичне у середовищі захисних газів і порошковим дротом [21, 22], автоматичне електродугове ванним способом з використанням плавкого мундштука [23–26]). Серед способів зварювання тиском ефективними є газопресове [27–28], індукційне [29, 30], лінійним тертям [31–34], електроконтактне [3, 4, 35–39], різновидами останнього є контактне стикове зварювання (КСЗ) безперервним оплавленням, КСЗ з попереднім підігрівом опором і КСЗ пульсуючим оплавленням.

Зяхор І.В. – <https://orcid.org/0000-0001-7780-0688>, Антіпін Є.В. – <https://orcid.org/0000-0003-3297-5382>,
Дідковський О.В. <https://orcid.org/0000-0001-5268-5599>, Кавуніченко О.В. <https://orcid.org/0000-0002-5164-9796>,
Левчук А.М. – <https://orcid.org/0000-0002-0361-7394>, Шило Ю.А. – <https://orcid.org/0000-0002-6174-5925>

© І.В. Зяхор, Є.В. Антіпін, О.В. Дідковський, О.В. Кавуніченко, А.М. Левчук, Ю.А. Шило, Yan Truska, 2023

Проводились роботи по розробці та дослідженню технології електрошлакового зварювання рейок [40, 41], але інформації про широке практичне застосування цього способу в наявних публікаціях знайти не вдалось.

Мета огляду – проаналізувати відомі способи зварювання залізничних рейок з точки зору їх ефективності, продуктивності та можливості забезпечення показників якості зварних рейок відповідно до вимог діючих стандартів.

При оцінці ефективності різних способів зварювання залізничних рейок брали до уваги технологічні особливості формування зварних стиків, показники механічних властивостей, макро- та мікроструктуру з'єднань, імовірність утворення дефектів, придатність до контролю (прогнозування) якості стиків, продуктивність та можливість автоматизації процесу зварювання.

Оскільки практичного застосування при будівництві та ремонті залізничних колій набули термітне, електродугове, газопресове і електроконтактне зварювання, то огляд присвячено аналізу саме цих способів.

Термітне (алюмінотермітне) зварювання. Термітне зварювання (ТЗ) – спосіб, у процесі якого нагрівання та плавлення торців рейок здійснюють теплом хімічної реакції порошкоподібної термітної суміші, яка складається з окисленого заліза, металевого алюмінію як реагуючих складових, та легуючих складових. Склад термітної суміші задається таким, щоб склад металу шва наближався до складу рейкової сталі.

З метою уникнення можливих дефектів зварного шва, забезпечується надійна фіксація рейок [18]. Термітну суміш виливають в тигель, встановлений над формою, і реакція запускається піротехнічним реагентом. Реакція триває 15...30 с, в процесі ТЗ температура досягає 2000 °С або вище, утворюють-

ся розплавлена сталь та глиноземний шлак, які залишаються в розплавленому стані і розділяються в тиглі за рахунок різниці в питомій вазі. Отримана таким чином розплавлена сталь заливається між торцями рейок. Процес від випуску до затвердіння займає близько 4 хв. Загальний час виконання одного з'єднання рейок становить близько 30 хв. Устаткування для ТЗ включає пальник для попереднього підігріву, тигель, комплект прес-форми та гратознімач з гідравлічним приводом.

Як видно з фотографії макроструктури шва, звареного ТЗ (рис. 1), ширина литої зони становить до 75 мм, а ширина ЗТВ – приблизно 20 мм по обидва боки шва [19]. Значення твердості металу шва та ЗТВ при ТЗ термічнозміцнених рейок суттєво менші у порівнянні з показниками основного металу. Для зменшення градієнта твердості (рис. 2) при ТЗ високоміцних рейок іноді застосовують термічну обробку – повторний нагрів зварного шва до аустенітної області та прискорене охолодження стисненим повітрям.

Структура металу шва характеризується величиною зерна № 1, властивого перегрітій сталі. Формування дефектних структур з великою величиною зерна сприяє втраті пластичності сталі [20]. Присутність у шві неметалічних включень типу сульфідів марганцю може суттєво впливати на формування дефектів, які значно знижують показники пластичності та міцності зварних стиків при циклічних навантаженнях.

При ТЗ довжина рейки під час зварювання не змінюється, тому цей метод успішно використовується у польових умовах для завершального етапу встановлення рейок. Якість зварювання залежить, головним чином, від дотримання умов підготовчих робіт та якості термітної суміші, що обумовлює низьку придатність ТЗ до автоматизованого контролю та прогнозування якості звар-

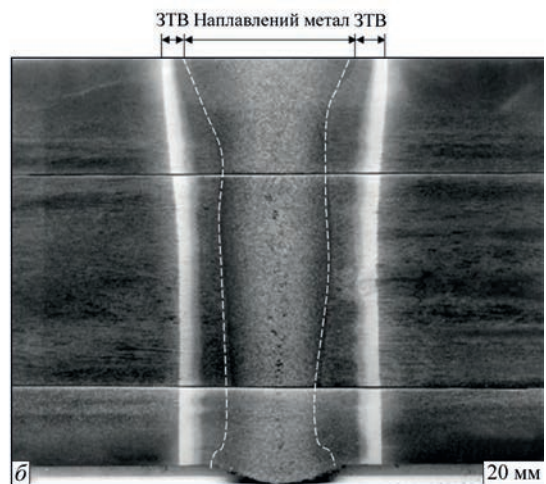


Рис. 1. Послідовність технологічних операцій при ТЗ (а) [19], макроструктура шва (б) [23]

них швів. Необхідний рівень твердості металу з'єднання залежить від марки рейки і може контролюватися кількістю легуючих елементів [20]. Незважаючи на порівняно низьку продуктивність, неможливість автоматизації процесу, технологія ТЗ завдяки високій мобільності та універсальності понад сто років застосовується для з'єднання рейок різного призначення (на трамвайних і залізничних коліях), а також для приварки хрестовин стрілочних переводів [18, 19, 23, 37].

Електродугове зварювання (ЕДЗ). Найбільш простий різновид – ручне ванне ЕДЗ покритими електродами застосовується в основному для з'єднання трамвайних і кранових рейок [21]. Однак цей спосіб не забезпечує задовільної якості з'єднань залізничних рейок, залежить від кваліфікації зварювальника і значно поступається за продуктивністю іншим способам зварювання. Більш високу продуктивність має напівавтоматичне ванне ЕДЗ, яке, зокрема, використовували при ремонті залізничних колій метрополітену [21]. Для запобігання утворенню тріщин у зоні зварного з'єднання проводили попередній підігрів до температури 300...350 °С. У роботі [22] описується досвід використання ЕДЗ закритою дугою з використанням високовуглецевих електродів для з'єднання рейок із високоміцних сталей, при цьому технологічний цикл зварювання передбачав попередній підігрів і післязварювальну термічну обробку. Більш висока

продуктивність досягалась при автоматичному зварюванні плавленням з використанням комбінації технологій ЕДЗ плавким електродом у захисному газі (для підосви рейок) та електрошлакового зварювання у вузький зазор [22].

Є досвід успішного застосування ЕДЗ при будівництві швидкісної залізничної лінії в Японії, де завдяки удосконаленню технології та зварювальних матеріалів, а також застосування спеціальної термічної обробки вдалося значно поліпшити якість зварних з'єднань [23]. Процес ЕДЗ рейок включає накладання кореневого валика з наскрізним проплавленням, багатопрохідне зварювання підосви, безперервне зварювання від шийки до головки та багатопрохідне зварювання головки рейок. Зварювальний дріт класу 800...1100 МПа використовуються для стандартних рейок із вуглецевої сталі. Оскільки вміст вуглецю у дроті низький, метал зварного шва має бейнітну структуру. Щоб покращити зносостійкість та стійкість до стирання металу шва високоміцних рейок, використовували високовуглецевий зварювальний дріт для отримання перлітної структури металу шва [23]. Продуктивність зварювання (один стик за 60...75 хв) навіть за умови використання сучасного обладнання знаходиться на низькому рівні.

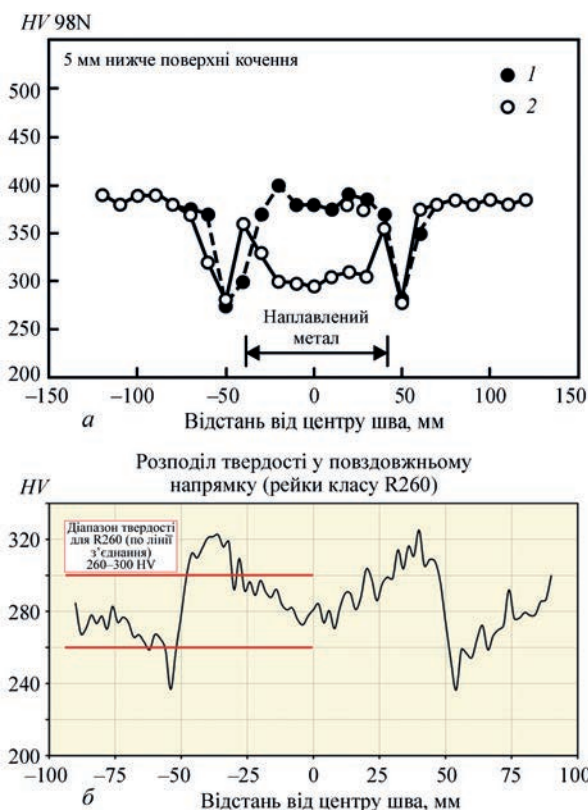


Рис. 2. Розподіл твердості в з'єднанні рейок класу міцності R350HT (а) [23] і R260 (б) [37]: 1 – після повторного нагріву і прискореного охолодження; 2 – після зварювання

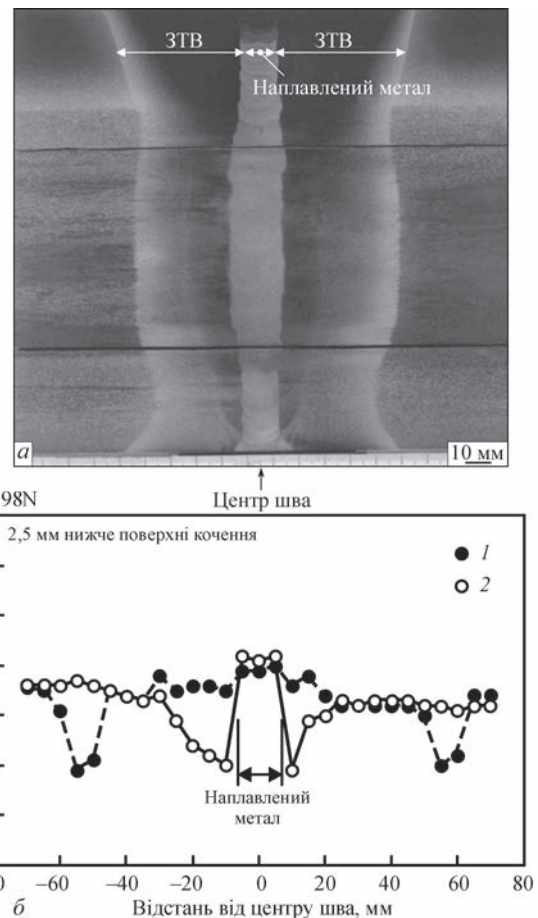


Рис. 3. Макроструктура шва (а), розподіл твердості в ЗТВ (б) з'єднання термічнозмцнених рейок [23]: 1 – після повторного нагріву і прискореного охолодження; 2 – після зварювання

На рис. 3 наведено макроструктуру шва та розподіл твердості в зоні з'єднання термічнозмцнених рейок. Ширина шва становить приблизно 20 мм, а загальна ширина ЗТВ – приблизно 100 мм. Твердість металу шва близька до твердості основного матеріалу *HV390*, але наявні зони пониженої твердості з обох боків шва. При повторному нагріванні та прискореному охолодженні зварного стику, яке проводять для зменшення градієнта твердості, розташування зон пониженої твердості зміщується на відстань до 60 мм від центру шва [23]. В роботі [24] показано, що при ЕДЗ рейок найбільш небезпечною ділянкою з'єднань з точки зору зародження холодних тріщин, є метал ЗТВ. Без застосування попереднього підігріву до температури щонайменше 250 °С виключити утворення холодних тріщин у з'єднаннях проблематично. Збільшення погонної енергії зварювання сприяє тільки уповільненню процесів розвитку холодних тріщин у зварних з'єднаннях, але не запобігає їх зародженню.

Відомі різновиди ЕДЗ мають невисокі показники ефективності з точки зору гарантування бездефектності швів, придатності до автоматизованого контролю (прогнозування) якості зварювання, продуктивності процесу.

В ІЕЗ розроблено технологію автоматичного ЕДЗ ванним способом з використанням плавкого мундштука [25, 26]. Її відмінною особливістю (рис. 4, *а, б*) є використання самозахисного порошкового дроту, що подається через поздовжній канал в плоскому мундштуку, який плавиться, що дозволяє виконувати зварювання при зазорі 12...16 мм, а в окремих випадках 8...22 мм [25]. Розроблена технологія ЕДЗ завдяки механізації процесу зварювання дозволяє у 2...3 рази збільшити продуктивність робіт і значно покращити якісні показники зварних з'єднань, зберігаючи високу мобільність та універсальність обладнання (рис. 4, *в*). Спеціальні зварювальні матеріали та технологія автоматичного ЕДЗ забезпечують задовільні показники механічних властивостей з'єднань [25, 26]. Так, твердість металу шва зварного з'єднання рейок Р65 становить *HV 2600...3200* МПа, межа міцності – 800...900 МПа [25], руйнівне навантаження при випробуванні на статичний згин – 1500...1650 кН при стрілі прогину 16...22 мм. Дана технологія придатна для зварювання рейкових колій промислових підприємств, трамвайних та підкранових шляхів, а також у перспективі – для виконання оперативних ремонтних робіт на залізницях.

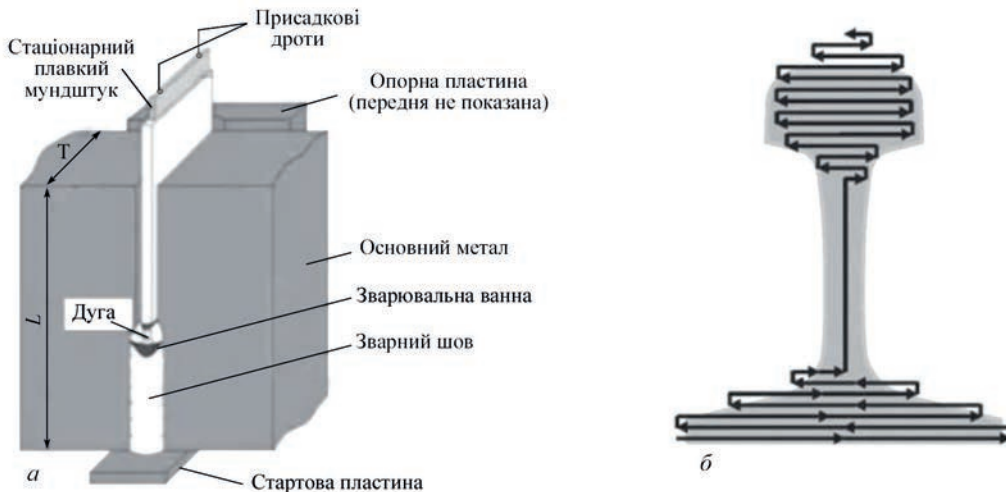


Рис. 4. Схема процесу (*а*), напрям переміщення мундштука (*б*) [25, 26], мобільне устаткування для ЕДЗ-ПІМ (*в*)

Газопресове зварювання (ГПЗ). ГПЗ – метод зварювання тиском, при якому торцеві поверхні рейок стикаються, а для нагрівання використовується газове полум'я [23, 27, 28]. Процес ГПЗ (рис. 5) складається зі стадій нагрівання, осадки, проковки і зрізання грату. Процес нагрівання виконується вручну оператором-зварювальником з використанням киснево-ацетиленової суміші, тому ступінь автоматизації процесу зварювання низький. Оскільки щільність контакту торців, що зварюються, значно впливає на якість з'єднання, торцеві поверхні обробляють спеціальними шліфувальними пристроями, що обумовлює відповідні вимоги до кваліфікації персоналу та організації підготовчих робіт.

У процесі нагрівання торцеві поверхні і прилеглі ділянки шва нагріваються до температури 1200...1300 °С. Тиск на торцях зазвичай залишається постійним $P = 20...30$ МПа протягом усього процесу нагрівання. У процесі ГПЗ кінці рейок пластично деформуються, величина укорочення рейок становить 20...40 мм. Випуклість, що утворилася в процесі проковки, в гарячому стані видаляється гратознімачем з гідравлічним приводом. При ГПЗ досягається відносно висока продуктив-

ність – час зварювання одного стику залежно від профілю рейки становить 6...7 хв. Устаткування для ГПЗ складається з газонагрівального пристрою, системи стискання рейок та гідравлічного гратознімача.

Ширина ЗТВ з'єднань рейок, становить близько 100 мм (рис. 6), значення твердості знижується приблизно до $HV270...290$, тому при ГПЗ термічнозміцнених рейок використовується післязварювальна термічна обробка, що суттєво знижує продуктивність робіт. Характерним видом дефектів, які утворюються у з'єднаннях при ГПЗ, є плівки оксидів. З метою зменшення утворення оксидів у роботі [27] досліджували процес ГПЗ з використанням водню у якості газу для нагрівання.

Незважаючи на те, що якість зварних стиків при ГПЗ залежна від рівня підготовки оператора, якості газу для нагрівання та підготовки торцевих поверхонь рейок, придатність до контролю (прогнозування) якості зварних з'єднань є вищою у порівнянні з ТЗ та ЕДЗ. За умови наявності кваліфікованого персоналу, правильній організації допоміжних і зварювальних робіт, ГПЗ при відносно незначному вкладенні коштів забезпечує надійне зварювання



Рис. 5. Послідовність технологічних операцій при ГПЗ [19]: 1 – зачистка кінців рейок; 2 – налаштування апарату для ГПЗ; 3 – у процесі ГПЗ (процес нагрівання); 4 – закінчення процесу ГПЗ (осадка); 5 – зрізання грату; 6 – зварна деталь відразу після ГПЗ

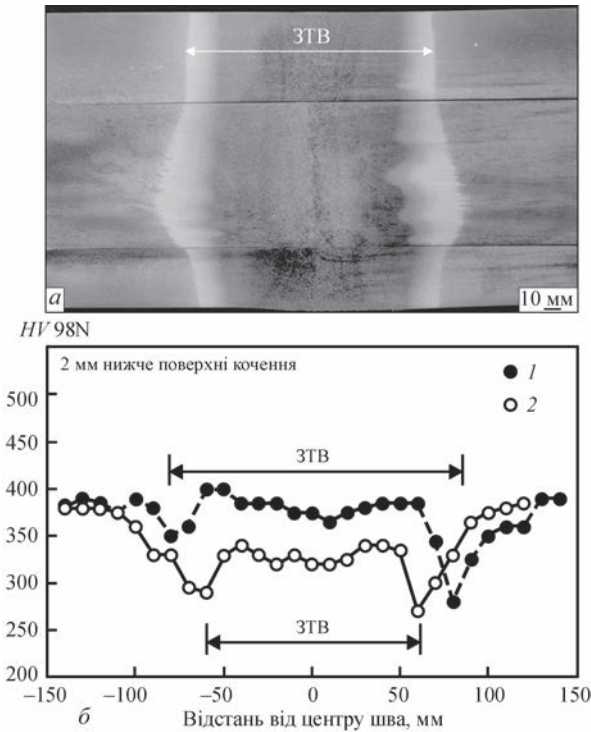


Рис. 6. Макроструктура (а), розподіл твердості в ЗТВ (б) з'єднання при ГПЗ термічнозміцнених рейок [23]: 1 – після повторного нагріву і прискореного охолодження; 2 – після зварювання

рейок, про що свідчить успішний досвід використання цієї технології в Японії [23]. В країнах ЄС, США цей метод не набув широкого застосування.

Контактне стикове зварювання (КСЗ) оплавленням. КСЗ може здійснюватися безперервним або пульсуючим оплавленням [36–39], а також оплавленням з попереднім підігрівом опором [35, 43–47]. При КСЗ безперервним оплавленням (рис. 7, а) рейки поступово зближують при включеному джерелі струму, що призводить до утворення і оплавлення контактів-перемичок. У результаті цього безперервного процесу забезпечується нагрівання рейок на задану глибину, на торцях утворюється шар рідкого металу, після чого швидкість зближення короткочасно підвищується (стадія інтенсивного оплавлення) (рис. 8, а) і виконується осадка. При цьому рідкий метал з оксидними плівками видавлюється зі стику назовні та при затвердінні утворює ґрат, який зазвичай видаляють в гарячому стані.

Процес КСЗ оплавленням з попереднім підігрівом включає стадії попереднього підігріву опором (основний розігрів рейок), інтенсивного оплавлення, осадки і зрізки ґрата. При підігріві опором (рис. 7, б) кінці рейок періодично стискають невеликим осьовим зусиллям і вмикають струм, розмикають і розводять, внаслідок чого досягається вирівнювання температурних полів по поперечному перерізу рейок. При попередньому підігріві опором джерело виділення енергії і зона розігріву майже повністю охоплює метал, що знаходиться між застискними губками зварювальної машини. Після

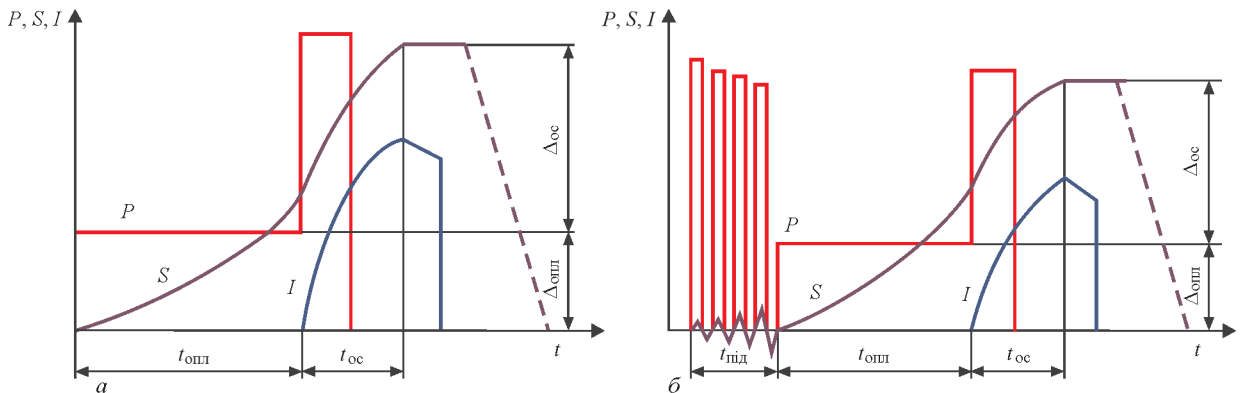


Рис. 7. Типові циклограми процесу КСЗ безперервним оплавленням (а) і КСЗ з попереднім підігрівом опором (б): $t_{опл}$, $t_{ос}$, $t_{від}$ – тривалість етапів оплавлення, осадки, підігріву; $\Delta_{опл}$ і $\Delta_{ос}$ – припуск на оплавлення і осадку; P – тиск, S – переміщення, I – струм

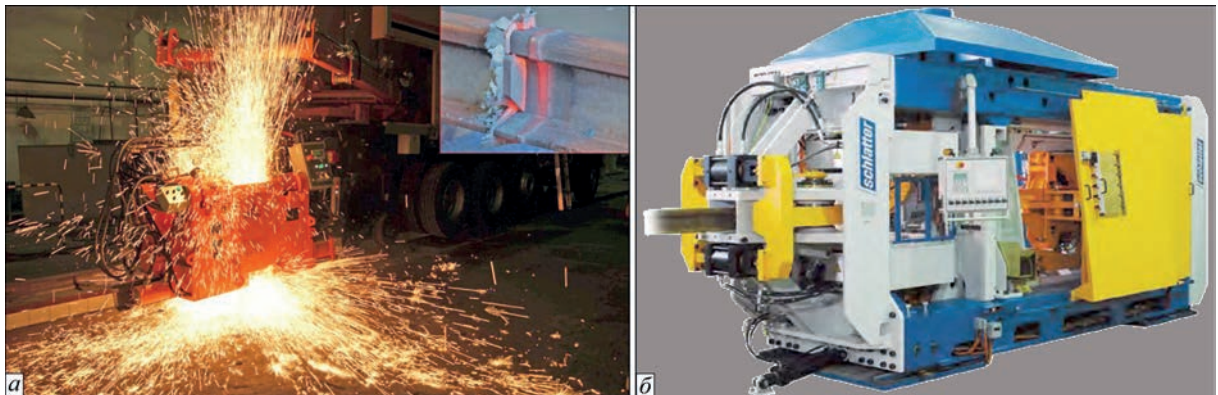


Рис. 8. Мобільна рейкозварювальна машина K922-1 у процесі КСЗ оплавленням (а), стаціонарна рейкозварювальна установка Schlatter GAAS 80 (б) [35]

підігрівання стиків рейок до потрібної температури виконується оплавлення і осадка. До середини 1960-х років ХХ сторіччя з'єднання рейок виконували методом КСЗ оплавленням з попереднім підігрівом в стаціонарних умовах на громіздкому устаткуванні вагою 20...30 т при наявності потужних (600...700 кВА) джерел енергопостачання.

Відомим сучасним розробником технології та устаткування для КСЗ оплавленням з попереднім підігрівом є компанія Schlatter (Швейцарія) [35], яка виготовляє рейкозварювальні комплекси, зокрема стаціонарні машини (рис. 8, б) для роботи в заводських умовах. Суттєвими обмеженнями застосування даної технології є необхідність використання джерела живлення значної потужності, відносна складність, великі габарити та висока вартість устаткування, зокрема і мобільних рейкозварювальних комплексів.

В ІЕЗ у 1960-х роках вперше у світі розроблено технологічні основи та створено високоефективне мобільне устаткування для зварювання залізничних рейок у польових умовах. В їх основу покладено технологію КСЗ безперервним оплавленням з програмною зміною основних параметрів процесу зварювання. Програмована зміна параметрів здійснюється спільно з використанням зворотних зв'язків, які автоматично корегують задані значення параметрів при зміні умов зварювання. Успішна реалізація даної технології обумовлена створенням оригі-

нальної конструкції зварювальних трансформаторів зі знизеним опором короткого замикання, зокрема була реалізована ідея використання елементів силового гідравлічного приводу у якості струмопровідних елементів вторинного контуру трансформаторів.

Недолік технології КСЗ безперервним оплавленням рейок – відносно великі значення припуску на оплавлення (близько 40 мм) і загального часу зварювання (180...240 с). Револьюційним удосконаленням технології КСЗ рейок стала технологія КСЗ пульсуючим оплавленням, розроблена в ІЕЗ [3, 4, 36, 38]. За рахунок багатфакторного регулювання процесу оплавлення забезпечується інтенсифікація контактного нагрівання, скорочуються втрати металу, підвищується термічний коефіцієнт корисної дії (ККД) процесу. Завдяки висококонцентрованому нагріванню, загальне енерговкладення, тривалість процесу і припуск на зварювання скорочується у 1,5...2,0 рази.

Для оцінки ефективності різних технологій КСЗ оплавленням необхідно розглянути вимоги чинних стандартів України та ЄС до зварних стиків залізничних рейок. Порівняння вимог чинних стандартів до показників якості зварних стиків рейок при КСЗ наведено в табл. 1.

Відповідно до нормативних документів – вітчизняних [8, 9] і європейських [10, 11] стандартів вимоги до зварних з'єднань залізничних рейок можна умовно розділити на групи:

Таблиця 1. Основні вимоги до показників якості зварних стиків рейок при КСЗ

Параметр, що контролюється	EN 14587-1:2018	EN 14587-2:2009	ТУ У 24.1-40075815-002:2016
Механічні властивості при випробуванні на статичний згин			
Мінімальне руйнівне навантаження при його прикладанні на головку рейки, кН	1600		1650
Стріла прогину, мм, не менше	20		30
Наявність дефектів при магнітопорошковому контролі			
Тріщини	недопустимо		недопустимо
Наявність дефектів у зламі з'єднання після примусового руйнування стиків			
Непровар	недопустимо		недопустимо
Матова пляма (не лінза)	припустимо $L < 10$ мм, $\delta < 0,7$ мм		не більше 3-х площею до 15 мм ²
Матова пляма (лінза)	припустимо $L < 4$ мм, $\delta < 0,7$ мм		
Дефекти та параметри ЗТВ при аналізі макроструктури			
Наявність непроварів, включень, тріщин, усадки	Не допускається		
Мінімальна ширина ЗТВ $H_{ЗТВ\min}$, мм	25	20	Не контролюється
Максимальна ширина ЗТВ $H_{ЗТВ\max}$, мм	45	45	Не контролюється
Допустима різниця ширини ЗТВ $H_{ЗТВ\max} - H_{ЗТВ\min}$, мм	10	20	Не контролюється
Мікроструктура			
Наявність мартенситу та бейніту при $\times 100$	Не допускається	Не допускається	Не контролюється
Розподіл твердості			
Нетермозміцнені рейки (R260, R220, R260Mn, M76), HV30	Min: $P - 30HV_{30}$ Max: $P + 60HV_{30}$	Min: $P - 30HV_{30}$ Max: $P + 60HV_{30}$	Min $P - 10\% HV_{30}$
Термозміцнені рейки (R350HT, K76Ф), HV30	Min: $P = 325HV_{30}$ Max: $P = 410HV_{30}$	Min: $P = 325HV_{30}$ Max: $P = 410HV_{30}$	Min $P - 15\% HV_{30}$
Втомні випробування			
Кількість циклів, млн	5	5	Не контролюється
Навантаження, кН	190	190	Не контролюється

- показники механічних властивостей – стріла прогину і навантаження до руйнування при випробуваннях стиків на статичний поперечний згин;
- наявність дефектів – види недопустимих і максимальні розміри та кількість допустимих дефектів;
- параметри зони термічного впливу (ЗТВ) – її ширина та нерівномірність по довжині та перерізу рейок при аналізі макроструктури зварних стиків;
- розподіл твердості у ЗТВ (мінімальне і максимальне значення);
- мікроструктура металу в зоні з’єднання і ЗТВ – допустима перлітна структура різної дисперсності (перліт, сорбіт, троостит), виключається наявність ділянок з мартенситною та бейнітною структурою;
- показники при випробуваннях стиків на циклічну міцність.

Аналіз даних табл. 1 показує, що існують суттєві відмінності у вимогах вітчизняних і європейських стандартів, перш за все, в необхідності визначення показників міцності при циклічних навантаженнях зварних стиків, і по-друге, кількісної оцінки параметрів ЗТВ з’єднань. Як свідчить інформація в наявних закордонних публікаціях [43–47], параметри ЗТВ (ширина, рівномірність по перерізу рейок) і показники втомної міцності є надзвичайно важливими в прогнозуванні зносостійкості зварних стиків і довговічності експлуатації залізничної колії (що є одним із визначальних критеріїв оцінки ефективності способу зварювання).

Тому, обгрунтованим і своєчасним є затвердження Міністерством інфраструктури України Переліку національних стандартів, відповідність яким надає презумпцію відповідності вимогам Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту (Наказ від 20.11.2019 р. № 815). До вказаного переліку включено національний стандарт ДСТУ EN 14587-2:2015 (EN 14587-2:2009, IDT), гармонізований з відповідним європейським нормативним документом [11]. Це означає, що при будівництві та ремонті вітчизняних залізничних колій з використан-

ням рейок закордонного виробництва показники якості стиків повинні оцінюватись на основі вимог європейського стандарту.

У зв’язку з цим, параметри ЗТВ, розподіл твердості в зоні з’єднань, мікроструктура (відсутність гартівних структур) є важливими критеріями оцінки ефективності технології КСЗ. Наявні публікації та багаторічний практичний досвід свідчать, що як і для будь-яких способів зварювання для КСЗ залізничних рейок проблемою є утворення в зоні термічного впливу градієнта твердості (рис. 9): для термічнозмцнених рейок – зон пониженої твердості з обох боків від лінії з’єднання («Double Dip Hardness») [43–47], а для нетермічнозмцнених рейок – суттєве підвищення твердості в зоні перегріву [4].

Головна проблема методу КСЗ з попереднім підгрівом це стабілізація теплового поля, що виникає під час зварювання. Зі збільшенням площі поперечного перерізу рейок енергетичний ККД процесу значно падає, також знижується коефіцієнт потужності. Практичний досвід свідчить, що за рахунок відповідного відпрацювання технології КСЗ з підгрівом вдається забезпечити вимоги до показників якості зварних стиків рейок (табл. 1). Однак, реалізація даної технології зварювання ускладнена в польових умовах за рахунок значних габаритних розмірів мобільних рейкозварювальних машин.

Технологія КСЗ пульсуючим оплавленням дозволяє у широких межах регулювати термічні цикли при зварюванні сталей з різним хімічним складом і властивостями та за умови оптимізації технологічних режимів забезпечує регламентовану чинними стандартами [10, 11] якість стиків рейок, виконаних як стаціонарними, так і мобільними рейкозварювальними машинами [4, 39].

Порівняння різних способів зварювання рейок. У табл. 2 наведено оціночне порівняння розглянутих способів зварювання рейок за декількома показниками із літературного джерела [23], а у табл. 3 – оцінку за іншими розглянутими критеріями.

Таблиця 2. Порівняння способів зварювання залізничних рейок [23]

Способи зварювання	Час зварювання, хв	Обладнання		Навички оператора	Якість зварювання
		Початкові інвестиції	Мобільність		
КСЗ	2...4	Значні	Низька	Не потребує	Висока
ГПЗ	5...7	Значні	Середня	Потребує	Висока
ЕДЗ	60	Незначні	Висока	Потребує	Задовільна
ТЗ	30	Незначні	Висока	Не потребує	Задовільна

Таблиця 3. Оціночне порівняння способів зварювання залізничних рейок

Характеристика (показник)	КСЗ	ГПЗ	ЕДЗ	ТЗ
Металургія процесу	Ковка	Ковка	Плавлення	Плавлення
Автоматизація процесу	Висока	Середня	Середня	Низька
Ширина ЗТВ, мм	20...45	120...150	80...100	115...140
Придатність до контролю (прогнозування) якості з’єднань	Висока	Середня	Низька	Низька

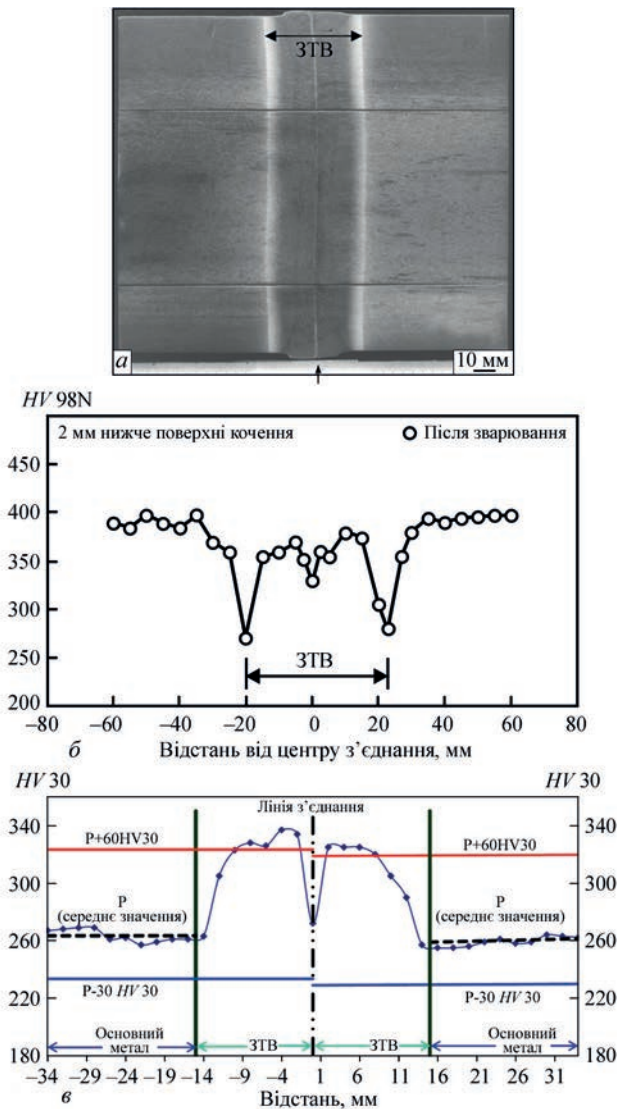


Рис. 9. Макроструктура зварного з'єднання рейок при КСЗ оплавленням (а); розподіл твердості у з'єднанні рейок класу R350НТ (б) [23] та R260 (в)

Практичний досвід свідчить, що незважаючи на порівняно низьку продуктивність, складність автоматизації процесу, способи зварювання плавленням (ТЗ і ЕДЗ) завдяки невисокій вартості по-

чаткових інвестицій, високій мобільності та універсальності понад сто років застосовується для з'єднання рейок різного призначення на трамвайних і залізничних коліях, підкранових шляхів промислових підприємств, а ТЗ успішно використовується для приварки хрестовин стрілочних переводів на залізничних коліях.

Незважаючи на невисокий ступінь автоматизації процесів підготовки кінців рейок, нагрівання, контролю якості з'єднань, газопресове зварювання за умови наявності кваліфікованого персоналу, правильній організації допоміжних і зварювальних робіт забезпечує надійне зварювання рейок, про що свідчить успішний досвід використання цієї технології в Японії.

Практичний досвід використання КСЗ оплавленням з попереднім підгрівом опором, зокрема компанії Schlatter, свідчить про відповідність показників якості зварних стиків рейок вимогам чинних стандартів. Основним обмеженням застосування даної технології є відносна складність, великі габарити та висока вартість рейкозварювального устаткування.

Починаючи з 1960-х до 2010-х рр. технологія КСЗ безперервним оплавленням успішно застосовувалась при з'єднанні рейок у стаціонарних і польових умовах, зокрема всіх типів рейок мартенівського виробництва. Недоліками технології КСЗ безперервним оплавленням рейок є відносно великі значення припуску на оплавлення, загального часу зварювання і складність забезпечення заданих нормативними документами термічних циклів, що необхідно для якісного з'єднання сучасних зносостійких рейок конверторного виробництва.

Технологія КСЗ пульсуючим оплавленням дозволяє у широких межах регулювати термічні цикли при з'єднанні залізничних рейок різних категорій, класу міцності зі сталей з різним хімічним складом та забезпечує регламентовану чинними стандартами якість з'єднань. У 2000-х рр. освоєно

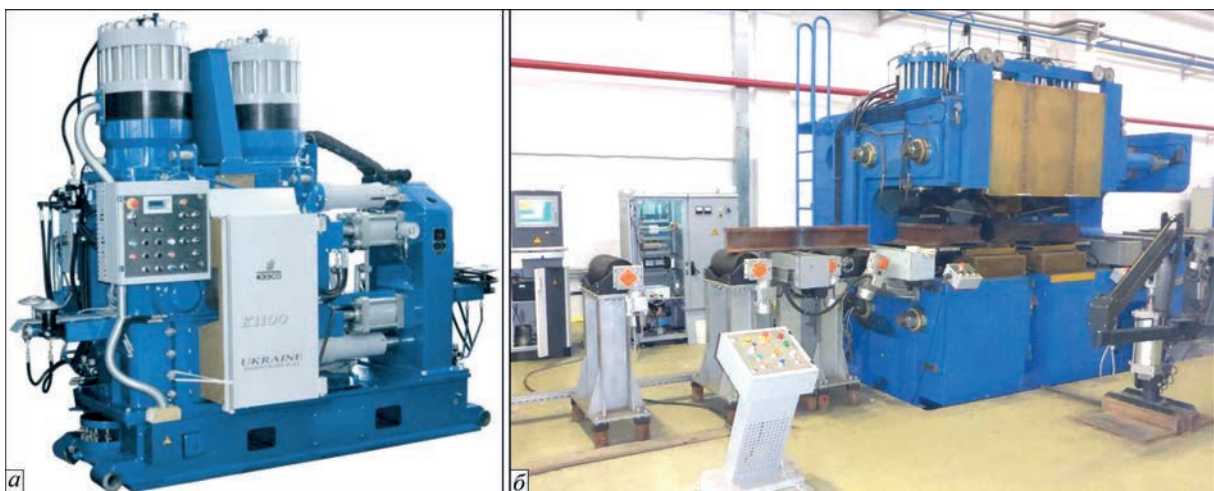


Рис. 10. Стаціонарні рейкозварювальні установки К1100 (а), К924 (б), розроблені ІЕЗ

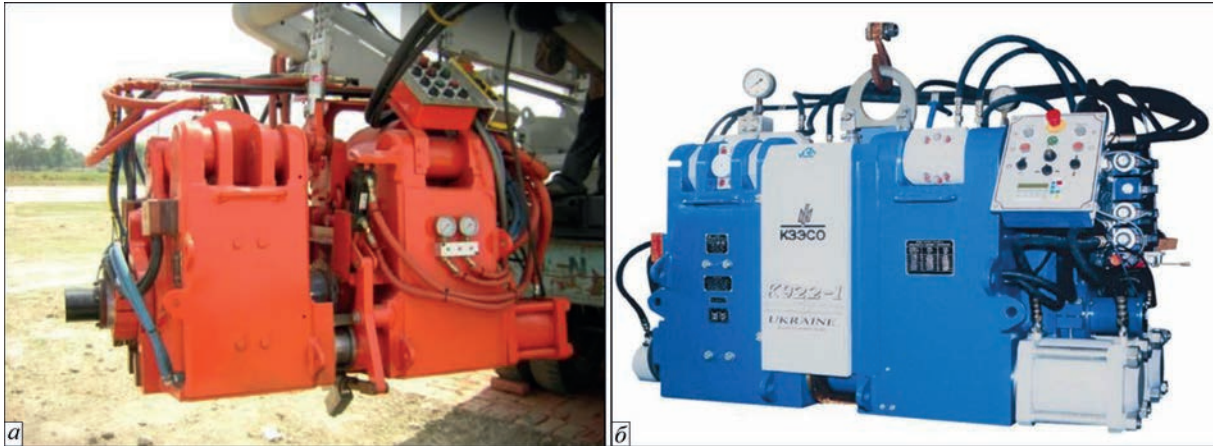


Рис. 11. Мобільні рейкозварювальні машини K920 (а), K922-1 (б)

виробництво мобільних і стаціонарних рейкозварювальних машин, оснащених комп'ютеризованими системами керування процесом і контролю основних параметрів зварювання. В основу систем покладені принципи керування процесом пульсуючого оплавлення [48–50]. Система автоматичного керування базується на використанні швидкого гідроприводу, промислового комп'ютера

з монітором для візуалізації даних, контролера, датчиків переміщення, напруги й тиску. При зварюванні кожного стику відбувається самонастроювання параметрів, що забезпечує оптимізацію програм їхньої зміни на всіх етапах оплавлення й у цілому за період зварювання. Комп'ютеризована система контролю реєструє всі параметри зварювання, визначає їх допустимі відхилення від зада-

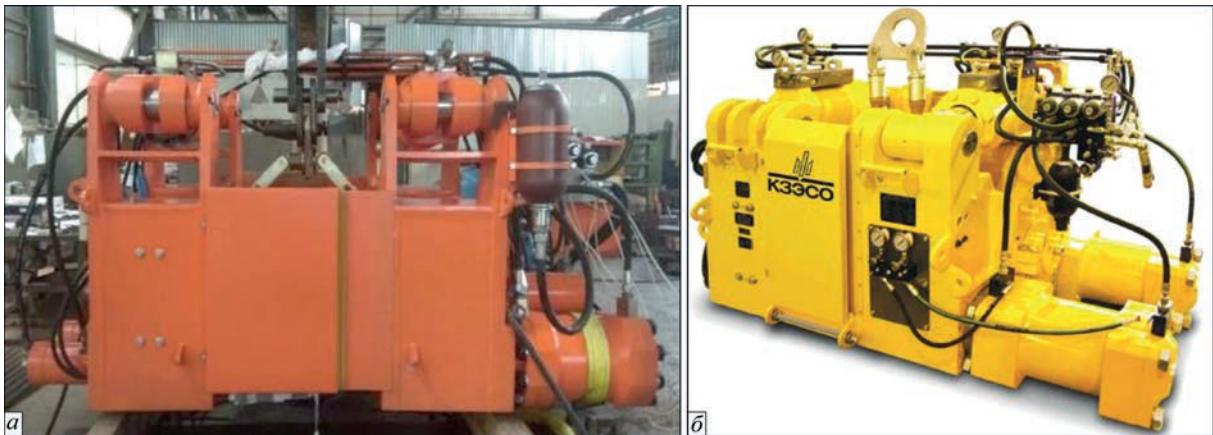


Рис. 12. Мобільні машини K960 (а), K945 (б), рейкозварювальний комплекс з машиною K945 (в) для КСЗ рейок з «натягом»

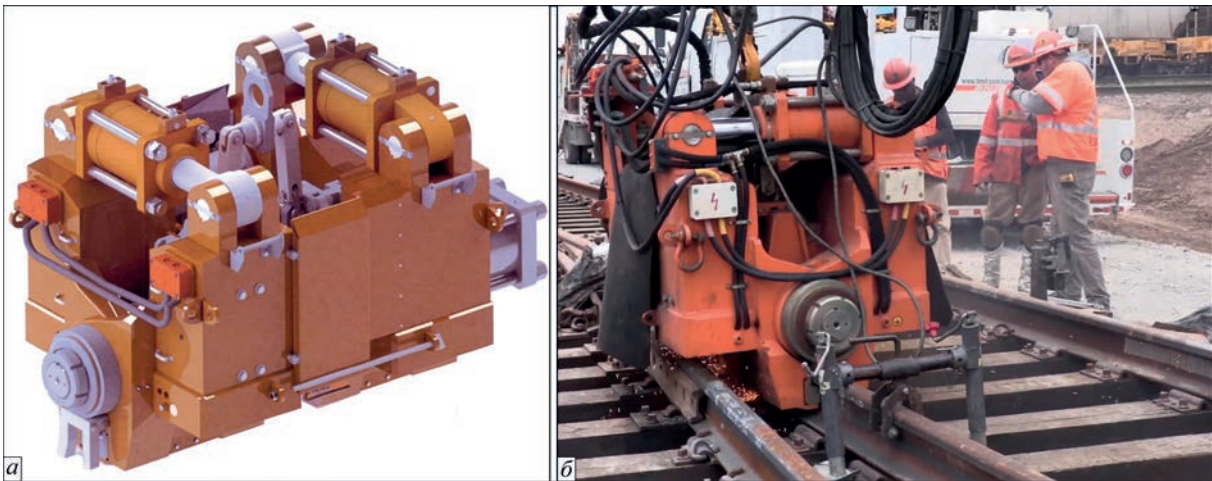


Рис. 13. Модель машини K1045 (а) та зварювальний комплекс з машиною K1045 для КСЗ рейок у важкодоступних локаціях (б)



Рис. 14. Рейкозварювальний комплекс KCM 005 на комбінованому шасі, оснащений машиною K920 (а), K922-1 (б)

них величин і відповідно до встановлених алгоритмів видає оцінку якості з'єднань відразу після виконання зварювання [49, 51].

Наукові, технологічні та конструкторські розробки ІЕЗ реалізовано в серії стаціонарних (K1000, K1100, K924) і мобільних машин (K900, K920, K921, K922-1, K930, K945, K950, K1045), якими комплектуються пересувні рейкозварювальні комплекси (рис. 10–14). Відмінними характеристиками цих машин є кінематична схема, особливості конструкції механізмів затискання та осьового переміщення, зусилля осадки (650...2000 кН) та інше. Перевагою більшості моделей машин є наявність вбудованого гратознімача з індивідуальним приводом для зрізання грату в гарячому стані без розтискання рейок, що зварюються.

В цих машинах втілено низку захищених міжнародними патентами інноваційних технічних рішень в області зварювання, систем керування, конструювання вузлів зварювальних машин, швидкодійних гідроприводів і принципів центрування рейок. За останні роки виготовлено й поставлено в різні країни (США, Канада, Австрія, Великобританія, Китай, Сінгапур, Таїланд, Малайзія, Тайвань, Казахстан, Словаччина та ін.) кілька сотень стаціонарних і мобільних рейкозварювальних машин.

Сучасні наукові, технологічні та конструкторські розробки ІЕЗ спрямовані на максималь-

ну адаптацію до вимог замовників з точки зору ефективності зварювання рейок різних категорій, класів міцності та хімічного складу (зокрема, заєвтектоїдного класу та легованих Cr, Mn, Ti, V) [52, 53], конструктивного вирішення та технічних характеристик машин, підвищення технологічності виготовлення окремих вузлів та механізмів і втілюються у конструкції нових мобільних рейкозварювальних машин.

Висновки

1. Для нероз'ємного з'єднання залізничних рейок використовуються способи зварювання плавленням (термітне, електродугове, електрошлакове) і тиском (газопресове, електроконтактне, індукційне, лінійним тертям).

2. Практичне застосування при будівництві та ремонті залізничних колій отримали способи зварювання – термітне, електродугове, газопресове й електроконтактне, різновидами якого є КСЗ безперервним оплавленням, КСЗ з попереднім підігрівом опором і КСЗ пульсуючим оплавленням.

3. Незважаючи на порівняно низьку продуктивність, неможливість автоматизації процесу, термітне зварювання завдяки високій мобільності та універсальності понад сто років застосовується для з'єднання рейок різного призначення

(на трамвайних і залізничних коліях), а також для приварки хрестовин стрілочних переводів.

4. Розроблена в ІЕЗ технологія автоматичного електродугового зварювання ванним способом з використанням плавкого мундштука придатна для зварювання рейкових колій промислових підприємств, трамвайних та підкранових шляхів, а також у перспективі – для виконання оперативних ремонтних робіт на залізницях.

5. Незважаючи на порівняно низький ступінь автоматизації процесу, газопресове зварювання за умови наявності кваліфікованого персоналу, при правильній організації допоміжних і зварювальних робіт забезпечує надійне зварювання рейок, про що свідчить успішний досвід використання цієї технології в Японії.

6. Практичний досвід використання КСЗ з попереднім підігрівом опором, зокрема компанії Schlatter, свідчить про відповідність показників якості зварних стиків рейок вимогам діючих стандартів. Основним обмеженням застосування даної технології є відносна складність, великі габарити та висока вартість рейкозварювального устаткування.

7. Технологія КСЗ пульсуючим оплавленням дозволяє забезпечити оптимальні термічні цикли при зварюванні сталей з різним хімічним складом і властивостями та забезпечує регламентовану чинними стандартами якість з'єднань. Наукові, технологічні та конструкторські розробки ІЕЗ реалізовано в серії стаціонарних і мобільних рейкозварювальних машин, якими комплектуються пересувні рейкозварювальні комплекси, успішно впроваджені у багатьох країнах світу.

8. Розвиток технологій і устаткування для КСЗ оплавленням обумовлюється необхідністю їх максимальної адаптації до сучасних вимог ефективного зварювання рейок різних категорій, класів міцності та хімічного складу, конструктивного вирішення та технічних характеристик рейкозварювальних машин, підвищення технологічності виготовлення окремих вузлів та механізмів.

Список літератури/References

1. Патон Б., Костюк М., Кучук-Яценко С. (2010) Инновационный кластер «Бархатный путь» и научно-технический прорыв Украины на мировой рынок строительства скоростных железных дорог. *Наука та інновації*, 6(2), 69–86. Paton, B., Kostyuk, M., Kuchuk-Yatsenko, S. (2010) Innovative cluster «Velvet road» and scientific-technical breakthrough of Ukraine into world market of construction of high-speed railways. *Nauka ta Innovatsii*, 6(2), 69–86 [in Ukrainian].
2. Cantos, P., Pastor, J., Serrano, L. (1999) Productivity, efficiency and technical change in the European railways: A non-parametric approach. *Transportation*, (26), 337–357. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1005127513206>
3. Кучук-Яценко С., Яковлев В., Дідковський О. та ін. (2016) Розвиток технологій та устаткування для зварювання рейок – ключ до розширення мережі суцільнозварних безстикових колій в Україні. *Українська залізниця*, 1, 56–59. Kuchuk-Yatsenko, S., Yakovlev, V., Didkovskiy, O. et al. (2016) Development of technologies and equipment of rail
- welding is the key for widening of all-welded seamless tracks in Ukraine. *Ukrainska Zaliznytsya*, 1, 56–59 [in Ukrainian].
4. Kuchuk-Yatsenko, S. (2018) Technologies and equipment for flash-butt welding of rails: 60 years of continuous innovations. *The Paton Welding J.*, 11–12, 25–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.12.03>.
5. Український науково-дослідний інститут металів «УкрНДІМет» (2004) *Рейки звичайні для залізниць широкої колії. Загальні технічні вимоги* ДСТУ 4344:2004. Київ, Держспоживстандарт України. DSTU 4344:2004 *Rails common to broad gauge railways. General specifications*. UkrNDIMet, Kyiv, Derzhspozhyvstandart [in Ukrainian].
6. *Railway applications – Track – Rail. Part 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above*. EN 13674-1:2011+A1:2017. European Committee for Standardization.
7. ДП «УкрНДНЦ» (2018) *Залізничний транспорт – Колія – Рейки – Частина 1: Залізничні рейки Вігноле 46 кг/м та вище* ДСТУ EN 13674-1:2018 (EN 13674-1:2011+A1:2017, IDT). DSTU EN 13674-1:2018 (EN 13674-1:2011+A1:2017, IDT) (2018) *Railway transport. Track. Rails. Pt. 1: Vignole railway rails 46 kg/m and above*. DP UkrNDNTs [in Ukrainian].
8. ТУУ 24.1-40075815-002:2016. *Рейки нові зварені для залізниць. Технічні умови*. ТУУ 24.1-40075815-002:2016. *New welded rails for railways. Specifications* [in Ukrainian].
9. *Технічні вказівки за технологією контактного зварювання рейок з натягом*, (2012). ВНД УЗ 32.7.02.012-2012 ЦП. ЦП-0280. Київ: НВП Поліграфсервіс. (2012) *Technical recommendations on technology of tension welding of rails*. VND UZ 32.7.02.012-2012 TsP-0280. Kyiv, Poligraphservis [in Ukrainian].
10. EN 14587-1:2018 (E). *Railway applications - Infrastructure - Flash butt welding of new rails - Part 1: R220, R260, R260Mn, R320Cr, R350HT, R350LHT, R370CrHT and R400HT grade rails in a fixed plant*.
11. EN 14587-2:2009 (E). *Railway applications – Track – Flash butt welding of rails – Part 2: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails by mobile welding machines at sites other than a fixed plant*.
12. Tachikawa, H., Uneta, T., Nishimoto, H. (2000) Steel welding technologies for civil construction applications. *Nippon Steel Techn. Rept.* 82(7), 35–41.
13. Xiao-Fei, L.L., Langenberg, P., Münstermann, S. et al. (2005) *Recent Developments of Modern Rail Steels*. HSLA Steels. 2.
14. Tatsumi, K., Mineyasu, T., Minoru, H. (2011) *Development of SP3 rail with high wear resistance and rolling contact fatigue resistance for heavy haul railways*. JFE Technical Report, (16).
15. Pointner, P. (2008) High strength rail steels – The importance of material properties in contact mechanics problems. *Wear.*, 265(9–10), 1373–1379.
16. Kuziak, R., Zygmunt, T. (2013) A new method of rail head hardening of standard-gauge rails for improved wear and damage resistance. *Steel Res. Int.*, 84(1), 13–19. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201200140>
17. Morant, S. (2015) Next-generation super-premium rail steels hit the tracks. *International Railway Journal*. <http://www.railjournal.com/index.php/track/next-generation-super-premium-rail-steels-hit-the-tracks.html?channel=531>
18. Lonsdale, C. (1999) *Thermite rail welding: History, process developments, current practices and outlook for the 21st century*. *Altoona, PA 16601: Conrail Technical Services Laboratory Altoona*.
19. Micenko, P., Muruganant, M., Huijun, L. et al. *Double Dip Hardness Profiles in Rail Weld Heat-affected Zone Literature and Research Review Report*, CRC Project Report, R3.121. Brisbane, Australia.
20. Wang, Y., Zhou, H., Shil, Y.-j. et al. (2012) Mechanical properties and fracture toughness of rail steels and thermit welds at low temperature. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 19(5), 409. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-012-0572-8>.
21. Dahl, B. (1995) Repair of rails on-site by welding. *Svetsaren*, 50, 2, 10–14.
22. Okumura, M. et al. (1995) Development of field fusion welding technology for rail-roadrails. *Nippon Steel Techn. Rept.*, 65, 4, 41–49.

23. Saita, K., Karimine, K., Ueda, M. (2013) Trends in Rail Welding Technologies and Our Future Approach. *Nippon steel and Sumitomo metal technical report.*, 105, 84–92.
24. Poznyakov, V., Kiriakov, V., Gajvoronsky, A. et al. (2010) Properties of welded joints of rail steel in electric arc welding. *The Paton Welding J.*, (8), 16–20.
25. Kuzmenko, G., Kuzmenko, V., Galinich, V. et al. (2012) New technology of electric arc bath welding of rails on tram and crane tracks. *The Paton Welding J.*, (5), 33–36.
26. Bajic, D., Kuzmenko, G., Samardzic, I. (2013) Welding of rails with new technology of arc welding. *Metalurgija*, 3, 399–402.
27. Yamamoto, R. (2007) Advances in Gas Pressure Welding Technology for Rails. *Railway. Technology Avalanche*, 17, 99–105.
28. Yamamoto, R., Komizu, Y., Fukada, Y. (2014) Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas pressure weld interface: joining phenomena of gas pressure welding. *Welding International*, 7, 510–520. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2012.753237>.
29. *Induction rail welding plant.* www.mirageservices.co.uk.
30. *Railway rail induction-welding device:* patent US2019330805: E01B29/46, B23K13/01, B23K37/04, E01B29/04, E01B29/44. Published on 06.12.2022.
31. Maalekian, M (2007) *Friction Welding of Rails.* PhD Th., Graz University of Technology.
32. Gould, J., Johnson, W. *Translational friction weld rail repair – Phase I final report*, EWI Project No. 52765GTH, FRA Contract No. DTFR53-11-C-00004.
33. Shira, S. *The use of translational friction welding for constructing and repairing rail for high speed and intercity passenger rail*–Phase II design report EWI Project 54368GTH Task 1 – 3, FRA Contract No. DTFR53-13-C-00041.
34. Zhang, H., Li, C., Zhu, Z. (2022) Influence of CDFW Process Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of U75V Rail Steel Welded Joint. *Metals*. 12(5), 711. DOI: <https://doi.org/10.3390/met12050711>.
35. *Schlatter Group. Rail welding systems* (2016) www.schlatter.ch.: www.schlatter.ch/en/welding-machines.
36. Kuchuk-Yatsenko, S., Krivenko, V., Didkovsky, A. (2012) Technology and new generation of equipment for flash butt welding of advanced high-strength rails for construction and reconstruction of high-speed railway lines. *The Paton Welding J.*, (6), 22–26.
37. *INNOTRACK – Innovative Track Systems.* Concluding Technical Report. <http://www.innotrack.eu>
38. Kuchuk-Yatsenko, S., Didkovsky, A., Shvets, V. (2016) Flash-butt welding of high-strength rails of nowadays production. *The Paton Welding J.*, (5-6), 4–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.06.01>
39. Kuchuk-Yatsenko, S., Didkovsky, A., Shvets, V. (2016) Flash-butt welding of high-strength rails. *Mining, Informatics, Automation and Electrical Engineering*, (528), 4.
40. Turpin, B., Danks, D. (2003) *Electroslag field welding of railroad rail–Final report for high-speed rail IDEA Project* http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/studies/idea/finalreports/highspeedrail/hsr-37final_report.pdf
41. Danks, D., Turpin, B. (2005) Recent advances in field electroslag rail welding. *Proceedings of the AREMA 2005 Annual Conferences.* www.arena.org/files/library/2005_Conference_Proceedings/00049.pdf
42. Grigorenko, G., Kostin, V., Zhukov, V. et al (2016) Peculiarities of structural transformations in HAZ metal of rail steel M76 joint produced by flash-butt welding. *Journal of Physical Science and Application*, 6(5), 54–652. DOI: <https://doi.org/10.17265/2159-5348/2016.05.0>
43. Weingrill, L., Krutzler, J., Enzinger, N. (2016) Temperature field evolution during flash-butt welding of railway rails. *Materials Science Forum.*, 879, 2088–2093. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.879.2088>
44. Micheletto, A., Cookson, J., Pang, Y. et al (2020) The structural integrity of flash-butt welded premium rail steel – Evaluation of strength, microstructure and defects. *Journal of Rail and Rapid Transit* (IF 1.87). DOI: <https://doi.org/10.1177/0954409720973138>
45. Mousavizade, M., Farhangi, H. (2009) Characterization of surface defects associated with flash butt-welded pearlitic rails and their contribution to overload and fatigue failures. *Advanced Materials Research.*, 83-86, 1262–1269.
46. Porcaro, R.R., Faria, G.L., Godefroid, L.B. et al (2019) Microstructure and mechanical properties of a flash butt welded pearlitic rail. *J. Mater. Process. Tech.*, (270), 20–27.
47. D4.6.1. *The influence of the working procedures on the formation and shape of the HAZ of flash butt and aluminothermic welds in rails* (2008) INNOTRACK Project TIP5-CT-2006-031415. <http://www.innotrack.eu>
48. Rudenko, P., Gavrish, V., Kuchuk-Yatsenko, S. (2017) Influence of flash butt welding process parameters on strength characteristics of railway rail butts. *The Paton Welding J.*, (5-6), 75–78. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.06.14>
49. Kuchuk-Yatsenko, S., Didkovsky, A., Antipin, E. (2017) Real-time operational control information management system for flash-butt welding of rails. *Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering*, (529), 4. DOI: <http://dx.doi.org/10.7494/miag.2017.1.529.35>.
50. Kuchuk-Yatsenko, S., Milenin, A., Velikoivanenko, E. (2018) Mathematical modeling of metal heating process in continuous flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, (10), 2–8. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.10.01>.
51. Kuchuk-Yatsenko, S. I., Rudenko, P. M., Gavrish, V. S. et al (2016) Statistical control of process of flash-butt welding of rails. Two-level control system. *The Paton Welding J.*, (6), 13–16. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.06.02>.
52. Shvets, V.I., Didkovsky, O.V., Antipin, Y.V. et al. (2022) Features of microstructure of butt joints of hypereutectoid ARE-AL-136HE-X rail steel in flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, (3), 33–40. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.03.04>
53. Shvets, V.I., Didkovsky, O.V., Zyakhor, I.V. et al (2023) Study of the structure of joints of rails of R260MN grade in flash-butt welding. *The Paton Welding J.*, (1), 3–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.01.01>

MODERN TECHNOLOGIES OF WELDING RAILWAY RAILS (Review)

I.V. Ziakhor¹, E.V. Antipin¹, O.V. Didkovsky¹, O.V. Kavunichenko¹, A.M. Levchuk¹, Yu.A. Shilo¹, Yan Truska²

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

E-mail: zyakhor@paton.kiev.ua

²SaZ s.r.o. Company. Koupeľní 3908/6, 69501 Hodonin, Czech Republic

The known methods of welding railway rails in terms of their efficiency, productivity and ability to provide the quality of welded rails in accordance with the requirements of acting standards were analyzed. When evaluating the efficiency of different methods of welding, the technological features of the formation of welded joints, indicators of mechanical properties, macro- and microstructure of joints, the probability of defects formation, efficiency and possibility of automation of the welding process were taken into account. It is shown that such welding methods received practical application as termitic, automatic electric arc, gas-pressure and electric resistance. The varieties of the latter are flash-butt welding (FBW) using continuous flashing, FBW with resistance preheating and FBW with pulsating flashing. FBW technology with pulsating flashing allows providing optimal thermal cycles when welding steels with different chemical composition and properties and provides the quality of joints regulated by acting standards. Scientific, technological and design developments of PWI were implemented in a series of stationary and mobile rail welding machines, which are completed with mobile rail welding complexes, successfully implemented in many countries of the world. 53 Ref., 3 Tabl., 14 Fig.

Keywords: *termitic, electric arc, gas-pressure, flash-butt welding of rails*

Надійшла до редакції 10.04.2023

МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА СТРУКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ, ОТРИМАНИХ ПРИ ЗТП АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ РІЗНИХ СИСТЕМ ЛЕГУВАННЯ

Покляцький А.Г.¹, Мотруніч С.І.¹, Федорчук В.Є.¹, Фальченко Ю.В.¹, Сагул М.²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: paton.testlab@gmail.com

²Чеський технічний університет, 16636, м. Прага, Чеська Республіка.

У статті викладено результати дослідження міцності, твердості та структури стикових з'єднань алюмінієвих сплавів різних систем легування, отриманих зварюванням тертям з перемішуванням (ЗТП). Показано, що цей процес дозволяє отримувати якісні з'єднання алюмінієвих сплавів різних систем легування як в однойменному, так і в різнойменному поєднаннях. Причому це стосується не тільки алюмінієвих сплавів, виготовлених за стандартною технологічною схемою методом лиття, але й гранульованих сплавів, які містять пересичений твердий розчин важкоплавких перехідних металів, отриманих з використанням порошкової металургії. Встановлено, що міцність зварних з'єднань, отриманих при ЗТП алюмінієвих сплавів, залежить від хімічних складів та механічних властивостей цих сплавів. Максимальну межу міцності мають зварні з'єднання високоміцних сплавів 1995 (483 МПа), 1963 (473 МПа) і Д16 (441 МПа), що обумовлено незначним ступенем розміщення металу в зоні термомеханічного впливу (ЗТМВ), де і відбувається руйнування зразків при статичному розтягуванні. Руйнування зразків зварних з'єднань різнойменних алюмінієвих сплавів також відбувається в цій зоні або на її межі з зоною термічного впливу (ЗТВ) зі сторони сплаву з нижчою міцністю. При цьому межа їх міцності знаходиться на рівні з'єднань відповідних однойменних сплавів. Показано, що в результаті інтенсивної пластичної деформації металу при ЗТП різних алюмінієвих сплавів у зоні формування нероз'ємного з'єднання в ядрі шва утворюються зерна практично глобулярної форми, розмір яких не перевищує 4...6 мкм. При зварюванні гранульованих сплавів пересичений твердий розчин у гранулах зберігається, відбувається тільки їх механічне подрібнення, внаслідок чого ядро шва має дрібнодисперсну щільну структуру, а гранули, що містять пересичений твердий розчин важкоплавких перехідних металів, рівномірно розподіляються по всьому об'єму матриці в металі шва. Бібліогр. 12, табл. 4, рис. 8.

Ключові слова: алюмінієві сплави, зварювання тертям з перемішуванням, твердість, міцність, структура

Вступ. Алюмінієві сплави широко використовуються при виготовленні різноманітних літальних апаратів, плавзасобів, залізничного, колісного та гусеничного транспорту, будівельних і мостових конструкцій. Значною мірою це обумовлено явними перевагами алюмінію у порівнянні з іншими конструкційними матеріалами: він утричі легший сталі, має високу корозійну стійкість та електропровідність, відзначається значною питомою міцністю, антимагнітністю та відсутністю порогу холодноламкості. При цьому більшість алюмінієвих сплавів легко обробляються і можуть якісно зварюватися, що дозволяє використовувати їх при виготовленні різноманітних вузлів конструкцій [1].

Залежно від функціонального призначення таких вузлів для їх виготовлення вибирають необхідні напівфабрикати і відповідні системи легування та композиції алюмінієвих сплавів. Світовий ринок пропонує споживачам близько трьохсот композицій конструкційних сплавів алюмінію, які мають різні фізико-механічні властивості та виготовляються у вигляді чушок, плоского про-

кату, профільного прокату, пресованого профілю, дроту і фольги [2, 3].

Крім звичайних алюмінієвих сплавів, отриманих за стандартною технологічною схемою методом лиття, серед пропонованого різновиду напівфабрикатів зростає частка композиційних матеріалів, які містять зміцнюючі армуючі частки оксиду алюмінію Al_2O_3 або карбиду кремнію SiC [4, 5]. Це дозволяє забезпечити високі значення модуля пружності, зносостійкості та жароміцності, а також низькі показники питомої ваги та коефіцієнтів термічного розширення і тертя. Завдяки використанню досягнень порошкової металургії серед асортименту конструкційних сплавів значне місце займають гранульовані алюмінієві сплави. При їх виготовленні завдяки високій швидкості охолодження гранул у процесі кристалізації вдається суттєво підвищити рівень легування сплавів важкотопкими перехідними металами, такими як хром, цирконій, титан, ванадій і т. п. Ці метали при кристалізації гранул утворюють аномально пересичені тверді розчини. При подальших технологічних нагрівах через розпад таких твердих розчинів

Покляцький А.Г. – <https://orcid.org/0000-0002-4101-2206>, Мотруніч С.І. – <https://orcid.org/0000-0002-8841-8609>
Федорчук В.Є. – <https://orcid.org/0000-0002-9929-3231>, Фальченко Ю.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3028-2964>,
Сагул М. – <https://orcid.org/0000-0001-5091-6381>

© А.Г. Покляцький, С.І. Мотруніч, В.Є. Федорчук, Ю.В. Фальченко, М. Сагул, 2023

утворюються дисперсні інтерметаліди, які забезпечують значне зміцнення сплавів [6, 7]. Серед нових досягнень у сфері виготовлення сучасних алюмінієвих сплавів варто відзначити створення квазікристалічних матеріалів. Вони містять інтерметаліди у вигляді нанорозмірних квазікристалічних часток, які забезпечують високі фізико-механічні властивості таких матеріалів [8, 9].

Проте реалізація потенційних можливостей таких перспективних матеріалів при виготовленні зварних конструкцій значною мірою залежить від правильного вибору способів отримання якісних нероз'ємних з'єднань. І якщо для більшості серійних сплавів успішно використовуються різні способи зварювання, то для згаданих вище перспективних матеріалів необхідно використовувати зварювання у твердій фазі, щоб зберегти переваги основного матеріалу у швах [5, 10, 11].

Вибір матеріалів при створенні вузлів зварних конструкцій значною мірою залежить від їх функціонального призначення та умов експлуатації. Тому доволі часто для забезпечення певних властивостей окремих елементів чи вузлів доводиться зварювати між собою не тільки однойменні алюмінієві сплави, але й різнойменні, які можуть відрізнятися як системою легування, так і способом виготовлення [3].

Мета даної роботи – оцінити ефективність застосування зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) для отримання якісних з'єднань різнойменних алюмінієвих сплавів, включаючи гранульовані.

Матеріали та методи обладнання. Для досліджень використовували алюмінієві сплави завтовшки 2 мм різних систем легування, хімічний

склад яких приведено в табл. 1. Серед представлених матеріалів є широко вживані сплави (АМг5М, АМг6М і Д16), перспективні високоміцні сплави (1460 і 1963) і сплав 6013 з підвищеною жаростійкістю, які отримані по стандартній технологічній схемі, а також сплави 1995 і 1419, отримані з використанням порошкової металургії. Механічні властивості листів досліджуваних сплавів приведені в табл. 2.

У відповідності з вимогами до зварних з'єднань конструкцій відповідального призначення проводили стандартне хімічне травлення листів у розчині NaOH з наступним освітленням у розчині HNO₃, а безпосередньо перед зварюванням – механічну зачистку поверхонь листів у зоні формування швів.

ЗТП здійснювали на розробленій в ІЕЗ ім. Є.О. Патона лабораторній установці при частоті обертання інструмента $N = 1420$ об/хв, використовуючи спеціальний інструмент з діаметром бурта 12 мм і наконечником довжиною 1,85 мм у вигляді зрізаного конуса діаметром при основі бурта 3,4 мм і кутом нахилу твірної конуса 12° [12]. З отриманих зварних з'єднань виготовляли шліфи для дослідження їх структурних особливостей. Межу міцності стикових з'єднань визначали при статичному одноосному розтягуванні стандартних плоских зразків з шириною робочої частини 15 мм на універсальному сервогідравлічному комплексі MTS 318.25. Оцінку структурних особливостей зварних з'єднань здійснювали за допомогою оптичного електронного мікроскопа ММТ-1600В. Твердість металу в різних зонах отриманих стикових зварних з'єднань вимірювали на лицьових поверхнях зразків на приладі «ROCKWELL» при навантаженні $P = 600$ Н.

Таблиця 1. Хімічний склад досліджуваних алюмінієвих сплавів

Марка сплаву	Масова частка хімічних елементів, % (основа – Al)											
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Li	Sc	Інші
АМг5М	0,50	0,50	0,10	0,7	5,2	–	0,20	0,09	–	–	–	0,05 Be
АМг6М	0,40	0,40	0,10	0,8	6,3	–	0,20	0,10	–	–	–	0,05 Be
Д16	0,50	0,50	4,5	0,7	1,6	0,10	0,25	0,15	0,05	–	–	–
1460	0,10	0,15	3,1	0,1	0,1	0,05	0,25	0,06	0,12	2,3	0,12	0,08 Be
6013	0,58	0,20	0,95	0,26	1,0	–	–	0,03	–	–	–	–
1963	0,15	0,25	1,9	–	2,9	–	6,8	–	0,15	–	–	–
1995	0,15	0,20	–	0,23	2,8	0,65	4,95	0,20	–	–	–	–
1419	0,15	0,20	–	2,0	–	1,05	–	0,60	0,60	–	–	0,60 V

Таблиця 2. Механічні властивості досліджуваних алюмінієвих сплавів

Марка сплаву	Межа міцності σ_b , МПа	Межа плинності $\sigma_{0,2}$, МПа	Відносне видовження δ , %	Кут згину α , град
АМг5М	338	161	21,8	180
АМг6М	359	220	22,3	96
Д16	445	315	18,5	83
1460	486	445	17,7	37
6013	410	317	8,0	96
1963	560	530	6,3	54
1995	610	527	7,1	26
1419	300	260	12,8	115

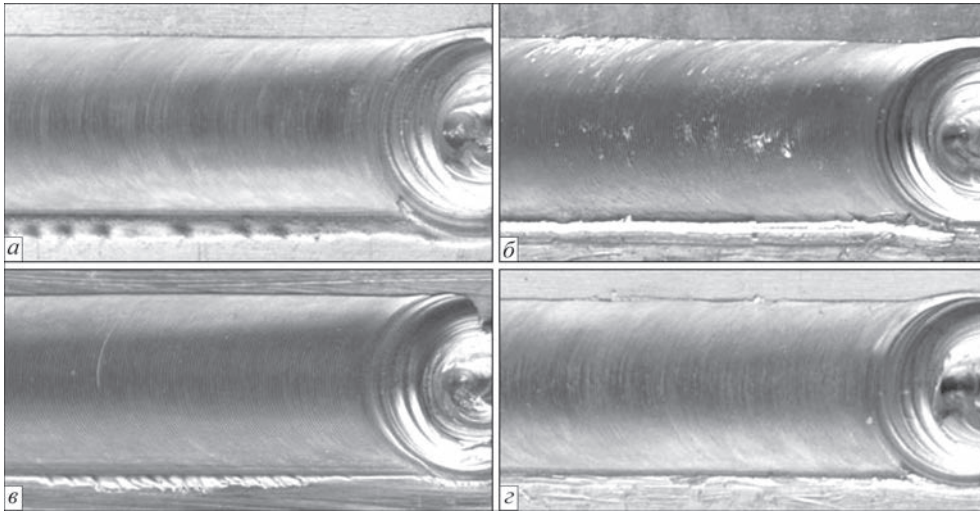


Рис. 1. Зовнішній вигляд лицьової поверхні швів, отриманих при ЗТП на оптимальних режимах, алюмінієвих сплавів в однойменному поєднанні: а – 6013; б – 1963; в – 1995; з – 1419

Результати досліджень та обговорення. Проведені експериментальні дослідження показали, що якісне формування швів алюмінієвих сплавів при ЗТП забезпечується при різних швидкостях лінійного переміщення інструмента. Так, оптимальна швидкість зварювання для сплаву АМг5М при частоті обертання інструмента 1420 об/хв становить 16 м/год, для сплаву 1460 – 14 м/год, для сплаву АМг6М – 12 м/год, а для сплаву Д16 – 10 м/год. Якісні зварні з'єднання сплаву 6013 можна отримати при швидкості зварювання 38 м/год, сплаву 1963 – 10 м/год, сплавів 1995 і 1419 – 26 м/год. Зовнішній вигляд таких зварних з'єднань приведено на рис. 1.

Результати та обговорення. Результати експериментальних досліджень показали, що для отримання якісних з'єднань різнойменних алюмінієвих сплавів ЗТП необхідно виконувати при меншій для обраної пари сплавів швидкості лінійного переміщення інструмента, що дозволяє зменшити ймовірність виникнення внутрішніх дефектів швів

у вигляді несучільностей. Зовнішній вигляд деяких отриманих тертям з перемішуванням якісних стикових зварних з'єднань алюмінієвих сплавів у різнойменному поєднанні приведено на рис. 2.

Вимірювання твердості металу в зоні зварювання показали, що ступінь його розміщення залежить від хімічного складу алюмінієвих сплавів. При цьому для більшості сплавів твердість металу шва дещо вища, ніж у зоні термомеханічного впливу (ЗТМВ), завдяки формуванню дрібнокристалічної структури металу. Так, при ЗТП сплаву 6013 з підвищеною корозійною стійкістю твердість металу шва становить $HRB\ 87\dots 88$, а в ЗТМВ – $HRB\ 85\dots 86$. Для високоміцного сплаву 1963 системи легування Al–Cu–Mg–Zn максимальна ступінь розміщення металу також спостерігається у ЗТМВ, тоді як у шві вона знаходиться на рівні $HRB\ 109\dots 110$ (рис. 3).

Пластичний низьколегований гранульований сплав 1419 має твердість металу шва та прилеглих ділянок на рівні $HRB\ 75\dots 76$, тоді як для основ-

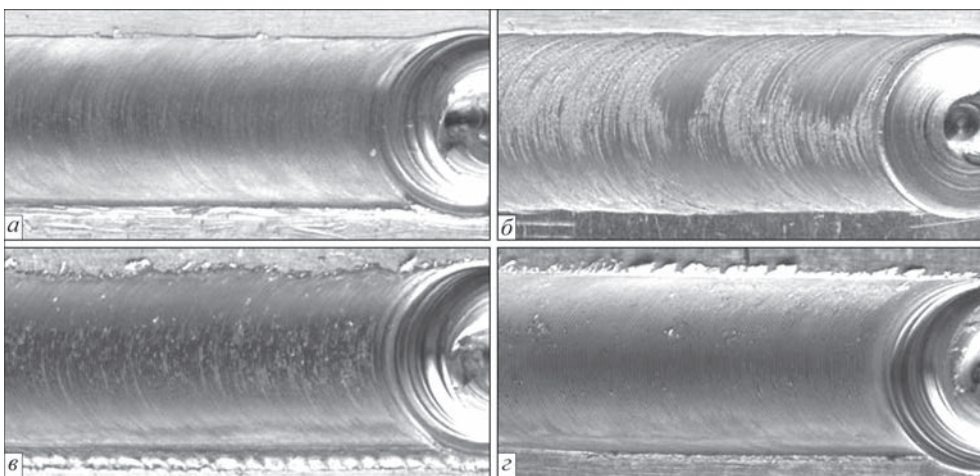


Рис. 2. Зовнішній вигляд лицьової поверхні швів, отриманих при ЗТП на оптимальних режимах, алюмінієвих сплавів у різнойменному поєднанні: а – АМг6М+6013; б – АМг6М+1419; в – 1460+6013; з – 1460+1995 (вказаний першим сплав знаходиться зверху – зі сторони набігання)

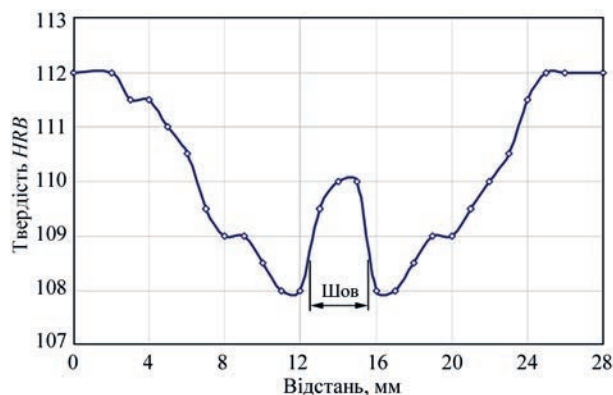


Рис. 3. Розподіл твердості у стикових з'єднаннях алюмінієвого сплаву 1963 завтовшки 2 мм, отриманих ЗТП

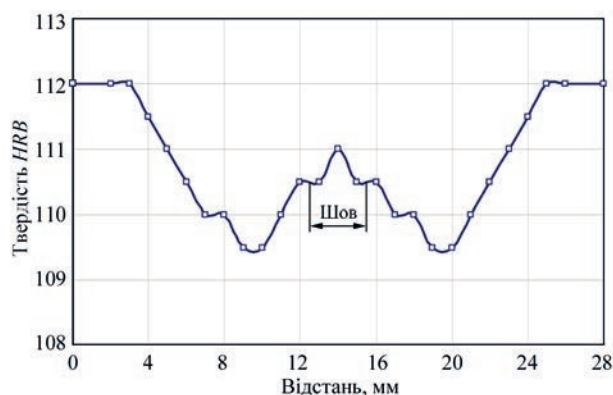


Рис. 4. Розподіл твердості у стикових з'єднаннях гранульованого алюмінієвого сплаву 1995 завтовшки 2 мм, отриманих ЗТП

ного металу вона становить HRB 87 (рис. 6). При ЗТП високоміцного гранульованого сплаву 1995 ступінь розміщення металу в зоні зварювання досить незначна – у шві твердість металу становить HRB 110,5...111,0, тоді як для основного металу вона знаходиться на рівні HRB 112, а в ЗТМВ – HRB 109,5...110,5 (рис. 4).

Вимірювання твердості металу в зоні формування нероз'ємних з'єднань, отриманих при різнойменному поєднанні алюмінієвих сплавів показали, що у порівнянні зі зварюванням одноіменних сплавів зміни твердості металу відбуваються лише у швах і на прилеглих до них ділянках

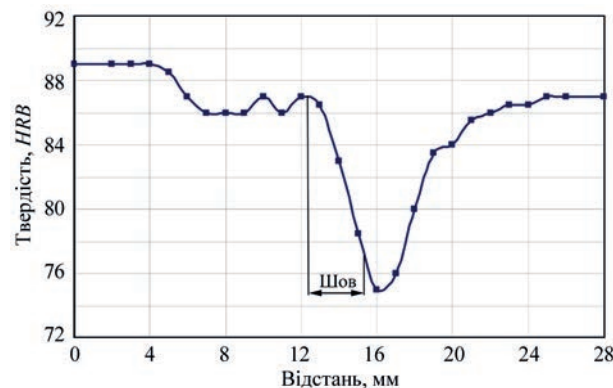


Рис. 5. Розподіл твердості у стикових з'єднаннях, отриманих при ЗТП сплаву АМг6М (ліва) зі сплавом 1419 (права) завтовшки 2 мм

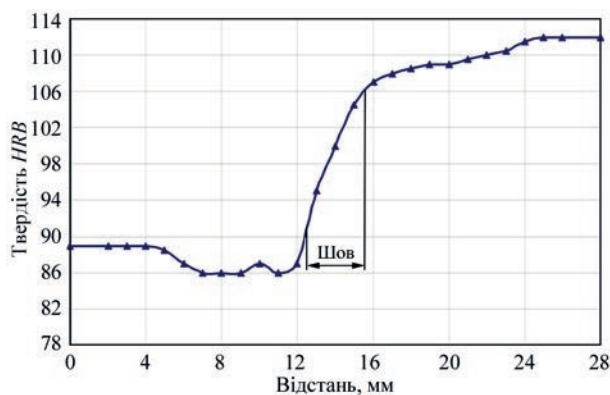


Рис. 6. Розподіл твердості у стикових з'єднаннях, отриманих при зварюванні тертям з перемішуванням сплаву АМг6М (ліва) зі сплавом 1963 (права) завтовшки 2 мм


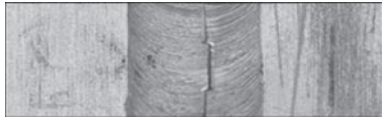
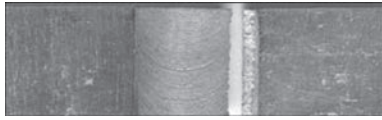


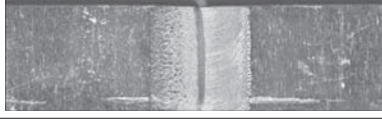
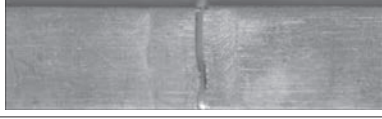
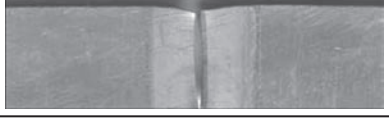
у ЗТМВ. Так, наприклад, при зварюванні сплаву АМг6М зі сплавом 1419 зі сторони АМг6М метал шва має твердість HRB 85...87, а зі сторони 1419 – HRB 77...79 (рис. 5).

Зварювання сплаву АМг6М з високоміцним сплавом 1963 забезпечує твердість металу шва зі сторони АМг6М на рівні HRB 90...95, а зі сторони 1963 – HRB 104...106 (рис. 6). Тоді як мінімальна твердість металу (HRB 86) спостерігається в ЗТМВ зі сторони сплаву АМг6М, як і для одноіменних з'єднань цього сплаву.

Аналогічна ситуація спостерігається і при зварюванні інших досліджуваних з'єднань різнойменних алюмінієвих сплавів – відбувається різка зміна твердості металу шва або її плавний перехід при поєднанні різних сплавів. Так, різка зміна твердості металу шва відбувається при зварюванні між собою таких сплавів: АМг5М + 1995, АМг6М + 1963, АМг6М + 1419, 1460 + 6013 та 1460 + 1995. Тоді як поєднання сплавів АМг6М + 6013, Д16 + 1963 і Д16 + 1995 забезпечує плавну зміну твердості металу в зоні зварювання. Наприклад, при зварюванні сплаву АМг5М зі сплавом 1995 твердість металу шва зі сторони сплаву АМг5М знаходиться на рівні HRB 84...90, а зі сторони сплаву 1995 – значно вища (HRB 104...108). При зварюванні сплаву АМг6М зі сплавом 6013 твердість металу шва приблизно однакова з обох сторін (HRB 87...89).

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що при ЗТП алюмінієвих сплавів в одноіменному поєднанні міцність їх зварних з'єднань та місце руйнування зразків залежать від хімічних складів та механічних властивостей зварюваних сплавів (табл. 3). У більшості випадків руйнування зразків зварних з'єднань відбувається у ЗТМВ. Деякі зразки сплавів АМг5М та АМг6М руйнуються по зоні термічного впливу (ЗТВ). А для з'єднань сплавів Д16 і 6013 характерним місцем руйнування зразків є межа між ЗТМВ і ЗТВ зі сторони відходу (ЗТВ_{відх.}).

Таблиця 3. Межа міцності стикових з'єднань, отриманих при ЗТП алюмінієвих сплавів в однойменному поєднанні

Номер	Марки сплавів	Межа міцності, МПа	Місце руйнування	Фото зруйнованого зразка
1	AMg5M	315 <u>310</u> 313	ЗТВ ЗТМВ	
2	AMg6M	334 <u>329</u> 332	ЗТВ ЗТМВ	
3	Д16	443 <u>439</u> 441	ЗТМВ/ЗТВ _{відх.}	
4	1460	310 <u>307</u> 309	ЗТМВ	
5	6013	238 <u>230</u> 234	ЗТМВ/ЗТВ _{відх.}	
6	1963	482 <u>462</u> 473	ЗТМВ	
7	1995	490 <u>478</u> 483	ЗТМВ	
8	1419	257 <u>253</u> 255	ЗТМВ	

Так, максимальну межу міцності мають зварні з'єднання високоміцних сплавів 1995 (483 МПа), 1963 (473 МПа) і Д16 (441 МПа), що обумовлено незначним ($HRB < 2,5$) ступенем розміцнення металу в ЗТМВ, де і відбувається руйнування зразків при статичному розтягуванні. При ЗТП високоміцного сплаву 1460 в зоні формування нероз'ємного з'єднання відбувається досить значне ($HRB 24$) розміцнення металу, внаслідок чого межа міцності його зварних з'єднань знаходиться на рівні 309 МПа. Мінімальну межу міцності мають зварні з'єднання сплавів 1419 (255 МПа) і 6013 (234 МПа), що також обумовлено великим ($\approx HRB 12$) ступенем розміцнення металу в ЗТМВ і нижчою міцністю основного матеріалу.

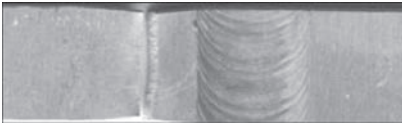
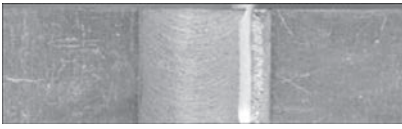

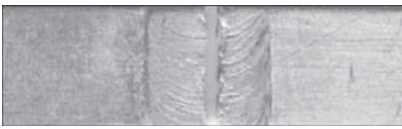
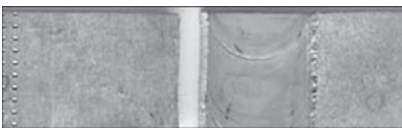
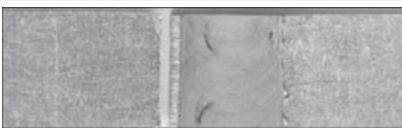
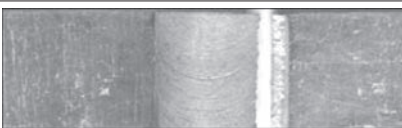
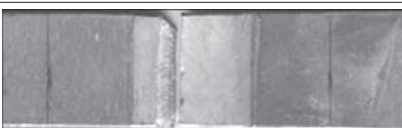
При ЗТП алюмінієвих сплавів у різнойменному поєднанні міцність з'єднань і місце руйнування зразків також залежать від того, який хімічний склад і механічні властивості мають зварювані матеріали (табл. 4).

Так, при зварюванні сплавів АМг5М чи АМг6М з високоміцними сплавами 1995 та 1963, які при цьому мало розміцнюються, руйнування

зразків з'єднань відбувається в ЗТВ або ЗТМВ зі сторони сплавів АМг5М чи АМг6М і їх міцність така ж, як і при зварюванні цих сплавів в однойменному поєднанні. Такі ж закономірності зберігаються і при зварюванні інших сплавів. Наприклад, зварні з'єднання сплавів 1460+1995 руйнуються в ЗТМВ, а Д16+1963 і Д16+1995 – на межі ЗТМВ і ЗТВ зі сторони сплавів 1460 і Д16, які мають меншу міцність. При цьому межа міцності таких з'єднань різнойменних сплавів знаходиться на рівні з'єднань відповідних однойменних сплавів. Руйнування зразків з'єднань, отриманих при ЗТП сплаву АМг6М зі сплавами 6013 та 1419, відбувається на межі зон термічного і термо-механічного впливу зі сторони сплавів з меншою міцністю.

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що при зварюванні у твердій фазі тертям з перемішуванням вище згаданих алюмінієвих сплавів в однойменному поєднанні внаслідок інтенсивної пластичної деформації металу в зоні формування нероз'ємних з'єднань відбувається подрібнення зерен. Причому при зварю-

Таблиця 4. Межа міцності з'єднань, отриманих при ЗТП алюмінієвих сплавів у різнойменному поєднанні

Номер	Марки сплавів	Межа міцності, МПа	Місце руйнування	Фото зруйнованого зразка
1	АМг5М + 1995	316 309 314	ЗТВ _{АМг5М} ЗТМВ _{АМг5М}	
2	АМг6М + 6013	236 231 234	ЗТМВ/ЗТВ ₆₀₁₃	
3	АМг6М + 1963	336 330 333	ЗТВ _{АМг6М} ЗТМВ _{АМг6М}	
4	АМг6М + 1419	259 252 256	ЗТМВ ₁₄₁₉	
5	Д16 + 1963	445 440 442	ЗТМВ/ЗТВ _{Д16}	
6	Д16 + 1995	442 439 440	ЗТМВ/ЗТВ _{Д16}	
7	1460 + 6013	237 232 234	ЗТМВ/ЗТВ ₆₀₁₃	
8	1460 + 1995	312 306 309	ЗТМВ ₁₄₆₀	

ванні сплавів, отриманих за стандартною технологічною схемою методом лиття, в ядрі шва утворюються зерна практично глобулярної форми, розмір яких не перевищує 4...6 мкм. У зоні термомеханічного впливу по границях спряження шва з основним металом спостерігається більш крупнозерниста (6...8 мкм) структура в порівнянні з ядром шва, а більшість зерен витягнуті в напрямку обертання інструмента. При цьому зі сторони набігання, де напрямки обертання та лінійного переміщення інструмента співпадають, спостерігається більш різка зміна напрямку орієнтації зерен, ніж з протилежної сторони відходу. У зоні термічного впливу зберігається структура основного матеріалу і оплавлення структурних складових не відбувається (рис. 7). При зварюванні гранульованих сплавів пересичений твердий розчин у гранулах зберігається, відбувається тільки їх механічне подрібнення, внаслідок чого ядро шва має дрібнодисперсну щільну структуру, а в зоні спряження шва з основним матеріалом лише змінюється напрямок текстури

прокату під дією обертального та поступального руху зварювального інструмента.

При ЗТП алюмінієвих сплавів у різнойменному поєднанні структура зварних з'єднань змінюється. Повне перемішування з'єднаних матеріалів спостерігається лише у верхній частині шва, яка становить 20...25 % від їх товщини. У центрі та нижній частині шва добре помітні окремі ділянки повністю неперемішаних об'ємів зварюваних сплавів, які утворилися внаслідок пластичного деформування металу і його масопереносу робочими поверхнями наконечника та бурта інструмента. При цьому розміри зерен у центральній частині шва приблизно такі ж, як і при ЗТП досліджуваних сплавів у однойменному поєднанні, що свідчить про інтенсивну пластичну деформацію металу. У ЗТМВ різнойменних зварних з'єднань спостерігаються незначні відмінності від однойменних, які також частково обумовлені наявністю повністю незмішаних об'ємів металу, а частково зміною умов формування швів

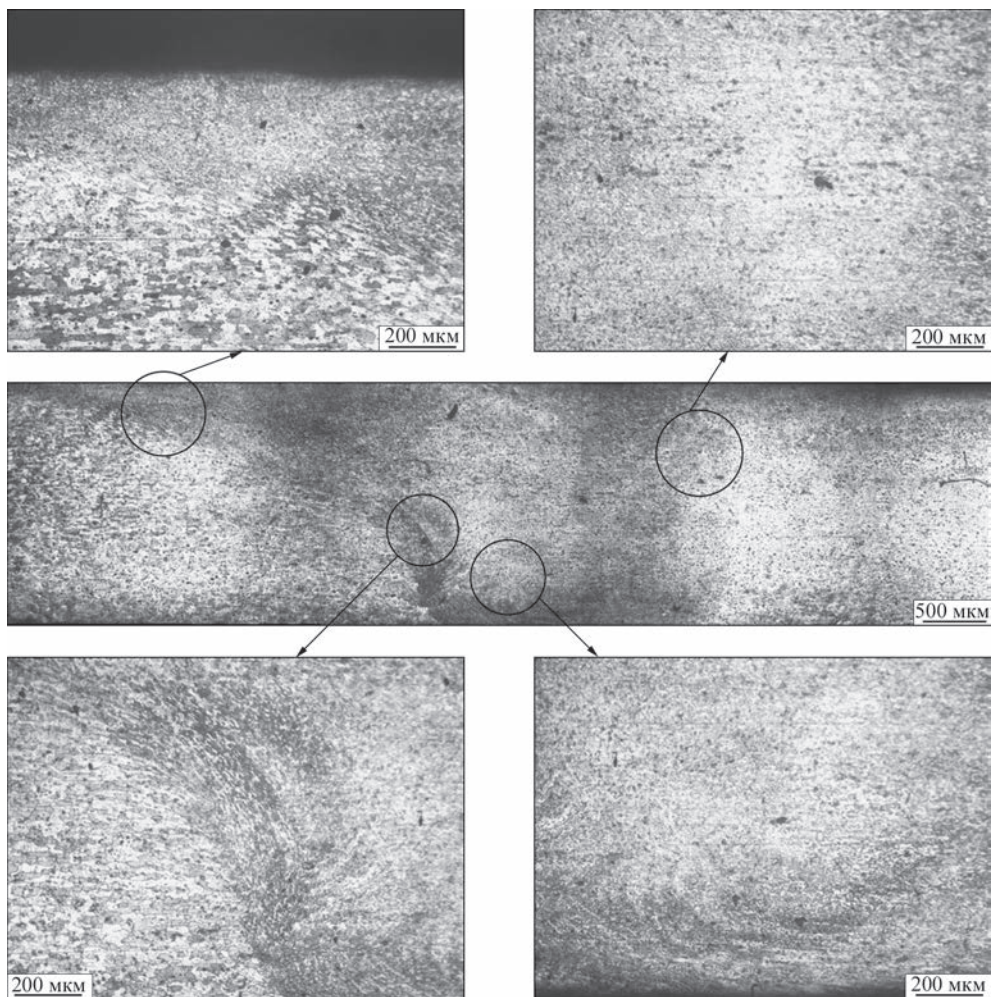


Рис. 7. Мікроструктура зварного з'єднання алюмінієвого сплаву 6013 завтовшки 2 мм, отриманого тертям з перемішуванням

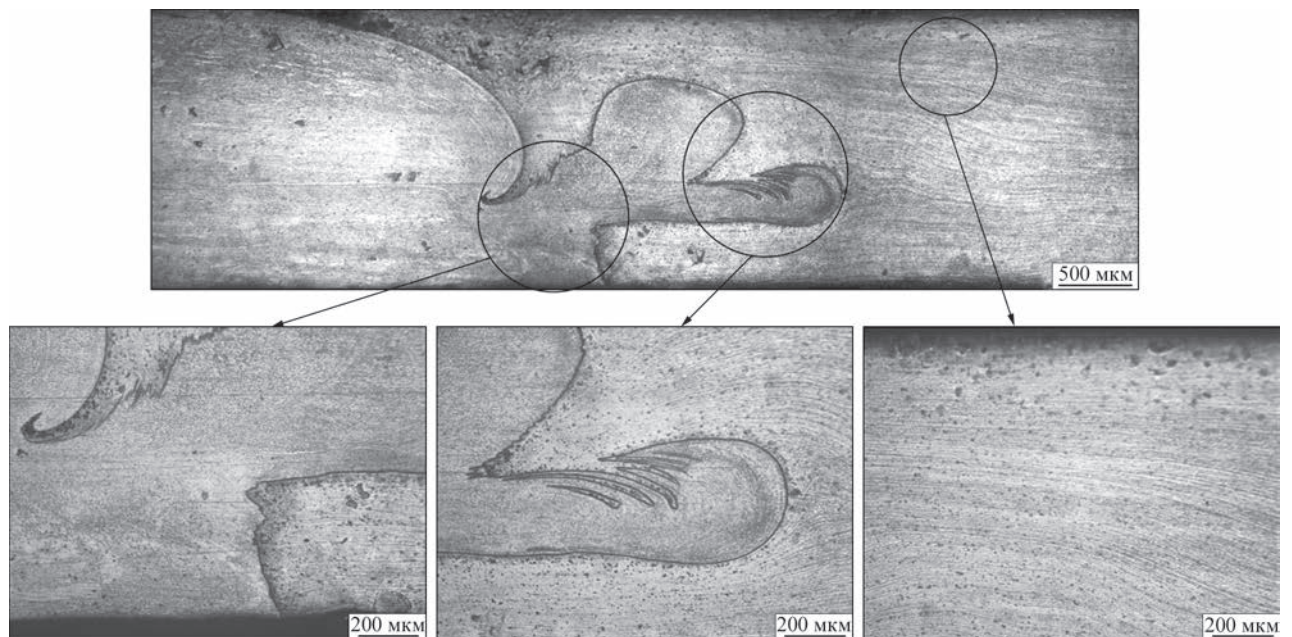


Рис. 8. Мікроструктура зварного різноіменного з'єднання завтовшки 2 мм, отриманого при ЗТП алюмінієвого сплаву 1460 (зліва) з гранульованим алюмінієвим сплавом 1995 (справа)

внаслідок різної пластичності зварюваних сплавів. При цьому у ЗТВ структура основного матеріалу не змінюється (рис. 8).

Висновки

1. Формування швів у твердій фазі при ЗТП дозволяє отримувати якісні нероз'ємні з'єднання

алюмінієвих сплавів різних систем легування як в однойменному, так і в різнойменному поєднаннях. Причому це стосується не тільки алюмінієвих сплавів, виготовлених за стандартною технологічною схемою методом лиття, але й гранульованих сплавів, які містять пересичений твердий розчин важкоплавких перехідних металів, отриманих з використанням порошкової металургії.

2. Ступінь розміщення металу у зварних швах залежить від хімічного складу алюмінієвих сплавів та їх здатності до термічного зміцнення. Мінімальна різниця між твердістю основного металу та металу шва спостерігається при ЗТП гранульованого алюмінієвого сплаву 1995 ($HRB \leq 1,5$) та високоміцного алюмінієвого сплаву 1963 ($HRB \leq 3,5$), схильних до гартування на повітрі. При зварюванні звичайних термічнозміцнених алюмінієвих сплавів 6013 і 1419 твердість металу швів набагато ($HRB > 9$) нижча, ніж твердість основного металу. У з'єднаннях, отриманих при різнойменному поєднанні алюмінієвих сплавів, у металі шва спостерігається різка або плавна зміна твердості при переході від одного сплаву до іншого, в залежності від ступеня розміщення зварюваних сплавів.

3. Міцність зварних з'єднань, отриманих при ЗТП алюмінієвих сплавів як в однойменному, так і в різнойменному поєднаннях, залежить від хімічних складів та механічних властивостей цих сплавів. Максимальну межу міцності мають зварні з'єднання високоміцних сплавів 1995 (483 МПа), 1963 (473 МПа) і Д16 (441 МПа), що обумовлено незначним ступенем розміщення металу в ЗТМВ, де і відбувається руйнування зразків при статичному розтягуванні. Руйнування зразків зварних з'єднань різнойменних алюмінієвих сплавів відбувається в ЗТМВ або на межі ЗТМВ і ЗТВ зі сторони сплаву з нижчою міцністю. При цьому межа їх міцності знаходиться на рівні з'єднань відповідних однойменних сплавів.

4. При ЗТП алюмінієвих сплавів як в однойменному, так і в різнойменному поєднаннях, через інтенсивну пластичну деформацію металу в зоні формування нероз'ємного з'єднання в ядрі шва утворюються зерна практично глобулярної форми, розмір яких не перевищує 4...6 мкм. При зварюванні гранульованих сплавів пересичений твердий розчин у гранулах зберігається, відбувається тільки їх механічне подрібнення, внаслідок чого ядро шва має дрібнодисперсну щільну структуру, а важкоплавкі легуючі елементи не виділяються з твердого розчину у вигляді алюмінідів, які можуть суттєво знизити властивості зварних з'єднань таких сплавів.

Список літератури

1. Ищенко А.Я., Лабур Т.М. (2013) *Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов*. Киев, Наукова думка. ISBN 978-966-00-1258-5.

2. Ищенко А.Я., Лабур Т.М., Бернадский В.М., Маковецкая О.К. (2006) *Алюминий и его сплавы в современных сварных конструкциях*. Киев, Экотехнология. ISBN 966-8409-14-0.
3. Белецкий В.М., Кривов Г.А. (2005) *Алюминиевые сплавы (Состав, свойства, технология, применение) Справочник*. Фридляндер И.Н. (ред.). Киев, КОМИНТЕХ. ISBN 966-8550-25-0.
4. Рябов В.Р., Павленко Ю.В. (1991) Сварка композиционных материалов (Обзор). *Автоматическая сварка*, **3**, 46–56.
5. Ищенко А.Я., Харченко Г.К., Фальченко Ю.В. и др. (2006) Твердофазное соединение в вакууме дисперсно-упрочненных композиционных материалов. *Сб.: Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*, **3**, 747–756.
6. Yasuhiro, Uetani, Ryotaro, Nagata, Hidetoshi, Takadi et al. (2007) Effect of Granule Size in Semi-Solid Slurry on Rheo-Extrusion of A7075 Aluminum Alloy. *Materials Science Forum* (Volumes 561-565), 291–294. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.561-565.291>
7. Guojiang, Dong, Changcai, Zhao, Yaxin, Peng, Ying, Li (2015) Hot granules medium pressure forming process of AA7075 conical parts/ *Chinese Journal of Mechanical Engineering* (Volume 28), 580–591. DOI: <https://doi.org/10.3901/CJME.2015.0217.019>
8. Inoue, A., Kimura, H. (2000) High-strength aluminium alloys containing nano-quasicrystalline particles. *Mater. Scien. And Eng.* **1**, 1–10.
9. Milman, Yu. V., Sirko, A. I., Yefimov, M. O. et al. (2006) High-strength alloys reinforced by nanosize quasi-crystalline particles for elevated temperature application. *High-Temperature materials and processes*, **1-2**, 19–29.
10. Poklyatsky, A. G., Ishchenko, A. Ya., Fedorchuk, V. E. (2011) Friction stir welding of composite, granulated and quasicrystalline aluminium alloys. *TPWG*, **7**, 2–7.
11. Мільман Ю.В., Захарова Н.П., Єфімов М.О. та ін. (2019) Структура та механічні властивості зварних з'єднань сплавів системи Al–Cr–Fe–Ti, що містять квазікристалічну фазу. *Електронна мікроскопія і прочність матеріалів*, **25**, 17–26.
12. Ищенко А.Я., Покляцький А.Г. (2010) *Інструмент для зварювання тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів*. Пат. 54096 Україна, МПК В23К 20/12; заявник і патентовласник ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. № u201005315; заяв. 30.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20.

References

1. Ishchenko, A. Ya., Labur, T. M. (2013) *Welding of modern structures from aluminium alloys*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian]. ISBN 978-966-00-1258-5.
2. Ishchenko, A. Ya., Labur, T. M., Bernadsky, V. M., Makovetskaya, O. K. (2006) *Aluminium and its alloys in modern welded structures*. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Russian]. ISBN 966-8409-14-0.
3. Beletsky, V. M., Krivov, G. A. (2005) *Aluminium alloys (Composition, properties, technology, application)*. In: Refer. book. Ed. by I. N. Fridlyander. Kyiv, KOMINTEKh. ISBN 966-8550-25-0.
4. Ryabov, V. R., Pavlenko, Yu. V. (1991) Welding of composite materials (Review). *The Paton Welding J.*, **3**, 46–56.
5. Ishchenko, A. Ya., Kharchenko, G. K., Falchenko, Yu. V. et al. (2006) Vacuum solid phase joint of dispersion-hardened composite materials. *Nanosistemy, Nanomaterialy, Nanotekhnologii*, **3**, 747–756 [in Russian].
6. Yasuhiro, Uetani, Ryotaro, Nagata, Hidetoshi, Takadi et al. (2007) Effect of granule size in semi-solid slurry on rheo-extrusion of A7075 aluminum alloy. *Mat. Sci. Forum*, Vol. 561-565, 291–294. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.561-565.291>
7. Guojiang, Dong, Changcai, Zhao, Yaxin, Peng, Ying, Li (2015) Hot granules medium pressure forming process of AA7075 conical parts/ *Chinese J. of Mechanical Engineering*, Vol. 28, 580–591. DOI: <https://doi.org/10.3901/CJME.2015.0217.019>
8. Inoue, A., Kimura, H. (2000) High-strength aluminium alloys containing nano-quasicrystalline particles. *Mater. Sci. And Eng.* **1**, 1–10.

9. Milman, Yu.V., Sirko, A.I., Yefimov, M.O. et al. (2006) High-strength alloys reinforced by nanosize quasi-crystalline particles for elevated temperature application. *High-Temperature Materials and Processes*, 1-2, 19–29.
10. Poklyatsky, A.G., Ishchenko, A.Ya., Fedorchuk, V.E. (2011) Friction stir welding of composite, granulated and quasicrystalline aluminium alloys. *The Paton Welding J.*, 7, 2–7.
11. Milman, Yu.V., Zakharova, N.P., Yefimov, M.O. et al. (2019) Structure and mechanical properties of welded joints of Al–Cr–Fe–Ti system with quasi-crystalline phase. *Elektronnaya Mikroskopiya i Prochnost Materialov*, 25, 17–26 [in Russian].
12. Ishchenko, A.Ya., Poklyatsky, A.G. (2010) Tool for friction stir welding of aluminium alloys. In: Pat. 54096, Ukraine, Int. Cl. B23K 20/12; fill. 30.04.2010, publ. 25.10.2010 [in Ukrainian].

MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURAL FEATURES OF BUTT JOINTS PRODUCED AT FSW OF ALUMINIUM ALLOYS OF DIFFERENT ALLOYING SYSTEMS

Poklyatskyi A.G.¹, Motrunich S.I.¹, Fedorchuk V.Ye.¹, Falchenko Iu.V.¹, Sagul M.²

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

E-mail: paton.testlab@gmail.com

² Czech Technical University, 16636, Prague, Czech Republic

The paper presents the results of investigations of the strength, hardness and structure of butt joints on aluminium alloys of different alloying systems, produced by friction stir welding (FSW). It is shown that this process allows producing sound joints of aluminium alloys of different alloying systems, both in similar and dissimilar combinations. This is true not only for aluminium alloys made by casting by the standard technological scheme, but also for granulated alloys, containing the oversaturated solid solution of refractory transition metals, produced by powder metallurgy. It is found that the strength of welded joints produced at FSW of aluminium alloys, depends on the chemical compositions and mechanical properties of these alloys. Maximum ultimate strength is demonstrated by welded joints of the following high-strength alloys: 1995 (483 MPa), 1963 (473 MPa) and D16 (441 MPa), which is due to a slight degree of metal softening in the zone of thermomechanical impact (ZTMI), which is where the samples fail at mechanical stretching. Destruction of samples of welded joints of dissimilar aluminium alloys also runs in this zone or on its boundary with the heat-affected zone (HAZ) from the side of the softer alloy. Their ultimate strength is on the level of the joints of the respective similar alloys. It is shown that intensive plastic deformation of metal at FSW of dissimilar aluminium alloys results in formation of grains of practically globular shape in the weld nugget in the permanent joint zone, their size not exceeding 4–6 μm. In granulated alloy welding, the oversaturated solid solution is preserved in the granules, just their mechanical refinement takes place, resulting in a fine dense structure of the weld nugget, and the granules containing an oversaturated solid solution of refractory transition metals are uniformly distributed over the entire volume of the matrix in the weld metal. 12 Ref., 4 Tabl., 8 Fig.

Keywords: aluminium alloys, friction stir welding, hardness, strength, structure

Надійшла до редакції 21.03.2023

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



LET'S JOIN
THE WORLD!

11. – 15. September, 2023

REGISTER NOW!

www.schweissen-schneiden.com




МАТЕРІАЛИ І ТЕХНОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО ЗВАРЮВАННЯ КОМБІНОВАНИХ З'ЄДНАНЬ МІЖ МАРТЕНСИТНИМИ І АУСТЕНІТНИМИ СТАЛЯМИ, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ЕНЕРГОМАШИНОБУДУВАННІ (Огляд)

М.О. Німко, В.Ю. Скульський, Т.В. Іваненко

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

Надано огляд недавньої зарубіжної дослідницької літератури, присвяченої вибору зварювальних матеріалів і актуальним підходам до зварювання комбінованих з'єднань між мартенситними і аустенітними сталями, що широко застосовуються в даний момент у всьому світі і в тому числі й у вітчизняному енергомашинобудуванні. Розглянуто характерні представники мартенситних та аустенітних сталей; вказано проблеми, що виникають в з'єднаннях різнорідних сталей при високотемпературній експлуатації, зокрема, процес дифузії вуглецю від менш легованої сталі до більш легованої та виникнення термічних напружень внаслідок різниці в коефіцієнтах термічного розширення поєднаних сталей; описано технологічні підходи для зменшення негативного впливу вказаних вище факторів, а також наведено перспективні зварювальні матеріали, які використовуються при виготовленні таких з'єднань, та проведено їх порівняльний аналіз. В кінці огляду приведено таблицю, в якій літературні посилання класифіковано в залежності від марки поєднаних сталей та зварювальних матеріалів, що використовувалися при виготовленні зварних з'єднань у відповідних літературних джерелах. Бібліогр. 47, табл. 4, рис. 8.

Ключові слова: зварювальні матеріали, з'єднання різнорідних сталей, мартенситні сталі, аустенітні сталі, нікелеві сплави, дифузія вуглецю, зневуглецьований прошарок

Вступ. Основним термодинамічним циклом теплових установок, що використовуються в сучасній теплоенергетиці, є цикл Ренкіна з перегрівом пари. Для реалізації цього теплового циклу різні ділянки пароводяного контуру на електростанції повинні мати різні параметри температури та тиску робочого тіла. З метою здешевлення спорудження електростанції ділянки з нижчими параметрами пари виготовляють з низьколегованих бейнітних сталей з 0,50...2,25 % Cr (труби настінних екранів котла, працюють при температурі 550...580 °C) та мартенситних сталей з 9...12 % Cr (верхні секції труб настінних екранів котла, колектори, магістральні паропроводи, для температур до 625...630 °C), ділянки з вищими параметрами пари, що потребують підвищених показники тривалої міцності та окалинистості – з більш дорогих аустенітних сталей (змійовики пароперегрівачів, робочі температури до 660...680 °C) [1]. Для реалізації закритого пароводяного контуру ці ділянки поєднуються між собою за допомогою зварювання, утворюючи з'єднання різнорідних сталей. Наприклад, в теплових електростанціях, що працюють при ультранадкритичних параметрах пари і максимальних температурах 600 °C, може використовуватися 4674 з'єднань тільки між мартенситними і аустенітними сталями [2].

Поява нових сталей, обумовлена необхідністю підвищення параметрів пари до надкритичного і

супернадкритичного рівнів і відповідного збільшення ККД електростанцій, вимагала проведення нових досліджень особливостей зварювання комбінацій цих сталей зі сталями, які працюють в інших температурних режимах.

Ціллю даної роботи був опис сучасного стану розроблення проблем, характерних для одержання з'єднань між сучасними мартенситними і аустенітними сталями, а також аналіз зварювальних матеріалів, зокрема, матеріалів на основі нікелю, що використовувалися останні десятиліття в дослідженнях зі створення підходів до зварювання різнорідних сталей.

Основні марки сталей для трубних систем перегрітої пари. В даному розділі розглянуто легування основних типів мартенситних і аустенітних сталей, зварювання сполучень яких складає актуальну проблему для сучасної теплової енергетики.

До класу сучасних мартенситних сталей, найбільш поширених в енергомашинобудуванні, належать сталі системи з базовим легуванням 9Cr–1Mo: P91 (X10CrMoVNb9-1 по EN), T92 (X10CrWMoVNb9-2) (табл. 1).

Сталь P91 була розроблена в Національній лабораторії в Окриджі в кінці 1970-х років і є модифікованою версією сталі P9 (9Cr–1Mo) з контрольованими добавками ванадію, ніобію і азоту для поліпшення високотемпературних механічних

Таблиця 1. Номінальний хімічний склад найбільш розповсюджених сучасних мартенситних сталей [1]

Марка сталі	Масова частка, %									
	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Nb	N	B
P91	0,10	0,35	0,45	9,0	0,95	–	0,22	0,08	0,05	–
P/T92	0,09	0,25	0,50	9,0	0,50	1,8	0,20	0,05	0,05	0,003

властивостей сталі за рахунок дисперсійного зміцнення виділеннями карбонітридів МХ (де М – це ванадій або ніобій, а Х – вуглець або азот). Типові температури експлуатації даної сталі в посудинах високого тиску і трубних системах теплових електростанцій становлять 580...600 °С [1].

Сталь P92/T92 є наступною модифікацією сталі P91. Нова сталь була розроблена в «Nippon Steel Corporation» в 1990-х роках для експлуатації при температурах 600 °С і вище, і тиску пари близько 25 МПа. Подальше поліпшення опору повзучості в даній сталі було досягнуто додаванням вольфраму, який частково замінив молібден, і бору. Початковою метою додавання W і В було збільшення частки твердорозчинного зміцнення і обмеження укрупнення дисперсійних виділень [1].

Що стосується аустенітних сталей, було виявлено, що сталі типу 08X18H10 (S304H, 316L та ін.), спочатку розроблені для застосування в корозійному середовищі, також мають чудові високотемпературні властивості. Аустенітні нержавіючі сталі, що застосовуються в енергомашинобудуванні і зустрічаються у даному огляді, приведено в табл. 2.

Сталі, що експлуатуються в корозійному середовищі, мають низький вміст вуглецю, зазвичай, нижче 0,03 %, для запобігання утворення міжкристалітної корозії. Такі сталі позначають буквою L в кінці назви. Високотемпературні варіанти цих сталей (з позначенням H в кінці назви) мають вміст вуглецю близько 0,08 %, що сприяє невеликому підвищенню опору повзучості.

Для забезпечення достатньої стійкості до корозії і окислення при температурах ~700 °С необхідно підвищувати вміст хрому в сталях до 20...25 %. Дві класичні високотемпературні сталі в даному діапазоні вмісту хрому – 310 і Alloy 800H. Обидві мають, однак, дуже низькі значення опору повзучості при 700 °С, хоча сталь 310 використовується і при більш високих температурах

через свою чудову корозійну стійкість. Для поліпшення опору повзучості додатково була розроблена сталь HR3C [1].

Добавки Ti і Nb в аустенітних сталях сприяють запобіганню розвитку міжкристалітної корозії, добавки Mo покращують опір пітінг-корозії і дають невеликий приріст до опору повзучості. Азот сприяє збільшенню міцності при підвищених температурах за двома механізмами: через твердорозчинне зміцнення і через утворення дрібнодисперсних нітридів ніобію.

Проблеми, які виникають під час експлуатації різнорідних з'єднань. Зварні з'єднання різнорідних сталей характеризуються на певних ділянках дуже різким градієнтом в мікроструктурі, фізичних властивостях, хімічному потенціалі і, як наслідок, в механічних властивостях. Основними чинниками, відповідальними за ушкодження при повзучості з'єднань різнорідних теплостійких сталей, є:

– різниця у фізичних властивостях;

– зневуглецювання/навуглецювання в зоні контакту сталей внаслідок різниці в хімічному складі сталей і, відповідно, їх хімічному потенціалі.

Додаткові напруження в з'єднанні різнорідних сталей можуть виникнути через невідповідність фізичних властивостей: наприклад, аустенітні сталі мають коефіцієнт термічного розширення (КТР) на 30 % більший, ніж мартенситні – типовими значеннями КТР є 18 та 13...14 мкм/м·К відповідно [3]. Циклічний температурний вплив при експлуатації електростанцій відіграє важливу роль в передчасних руйнуваннях цих з'єднань. Різниця в коефіцієнтах термічного розширення і теплопровідності між основним металом і металом шва призводять до утворення термічних напружень в зварному з'єднанні під час чисельних запусків та відключень електростанції при експлуатації. Ці циклічні напруження, накладені на залишкові зварювальні напруження та напруження від зовнішнього навантаження/внутрішнього

Таблиця 2. Номінальний хімічний склад аустенітних сталей [1]

Марка сталі	Масова частка, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N	Nb	Ti	Інші
S304H	0,10	0,2	0,8	18,0	9,0	–	0,1	0,4	–	3,0 Cu
316L	0,03	0,6	1,6	16,0	12,0	2,5	–	–	–	–
347H	0,08	0,6	1,6	18,0	10,0	–	–	0,8	–	–
310	0,08	0,6	1,6	25,0	20,0	–	–	–	–	–
HR3C	0,08	0,4	1,6	25,0	20,0	–	0,2	0,45	–	–
Alloy 800H	0,08	0,5	1,2	21,0	32,0	–	–	–	0,5	0,4 Al
Tempaloy AA-1	0,10	0,3	1,5	18,0	10,0	–	–	0,3	0,2	0,02 B 3,0 Cu

тиску пари, можуть слугувати причиною критичних руйнувань подібних з'єднань в умовах втоми і повзучості. Типово такі руйнування трапляються в ЗТВ мартенситної сталі безпосередньо біля лінії сплавлення, внаслідок поширення кільцевих тріщин [4].

Більш значним механізмом, що впливає на час і місце руйнування в з'єднаннях різнорідних сталей, що піддаються впливу повзучості, є структурна неоднорідність, викликана залишковими напруженнями і градієнтом хімічного складу сталей. Різниця в хімічних потенціалах між мартенситними і аустенітними сталями призводить до міграції (дифузії) вуглецю поперек лінії сплавлення зі сталі з нижчим вмістом хрому в сталь з вищим вмістом хрому [3]. Внаслідок цього через деякий час при високо-температурній витримці в сталі з нижчим вмістом хрому (завичай – мартенситній сталі) біля лінії сплавлення починає утворюватися і розвиватися знеуглецьований прошарок, який має знижену твердість і міцність, і може в майбутньому служити місцем руйнування зразка. Також відмічено, що:

- міграція вуглецю значно зменшує нанотвердість та межу плинності знеуглецьованого прошарку, який стає найслабшою ділянкою у всьому з'єднанні [5];
- при підвищенні температури експлуатації збільшується вірогідність руйнування по знеуглецьованому прошарку при високоциклічній втомі [6];
- знеуглецьований прошарок значно понижує довговічність з'єднання при повзучості при високих навантаженнях, однак, при зниженні випробувальних навантажень цей ефект стає менш помітним [7].

Вказані вище механізми накладають обмеження на використання для зварювання різнорідних сталей аустенітних зварювальних матеріалів, які, крім термонапружень внаслідок більш різкого градієнта КТР і дифузії вуглецю з боку мартенситної сталі в аустенітний шов, можуть також призводити до утворення науглецьованого прошарку в зоні сплавлення. В роботі [8] було показано, що в такому науглецьованому прошарку можуть зароджуватися мікротріщини. Такі мікродофекти переважно зароджуються в перехідній зоні та мають міжзеренний характер. Зазначається [9], що критичним при руйнуванні в знеуглецьованому прошарку є саме взаємодія прилеглих на-

вуглецьованої і знеуглецьованої ділянок, що мають на вузькій ділянці крайню фізичну і хімічну гетерогенність: в науглецьованій зоні мікротріщини зароджуються і далі розповсюджуються в знеуглецьовану зону, в якій присутні підвищені напруження.

Для подолання даної проблеми було запропоновано використовувати зварювальні матеріали на основі нікелю, що як в лабораторних дослідженнях, так і при експлуатації демонстрували значне покращення експлуатаційного ресурсу з'єднань в порівнянні зі з'єднаннями, звареними хромо-нікелевими аустенітними матеріалами [4]. Це зрозуміло, тому що метал шва на основі нікелю має проміжний КТР між мартенситною і аустенітною сталями, що відповідно призводить до зменшення величини циклічних термічних напружень в зварних з'єднаннях. Додатково, використання нікелевих матеріалів значно зменшує ступінь міграції вуглецю з мартенситної сталі в метал шва через низький градієнт активності вуглецю, а також низький коефіцієнт дифузії вуглецю в нікелевих сплавах.

Тому, на сьогоднішній день матеріалам на основі нікелю надають перевагу при виготовленні зварних з'єднань між мартенситними і аустенітними сталями. Є точка зору, що використання нікелевих матеріалів може в п'ять разів збільшити строк експлуатації зварного з'єднання в порівнянні зі з'єднаннями, що використовують аустенітні матеріали на основі заліза [4].

Головним недоліком матеріалів на нікелевій основі є їх гірша зварюваність в порівнянні з аустенітними матеріалами, що вимагає підвищеної кваліфікації зварників. Також в літературі зустрічаються повідомлення про схильність металу шва на основі нікелю до утворення гарячих тріщин в з'єднаннях різнорідних сплавів, однак більшість повідомлень відноситься до різнорідних з'єднань між нікелевими сплавами і аустенітними сталями [10, 11].

Технологічні підходи до зварювання різнорідних сталей. Крім традиційного виконання багатопрохідного зварного з'єднання широко застосовується підхід з попереднім плакуванням нікелевим зварювальним матеріалом мартенситної сталі, послідуною термообробкою плакованої кромки на режимі відпуску мартенситної сталі і, потім, остаточним зварюванням з аустенітною стороною з'єднання [2, 12–14] (рис. 1).



Рис. 1. Схема виконання зварного з'єднання з попереднім плакуванням

Подальші технологічні підходи, які покликані зменшити вплив різниці в теплофізичних властивостях між мартенситними і аустенітними сталями, ґрунтуються на використанні вставок з проміжним КТР. Було запропоновано використання проміжної вставки з матеріалу Alloy 800 (високонікелевий Incoloy), та показано, що використання таких вставок може призводити до значного зменшення циклічних термічних напружень [4]. Сплав Alloy 800 був вибраний виходячи з того, що він має проміжний коефіцієнт термічного розширення між мартенситною і аустенітною сталями, а також прийнятні опір повзучості і стійкість до окислення. Передбачається, що використання триметалічного з'єднання зі вставкою Alloy 800 може в чотири рази збільшити тривалість експлуатації зварного з'єднання різнорідних сталей в порівнянні зі звичайним біметалічним з'єднанням [4].

Сіріша та ін. в серії робіт [10, 15–18] досліджували мікроструктуру і механічні властивості зварних з'єднань P91 + Alloy 800 і Alloy 800 + 316L як частини триметалічного з'єднання P91/Alloy 800/316L: ґрунтуючись на випробуваннях на схильність до утворення гарячих тріщин і результатах механічних та металографічних випробувань, проводили порівняння зварювальних матеріалів. За результатами цих робіт автори запропонували використовувати матеріали Inconel 82 для виконання кореневих проходів і Inconel 182 – для заповнення (рис. 2). На виконаних рекомендованими зварювальними матеріалами з'єднаннях додатково проводили дослідження впливу високотемпературного старіння при 625 °C на мікроструктуру і механічні властивості та дослідження тріщиноутворення при термічному циклуванні в діапазоні 20...650 °C попередньо термооброблених по різних режимам з'єднань. Результати даного дослідження показали, що навіть в найнесприятливіших умовах термоциклічних випробувань не виявляється утворення тріщин або оксидних підрізів.

Але в пізнішій роботі Лахи та ін. [19] показана обмежена перспектива використання подібних з'єднань із вставкою Alloy 800. В результаті випробувань на повзучість з'єднань з феритно-мартенситних сталей (P9, P91, 2,25Cr-1Mo) зі сплавом Alloy 800 при 550 °C автори встановили, що опір повзучості таких з'єднань менший, ніж опір повзучості відповідних феритних сталей. Було визначено, що зі зменшенням навантаження при випробуваннях на повзучість місце руйнування зміщується з основного металу феритної сталі в ділянку міжкритичних температур ЗТВ феритної сталі, що веде до утворення тріщин типу IV. При найменших навантаженнях руйнування відбувається в зоні сплавлення між феритною сталлю і

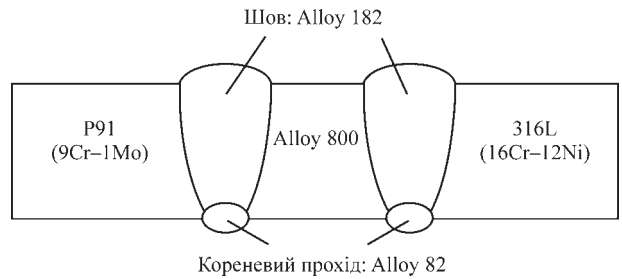


Рис. 2. Схема з'єднання мартенситної і аустенітної сталей через вставку з матеріалу Alloy 800 [13, 17, 18]

металом шва та пов'язане з дуже низькою пластичністю при повзучості в цій ділянці.

Був запропонований новий підхід до зварювання з'єднань різнорідних сталей, який ґрунтувався на використанні перехідних з'єднань з присадним металом з декількох сталей або сплавів [20]. Передбачалося, що присадкові матеріали повинні мати значення КТР в діапазоні між мартенситною і аустенітною сталями і розташовуватися при формуванні шва по порядку збільшення КТР від мартенситної сталі до аустенітної.

Цей підхід частково було випробувано в двох роботах [21, 22], в яких за допомогою зварювання тертям з перемішуванням виконували два з'єднання сталі P91 зі сталлю 304: в першому використовували тришаровий перехідний шов Inconel 625/Inconel 600/Inconel 800 (рис. 3), у другому – одношаровий шов, виконаний матеріалом Inconel 600. Три матеріали в першому з'єднанні підбиралися, ґрунтуючись на їх значенні КТР (Inconel 625 – $14,40 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$; Inconel 600 – $15,30 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$; Inconel 800 – $16,02 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$), що забезпечувало градієнтну зміну КТР в з'єднанні між сталлю P91 ($13,18 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$) і сталлю 304 ($18,0 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$). Результати розрахунків (метод скінченних елементів) і випробувань на повзучість показали, що трьохметалічне з'єднання має кращі механічні властивості і опір повзучості, ніж звичайне з'єднання внаслідок більш низького розподілу напружень в з'єднанні. Недоліком трьохметалічного з'єднання була наявність в ЗТВ сталі P91 м'якого прошарку, утворення якого може бути пов'язано з дифузією вуглецю в прилеглий сплав Inconel 625 (сплав містить 22 % Cr).

У зв'язку з цим перспективним напрямком досліджень є розробка жароміцного зварювального матеріалу на основі нікелю або заліза-нікелю,

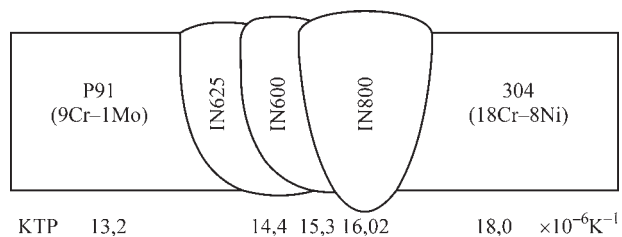


Рис. 3. Схема виконання перехідного трьохметалічного шва з градієнтним КТР [21, 22]

який мав би знижений вміст хрому ($\sim 9\%$ Cr), для запобігання дифузії вуглецю, і близький до мартенситних сталей КТР ($\sim 14 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$). Одними з перших кроків в цьому напрямку були дослідження Electric Power Research Institute (EPRI) і пов'язана з ними розробка зварювального матеріалу HFS6 в 1980-х роках. HFS6 так і не досяг стадії комерційного використання через схильність до ліквідаційних тріщин в металі шва, але дані, отримані в дослідницькій програмі по його розробці, мали велике значення у подальшому [23]. У 2002 р. була ініційована розробка електродів EPRI P87, вже у 2009 р. повідомлялося про їх успішне комерційне застосування при спорудженні теплової вугільної електростанції в США. На основі хімічного складу електродів пізніше було розроблено суцільний дріт для застосування при зварюванні вольфрамовим електродом в середовищі захисних газів. Характерною особливістю даного матеріалу на нікелевій основі є вміст хрому і вуглецю, близькі до вмісту цих елементів в сталі P91, що має сприяти усуненню міграції вуглецю (і утворенню карбідів I типу) поперек зони сплавлення між швом, виконаним за допомогою P87, і мартенситною сталлю. Крім того, P87 володіє прийнятним значенням КТР, подібним з КТР інших матеріалів на нікелевій основі [24].

Більш ширший огляд типів перехідних швів, що зустрічаються в з'єднаннях феритних і аустенітних сталей в енергомашинобудуванні, наведено в роботі [4].

Дифузія вуглецю при використанні матеріалів на основі нікелю. Більшість дослідників вважає, що традиційні матеріали на основі нікелю (Alloy 82/182/617/625 і т. д.) не можуть ефективно повністю стримувати дифузію вуглецю з мартенситної сталі в шов, оскільки у більшості нікелевих сплавів, використовуваних в якості зварювальних матеріалів, міститься велика кількість карбидоутворювачів (Cr, Mo, Nb, Ti).

Відносно з'єднань між мартенситними і аустенітними сталями, в роботі [16] показали, що в з'єднанні P91 + Alloy 800, виконаному електрода-

ми Inconel 182, після тривалого відпуску протягом 20 і 50 год при температурі $760\text{ }^\circ\text{C}$ і подальшого термоциклування в діапазоні $20\dots 625\text{ }^\circ\text{C}/3025$ год на границі між сталлю P91 і нікелевим швом відбувається міграція вуглецю і утворення темнопротравлюваної ділянки, що має підвищену твердість (рис. 4).

В роботі [12] вже після відпуску $760\text{ }^\circ\text{C}/2$ год спостерігали утворення науглецьованого прошарку в плакуванні Inconel 182 і утворення м'якої зони в ЗТВ сталі P91 (рис. 5). Аналіз результатів механічних випробувань на розтяг мініатюрних зразків з різних ділянок плакованого з'єднання P91 + 316L показав, що ЗТВ сталі P91 мала найменші значення тривалої міцності і опору пластичної нестійкості як при кімнатній температурі, так і при температурі $550\text{ }^\circ\text{C}$.

У деяких роботах наводяться суперечливі дані про ефективність традиційних нікелевих сплавів при протидії міграції вуглецю, можливо, обумовлені відсутністю єдиного підходу до оцінки знеуглецьованої ділянки ЗТВ низьколегованої сталі в комбінованих зварних з'єднаннях.

Наприклад, в роботі Ананда та ін. [25] за допомогою розрахункових методів досліджували дифузію вуглецю в наплавці «підкладка 2,25Cr–1Mo/проміжний прошарок Inconel 182 (0,1 мм)/шар 9Cr–1Mo (2 мм)» при температурі $750\text{ }^\circ\text{C}$ і витримці до 15 год.

Результати розрахунку в потрійній системі Fe–Cr–C на підставі методу скінченних різниць показали, що ефективність облицювання нікелевим матеріалом залежить від його товщини: в з'єднаннях, товщина облицювання яких становила 40 мкм, прогнозувалося утворення зміцнених науглецьованих ділянок біля лінії сплаву, і їх відсутність в з'єднаннях з облицюванням завтовшки 80 мкм і вище, тобто зі збільшенням товщини облицювання збільшується її ефективність в перешкоджанні міграції вуглецю. Дані результати були підтверджені експериментально за допомогою металографії і вимірювання твердості наплавлень, відпущених при $750\text{ }^\circ\text{C}$ протягом 1 та 15 ч, які по-

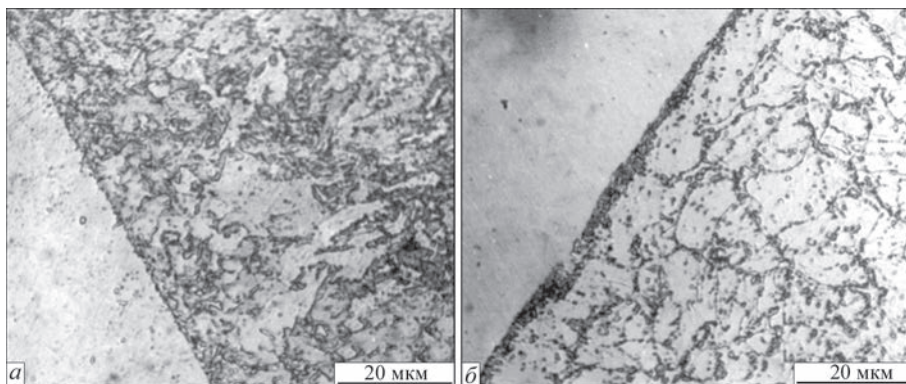


Рис. 4. Мікроструктура ЗТВ сталі P91 разом із зоною сплавлення (шов Inconel 182) перед і після термічного циклування: а – відпуск при $760\text{ }^\circ\text{C}$, 50 год; б – відпуск при $760\text{ }^\circ\text{C}$, 50 год + термоциклування $20\dots 625\text{ }^\circ\text{C}$ [16]

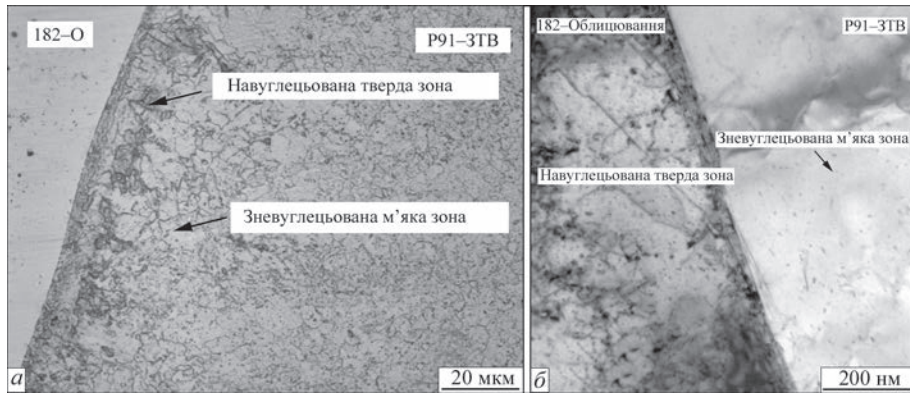


Рис. 5. Мікроструктура зони сплавлення P91/Inconel 182 після відпуску 760 °С, 2 год: а – оптичний мікрознімок (протравлена сторона P91); б – знімок ТЕМ [12]

казали відсутність утворення твердих ділянок в нікелевому шві або сталі 9Cr-1Mo (рис. 6).

Щодо нового матеріалу EPRI P87, в роботі [26] показали його високу ефективність в стримуванні міграції вуглецю з мартенситної сталі Т92, що значно перевершує таку у порівнянні з традиційними нікелевими сплавами. Показано, що у з'єднаннях, виконаних Inconel 82 після відпуску 760 °С, 30 хв, зневуглецьована ділянка в деяких місцях була у 18 разів ширше, а в разі Inconel 617 –

у 24 рази ширше, ніж в з'єднаннях EPRI P87 (рис. 7). В роботі [27] на пластині зі сталі P91 виконували три наплавки: матеріалом EPRI P87 (9 % Cr), аустенітною нержавіючою сталлю 309 (22...25 % Cr) та Inconel 625 (20...23 % Cr). Після наплавлення пластину нормалізували при температурі 1060 °С, 2 год, і відпускали при температурі 760 °С, 2 год. Результати металографічних досліджень, показаних на рис. 8, підтверджують переваги нового матеріалу у стримуванні зневуглецювання.

Вибір матеріалів для зварювання типових з'єднань. Аналіз літературних даних показує, що останнім часом для зварювання типових комбінованих з'єднань в енергомашинобудуванні найбільш часто застосовуються в дослідженнях матеріали Alloy 82 і Alloy 182 (табл. 3). Типовий хімічний склад найбільш поширених зварювальних матеріалів на основі нікелю наведено в табл. 4.

У деяких роботах наводяться порівняльні дослідження мікроструктури і механічних властивостей різних зварювальних матеріалів стосовно конкретної комбінації зварюваних сталей. Так, в роботі [33] проводили порівняння зварювальних матеріалів Т-304Н, Alloy 617 і Alloy 82 за критеріями випробувань на ударну в'язкість і статичний розрив з'єднань Т92 + 304 (післязварювальний відпуск 630...670 °С, 2 год). Показано, що в одержаних композиціях зварних з'єднань шви, виконані електродами Т-304Н, мали саму низьку ударну в'язкість. При порівнянні матеріалів Alloy 617 і

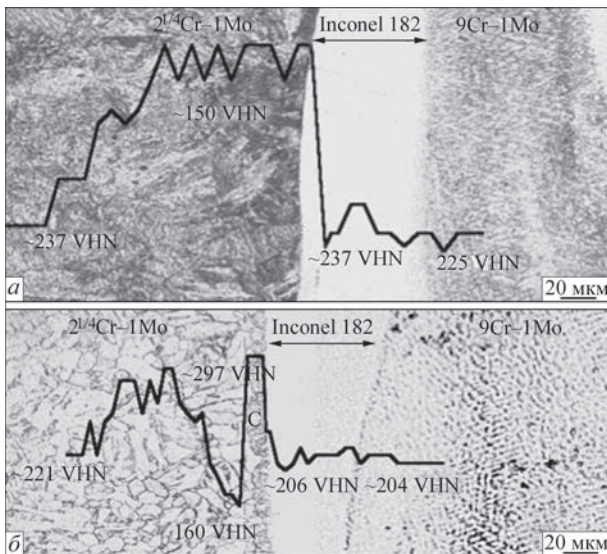


Рис. 6. Мікроструктура і профіль твердості в перехідному з'єднанні, виконаному з шаром плакування Inconel 182 завтовшки 0,1 мм після термообробки при 750 °С тривалістю: а – 1 год; б – 15 год [25]

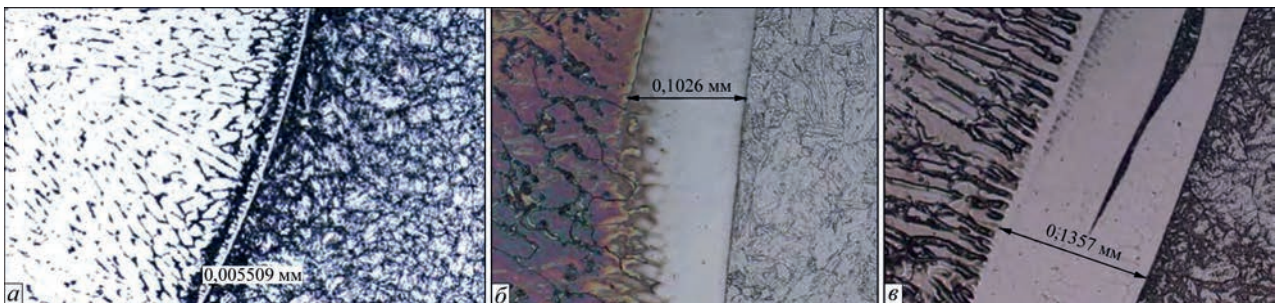


Рис. 7. Перехідна зона між сталлю Т92 і швом, виконана матеріалом EPRI P87(а), Inconel 82(б) та Inconel 617 (в) після відпуску 760 °С, 30 хв [26]

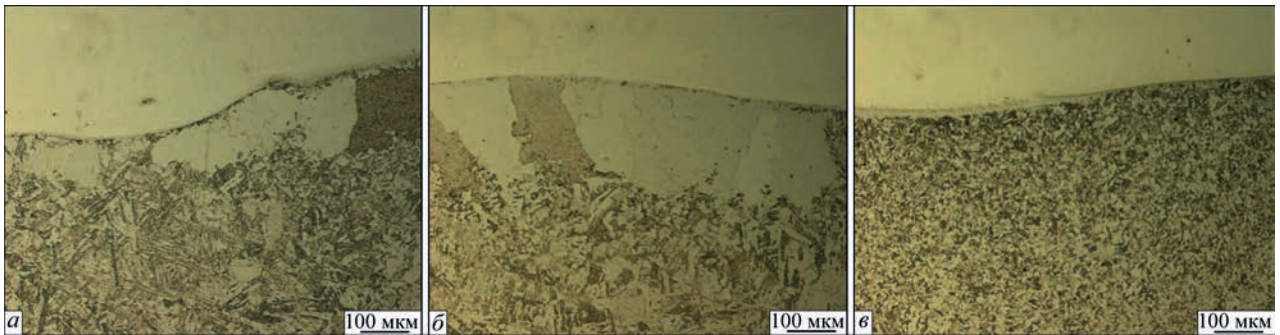


Рис. 8. Перехідна зона між сталлю P91 і швом, виконана матеріалом ER 309 (а), Inconel 625 (б) та EPRI P87 (в) після нормалізації 1060 °С, 2 год і відпуску 760 °С, 2 год [27]

Таблиця 3. Типові комбіновані з'єднання, що зустрічаються в нещодавній дослідницькій літературі, і матеріали, що використовуються для їх зварювання

Мартенситна сталь	Аустенітна сталь	Зварювальні матеріали	Літературні джерела
P91	S304H	Alloy 625, Alloy 600	21, 22, 28
		EPRI P87	23
	S304L	Alloy 182	14
		AWSER90S-B9 (9CrMoV-N)	29
	316L	Alloy 182	10, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 19
	310HCbN	Alloy 82	10, 15
		EPRI P87	23
	347H	Alloy 82	30, 31, 32
		Rutox (19Cr-20Ni)	30
ER90S-B3		32	
EPRI P87		23	
T92	S304H	Alloy 82	33, 34, 35, 36, 37
		Alloy 617	2, 33, 38
		T-304H	33
		Alloy 625	35
	316H	EPRI P87	2, 23
		Alloy 82	39, 40, 41, 42
	Tempaloy AA-1	EPRI P87	26
		Alloy 82	
		Alloy 617	
	310	Alloy 82	2
		EPRI P87	23
	347HFG	EPRI P87	23
	HR3C	Alloy 82	43
EPRI P87		2	

Таблиця 4. Хімічний склад типових зварювальних матеріалів на основі нікелю

Сплав	Масова частка, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti	Fe	Інші
Alloy 82	≤ 0,1	≤ 0,5	2,5...3,5	18,0...22,0	≥ 67,0 ¹⁾	–	2,0...3,0 ²⁾	≤ 0,75	≤ 3,0	Cu ≤ 0,5
Alloy 182	≤ 0,1	≤ 1,0	5,0...9,5	13,0...17,0	≥ 59,0 ¹⁾	–	1,0...2,5 ²⁾	≤ 1,0	≤ 10,0	Cu ≤ 0,5
Alloy 600	≤ 0,15	≤ 0,5	≤ 1,0	14,0...17,0	≥ 72,0 ¹⁾	–	–	–	6,0...10,0	Cu ≤ 0,5
Alloy 617	0,05...0,15	≤ 1,0	≤ 1,0	20,0...24,0	≥ 44,5	8,0...10,0	–	≤ 0,6	≤ 3,0	Co 10,0...15,0 Al 0,8...1,5 Cu ≤ 0,5 B ≤ 0,006
Alloy 625	≤ 0,1	≤ 0,5	≤ 0,5	20,0...23,0	≥ 58,0	8,0...10,0	3,15...4,15 ²⁾	≤ 0,4	≤ 5,0	Co ≤ 1,0 Al ≤ 0,4
EPRI P87 [24]	≤ 0,1	≤ 0,3	≤ 1,5	≤ 9,0	баланс	≤ 2,0	≤ 1,0	-	≤ 38,0	Незначні добавки Al, Ti, N, B

Примітка. ¹⁾Вказано вміст Ni + Co. ²⁾Вказано вміст Nb + Ta.

Alloy 82 віддали перевагу першому, оскільки шви більш високе значення тимчасового опору розриву, ніж шви, виконані Alloy 82.

В порівняльних дослідженнях властивостей з'єднань сталей T92 + 304, виконаних з використанням зварювальних матеріалів Alloy 625 та Alloy 82 показано, що кращі мікроструктурні і механічні властивості мали з'єднання зі швами Alloy 625 [35].

Хюйсманс та ін. [2] виконували старіння при 625 °С, 10000 год з'єднань T92 + 304, виготовлених за допомогою зварювальних дротів Alloy 617, Alloy 82 і EPRI P87 (TIG). Було визначено, що в з'єднаннях, виконаних дротом Alloy 617, при старінні в ЗТВ сталі T92 виділяються карбіди I типу, які можуть призводити до передчасних руйнувань при високотемпературній повзучості. Краще за інших після однакових умов старіння себе показав матеріал P87, при цьому зазначено, що перевагу треба віддавати технології попереднього плакування крайки з відпуском перед звичайним зварюванням. Alloy 82 визнаний авторами дослідження гарною альтернативою матеріалу P87. Але встановлено, що при більш тривалих високотемпературних витримках в з'єднаннях, виконаних Alloy 82, біля лінії сплавлення сталі T92 утворюються більш одноорієнтовані карбіди, які можуть в подальшому призвести до руйнувань.

За результатами даних робіт для з'єднання T92 + 304 можна скласти наступну умовну порівняльну класифікацію зварювальних матеріалів по мірі збільшення якості з'єднання:

T-304H < Alloy 617 ≈ Alloy 82 < Alloy 625 < EPRI P87.

Матеріали Alloy 617, Alloy 82 і EPRI P87 також досліджували в роботі [26] в з'єднаннях T92 + Tempaloy AA-1. У випробуваннях на статичний розтяг і ударну в'язкість кращі результати показав матеріал Alloy 82; Alloy 617 і EPRI P87 демонстрували схожі більш низькі значення, які все ж перевищували рекомендований європейськими стандартами мінімальний рівень. При випробуваннях на вигин всіх трьох з'єднань витримували кут загину 180° без утворення мікротріщин. Вимірюваннями мікротвердості в стані після відпуску 760 °С, 30 хв показано, що в з'єднаннях, виконаних матеріалом Alloy 82, відбувалось найбільше знеміцнення в знеуглецьованій ділянці. Передбачається, що саме в цій ділянці буде відбуватися руйнування в подальшому при високотемпературній експлуатації під підвищеним тиском.

Порівняльну оцінку матеріалів Alloy 82 і Alloy 182 стосовно з'єднання сталей P91 + 316 приведено в роботах [10, 13]. Загалом ці матеріали мають схожі властивості, однак дослідники віддають перевагу Alloy 182. Зокрема відзначається, що в умовах утомного термоцикування шви типу Alloy 182 виявляли меншу схильність до утворення пошкоджень, ніж шви, виконані з Alloy 82.

В роботі [30] проводили порівняння механічних властивостей і мікроструктури з'єднань P91 + 347, виконаних дротом Alloy 82 (TIG), електродами Rutox-Ast, Rutox-B (PДЗ) і комбінованим способом «корінь Alloy 82 (TIG) + заповнення Rutox-Ast (PДЗ)». Кращі результати за механічними властивостями (тимчасовий опір, пластичність) продемонструвало з'єднання, виконане дротом Alloy 82, на другому місці – Rutox-Ast (PДЗ), далі – комбінований спосіб і Rutox-B (PДЗ) у кінці.

В останні роки набуває популярності використання автогенних способів зварювання різнорідних з'єднань мартенситних і аустенітних сталей, зокрема, зварювання вольфрамовим електродом в середовищі захисних газів за допомогою активованих флюсів, що перебувають в суспендованому стані в розчині носія, такому як метанол, етанол чи ацетон (A-TIG). Типові з'єднання мартенситних і аустенітних сталей, що досліджувалися в зв'язку з цим методом зварювання: P91 + 316L [44, 45], P92 + 304H [36, 46], P91 + 304L [47].

Дослідники, що проводили порівняння процесу A-TIG та звичайного зварювання вольфрамовим електродом в середовищі захисних газів з присадним дротом TIG відмічають [36], що шви, виконані за допомогою автогенного A-TIG зварювання, мають підвищені значення межі міцності і понижені значення ударної в'язкості в порівнянні зі звичайним зварюванням за допомогою дроту. Причиною цьому є те, що структура автогенного шва складається з невідпущеного мартенситу, в той час як при виконанні багатопрхідного зварювання дротом відбувається довідпуск вже виконаного шва за допомогою послідовних валиків. Через це з'єднання, виконані за допомогою процесу A-TIG, потребують значно тривалішої витримки при післязварювальній термообробці, ніж стандартні з'єднання, для набуття прийнятних механічних властивостей.

Висновки

1. Однією з головних проблем при зварюванні мартенситних і високолегованих аустенітних сталей є дифузійне зменшення концентрації вуглецю у менш легovanому металі, контактуючому з більш легovanим металом, що містить енергійні карбідоутворюючі елементи – в першу чергу хром, а також молібден, титан, ніобій. Збіднені вуглецем ділянки є зонами можливого руйнування з'єднань при експлуатації.

2. Основним технологічним заходом, спрямованим на зменшення збіднення вуглецем мартенситної сталі залишається традиційне зварювання швом на нікелевій основі. Найбільш поширеними є електродні матеріали типу Alloy 82, Alloy 182, Alloy 600, Alloy 617, Alloy 625.

3. Встановлено, що застосування зварювальних матеріалів на основі нікелю не стримує повністю перерозподіл вуглецю з причини високого вмісту в них хрому (13...24 %), а також інших карбідоутворюючих елементів.

4. Високоєфективним щодо стримування збіднення вуглецем мартенситної сталі є новий електрод на нікелевій основі з 9 % хрому марки EPRI P87, розроблений Електроенергетичним дослідним інститутом EPRI, США. Експериментально показано, що при однакових термічних умовах одержання з'єднань ширина збідненого вуглецем прошарку при використанні електрода P87 буде у 18...24 разів менше, ніж при зварюванні електродами Alloy 82 і Alloy 617.

5. На перерозподіл вуглецю між менш легованою мартенситною сталлю і більш легованим швом впливає не тільки різниця у хімічному потенціалі вуглецю в сталях, обумовленому різним вмістом карбідоутворюючих елементів, а також напружений стан, спричинений різним значенням коефіцієнтів термічного розширення контактуючих металів. Для зменшення рівня напружень у зоні сплавлення існують методи зварювання з мінімізацією градієнту КТР у з'єднанні, які передбачають виконання зварювання з використанням перехідної вставки або за допомогою нашарування кількох електродних матеріалів з проміжним (між α - і γ -сталями) коефіцієнтом термічного розширення.

6. На основі вивчення структури і механічних характеристик з'єднань різнорідних сталей визначено найбільш прийнятні зварювальні матеріали для наступних комбінацій сталей:

T92 + SS304 – EPRI P87;
P91 + SS316 – Alloy 182;
P91 + SS347 – Alloy 82.

На прикладі сполучення T92 + SS304 встановлено, що за ефективністю впливу на якість металу в зоні з'єднання зварювальні матеріали можна розташувати наступним чином:

T-304H < Alloy 617 \approx Alloy 82 < Alloy 625 < EPRI P87.

Список літератури/References

- Shibli, A. (2014) Coal Power Plant Materials and Life Assessment. Woodhead Publishing.
- Huysmans, S., Vekeman, J., Hautfenne, C. (2017) Dissimilar metal welds between 9Cr creep strength enhanced ferritic steel and advanced stainless steels—creep rupture test results and microstructural investigations. *Weld World*, 61, 341–350.
- Dak, G., Pandey, C. (2020) A critical review on dissimilar welds joint between martensitic and austenitic steel for power plant application. *Journal of Manufacturing Processes*, 58, 377–406.
- Bhaduri, A. K., Venkadesan, S., Rodriguez, P., Mukunda, P. G. (1994) Transition metal joints for steam generators—An overview. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 58(3) 251–265.
- Wu, Q., Xua, Q., Jianga, Y., Gong, J. (2020) Effect of carbon migration on mechanical properties of dissimilar weld joint. *Engineering Failure Analysis*, 117, 104935, 1–10.
- Zhang, W.-Ch., Zhu, M.-L., Wang, K., Xuan, F.-Zh. (2018) Failure mechanisms and design of dissimilar welds of 9 %Cr and CrMoV steels up to very high cycle fatigue regime. *International Journal of Fatigue*, 113, 367–376.
- Yong, J., Zuo, Zh., Jianming, G. (2015) Carbon diffusion and its effect on high temperature creep life of Cr5Mo/A302 dissimilar welded joint. *Acta Metallurgica Sinica*, 51 (4), 393–399.
- Frei, J., Alexandrov, B. T., Rethmeier, M. (2019) Low heat input gas metal arc welding for dissimilar metal weld overlays part III: hydrogen-assisted cracking susceptibility. *Welding in the World*, 63, 591–598.
- Ul-Hamid, A., Tawancy, H.M., Abbas, N.M. (2005) Failure of weld joints between carbon steel pipe and 304 stainless steel elbows. *Engineering Failure Analysis*, 12, 181–191.
- Sireesha, M., Albert, S. K., Shankar, V., Sundaresan, S. (2000) A comparative evaluation of welding consumables for dissimilar welds between 316LN austenitic stainless steel and Alloy 800. *Journal of Nuclear Materials*, 279, 65–76.
- Singh, S., Singh, A.B., Kumar, M. et al. (2021) Dissimilar Metal Welds used in AUSC Power Plant, Fabrication and Structural Integrity Issues. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1017, 012022.
- Karthick, K., Malarvizhi, S., Balasubramanian, V., Gourav Rao, A. (2018) Tensile properties variation across the dissimilar metal weld joint between modified 9Cr–1Mo ferritic steel and 316LN stainless steel at RT and 550 °C. *Metallurgy, Microstructure and Analysis*, 7, 209–221.
- Lee, H.-Y., Lee, S.-H., Kim, J.-B., Lee, J.-H. (2007) Creep-fatigue damage for a structure with dissimilar metal welds of modified 9Cr–1Mo steel and 316L stainless steel. *International Journal of Fatigue*, 29, 1868–1879.
- Mahajan, S., Chhibber, R. (2020) Investigations on dissimilar welding of P91/SS304L using Nickel-based electrodes. *Materials and Manufacturing Processes*, 35(9), 1010–1023.
- Sireesha, M., Shankar, V., Albert, S. K., Sundaresan, S. (2000) Microstructural features of dissimilar welds between 316LN austenitic stainless steel and alloy 800. *Materials Science and Engineering*, A292, 74–82.
- Sireesha, M., Albert, S. K., Sundaresan, S. (2002) Thermal cycling of transition joints between modified 9Cr–1Mo steel and Alloy 800 for steam generator application. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 79, 819–827.
- Sireesha, M., Albert, S. K., Sundaresan, S. (2003) Metallurgical changes and mechanical behavior during high temperature aging of welds between Alloy 800 and 316LN austenitic stainless steel. *Materials Science and Technology*, 19(10), 1411–1417.
- Sireesha, M., Albert, S. K., Sundaresan, S. (2005) Influence of high-temperature exposure on the microstructure and mechanical properties of dissimilar metal welds between modified 9Cr–1Mo steel and Alloy 800. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 36a, 1495–1506.
- Laha, K., Chandravathi, K.S., Parameswaran, P. et al. (2012) A comparison of creep rupture strength of ferritic/austenitic dissimilar weld joints of different grades of Cr–Mo ferritic steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 43A, 1174–1186.
- Brentrup, G.J., Snowden, B.S., DuPont, J.N., Grenestedt, J.L. (2012) Design considerations of graded transition joints for welding dissimilar alloys. *Welding Journal*, 91, 252–259.
- Akram, J., Kalvala, P.R., Misra, M., Charit, I. (2017) Creep behavior of dissimilar metal weld joints between P91 and AISI 304. *Material Science and Engineering A*, 688, 396–406.
- Akram, J., Kalvala, P.R., Chalavadi, P., Misra, M. (2018) Dissimilar metal weld joints of P91/Ni alloy: microstructural characterization of HAZ of P91 and stress analysis at the weld interfaces. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(8), 4115–4128.
- Siefert, J.A., Tanzosh, J.M., Shingledecker, J.P. (2010) Weldability of EPRI P87. In: Advances in materials technology for fossil power plants: *Proceedings from the 6th International Conference, August 31–September 3, 2010, Santa Fe, New Mexico, USA*, 995–1013.

24. Siefert, J.A., Tanzosh, J.M., Shingledecker, J.P. et al. (2011) EPRI P87: A Promising New Filler Metal for Dissimilar Metal Welding. *Welding Journal*, 90(3), 30–34.
25. Anand, R., Sudha, C., Karthikeyan, T. et al. (2009) Effectiveness of Ni-based diffusion barriers in preventing hard zone formation in ferritic steel joints. *Journal of Materials Science*, 44, 257–265.
26. Urzunicok, M., Jachym, R., Kwiecinski, K. et al. (2013) Application of EPRI87 in dissimilar welding austenitic-martensitic welded joints of TEMPALLOY AA-1 and T92 steel grades. In: *Advances in materials technology for fossil power plants: Proceedings from the 7th International Conference, October 22–25, 2013 Waikoloa, Hawaii, USA*, 992–1005.
27. Coleman, K., Gandy, D. (2007) Alternative filler materials for DMWs involving P91 materials. In: *Advances in materials technology for fossil power plants: Proceedings from the 5th International Conference, October 3–5, 2007, Marco Island, Florida, USA*, 940–967.
28. Sirohi, S., Pandey, C., Goyal, A. (2021) Role of the Ni-based filler (IN625) and heat-treatment on the mechanical performance of the GTA welded dissimilar joint of P91 and SS304H steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 65, 174–189.
29. Thakare, J.G., Pandey, C., Mahapatra, M.M., Mulik, R.S. (2019) An assessment for mechanical and microstructure behavior of dissimilar material welded joint between nuclear grade martensitic P91 and austenitic SS304 L steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 48, 249–259.
30. Mittal, R., Sidhu, B.S. (2015) Microstructures and mechanical properties of dissimilar T91/347H steel weldments. *Journal of Materials Processing Technology*, 220, 76–86.
31. Senthil, T.S., Siva Kumar, G. (2015) Dissimilar steel welding of super heater coils for power boiler applications. *American Journal of Materials Research*, 2(5), 44–49.
32. Arunkumar, N., Duraisamy, P., Veeramanikandan, S. (2012) Evaluation of mechanical properties of dissimilar metal tube welded joints using inert gas welding. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2(5), 1709–1717.
33. Liang, Z., Gui, Y., Zhao, Q. (2018) Investigation of microstructures and mechanical properties of T92 martensitic steel/Super304 austenitic steel weld joints made with three welding consumables. *Archives of Metallurgy and Materials*, 63(3), 1249–1256.
34. Cao, J., Gong, Y., Zhu, K. et al. (2011) Microstructure and mechanical properties of dissimilar materials joints between T92 martensitic and S304H austenitic steels. *Materials and Design*, 32, 2763–2770.
35. Chen, G., Zhang, Q., Liu, J. et al. (2013) Microstructures and mechanical properties of T92/Super304H dissimilar steel weld joints after high-temperature ageing. *Materials and Design*, 44, 469–475.
36. Sharma, P., Kumar Dwivedi, D. (2019) Comparative study of activated flux-GTAW and multipass-GTAW dissimilar P92 steel-304H ASS joints. *Materials and Manufacturing Processes*, 34(11), 1195–1204.
37. Xu, L., Wang, Y., Jing, H. et al. (2016) Deformation Mechanism and Microstructure Evolution of T92/S30432 Dissimilar Welded Joint During Creep. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25, 3960–3971.
38. Liang, Z., Zhao, Q., Deng, J., Wang, Y. (2017) Influence of aging treatment on the microstructure and mechanical properties of T92/Super 304H dissimilar metal welds. *Materials at High Temperatures*, 35(2), 1–8.
39. Čiripová, L., Falat, L., Ševc, P. et al. (2018) Ageing effects on room-temperature tensile properties and fracture behavior of quenched and tempered T92/TP316H dissimilar welded joints with Ni-based weld metal. *Metals*, 8, 791–806.
40. Falat, L., Výrostková, A., Svoboda, M., Milkovič, O. (2011) The influence of PWHT regime on microstructure and creep rupture behaviour of dissimilar T92/TP316H ferritic/austenitic welded joints with Ni-based filler metal. *Kovove Materiale*, 49 (6), 417–426.
41. Falat, L., Čiripová, L., Kepič, J. et al. (2014) Correlation between microstructure and creep performance of martensitic/austenitic transition weldment in dependence of its post-weld heat treatment. *Engineering Failure Analysis*, 40, 141–152.
42. Falat, L., Kepič, J., Čiripová, L. et al. (2016) The effects of postweld heat treatment and isothermal aging on T92 steel heat-affected zone mechanical properties of T92/TP316H dissimilar weldments. *Journal of Materials Research*, 31(10), 1532–1543.
43. Cao, J., Gong, Y., Yang, Z.G. (2011) Microstructural analysis on creep properties of dissimilar materials joints between T92 martensitic and HR3C austenitic steels. *Materials Science and Engineering A*, 528, 6103–6111.
44. Fei, Z., Pan, Z., Cuiuri, D. et al. (2020) Effect of post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of deep penetration autogenous TIG-welded dissimilar joint between creep strength enhanced ferritic steel and austenitic stainless steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108, 3207–3229.
45. Vidyarthi, R.S., Kulkarni, A., Dwivedi, D.K. (2017) Study of microstructure and mechanical property relationships of A-TIG welded P91–316L dissimilar steel joint. *Material Science and Engineering A*, 695, 249–257.
46. Sharma, P., Kumar Dwivedi, D. (2019) A-TIG welding of dissimilar P92 steel and 304H austenitic stainless steel: Mechanisms, microstructure and mechanical properties. *Journal of Manufacturing Processes*, 44, 166–178.
47. Thakare, J.G., Pandey, C., Gupta, A. et al. (2021) Role of the heterogeneity in microstructure on the mechanical performance of the Autogenous Gas Tungsten Arc (GTA) welded dissimilar joint of F/M P91 and SS304L steel. *Fusion Engineering and Design*, 168, 112616, 1–13.

MATERIALS AND TECHNOLOGICAL APPROACHES TO WELDING OF COMBINED JOINTS BETWEEN MARTENSITIC AND AUSTENITIC STEELS USED IN POWER MACHINE BUILDING (Review)

M.O. Nimko, V.Yu. Skulsky, T.V. Ivanenko

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

A review of recent foreign research literature is given, dedicated to the choice of welding consumables and relevant approaches to welding of combined joints between martensitic and austenitic steels, which are widely used at the moment and in the domestic power machine building. The typical representatives of martensitic and austenitic steels are considered; the problems arising in the joints of dissimilar steels during high-temperature operation, in particular, the process of diffusion of carbon from less alloyed steel to more alloyed and arising of thermal stresses due to the difference in the coefficients of thermal expansion of the combined steels are mentioned; technological approaches to reduce the negative impact of the abovementioned factors are described, as well as the promising welding consumables used in the manufacture of such joints and their comparative analysis are given. At the end of the review, a table is given in which literary references are classified depending on the grade of combined steels and welding consumables used in the manufacture of welded joints in relevant literary references. 47 Ref., 4 Tabl., 8 Fig.

Keywords: welding consumables, joints of dissimilar steels, martensitic steels, austenitic steels, nickel alloys, carbon diffusion, decarbonized interlayer

Надійшла до редакції 12.04.2023

ЧИСЕЛЬНИЙ МЕТОД МУЛЬТИМАСШТАБНОГО МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПРИ МОНТАЖНОМУ ЗВАРЮВАННІ

О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, Н.І. Півторак

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: asmilenin@ukr.net

Запропоновано мультимасштабну методику моделювання кінетики напружено-деформованого стану великогабаритних конструкцій в процесі монтажного зварювання. В основу цієї методики покладено скінченно-елементне розв'язання задач нестационарної термопластичності, характерних для технологій зварювання плавленням, на мезомасштабному рівні з дрібним просторовим розбиттям області та з наступним перенесенням певного обсягу розрахункових даних в макроскопічну модель великогабаритної конструкції. Для цього запропоновано алгоритми відповідного усереднення властивостей та параметрів напружено-деформованого стану, що дозволяє проводити аналіз великогабаритних конструкцій в процесі зварювання без необхідності залучення суттєвих обчислювальних потужностей. На характерному прикладі монтажного зварювання циліндричної конструкції великого діаметра показано застосовність розробленого підходу для прогнозування просторових розподілів напружень та деформацій. При цьому найбільш ефективним є розрахунок полів напружень, де можливе суттєве розрідження просторового розбиття, тоді як розрахунок деформованого стану є значно більш чутливим до розміру скінченних елементів. Бібліогр. 14, рис. 3.

Ключові слова: великогабаритні конструкції, зварювання, напружено-деформований стан, математичне моделювання, мультимасштабний метод, ресурсомісткість розрахунку

Вступ. Розв'язання характерних задач оптимізації технологічних процесів монтажного зварювання великогабаритних конструкцій пов'язане з низкою об'єктивних труднощів, зумовлених протяжністю зварних швів і водночас локальністю впливу зварювального нагрівання. Зокрема, необхідним є прогнозування поточного та залишкового напружено-деформованого стану (НДС) конструкцій, що зумовлено необхідністю гарантування припустимості їх формозміни, локальної стійкості та опірності різним типам руйнування [1–3]. Експериментальне визначення розвитку полів температур, напружень і деформацій при зварюванні з метою гарантування належної якості кінцевого продукту ускладнюється матеріаломісткістю конструкції та значними супутніми фінансовими витратами, тому раціональним є використання сучасних методів чисельного моделювання зварювальних процесів. Це дозволяє виявити якісні та кількісні закономірності впливу зварювання на стан конкретної конструкції як при монтажу, так і в умовах подальшої експлуатації.

Поява нових методів прогнозування стану великогабаритних конструкцій, в тому числі, з великою кількістю зварних швів, відповідає розвитку розуміння фізико-механічних процесів в суцільних середовищах, математичних моделей їх описання, чисельних методів та комп'ютерних технологій. Сучасні принципи дискретного опи-

сання кінетики нестационарних мультифізичних процесів (перш за все, методами скінченних елементів) надають широкі можливості щодо розв'язання фундаментальних і прикладних задач. Адекватність і точність отримуваних чисельних результатів залежить, в тому числі, від мілкості просторового розбиття, тобто розміру скінченного елемента (СЕ), яке є достатнім для отримання точного розв'язку необхідних диференціальних рівнянь в різницевій постановці [4]. Але стосовно чисельного описання стану великогабаритних конструкцій при зварюванні це означає надмірну ресурсомісткість задач, тому що, з одного боку, високий градієнт температур, напружень і деформацій в області зварювання вимагає дрібного просторового розбиття, яке неможливо використати по всій конструкції, з іншого боку, велика різниця в розмірах СЕ призводить до нестабільності схем розв'язання відповідних крайових задач [5]. Це зумовило розвиток спрощених моделей, які дозволяють з необхідною точністю описати окремі технологічні та фізико-механічні процеси при зварюванні та споріднених процесах.

Зокрема, для прогнозування залишкової формозміни великогабаритних конструкцій в результаті монтажного зварювання набули поширення методи власних деформацій або функції усадки [6, 7]. Цей клас методів полягає в припущенні, що залишкові пластичні деформації, викликані зварюванням

(попередньо обчислені або виміряні експериментально) можуть бути задані в якості початкового стану конкретної конструкції, що особливо зручно у випадку наявності великої кількості однотипних швів – в корабельних обшивках, стрингерних панелях, тощо [8–10]. Недоліком вказаних методів є те, що вони не дозволяють простеження поточного НДС конструкцій при зварюванні, а розглядають лише задачу залишкового деформованого стану. Крім того, за відсутності даних про кінетику температурного поля та деформованого стану в процесі зварювання виникають об’єктивні труднощі при визначенні ефективної області для задання початкових інтегрованих чи розподілених пластичних деформацій в металі шва та зоні термічного впливу. Моделювання поточного стану великогабаритних конструкцій дозволяють так звані 2D-X моделі [11], проте їх застосовність є достатньо обмеженою. Тому практично важливим є подальший розвиток чисельних методів прогнозування поточного НДС великогабаритних конструкцій в процесі монтажного зварювання, зокрема, на прикладі типових циліндричних посудин тиску, що є метою цієї роботи.

Як було сказано вище, однією з особливостей стану великогабаритних конструкцій при зварюванні є різномасштабність фізико-механічних процесів в області зварювання та на периферії. Це ускладнює чисельну реалізацію відповідних математичних моделей загальноприйнятими методами, але робить раціональним використання багаторівневих мультимасштабних моделей. Так, розвиток температур і НДС при зварюванні має локальний характер і може бути описаний спільними моделями теплопровідного та пружнопластичного середовища. Для низки випадків локальний поточний та залишковий розподіл напружень і деформацій можуть бути описані в рамках спрощених двовимірних моделей, що дозволяє використовувати для їх скінченно-елементного описання невеликі СЕ без суттєвого збільшення розрахункового часу. Перенесення певного масиву розрахункових даних в повну тривимірну модель великогабаритної конструкції з власним скінченно-елементним розбиттям (таким, що дозволяє проводити відповідні розрахунки в реальному часі) з подальшим розрахунком загального НДС формалізує алгоритм мультимасштабного взаємозв’язку між розрахунковими рівняннями.

Так, в рамках цієї роботи було розглянуто два масштабних рівні, типових для задач прогнозування кінетики температурного та напружено-деформованого станів великогабаритних конструкцій, а саме мезорівень, на якому прийнято описувати зварювальні процеси, з характерним просторовим масштабом близько 1 мм, та макрорівень, який характерний для задач деформуван-

ня великогабаритних конструкцій з просторовим масштабом 1 см і більше. Для чисельного описання кінетики нестационарного температурного та напружено-деформованого станів в області монтажного зварювання було використано скінченно-елементне розв’язання спільних відповідних взаємопов’язаних задач. Відповідні алгоритми та математичні формулювання є розвитком комплексних підходів, розроблених авторами [12–14], в контексті мультимасштабної постановки.

Так, кінетика температурного поля прогнозувалась шляхом чисельного розв’язання нестационарного рівняння теплопровідності в двовимірному наближенні швидко рухаючогося джерела нагрівання. Це дозволило не тільки врахувати температурні залежності теплопровідності та теплоємності матеріалу конструкції, але і максимально зменшити просторове розбиття розрахункової області без суттєвого збільшення часу розрахунку.

На основі розрахункових полів температур в перерізі конструкції при її монтажному зварюванні формулювалась крайова задача нестационарної термопластичності матеріалу конструкції з відповідною скінченно-елементною реалізацією на основі восьмикутних СЕ (рис. 1). Так, приріст тензора деформацій може бути представлено у відповідності з наступним виразом:

$$d\epsilon_{ij} = d\epsilon_{ij}^e + d\epsilon_{ij}^p + \delta_{ij} d\epsilon_T, \quad (1)$$

де $d\epsilon_{ij}^e$; $d\epsilon_{ij}^p$; $\delta_{ij} d\epsilon_T$ – компоненти приросту тензора деформацій, обумовлених пружним механізмом деформування, деформаціями миттєвої пластичності та кінетикою неоднорідного температурного поля, відповідно.

Приріст деформацій, що зумовлений кінетикою температури T

$$d\epsilon_T = \alpha dT, \quad (2)$$

де α – коефіцієнт лінійного температурного розширення матеріалу.

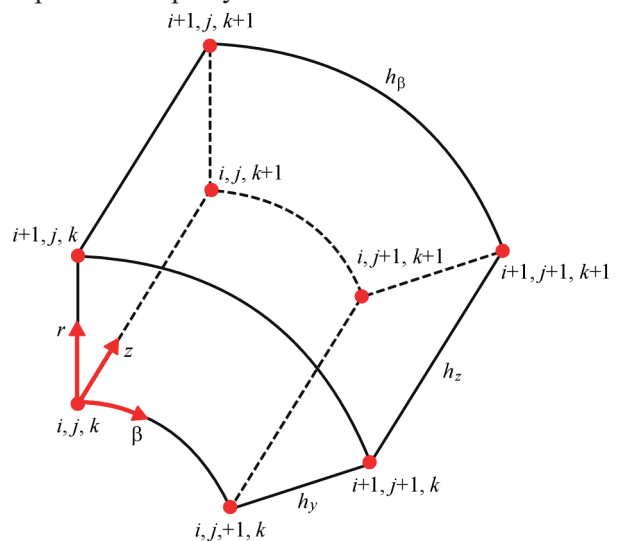


Рис. 1. Схема восьмикутного скінченного елемента в циліндричній системі координат

Тензори механічних напружень σ_{ij} і пружних деформацій $d\varepsilon_{ij}^e$ пов'язані між собою узагальненим законом Гука, тобто

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma}{2G} + \delta_{ij}(K\sigma + \varphi), \quad (3)$$

де $\sigma = \frac{(\sigma_{\beta\beta} + \sigma_{zz} + \sigma_{rr})}{3}$ – середнє значення нормальних компонентів тензора напружень

σ_{ij} , $K = \frac{1-2\nu}{E}$ – модуль об'ємного стиску;

$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ – модуль зсуву; E – модуль Юнга;

ν – коефіцієнт Пуассона; φ – об'ємна деформація.

Приріст деформацій миттєвої пластичності $d\varepsilon_{ij}^p$ в залежності від напруженого стану в конкретному СЕ може бути обчислений за допомогою лінійної залежності скалярної функції Λ і девіаторної складової тензора напружень, а саме [12]:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\Lambda(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma). \quad (4)$$

Кількісне значення функції Λ залежить від напруженого стану в розглянутій області конструкції, а також від форми поверхні плинності матеріалу Φ , яка характеризується границею текучості σ_T :

$$\begin{aligned} d\Lambda &= 0, \text{ якщо } \sigma_i < \sigma_T, \\ d\Lambda &> 0, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_T, \\ \text{стан } \sigma_i &> \sigma_T \text{ недопустимий.} \end{aligned} \quad (5)$$

де $\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}\sigma_{ij}\sigma_{ij}}$ – інтенсивність напружень.

Прирости тензора деформацій можуть бути представлені у вигляді суперпозиції приросту відповідних складових [13]:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{ij} &= \Psi(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma) + \delta_{ij}(K\sigma + \Delta\varepsilon_T) - \\ & - \frac{1}{2G}(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma)^* - (K\sigma)^*, \end{aligned} \quad (6)$$

де δ_{ij} – символ Кронекера, індекс «*» відносить відповідну змінну до попереднього кроку простежування; Ψ – функція стану матеріалу визначає умову пластичного плину відповідно до критерію Мізеса:

$$\begin{aligned} \Psi &= \frac{1}{2G}, \text{ якщо } \sigma_i < \sigma_T, \\ \Psi &> \frac{1}{2G}, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_T, \\ \text{стан } \sigma_i &> \sigma_T \text{ недопустимий.} \end{aligned} \quad (7)$$

Визначення функції Ψ проводиться ітеруванням на кожному кроці чисельного простежування (за часом або за приростом навантаження), що дозволяє розв'язати нелінійність за пластичним плином матеріалу. Виходячи з конкретного зна-

чення функції Ψ із (7) визначається поле деформацій на кожному етапі навантаження з урахуванням залежності $\sigma_T(T)$:

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \left(\Psi - \frac{1}{G}\right)(\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma). \quad (8)$$

При цьому на кожному кроці ітерації по Ψ напруження σ_{ij} обчислюються згідно з наступним алгоритмом (за повторюваними індексами відбувається підсумовування) [14]:

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{\Psi} \left(\Delta\varepsilon_{ij} + \delta_{ij} \frac{\Psi - K}{K} \Delta\varepsilon \right) + J_{ij}, \quad (9)$$

де

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon_{ii}}{3},$$

$$J_{ij} = \frac{1}{\Psi} \left[(b_{ij} - \delta_{ij}b) + \delta_{ij} \left(K\sigma^* - \frac{\Delta\varepsilon_T}{K} \right) \right],$$

$$b = \frac{b_{ii}}{3}.$$

$$b_{ii} = \left(\frac{\sigma_{ij}}{2G} \right)^* + \delta_{ij} \left[\sigma^* \left(K - \frac{1}{2G} \right)^* - \Delta\varphi \right]. \quad (10)$$

Зв'язок між компонентами тензора деформацій $\Delta\varepsilon_{ij}$ і вектора приросту переміщень ΔU_i має наступний математичний вираз:

$$\Delta\varepsilon_{ij} = \frac{\Delta U_{i,j} + \Delta U_{j,i}}{2}, \quad (11)$$

де комою позначено диференціювання в межах СЕ.

Компоненти тензора напружень задовольняють рівнянням статки для внутрішніх СЕ і граничним умовам – для поверхневих. У свою чергу, компоненти вектора $\Delta U_i = (\Delta U, \Delta V, \Delta W)$ задовольняють відповідним умовам на границі.

Розв'язувана система рівнянь у змінних вектора приростів переміщень у вузлах СЕ на кожному кроці простежування та ітерацій по Ψ визначається мінімізацією наступного функціонала (варіаційний принцип Лагранжа):

$$\mathcal{E}_I = -\frac{1}{2} \sum_V (\sigma_{ij} + J_{ij}) \Delta\varepsilon_{ij} V_{m,n,r} + \sum_{S_p} P_i \Delta U_i \Delta S_p^{m,n,r}, \quad (12)$$

де \sum_V – оператор суми по внутрішніх СЕ; \sum_{S_p} – оператор суми по поверхневих СЕ, на яких задані компоненти силового вектора P_i , тобто наступна система рівнянь дозволяє отримати розв'язок в компонентах вектора приростів переміщень на кожному кроці простежування та ітерацій по Ψ для конкретного СЕ:

$$\frac{\partial \mathcal{E}_I}{\partial \Delta U_{m,n,r}} = 0, \quad \frac{\partial \mathcal{E}_I}{\partial \Delta V_{m,n,r}} = 0, \quad \frac{\partial \mathcal{E}_I}{\partial \Delta W_{m,n,r}} = 0. \quad (13)$$

При розгляді циліндричних конструкцій з кільцевим зварним швом можуть бути використані

припущення двовимірної моделі плоского напруженого стану. Тензор напружень σ_{ij} ($i, j = r, \beta, z$) при такому описанні включає чотири ненульові компоненти $\sigma_{rr}, \sigma_{zz}, \sigma_{\beta\beta}, \sigma_{rz}$. Аналогічні ненульові компоненти містить тензор приростів деформацій $\Delta\varepsilon_{ij}$. Компоненти цього тензора зв'язані з компонентами приростів переміщень ΔU_r і ΔU_z наступними співвідношеннями:

$$\Delta\varepsilon_{rr} = \frac{\partial\Delta U_r}{\partial r}, \Delta\varepsilon_{zz} = \frac{\partial\Delta U_z}{\partial z},$$

$$\Delta\varepsilon_{rz} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\partial\Delta U_r}{\partial z} + \frac{\partial\Delta U_z}{\partial r} \right), \Delta\varepsilon_{\beta\beta} = \frac{\Delta U_r}{r}. \quad (14)$$

Зв'язок між σ_{ij} і $\Delta\varepsilon_{ij}$ може бути описаний у такий спосіб:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= A_1 \Delta\varepsilon_{rr} + A_2 (\Delta\varepsilon_{\beta\beta} + \Delta\varepsilon_{zz}) + Y_{rr}, \\ \sigma_{\beta\beta} &= A_1 \Delta\varepsilon_{\beta\beta} + A_2 (\Delta\varepsilon_{rr} + \Delta\varepsilon_{zz}) + Y_{\beta\beta}, \\ \sigma_{zz} &= A_1 \Delta\varepsilon_{zz} + A_2 (\Delta\varepsilon_{rr} + \Delta\varepsilon_{\beta\beta}) + Y_{zz}, \\ \sigma_{rz} &= A_3 \Delta\varepsilon_{rz} + Y_{rz}, \end{aligned} \quad (15)$$

де

$$A_1 = \frac{\Psi + 2K}{3K\Psi}, A_3 = \frac{1}{\Psi}, A_2 = A_1 - A_3 = \frac{\Psi - K}{3K\Psi},$$

$$Y_{ij} = \frac{1}{\Psi} \left(\frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij}\sigma}{2G} \right)^* + \delta_{ij} \frac{(K\sigma)^* - \Delta\phi}{K}. \quad (16)$$

Рівняння (15), (16) формують систему лінійних алгебраїчних рівнянь відносно деформацій (переміщень), яка є основою скінченно-елементної реалізації чисельного розв'язку.

Як зазначалося вище, використання аналогічного підходу для описання температурного стану, поточного та залишкового НДС великогабаритної конструкції на основі дрібного просторового розбиття ускладнене або неможливе по причині надмірної ресурсомісткості подібної задачі. Але збільшення кроків просторового розбиття в макромасштабному підході може призвести до втрати точності розрахункової моделі аж до суттєво викривлених результатів. Тому в якості вхідних даних макромасштабного розрахунку використовувались результати, отримані відповідно до мезомасштабного розрахунку, але з урахуванням необхідної для цього інтегральної інтерпретації. Тобто для простежування стану одного СЕ макроскопічної задачі необхідно використовувати усереднений стан декількох СЕ мезозадачі протягом всього технологічного циклу монтажного зварювання. Результатом такого усереднення мають бути інтегральні значення механічних властивостей матеріалу нерівномірно нагрітої конструкції та параметри її поточного деформованого стану. Так, для усереднення механічних властивостей матеріалу, а саме модуля Юнга, коефіцієнта лінійного теплового розширення та границі текучості, можна використати спрощений підхід, аналогіч-

ний правилу сумішей. Це обґрунтовується характерно невеликими градієнтами властивостей на відстанях порядку розміру СЕ, що є необхідним для стабільного розв'язку крайової задачі нестационарної термопластичності в постановці (1)-(13). Тому якщо стан елемента mn в макрозадачі описується декількома елементами ij в мезомасштабній постановці, то відповідні механічні характеристики можуть бути оцінені наступним чином:

$$E'_{mn} = \frac{\sum_i \sum_j E(T_{ij}) s_{ij}}{\sum_i \sum_j s_{ij}}; \alpha'_{mn} = \frac{\sum_i \sum_j \alpha(T_{ij}) s_{ij}}{\sum_i \sum_j s_{ij}}; \quad (17)$$

де s_{ij} – площа ij -го СЕ; T_{ij} – температура в точці ij ; «'» відносить параметр до макрозадачі.

Слід зазначити, що співвідношення (17) сформульовано в двовимірній постановці, але аналогічним чином може бути реалізовано усереднення з двовимірної задачі на тривимірну.

Розвиток НДС в макроскопічній постановці потребує врахування силового фактору, а саме нерівномірної деформації матеріалу. Для розрахунку розподілу поточного та залишкового НДС, який задовольняє умові рівноваги (13) та не отримує суттєвого викривлення на грубих просторових сітках, було запропоновано наступне просторове усереднення чисельних компонент матриці (15) – (16) та функції стану матеріалу Ψ , визначеної згідно (7):

$$A'_{kmn} = \frac{\sum_i \sum_j A_{k mn} s_{ij}}{\sum_i \sum_j s_{ij}}, k=1, 2, 3$$

$$Y'_{mn} = \frac{\sum_i \sum_j Y_{ij} s_{ij}}{\sum_i \sum_j s_{ij}}; \Psi'_{mn} = \frac{\sum_i \sum_j \Psi_{ij} s_{ij}}{\sum_i \sum_j s_{ij}}. \quad (18)$$

Розв'язок системи лінійних алгебраїчних рівнянь (15) в рамках постановки макроскопічної задачі НДС дозволяє отримати на кожному кроці простеження рівноважні розподіли полів напружень та деформацій конструкції.

Межі застосовності та особливості розробленого мультимасштабного підходу було досліджено на характерному прикладі монтажного зварювання кільцевих з'єднань циліндричної конструкції з алюмінієвого сплаву АМг6 ($E = 71$ ГПа, $\nu = 0,3$, $\sigma_T = 170$ МПа, $\alpha = 2,26 \cdot 10^{-5}$ $1/^\circ\text{C}$ при 20 $^\circ\text{C}$) діаметром $D = 3900$ мм і товщиною стінки $t = 10$ мм, зварювання на режимі $U = 20$ В, $I = 380$ А, $v_{зв} = 2,23$ мм/с. Слід зазначити, що вибір конструкції для дослідження відповідає типовим конструкційним рішенням космічного призначення, зокрема, паливним бакам ракет-носіїв, хоча універсальність запропонованого підходу дозволяє розгля-

дати широкий спектр матеріалів, конструкційних елементів і технологій зварювання.

Мезомасштабна постановка була реалізована в рамках спільного розв'язання задачі кінетики температурного поля при зварюванні та розвитку пружнопластичного деформованого та напруженого станів конструкції в області з'єднання в двовимірному формулюванні, що дозволило використати дрібне та регулярне просторове скінченно-елементне розбиття з лінійним розміром елемента в радіальному та осьовому напрямках $h_r = h_z = 1$ мм. При постановці тривимірної задачі було кратно збільшено лінійний розмір скінченних елементів в радіальному та аксіальному напрямках – в 2, 4 та 8 разів і проведено порівняння полів напружень і деформацій, отриманих в рамках мультимасштабної постановки задачі та прямого тривимірного моделювання з просторовим кроком $h_r = h_z = h_\beta = 1$ мм.

Як показано на рис. 2, порівняння розрахункових розподілів окружних $\sigma_{\beta\beta}$ та осьових σ_{zz} напружень для різного макромасштабного просторового розбиття підтверджують високий ступінь відповідності результатів мультимасштабного моделювання прямими розрахунками. Суттєві відмінності з'являються тоді, коли характерний просторовий розподіл локальних напружень стає меншим за один крок макромасштабної задачі, де відбувається відповідне усереднення (зокрема, при збільшенні h_z до 8 мм). При цьому на інших ділянках конструкції, де градієнт залишкових напружень менш суттєвий, відповідність розрахунків за двома підходами висока (похибка менше 2%). Така точність мультимасштабного підходу пов'язана з фізичною сутністю математичного формулювання (18), а саме, перенесення усередненої внутрішньої енергії деформованого матеріалу. Це дозволяє використовувати запропоновану методику для аналізу напруженого стану великогабаритних зварних конструкцій, в тому числі під дією складного екс-

плуатаційного навантаження, а також для аналізу крихкої міцності. Слід зазначити, що максимальна величина залишкових напружень дещо перевищує границю текучості матеріалу за кімнатної температури. Це пояснюється тим, що циліндрична конструкція характеризується двовісним напруженим станом, тому значення інтенсивності напружень σ_i є дещо нижчим за деякі окремі компоненти тензора напружень. Але саме визначає σ_i поверхню границю текучості матеріалу Φ відповідно до умови текучості Мізеса, зокрема, у формі (5).

Аналогічні розрахунки кінетики полів деформацій показали, що вплив мультимасштабного підходу на похибку результатів прогнозування залишкового деформованого стану суттєво вищий (рис. 3). Так, збільшення h_r в обраних межах незначно впливає на розрахункову величину окружних деформацій $\epsilon_{\beta\beta}$ (похибка складає близько 1,7%), тоді як для повздовжніх деформацій ϵ_{zz} задовільний результат мультимасштабного моделювання спостерігається для невеликого збільшення просторового розбиття (в 2 рази до розміру 2 мм). Аналогічний висновок про відносно невеликі можливості збільшення h_z : розрідження просторового розбиття до 4 разів дозволяє отримувати задовільну величину похибки мультимасштабного прогнозування $\epsilon_{\beta\beta}$ (похибка менше 7%), тоді як для коректних результатів ϵ_{zz} збільшення h_z не має бути більше ніж в 2 рази до розміру 2 мм.

Такі результати аналізу пояснюються тим, що одним із основних припущень скінченно-елементного моделювання є однорідність властивостей кожного зі СЕ. Суттєве збільшення розміру елементів призводить до некоректності постановки задачі, яка проявляється, в першу чергу, в невідповідності поля деформацій істинному розв'язку на дрібних сітках. Проте ця нестійкість стосується, перш за все, деформованого стану в осьовому напрямку, де спостерігається максимальний градієнт деформацій, тоді як для $\epsilon_{\beta\beta}$ та напруженого стану можливо-

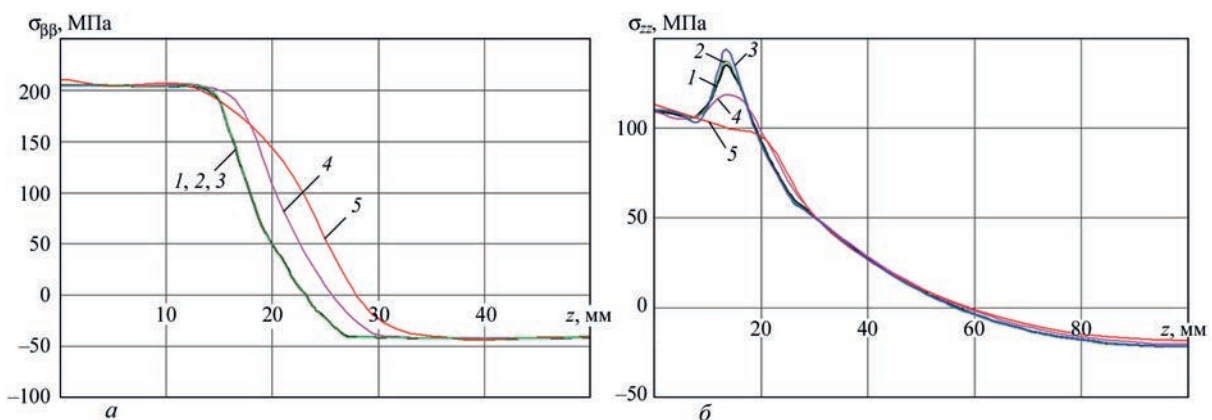


Рис. 2. Розрахунковий розподіл залишкових післязварювальних окружних $\sigma_{\beta\beta}$ (а) і осьових σ_{zz} (б) напружень: 1 – контрольний тривимірний розрахунок при $h_r = h_z = h_\beta = 1$ мм; 2 – мультимасштабний розрахунок при $h_r = 4$ мм, $h_z = h_\beta = 1$ мм; 3 – мультимасштабний розрахунок при $h_r = 8$ мм, $h_z = h_\beta = 1$ мм; 4 – мультимасштабний розрахунок при $h_z = 4$ мм, $h_r = h_\beta = 1$ мм; 5 – мультимасштабний розрахунок при $h_z = 8$ мм, $h_r = h_\beta = 1$ мм (на рис. 2, а криві 1, 2 та 3, фактично, співпадають)

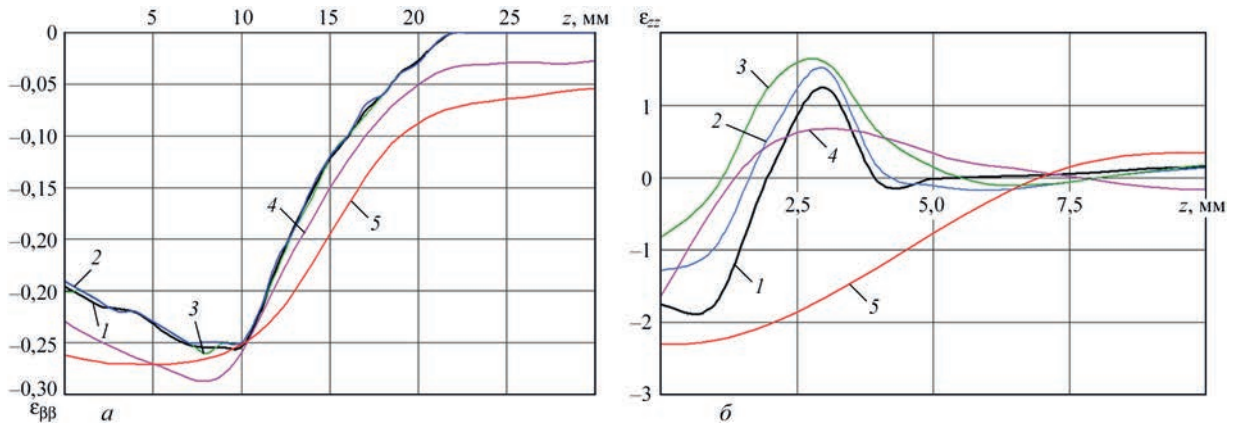


Рис. 3. Розрахунковий розподіл залишкових післязварювальних окружних $\epsilon_{\phi\phi}$ (а) і осевих ϵ_{zz} (б) деформацій (опис кривих 1–5 див. на рис. 2)

сті оптимізації розрахунків великогабаритних конструкцій шляхом використання запропонованого мультимасштабного підходу значно вищі.

Як показали розрахунки, одночасне збільшення просторових кроків в радіальному та осьовому напрямках несуттєво змінює отримані висновки, тому що превалюючою є нестійкість окремих розв’язків внаслідок розрідження в осьовому напрямку.

Незважаючи на те, що в роботі було розглянуто конкретний приклад зварної великогабаритної конструкції з алюмінієвого сплаву, отримані результати є достатньо загальними для більш широкого використання розробленої методики та загальних рекомендацій для випадків конструкцій з інших матеріалів, з відмінними геометричними розмірами або виготовленої із застосуванням інших технологій або режимів монтажного зварювання. Принципова різниця буде полягати в поточних і залишкових градієнтах напружень та деформацій, які визначатимуть допустимий лінійний розмір усереднення згідно (17), (18). Наприклад, зменшення зони термічного впливу (при використанні меншого тепловкладення чи за меншої теплопровідності матеріалу великогабаритної конструкції) визначатиме пропорційно менший розмір просторового розбиття макроскопічної задачі в області зварювання, але більший на периферії, де відповідні градієнти напружень та деформацій будуть суттєво меншими.

Висновки

1. З метою створення ефективних методів аналізу технологічних процесів зварювання великогабаритних конструкцій без суттєвого збільшення ресурсомісткості відповідних розрахунків запропоновано мультимасштабний підхід чисельного прогнозування кінетики температур і напружено-деформованого стану. В основу цієї методики покладено скінченно-елементне розв’язання задач нестационарної термопластичності, характерних для технологій зварювання плавленням, на мезомасштабному рівні з дрібним просторовим розбиттям конструкції в двовимірній постановці та з

наступним перенесенням певного об’єму розрахункових даних в тривимірну макроскопічну модель з розрідженою сіткою. Для цього запропоновано алгоритми відповідного усереднення властивостей та параметрів напружено-деформованого стану, що дозволяє проводити аналіз стану великогабаритних конструкцій в процесі зварювання без необхідності залучення суттєвих обчислювальних потужностей.

2. На прикладі монтажного зварювання кільцевого шва великогабаритної посудини тиску з алюмінієвого сплаву АМгб показано високу відповідність результатів скінченно-елементних розрахунків напруженого стану в рамках розробленої моделі та контрольними розрахунками за стандартними підходами. Показано, що можливе суттєве (до восьми разів) збільшення просторового скінченно-елементного розбиття аж до тих пір, поки характерний просторовий розподіл локальних напружень не стане меншим за один крок макромасштабної задачі, де відбувається відповідне усереднення.

3. Показано, що можливості використання запропонованого підходу для прогнозування деформованого стану великогабаритних конструкцій внаслідок усадкових процесів при нерівномірному зварювальному нагріванні обмежені. Це зумовлено високими розрахунковими градієнтами деформацій, особливо в осьовому напрямку, в такому випадку просторове усереднення властивостей матеріалу конструкції, що зварюється, може призвести до збіжності задачі в рамках скінченно-елементної постановки, до хибного розв’язку.

Список літератури/References

1. Deng, D., Murakawa, H., Liang, W. (2007) Numerical simulation of welding distortion in large structures. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, 196, 4613–4627. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cma.2007.05.023>
2. Park, J.-U., An, G., Woo, W. et al. (2014) Residual stress measurement in an extra thick multi-pass weld using initial stress integrated inherent strain method. *Marine Structures*, 39, 424–437. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marstruc.2014.10.002>
3. Zhang, L., Michaleris, P., Marugabandhu, P. (2007) Evaluation of Applied Plastic Strain Methods for Welding Distortion Prediction. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 129, 1000–1010. <http://dx.doi.org/10.1115/1.2716740>
4. Liu, R.-F., Wang, J.-C. (2022) Application of finite element method to effect of weld overlay residual stress on probability of

- pipng failure. *International Journal of Pressure Vessels and Pipng*, 200, 104812. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104812>
5. Li, S., Coraddu, A., Oneto, L. (2022) Computationally aware estimation of ultimate strength reduction of stiffened panels caused by welding residual stress: From finite element to data-driven methods. *Engineering Structures*, 264, 114423. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114423>
 6. Bayraktar, C., Demir, E. (2022) A thermomechanical finite element model and its comparison to inherent strain method for powder-bed fusion process. *Additive Manufacturing*, 54, 102708. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102708>
 7. Takezawa, A., To, A.C., Chen, Q. et al. (2020) Sensitivity analysis and lattice density optimization for sequential inherent strain method used in additive manufacturing process. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 370, 113231. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113231>
 8. Liangfeng, L., Cheng, L., Jie, S., Yansong, Z. (2022) Numerical prediction of welding deformation in ship block sub-assemblies via the inhomogeneous inherent strain method. *Journal of Manufacturing Processes*, 80, 860–873. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.06.044>
 9. Honaryar, A., Iranmanesh, M., Liu, P., Honaryar, A. (2020) Numerical and experimental investigations of outside corner joints welding deformation of an aluminum autonomous catamaran vehicle by inherent strain/deformation FE analysis. *Ocean Engineering*, 200, 106976. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.106976>
 10. Makhnenko, O.V., Muzhichenko, A.F., Seyffarth, P. (2009) Application of mathematical modelling in thermal straightening of shipbuilding panels. *Paton Welding J.*, 1, 6–11.
 11. Makhnenko, V.I., Milenin, A.S., Semyonov, A.P. (2007) Mathematical modelling of thermal-deformation processes in braze-welding of butt joints of the titanium-aluminium type. *Ibid*, 11, 5–9.
 12. Makhnenko, V.I., Pochinok, V.E. (2006) *Strength Calculation of Welded Joints with Crack-Like Imperfections*. E.O. Paton Electric Welding Institute, NASU.
 13. Махненко В.І. (2006) *Ресурс безпечної експлуатації сварних з'єдинень у вузлів сучасних конструкцій*. Київ, Наукова думка.
 14. Makhnenko, V.I. (2006) *Safe service life of welded joints and assemblies of modern structures*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
 15. Velikoivanenko, E., Milenin, A., Popov, A. et al. (2019) Methods of numerical forecasting of the working performance of welded structures on computers of hybrid architecture. *Cybernetics and Systems Analysis*, 55, 1, 117–127. <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00117-8>

A NUMERICAL METHOD OF MULTISCALE MODELING OF THE STRESS- STRAIN STATE OF LARGE-SIZED SSTRUCTURES IN SITE WELDING

O.S. Milenin, O.A. Velikoivanenko, G.P. Rozynka, N.I. Pivtorak

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

E-mail: asmilenin@ukr.net

A multiscale procedure was proposed for modeling the kinetics of stress-strain state of large-sized structures during site welding. This procedure is based on finite-element solution of nonstationary thermoplasticity problems, characteristic for fusion welding technologies, at the mesoscale level with fine spatial breakdown of the region and with subsequent transfer of a certain amount of calculation data into a macroscopic model of a large-scale structure. Algorithms of the respective averaging of the properties and stress-strain state parameters are proposed for this purpose, which allows performing analysis of large-sized structures during welding without the need to involve significant computing power. A characteristic example of site welding of a cylindrical structure of a large diameter is used to show the applicability of the developed approach for prediction of spatial distribution of stresses and strains. Here, the most effective method is calculation of the stress fields, where a much greater sparseness of the spatial breakdown can be achieved, while calculation of the strained state is much more sensitive to finite element size. 14 Ref., 3 Fig.

Keywords: large-sized structures, welding, stress-strain state, mathematical modeling, multiscale method, resource intensity of calculation

Надійшла до редакції 03.04.2023

НОВІ КНИГИ

Ахонін С.В., Березос В.О., Северин А.Ю. Електронно-променева плавка зливків інтерметалідів на основі алюмініду титану. — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2023. — 98 с.

У монографії розглянуто технологію електронно-променевої плавки зливків сплавів інтерметаліду системи Ti–Al. Проведено дослідження, які дозволили розробити методику вибору технологічних параметрів електронно-променевої плавки (ЕПП) зливків інтерметаліду TiAl за допомогою математичної моделі випаровування легуючих елементів, що дозволяє визначити точний хімічний склад вихідної шихти. Показано особливості кристалізації рідкого металу зливків сплавів інтерметаліду системи Ti–Al в умовах дії електронно-променевого нагріву. Досліджено можливість отримання зливків ЕПП інтерметаліду TiAl з введенням додаткових легуючих елементів Nb, Cr, Mo, Zr, V, La. Описано дослідні плавки зливків методом електронно-променевої плавки з проміжною ємністю. Наведено характеристики хімічного стану, макро-, мікроструктури та деяких механічних властивостей сплавів, отриманих методом ЕПП. Розглянуто можливість деформаційної обробки інтерметаліду TiAl, додатково легovanого бором і лантаном. Описано мікроструктуру та механічні властивості деформованого та термічно обробленого металу. Для наукових та інженерно-технічних працівників, а також для студентів металургійних спеціальностей. Бібліогр. 131, табл. 25, рис. 56.

Позняков В.Д. Зварювальні технології для ремонту металевих конструкцій. — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2023. — 232 с.

У науково-технічному посібнику розглянуто питання щодо впливу різних факторів на структуру та механічні властивості металу швів і зони термічного впливу зварних з'єднань високоміцних низьколегованих та легованих високоміцних сталей з границею текучості 350...700 МПа. Розглянуто проблеми стосовно стійкості зварних з'єднань високоміцних сталей до утворення холодних тріщин і продемонстровано, як на цей процес впливають залишкові напруження, хімічний склад, структура, вміст дифузійного водню в наплавленому металі та технологічні параметри зварювання. Запропоновано способи зменшення рівня залишкових напружень у характерних для ремонтного зварювання жорстко закріплених з'єднаннях великої товщини, які реалізуються шляхом оптимізації технології зварювання. Розглянуто питання щодо впливу ремонтно-зварювальних технологій і зміцнюючих обробок на механічні властивості та циклічну довговічність зварних з'єднань високоміцних сталей. Викладено загальні рекомендації стосовно способів видалення дефектів і підготовки з'єднань до ремонтного зварювання, вибору зварювальних матеріалів, температури попереднього підігріву та режимів і техніки зварювання високоміцних сталей. Наведено приклади застосування ремонтно-зварювальних технологій при відновленні цілісності та працездатності металевих конструкцій кар'єрних екскаваторів і автосамоскидів великої потужності, резервуарів для переробки нафти, суцільнолитих масивних базових вузлів пресового обладнання та дробарок. Посібник призначено для наукових працівників дослідних установ та ВУЗів, аспірантів, студентів, інженерних працівників, що спеціалізуються у галузі виготовлення і ремонту зварних металевих конструкцій тривалої експлуатації. Бібліогр. 126, табл. 54, рис. 159.

Замовлення на книги надсилати до редакції журналу.

ОСНОВИ КОМП'ЮТЕРНОГО МУЛЬТИФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ ЖИВИХ ТКАНИН

О.В. Лебедєв¹, А.Г. Дубко^{1,2}, Н.А. Чвертко²

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського».
03056, м. Київ, вул. Янгеля, 16/2

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

Зварювання живих тканин замінює зшивання тканин нитками при хірургічних операціях. Це спрощує та скорочує час проведення операцій, зменшує їх вартість та ймовірність післяопераційних ускладнень. Вода становить понад половину маси біологічної тканини. При зварюванні стадія плавлення явно не виражена. У післяопераційному періоді зварний шов повинен поступово замінюватись здоровою тканиною без втрати міцності. Комп'ютерне моделювання суттєво прискорює, спрощує та здешевлює вивчення механічних, електромагнітних та теплових процесів, що протікають при зварюванні живих тканин. Різні математичні комплекси дозволяють моделювати ці процеси одночасно. В статті наведено приклад математичного моделювання за допомогою методу кінцевих елементів, застосування якого дає можливість подолати труднощі при вивченні процесів, що протікають при зварюванні живих тканин та дозволяє, за допомогою трьохмірної комп'ютерної моделі, моделювати процеси стиснення тканини та проходження змінного струму. Бібліогр. 18, рис. 4.

Ключові слова: контактне зварювання живих тканин, математичне моделювання, стиснення тканини, проходження змінного струму, електромагнітне нагрівання тканини

Вступ. Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона (ІЕЗ) розпочав розробку технології та апаратури для зварювання живих тканин (ЗЖТ) на початку 1990-х років. ЗЖТ замінює зшивання тканин нитками при хірургічних операціях. Особливо це зручно у випадках, коли немає можливості зшивати нитками, наприклад, при відшаруванні сітківки ока, лапароскопічних операціях із зварювання печінки та легені. Це суттєво економить час та значно знижує вартість операції, збільшує герметичність анастомозів при здійсненні оперативних втручань в абдомінальній хірургії, зменшує ймовірність появи післяопераційних ускладнень [1–5].

Експериментальний вимір температури, деформацій, переміщень та механічних напруг при ЗЖТ провести складно, а іноді неможливо. Це пов'язано з невеликими розмірами електродів та утрудненим доступом до зони зварювання. Для проведення експериментів на піддослідних тваринах необхідно залучати хірургів та анестезіологів. Це значно збільшує вартість експериментів, а, іноді, унеможливує їх проведення.

Для отримання якісних з'єднань біологічних тканин необхідно визначення фізико-хімічних процесів, які складають теоретичну основу технології і протікають при формуванні цих з'єднань.

Комп'ютерне моделювання дозволяє детально вивчити процеси при зварюванні, визначити оптимальні режими, при потребі спроектувати інструмент із мінімальними витратами коштів та часу.

Метою роботи було проведення мультифізичного моделювання процесів, які відбуваються при зварюванні біологічних тканин.

Для вирішення наукових завдань, поставлених у статті, використовувались: науково-технічна література та інформаційні матеріали із баз мережі Інтернет; матеріали, пов'язані з теоретичними основами опору матеріалів, електродинаміки та теплотехніки; методи мультифізичного математичного моделювання.

Аналіз літератури. Вода становить понад половину маси біологічної тканини. При зварюванні стадія плавлення явно не виражена. У післяопераційному періоді зварний шов повинен поступово замінюватись здоровою тканиною без втрати міцності.

При зварюванні біологічних тканин відбуваються складні процеси перетворення електричної і механічної енергії в теплову. Цей вид зварювання можна віднести до контактного зварювання опором [6–8].

В багатьох областях, таких як електродинаміка, термодинаміка, механіка суцільних середовищ, теорія пружності і багато ін. фізичні процеси описують за допомогою рівнянь з частинними похідними.

При зварюванні біологічних тканин необхідно вирішити три основні завдання: деформаційне, теплове та електромагнітне.

Деформаційне завдання вирішується за допомогою залучення механіки суцільних середовищ

Лебедєв О.В. – <https://orcid.org/0000-0002-8692-6677>, Дубко А.Г. – <https://orcid.org/0000-0001-6070-3945>,

Чвертко Н.А. – <https://orcid.org/0000-0002-7559-7716>

© О.В. Лебедєв, А.Г. Дубко, Н.А. Чвертко, 2023

(МСС) [9–11]. Цей розділ теоретичної фізики є фундаментальним для вирішення різних технічних і технологічних завдань.

На основних законах і моделях МСС базуються більшість теорій, які описують поведінку реальних середовищ: теорія пружності, теорія пластичності, теорія в'язкопружності. У МСС аналіз деформаційних полів полягає в переході від реальних середовищ до їх ідеалізованого подання.

Пружні деформації тіла описуються рівнянням руху (другий закон Ньютона), що пов'язує динамічну зміну вектора переміщень d , тензора напруження S , і вектора об'ємних сил f [12]:

$$\rho \frac{\partial^2 d}{\partial t^2} = \nabla S + f \quad (1)$$

де ρ – густина; t – час; ∇ – оператор набла.

Для вирішення задачі теплопередачі, в першу чергу, необхідно вирішити електромагнітну задачу і в результаті знайти Q -функцію розподілу джерел нагрівання.

З рівнянь Максвелла [13] випливає рівняння (2), яке описує електромагнітні процеси в провідних середовищах:

$$-\nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla E \right) + (j\omega\sigma - \omega^2\epsilon)E = 0, \quad (2)$$

де E – напруженість електричного поля; μ – магнітна проникність провідного середовища; j – уявна одиниця; ω – кутова частота; σ – питома електропровідність; ϵ – діелектрична проникність провідного середовища.

Рівняння (2) дозволяє визначити напруженість електричного поля E і розподіл джерел нагрівання Q при протіканні височастотного струму в провідних середовищах:

$$Q = \sigma E^2. \quad (3)$$

Розподіл температури в будь-якому матеріалі описується рівнянням теплопровідності (4), яке має вигляд:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(k\nabla T) = Q, \quad (4)$$

де C – питома теплоємність; k – коефіцієнт теплопровідності; Q – функція розподілу джерел нагрівання; T – температура.

Біологічна тканина затискається між електродами, до яких підводиться змінна напруга із частотою від 100 кГц до кількох МГц. Застосування змінної напруги пояснюється вимогами техніки безпеки та високим питомим опором тканини, оскільки мембрани клітин погано проводять струм. Схему заміщення тканини можна подати послідовним з'єднанням конденсаторів і резисторів.

Програмні комплекси MATLAB, COMSOL, ANSYS, ABAQUS дозволяють в одному дослідженні одночасно моделювати процеси стиснен-

ня тканини, проходження змінного струму з урахуванням поверхневого ефекту, електромагнітне нагрівання [14–17].

Тканина при стисканні електродами суттєво деформується, що призводить до зникнення деяких кінцевих елементів сітки або зміни їх форми. Час моделювання збільшується, можливі аварійні зупинки обчислень.

Зменшити час моделювання можна шляхом розподілу моделювання на кілька етапів. Спочатку моделюється стискання тканини. Потім на деформованій моделі створюється сітка кінцевих елементів, яка використовується для електромагнітних та теплових розрахунків.

Експериментальна частина. Далі наведено приклад моделювання зварювання живих тканин методом кінцевих елементів.

На початку зварювання опір тканини збільшений. У міру руйнування мембран клітин та нагрівання рідини, що знаходиться в тканині, опір падає у кілька разів. Подальше підвищення температури призводить до коагуляції та втрати тканиною рідини, що призводить до збільшення опору. У нашому випадку для спрощення моделювання приймемо, що провідність тканини постійна і дорівнює її середньому значенню під час зварювання – 0,2 См/м. Використовували електроди із мідного сплаву прямокутної форми розмірами 3×2×10 мм. Розміри біологічної тканини – 1×8×10 мм. На верхній електрод для стиснення тканини прикладається тиск 2 МПа (рис.1). Для моделювання прийнято: модуль пружності кишки – 2 МПа, коефіцієнт Пуасона 0,4 [18], тривалість зварювання 3 с, напруга 40 В, частота 440 кГц. Коефіцієнт теплопередачі (конвекції) $k_{ht} = 50$ Вт/м²К. Температура зовнішнього середовища $T_{out} = 293,15$ К.

Необхідно задати також граничні умови в моделі.

Граничні умови при розрахунку деформації:

- нерухомо закріплені ліва і права бічні грані тканини, для яких переміщення $d = 0$;
- нерухомо закріплений нижній електрод, для граней якого переміщення $d = 0$;
- на верхній поверхні рухомого верхнього електрода $nS = f/M$, де n – вектор нормалі, M – площа поверхні;
- на бічних поверхнях $nS = 0$.

Граничні умови при розрахунку електромагнітних процесів:

- поширення електромагнітних полів обмежуються 3Д прямокутником з розмірами 10×10×5 мм, на зовнішніх границях якого $nJ = 0$, $nA = 0$, де J – густина струму, A – векторний магнітний потенціал;
- електрична напруга підводиться до бічних фронтальних поверхонь електродів Ω_1 і Ω_2 , на

верхньому електроді електричний потенціал дорівнює V , на нижньому електроді електричний потенціал дорівнює нулю (рис. 1).

Граничні умови при розрахунку теплових процесів:

– на бічних поверхнях електродів і тканини здійснюється теплообмін з навколишнім середовищем, який описується рівнянням $n(k\nabla T) = k_{tr}(T_{out} - T)$.

Найбільші напруження – 9,5 МПа діють на електродах поруч із тканиною. У тканині напруження дорівнюють близько 1,5 МПа, товщина тканини між електродами становить 0,46 мм (рис. 2).

Найбільша електромагнітна густина об’ємних втрат енергії – $4,5 \cdot 10^8$ Вт/м³ спостерігається на краях електродів, які контактують з тканиною (рис. 3).

Тканина нагрівається через 3 с до 83 °С. Електроди охолоджують тканину та нагріваються до 50 °С (рис. 4).

Отримані результати досліджень свідчать про те, що тривимірна комп’ютерна модель процесів зварювання живих тканин з використанням методу кінцевих елементів дозволяє підібрати оптимальні режими зварювання і оптимальну геометрію інструмента.

У наступних публікаціях буде проведено моделювання впливу форми електродів на картину розподілу

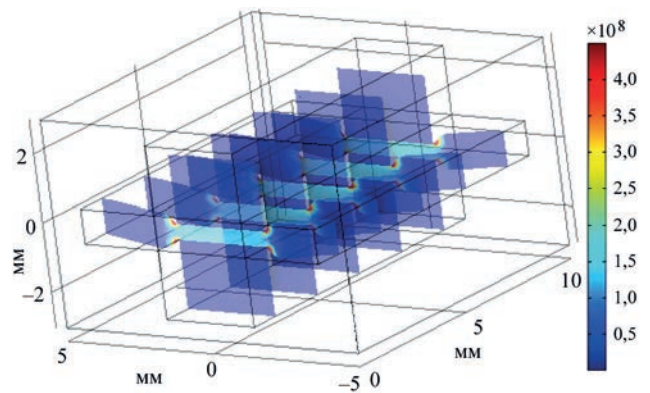


Рис. 3. Електромагнітна густина об’ємних втрат енергії (Вт/м³) наприкінці зварювання

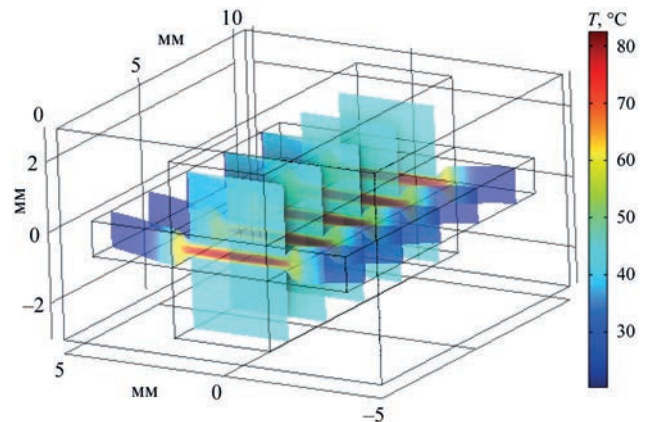


Рис. 4. Температура (°C) при зварюванні

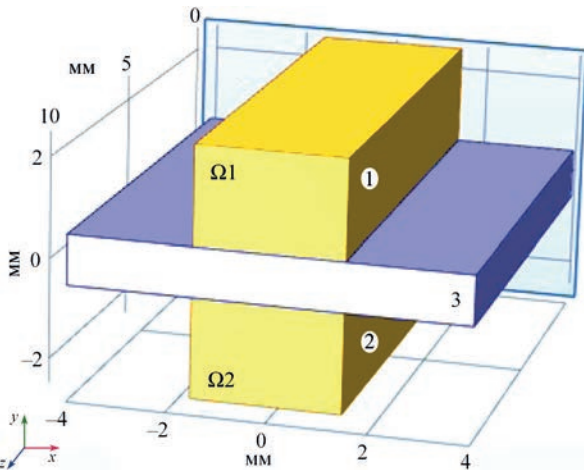


Рис. 1. Схема зварювання: 1, 2 – електроди, до яких підводиться змінна напруга; 3 – біологічна тканина

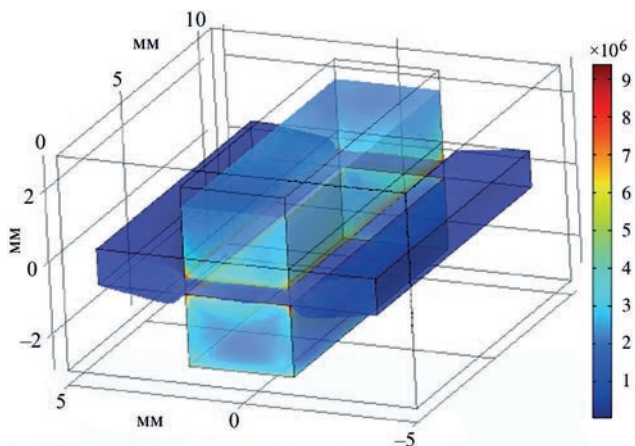


Рис. 2. Механічне напруження за Мізесом (Па) в електродах та біологічній тканині

густини струму та температурного поля у тканині; детальне моделювання процесів зміни опору (провідності) тканин під час зварювання внаслідок зневоднення.

Висновки

1. Науковими дослідженнями, проведеними в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона доведено, що вивчення механічних, електромагнітних та теплових процесів, що протікають при зварюванні живих тканин, є основою отримання якісних з’єднань цих тканин і виявляється складною задачею, що потребує суттєвих ресурсів.

2. Розкриті та пояснені основні принципи математичного мультифізичного моделювання процесу зварювання живих тканин, що є найбільш прийнятним для вирішення трьох основних завдань: деформаційного, теплового та електромагнітного.

3. Виконано математичне моделювання із використанням методу кінцевих елементів, застосування якого дає можливість подолати труднощі при вивченні процесів, що протікають при контактному зварюванні живих тканин та дозволяє, за допомогою тривимірної комп’ютерної моделі, моделювати процеси стиснення тканини та проходження змінного струму.

4. Отримані результати досліджень свідчать про те, що тривимірна комп’ютерна модель процесів зварювання живих тканин з використанням методу кінцевих елементів дозволяє підібрати оптимальні режими зварювання.

Список літератури

1. Патон Б.Е. (2004) Электрическая сварка мягких тканей в хирургии. *Автоматическая сварка*, **9**, 7–11.
2. Патон Б.С., Иванова О.Н. (2009) *Тканесохраняющая высокочастотная электросварочная хирургия*. Киев, Наукова думка.
3. Umanets, N., Pasyechnikova, N.V., Naumenko, V.A. et al. (2014) High-frequency electric welding: A novel method for improved immediate chorioretinal adhesion in vitreoretinal surgery. *Graefe's Arch. Clin. Exp. Ophthalmol.*, **252**, 1697–1703.
4. Маринский Г.С., Чернец А.В., Ткаченко В.А. и др. (2016) Стендовые исследования высокочастотной электросварки биологических тканей. *Автоматическая сварка*, **12**, 41–45.
5. Molotkovets, V.Yu., Medvediev, V.V., Korsak, A.V. et al. (2020) Restoration of the Integrity of a Transected Peripheral Nerve with the Use of an Electric Welding Technology. *Neurophysiology*, **52**, **1**, 31–42.
6. Лебедев А.В., Дубко А.Г. (2012) Особенности применения теории контактной сварки металлов к сварке живых тканей. *Техн. электродинамика*. Тем. выпуск, 187–192.
7. Гельман А.С. (1949) *Контактная электросварка*. Москва, Mashgiz.
8. Кочергин К.А. (1987) *Контактная сварка*. Москва, Машиностроение.
9. Седов Л.И. (1970) *Механика сплошной среды*. Т.1. Москва, Наука.
10. Ванін В.А. (2018) *Математичні моделі та чисельні методи в задачах механіки суцільного середовища*: Навчальний посібник. Харків, НТУ «ХПІ».
11. Бабкин А.В., Селиванов В.В. (1998) *Прикладная механика сплошных сред*. В 3 т. Т.1. Москва, МГТУ.
12. Ландау Л., Лифшиц Е.М. (1987) *Теоретическая физика*. Т.7. Теория упругости. Москва, Наука.
13. Popović, Z., Popović, B.D. (1999) *Introductory Engineering Electromagnetics*. Prentice Hall.
14. Khennane, A. (2013) *Introduction to Finite Element Analysis Using MATLAB® and Abaqus*. CRC Press. Taylor & Francis Group.
15. Pryor, R.W. (2011) *Multiphysics modeling using COMSOL: a first principles approach*. Jones and Bartlett Publishers.
16. Xiaolin Chen, Yijun Liu (2019) *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. Second Edition. CRC Press Taylor & Francis Group.
17. Krysl, P. (2018) *Finite Element Modeling with Abaqus and Python for Thermal and Stress Analysis*. Pressure Cooker Press. San Diego.
18. Лебедев А.В., Дубко А.Г., Лопаткина Е.Г. (2011) Основные биофизические свойства мягких тканей при электросварке. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія *Машинобудування*, **61**, Т.2, 130–133.

References

1. Paton, B.E. (2004) Electric welding of soft tissues in surgery. *The Paton Welding J.*, **9**, 6–10.
2. Paton, B.E., Ivanova, O.N. (2009) *Tissue-saving high-frequency electric welding surgery*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
3. Umanets, N., Pasyechnikova, N.V., Naumenko, V.A. et al. (2014) High-frequency electric welding: A novel method for improved immediate chorioretinal adhesion in vitreoretinal surgery. *Graefe's Arch. Clin. Exp. Ophthalmol.*, **252**, 1697–1703.
4. Marinsky, G.S., Chernets, A.V., Tkachenko, V.A. et al. (2016) Bench research of high-frequency electric welding of biological tissues. *The Paton Welding J.*, **12**, 38–42.
5. Molotkovets, V.Yu., Medvediev, V.V., Korsak, A.V. et al. (2020) Restoration of the integrity of a transected peripheral nerve with the use of an electric welding technology. *Neurophysiology*, **52**(**1**), 31–42.
6. Lebedev, A.V., Dubko, A.G. (2012) Peculiarities of application of resistance welding theory of metals in welding of live tissues. *Tekhn. Elektrodynamika*, Them. Issue, 187–192 [in Russian].
7. Gelman, A.S. (1949) *Resistance electric welding*. Moscow, Mashgiz [in Russian].
8. Kochergin, K.A. (1987) *Resistance welding*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
9. Sedov, L.I. (1970) *Continuum mechanics*. Vol. 1. Moscow, Nauka [in Russian].
10. Vanin, V.A. (2018) *Mathematical models and numerical methods in problems of continuum mechanics*. In: Manual. Kharkiv, NTU KhPI [in Ukrainian].
11. Babkin, A.V., Selivanov, V.V. (1998) *Applied continuum mechanics*. In: 3 Vol., Vol. 1. Moscow, MGТУ [in Russian].
12. Landau, L., Lifshits, E.M. (1987) *Theoretical physics*. Vol. 7: Theory of elasticity. Moscow, Nauka [in Russian].
13. Popovic, Z., Popovic, B.D. (1999) *Introductory Engineering Electromagnetics*. Prentice Hall.
14. Khennane, A. (2013) *Introduction to Finite Element Analysis using MATLAB® and Abaqus*. CRC Press. Taylor & Francis Group.
15. Pryor, R.W. (2011) *Multiphysics modeling using COMSOL: a first principles approach*. Jones and Bartlett Publishers.
16. Xiaolin Chen, Yijun Liu (2019) *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*. Second Edition. CRC Press Taylor & Francis Group.
17. Krysl, P. (2018) *Finite Element Modeling with Abaqus and Python for Thermal and Stress Analysis*. Pressure Cooker Press. San Diego.
18. Lebedev, A.V., Dubko, A.G., Lopatkina, E.G. (2011) Main biophysical properties of soft tissues in electric welding. *Visnyk NTU KPI, Seriya Mashynobuduvannya*, **61**, Vol. 2, 130–133.

FUNDAMENTALS OF COMPUTER MULTIPHYSICS MODELLING OF RESISTANCE WELDING OF LIVE TISSUES

O.V. Lebedev¹, A.G. Dubko^{1,2}, N.A. Chvertko²¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute». 1/2 Yangel Str., 03056, Kyiv²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Welding of living tissues replaces stitching of tissues with threads during surgical operations. It simplifies and shortens the time of operation performance, lowers their cost and probability of postoperative complications. Water makes up more than half of the biological tissues mass. During welding the melting stage is not clearly expressed. In the post-operative period the weld should be gradually replaced by a healthy tissue without loss of strength. Computer modeling greatly accelerates, simplifies and lowers the cost of studying the mechanical, electromagnetic and thermal processes, running in live tissue welding. Different mathematical packages allow modeling these processes simultaneously. The paper gives an example of mathematical modeling using the finite element method. Its application enables overcoming the difficulties, when studying the processes running in live tissue welding and allows using a 3D computer model, which models the processes of tissues compression and alternating current passage. 18 Ref., 4 Fig.

Keywords: resistance welding of live tissues, mathematical modeling, tissue compression, alternating current passage, electromagnetic heating of the tissue

Надійшла до редакції 06.03.2023

ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПАДКУ КОРОЗІЇ ЕМАЛЬОВАНИХ ТРУБ ХОЛОДНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

С.О. Осадчук, Л.І. Ниркова, Л.В. Гончаренко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03105, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: svetlanaosadchuk@meta.ua

Досліджено трубу з вуглецевої сталі з внутрішнім силікатноемалевим покриттям, пошкоджену під час експлуатації в системі холодного водопостачання громадської будівлі впродовж 5 років. За результатами візуального огляду виявлено, що труба електрозварна та корозійні ураження у вигляді щілин утворилися після пошкодження захисного покриття на електрозварному шві. Показано, що перехідний питомий електричний опір на поверхні з електрозварним швом низький ($1,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$) порівняно з цим показником на основному металі ($907 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$), що вказує на практичну відсутність його захисної здатності. Металографічними дослідженнями показано, що причиною руйнування зразка труби є дефекти несплавлення кромок листа під час виготовлення. Ідентифіковано вид корозії – щілинна, яка розвивалася на внутрішній поверхні труби в місцях несплавлення кромок шва. За 5 років експлуатації швидкість щілинної корозії становила $0,8 \text{ мм/рік}$ та супроводжувалася утворенням наскрізних уражень, а корозійна тривкість в щілині оцінена згідно з ГОСТ 9.502, як «понижена» (від $0,5$ до $1,0 \text{ мм/рік}$). Зроблено висновок, що корозійна тривкість та довговічність дослідженої емальованої труби визначається якістю виконання електрозварного з'єднання. Бібліогр. 14, табл. 2, рис. 4.

Ключові слова: емальовані труби, вуглецева сталь, силікатноемалеві покриття, електрозварний шов, корозійна тривкість, швидкість корозії

Вступ. У системах холодного та гарячого водопостачання у житлових та громадських будівлях застосовуються зварні труби, з'єднані високочастотним зварюванням. Із досвіду світової практики відомі приклади корозії електрозварних труб як без покриття [1] так і з захисним покриттям [2].

Для захисту труб від внутрішньої корозії ДСТУ Б В.2.5-30 [3] рекомендується застосовувати протикорозійні покриття, зокрема, силікатноемалеві, які наносять на поверхню шляхом розплавлення неметалевого порошку (фрити), що містить, переважно, силікатні продукти [4]. Термін служби труб з силікатноемалевим покриттям збільшується в $5 \dots 10$ разів. Якість його нанесення залежить від якості підготування внутрішньої поверхні труб, особливо в області електрозварного шва. Під час зварювання труб, можуть утворюватися різні дефекти [5]: тріщини; порожнини, пори; несплавлення та непровари; порушення форми шва тощо.

Зчеплення емалі з металевою поверхнею формується внаслідок проникнення розплавленої емалі в мікронерівності поверхні (механічне зчеплення) і розчинення металу в склі (складова покриття), тобто за рахунок хімічного зв'язку. Однак, під час охолодження на поверхні розділу та в емалевому шарі можуть виникати залишкові напруження, які погіршують властивості покриття. Еластичність покриття залежить від товщини емалі, тому при її нанесенні намагаються досягти оптимальних властивостей покриття за мінімальної товщини.

У водному середовищі склоподібні емалі, як правило, є хімічно стійкими [4]. Під дією

води на емаль модифікатор в ґратці скла піддається гідролізу і легко вилугується зі скла, сприяючи втраті блиску та появі пористості. На стійкість до води впливають фарбувальні пігменти, які є дуже активними. У замкнених системах при контакті емалі з водою вилугуються речовини, які можуть прискорювати корозію поверхні.

При роботах з емальованими трубами треба враховувати невисоку міцність силікатних емалей під час удару і вживати спеціальні заходи для їх захисту від пошкоджень при навантажуванні, транспортуванні [3] та монтажі.

Технічні вимоги до силікатноемалевих покриттів стандартизовані у ДСТУ Б В.2.5-30 [3], згідно з яким товщина одного шару покриття має бути не менше $0,2 \text{ мм}$; міцність під час удару – $2,0 \text{ Дж}$; швидкість розчинення покриття в агресивних середовищах з рН від 4 до 11 за температур до $50 \text{ }^\circ\text{C}$ – $0,02 \text{ мм/рік}$; втрата маси покриття при кип'ятінні в дистильованій воді протягом 48 год – не більше $0,08 \text{ мг/см}^2$. Покриття повинно бути термостійким при перепаді температур від 260 до $18 \text{ }^\circ\text{C}$. Перехідний питомий електричний опір безгрунтового покриття повинен бути не менше $500 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$ [6]. Однак, іноді трапляються випадки пошкодження труб з таким покриттям.

Мета цієї роботи полягала у дослідженні причин утворення наскрізних дефектів у трубах системи холодного водопостачання з внутрішнім силікатноемалевим покриттям у громадській будівлі після експлуатації впродовж 5 років.

Осадчук С.О. – <https://orcid.org/0000-0001-9559-0151>, Ниркова Л.І. – <https://orcid.org/0000-0003-3917-90636>, Гончаренко Л.В. – <https://orcid.org/0000-0001-8371-2078>

© С.О. Осадчук, Л.І. Ниркова, Л.В. Гончаренко, 2023

Методи дослідження. Хімічний склад сталі визначали на спектрометрі «Спектравак-1000» фірми «Biard».

Фізико-механічні властивості силікатномалевого покриття визначали за стандартними методиками згідно з ДСТУ Б В.2.5-30 [3], сфера застосування якого поширюється на аналогічний сортамент емальованих труб: товщину – за допомогою приладу «Константа К5»; міцність під час удару на ударній установці з вантажем, що падає, вагою 1 кг та діаметром бойка 16 мм; перехідний питомий електричний опір – за допомогою тераомметра Е6-13.

Потенціал корозії сталі вимірювали відносно хлоридсрібного електроду порівняння впродовж 30 хв. Поляризаційні криві знімали на потенціостаті ПИ-50.1.1 зі швидкістю розгортки $1 \cdot 10^{-3}$ В/с у 3 %-му розчині хлориду натрію за температури 20 °С. Використовували притисну триелектродну електрохімічну комірку: робочий електрод – зразок досліджуваної труби, електрод порівняння – хлоридсрібний, допоміжний електрод – платиновий.

Дослідження шліфів після травлення у 4 %-му спиртовому розчині нітратної кислоти проводили методом оптичної мікроскопії за допомогою мікроскопу NEOPHOT 21 з використанням цифрової камери Allied Vision 1800 U-2050c та програмного забезпечення SEO ImageLAB v1.0.

Отримані результати.

Наскрізни ураження виявлені у системі холодного водопостачання торгівельного центру м. Києва.

Аналіз умов поводження з емальованими трубами показав, що доставляння труб до спожива-

ча проводили автотранспортом, розвантажували автокраном, а деякий час труби знаходилися на будівельному майданчику в різних умовах. За даними сертифікату труби покриті емальовим покриттям 25Ц. Вставки труб з полімерного матеріалу в системі водопостачання відсутні, що вказує на заземлення системи. Після монтажу водопровід одразу заповнювався водою, яка відповідає вимогам ДСанПіН 2.2.4-171 [7], та знаходився під тиском від 0,4 до 0,5 МПа. Поява першого наскрізного ураження емальованих труб зафіксована через 5 років експлуатації на горизонтальних ділянках, а через 6 років виявлено приблизно 50 пошкоджень на трубах діаметром 89...159 мм.

Лабораторні дослідження проводили на зразку труби діаметром 108 мм з товщиною стінки 4 мм. За результатами спектрального аналізу встановлено, що труба виготовлена зі сталі Ст1кп згідно з ДСТУ 2651 [8], її хімічний склад є типовим для такої сталі (табл. 1).

Під час візуального огляду встановлено, що труба має поздовжній зварний шов, виконаний за технологією височастотного зварювання (рис. 1).

На внутрішній поверхні труби – силікатномалеве покриття сірого кольору з блиском, вкрите тонким рівномірним шаром відкладень, які легко видаляються змиванням губкою та частково травленням у 20 %-му розчині оцтової кислоти. По всій поверхні є включення в покриття частинок фрити грубого помелу, які можуть сприяти затримуванню продуктів корозії та утворенню корозійних осередків у разі їх відколювання під час

Таблиця 1. Хімічний склад металу труб

Масова частка елементів, %									
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Ti
Досліджуваний зразок									
0,09	<0,03	0,37	0,028	0,007	0,017	0,030	0,02	0,018	<0,001
Вимоги ДСТУ 2651 (Ст1кп)									
0,06...0,12	<0,05	0,25...0,50	<0,050	<0,040	<0,30	<0,30	<0,30		

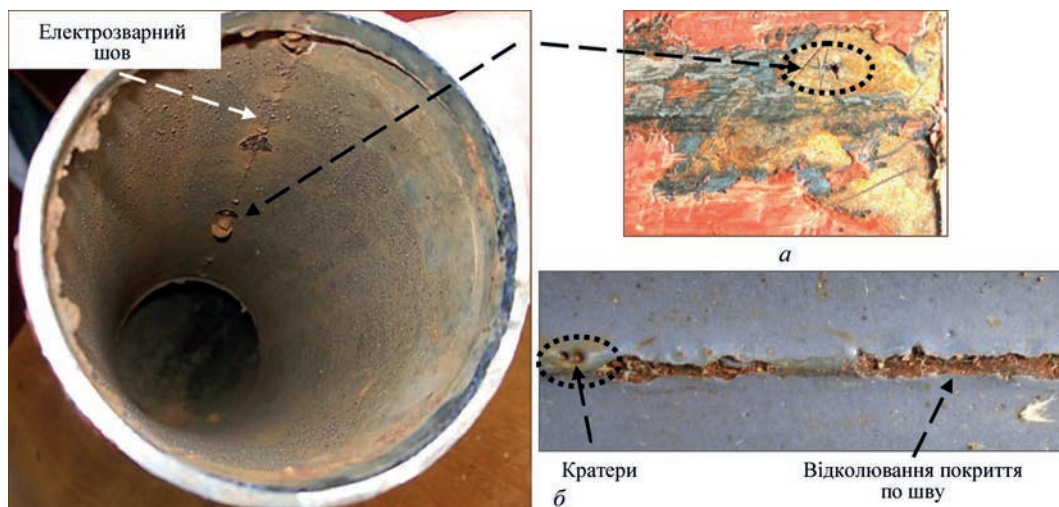


Рис. 1. Зовнішня (а) та внутрішня (б) поверхні труби

експлуатації. Вздовж електрозварного шва виявлено дефекти покриття у вигляді кратерів діаметром до 1 мм (рис. 1, б), що утворилися під час виготовлення покриття. Під покриттям на зварних швах виявлено низку дефектів зварювання: грат, ненаскрізні дефекти зварювання – несплавлення кромки у вигляді щілини довжиною до 15 мм та розкриттям кромки шириною приблизно 1 мм, несплавлення кромки довжиною до 4 мм. Висота грату – приблизно 0,2 мм, що є допустимою згідно з ГОСТ 10705 (висота грату для труб з товщиною стінки понад 3 мм повинна бути не більше 0,5 мм [9]). Грат на шві, місцями несплющений, сприяв утрудненню нанесення покриття і, як наслідок, слабкому зчепленню з металом в цій області. Ймовірно також потоншення покриття на верхівках грату. В місцях відколювання покриття від шва, в тому числі в області кратерів видно корозійні ураження внаслідок перебігу щілинної корозії.

На зовнішній поверхні в області електрозварного шва виявлені тріщиноподібні наскрізні корозійні ураження довжиною 3...4 мм, навколо яких розвивалася корозійна виразка.

На основі проведеного аналізу зовнішнього вигляду зразків, корозію ідентифіковано як внутрішню щілинну [10] в області електрозварного шва внаслідок дефекту з'єднання – несплавлення кромки, який, імовірно, утворився від нещільного прилягання покриття до верхівок грату та перебігу корозії в кратероподібних дефектах під покриттям.

Фізико-механічні властивості емалевого покриття визначали на зразку без візуально видимих пошкоджень покриття на ділянках без шва та зі швом (табл. 2).

Аналіз результатів дослідження (табл. 2), показав, що покриття, як на основному металі так і на зварному шві, не гладке: наявні включення фрити, що надають йому шорсткість, яка виявляється тактильно.

Середня товщина силікатноемалевого покриття на основному металі труби становила 0,223 мм, що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.5-30 [3] (більше 0,2 мм). Проте, товщина емалі на електрозварному шві становила приблизно 0,140 мм.

Перехідний питомий електричний опір покриття, що є показником його захисних властивостей, на поверхні основного металу становив 907 Ом·м², що майже в 1,8 разів більше нормованого [6] (500 Ом·м²); на поверхні, яка містила електрозварний шов – 1,5 Ом·м², що майже в 333 рази менше нормованого. Низький перехідний питомий електричний опір на поверхні зі зварним швом свідчить про наявність наскрізних мікродефектів у покритті в області шва.

У результаті випробувань міцності під час удару експлуатованого впродовж 5 років покриття виявлено його відколювання в місці удару, внаслідок чого під час експлуатації можливий розвиток корозії виразками.

Електрохімічні дослідження. Для дослідження корозії в дефекті зварювання в роботі змодельовано умови щілинної корозії у зазорі діаметром 2 мм та глибиною 2 мм у 3 %-му розчині NaCl. Потенціал корозії сталі відносно хлоридсрібного електроду порівняння в об'ємі розчину через 30 хв становив -0,670 В, у щілині – -0,701 В, тобто в щілині потенціал змістився у бік від'ємніших потенціалів на 0,031 В, що є передумовою пришвидшення корозійного процесу. Швидкість корозії сталі в об'ємі розчину та в щілині визначали з поляризаційних кривих методом їх екстраполяції. Встановлено (рис. 2), що процес відбувається з дифузійним контролем. Швидкість корозії сталі в струмових одиницях в об'ємі розчину становить 0,192 А/м², у щілині – 0,379 А/м², тобто в щілині швидкість корозії у майже 2 рази вища.

Таблиця 2. Фізико-механічні властивості силікатноемалевого покриття

Назва показника	Норма	Характеристика зразка	
		Без шва	Зі швом
Зовнішній вигляд згідно з ДСТУ Б В.2.5-30, пункт 7.3.8.3 [3]	Суцільна, рівномірна оплавлена, гладка, блискуча поверхня. Не допускається наявність тріщин, пор, пухирів й інших дефектів, що оголюють метал і видимі неозброєним оком	Суцільна, рівномірна оплавлена, шорстка на дотик, блискуча поверхня	Суцільна, рівномірна оплавлена, шорстка на дотик, блискуча поверхня. Відсутність покриття на ділянках електрозварного шва довжиною до 15 мм
Товщина, мм, згідно з ДСТУ Б В.2.5-30 [3]*	0,2	0,216	0,230
Перехідний питомий електричний опір згідно з ТУ 1390-001-01297858 [6], Ом·м ²	500	907,5**	1,5**
Міцність під час удару, Дж, згідно з ДСТУ Б В.2.5-30 [3]	2,0	Не витримує	Не витримує
<i>Примітки.</i> *Товщина одного шару покриття. **Під час вимірювань використовували порожнистий циліндр діаметром 0,034 м (площа 0,000907 м ²).			

Механізм щілинної корозії, яка відбувається всередині чи навколо вузького отвору, щілини або проміжку (ДСТУ 3830) [11], добре відомий. Спочатку в зазорі накопичуються агресивні іони (наприклад, хлорид-іони) і кисень витісняється з розчину всередині зазору внаслідок чого зазор працює як анод, а матеріал поза зазором – як катод. Корозія перебігає в зазорі через руйнування пасивної плівки на поверхні металу та прискорюється за недостатчі кисню та зміни рН середовища (з часом кислотність в зазорі зростає) через гідроліз в анодній зоні [12]:



Щілинна корозія найбільш інтенсивна в умовах водних середовищ, що не течуть. Саме на процеси корозії внаслідок недостатньої циркуляції води вказує шар відкладень, що містять продукти корозії, на внутрішній поверхні труби (рис. 1).

Аналіз поверхні зламу. Для отримання даних щодо походження дефектів проаналізували та оцінили характер поверхні зламу зразка труби, який виконали по зварному шву. На фотографії (рис. 3) видно дефект, вкритий шаром продуктів корозії бурого кольору, та частина шва металевого кольору. Руйнування зразка, відбулося по щілиноподібному дефекту – несплавленню кромки. Частина поверхні зламу, що прилягає до внутрішньої стінки труби вкрита шаром продуктів корозії бурого кольору. Це обумовлено потраплянням води в щілину, утворену в дефекті покриття (внаслідок наявності ґрату та кратероподібних дефектів покриття). Зважаючи на те, що товщина стінки труби 4 мм, а виток води з труби відбувся через 5 років експлуатації, можна вважати, що швидкість щілинної корозії становить приблизно 0,8 мм/рік. Стійкість досліджуваної сталеві труби в щілині згідно з ГОСТ 9.502 [13] «понижена» (від 0,5 до 1,0 мм/рік).

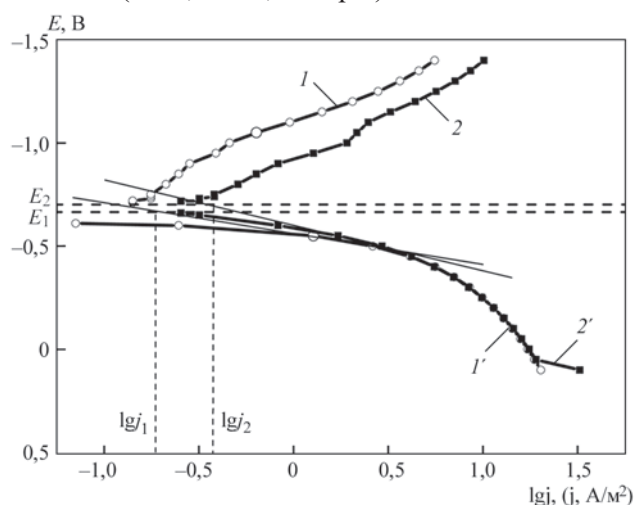


Рис. 2. Катодні (1, 2) та анодні (1', 2') поляризаційні криві на сталі Ст1кп у 3 %-му розчині NaCl за різних умов: 1 – об'єм розчину; 2 – змодельована щілина. E_1 та E_2 – потенціали корозії; j_1 та j_2 – щільність струму корозії

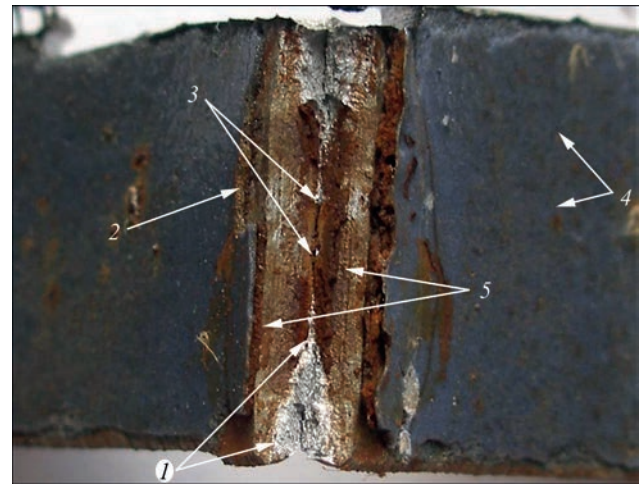


Рис. 3. Злам зварного з'єднання труби в області з наскрізним дефектом: 1 – проникнення корозії в області шва на глибину від 1 до 4 мм; 2 – відкол покриття; 3 – наскрізний дефект довжиною 3 мм; 4 – залишки продуктів корозії на нерівностях покриття; 5 – несплавлення кромки

Металографічні дослідження. Зовнішній вигляд перерізу частини труби на макрошліфі наведено на рис. 4, а, з якого видно, що з боку внутрішньої поверхні наявний дефект несплавлення кромки. Загалом, внутрішня поверхня зразка рівна, що вказує на відсутність внутрішньої корозії труби під покриттям. У перерізі середньої частини зразка виявлено ненаскрізний щілиноподібний дефект глибиною до приблизно 1,5 мм, що утворився під час її виготовлення (рис. 4, а).

Структура дослідженого зразка відповідає маловуглецевій сталі феритно-перлітного типу (рис. 4, б). Згідно з ГОСТ 5639 [14] розмір зер-

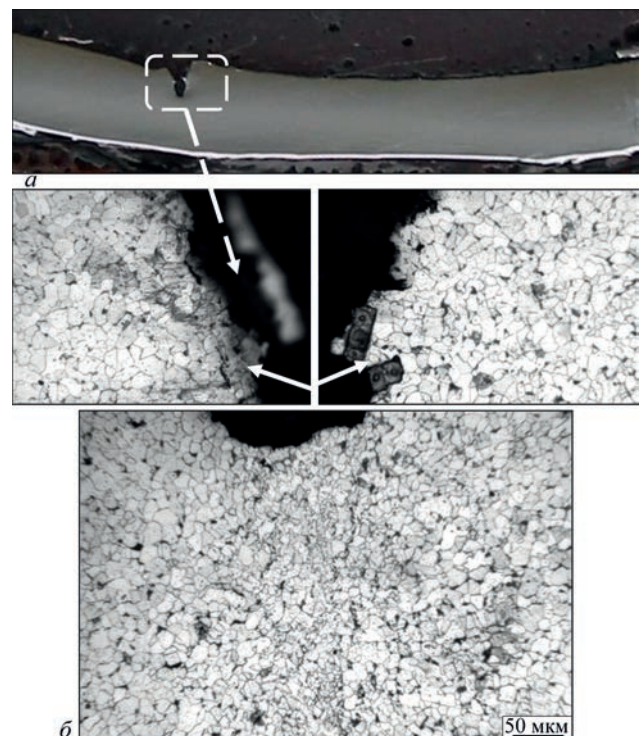


Рис. 4. Металографічний макрошліф (а) та мікроструктура областей електрозварного шва труби (б), $\times 200$

на основного металу відповідає 9 номеру (середній діаметр зерна 0,015 мм), в зоні шва – 10 (0,011 мм). Будова структури та розташування дефекту підтверджують, що щілиноподібний дефект утворився у зоні недостатнього стиснення кромки. Стінки дефекту (несплавлення кромки) уражені корозією (рис. 4, б), тобто внаслідок розвитку корозійного процесу в щілині при контакті з водою під час експлуатації водопроводу.

Таким чином встановлено, що витікання води на ділянці прокладення емальованих труб під час експлуатації відбулося внаслідок щілинної корозії, спричиненої несплавленням кромки при зварюванні труб на підприємстві-виробнику. Це призвело до виникнення аварійної ситуації в системі холодного водопостачання.

Висновки

1. Встановлено, що корозія емальованих електрозварних труб з вуглецевої сталі феритно-перлітної структури Ст1кп системи холодного водопостачання громадської будівлі – внутрішня. Корозійні ураження утворилися внаслідок несплавлення кромки листа при зварюванні та перебігу щілинної корозії під час контакту з водою.

2. Розвиток щілинної корозії супроводжується зниженням рН в щілині, яка є анодом, що локально прискорює корозійні процеси. За 5 років експлуатації, швидкість щілинної корозії становила 0,8 мм/рік та призвела до утворення наскрізних уражень, а корозійна стійкість сталі Ст1кп в щілині, згідно з ГОСТ 9.502 оцінена як «понижена» (від 0,5 до 1,0 мм/рік).

3. Перехідний питомий електричний опір покриття на основному металі становив 907 Ом·м², на електрозварному шві – 1,5 Ом·м², що в 333 рази менше нормованого згідно з ТУ 1390-001-01297858 (500 Ом·м²). Відмінності обумовлені різною товщиною покриття на основному металі (0,223 мм) та електрозварному шві (0,140 мм), а також наявністю дефектів покриття в зоні шва.

4. Корозійна стійкість та довговічність дослідженої емальованої труби визначається якістю виконання електрозварного з'єднання. Внаслідок недоліків технології зварювання при виготовленні труби відбулося утворення дефектів у зварному шві у вигляді несплавлення кромки. Незадовільне зчеплення силікатно-емалевого покриття в області заводського шва викликало його руйнування з утворенням щілин зсередини труби та розвитку корозії при контакті з середовищем.

5. При закупівлі електрозварних труб для систем водопостачання рекомендовано підвищити якість вхідного контролю труб (вибірковий контроль зварних швів руйнівними методами); запропонувати заводу-виробнику труб підготувати

додаткові вимоги, які попереджують утворення щілиноподібних дефектів в зварних швах електрозварних труб при їх виготовленні чи сприяють їх своєчасному виявленню неруйнівними методами.

Список літератури

1. Tyrala, D., Pawlowski, B. (2021) Failure analysis of premature corrosion of HF seam-welded steel pipe in central heating system. *Fail. Anal. and Preven.*, 21, 772–778. DOI: 10.1007/s11668-021-01134-6
2. Živković, D., Mišina, N., Ljumović, P. (2017) Corrosion damage of seam welded galvanized hot water pipelines. *Tehnički vjesnik*, 24, 4, 1007–1012. DOI:10.17559/TV-20170112142442
3. ДСТУ Б В.2.5-30:2006 *Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі. Трубопроводи сталеві підземні систем холодного і гарячого водопостачання. Загальні вимоги до захисту від корозії.*
4. Шайер Л.Л. (1981) *Коррозия. Справочник.* Москва, Металлургия.
5. ДСТУ EN ISO 6520-1:2015 (EN ISO 6520-1:2007, IDT; ISO 6520-1:2007, IDT) *Зварювання та споріднені процеси. Класифікація геометричних дефектів у металевих матеріалах. Частина 1. Зварювання плавленням.*
6. ТУ 1390-001-01297858-96 *Трубы стальные с двухсторонним силикатно-эмалевым покрытием. Технические условия.*
7. ДСанПіН 2.2.4-171-10 *Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною.*
8. ДСТУ 2651:2005 *Сталь вуглецева звичайної якості. Марки (ГОСТ 380-2005).*
9. ГОСТ 10705-80 *Трубы стальные электросварные. Технические условия.*
10. ГОСТ 9.908-85 *Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы и сплавы. Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости.*
11. ДСТУ 3830-98 *Коррозия металів і сплавів. Терміни та визначення основних понять.*
12. Жук Н.П. (2006) *Курс теории коррозии и защиты металлов.* Москва, ООО «Альянс».
13. ГОСТ 9.502-82 (СТ СЭВ 6194-88) *Единая система защиты от коррозии и старения Ингибиторы коррозии металлов для водных систем. Методы коррозионных испытаний.*
14. ГОСТ 5639-82 *Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.*

References

1. Tyrala, D., Pawlowski, B. (2021) Failure analysis of premature corrosion of HF seam-welded steel pipe in central heating system. *Fail. Anal. and Preven.*, 21, 772–778. DOI: 10.1007/s11668-021-01134-6
2. Živković, D., Mišina, N., Ljumović, P. (2017) Corrosion damage of seam welded galvanized hot water pipelines. *Tehnički vjesnik*, 24(4), 1007–1012. DOI:10.17559/TV-20170112142442
3. DSTU B V.2.5-30:2006 *Engineering equipment of buildings and structures. External networks. Underground steel pipelines of cold and hot water supply systems. General requirements for protection against corrosion* [in Ukrainian].
4. Shajer, L.L. (1981) Corrosion. In: Refer. book. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
5. DSTU EN ISO 6520-1:2015 (EN ISO 6520-1:2007, IDT; ISO 6520-1:2007, IDT) *Welding and allied processes. Classification of geometric imperfections in metallic materials. Pt 1: Fusion welding* [in Ukrainian].
6. TU 1390-001-01297858-96 *Steel pipes with double-sided silicate enamel coating. Specifications* [in Russian].
7. DСанПіН 2.2.4-171-10 *Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption* [in Ukrainian].
8. DSTU 2651:2005 *Common quality carbon steel. Grades (GOST 380-2005)* [in Ukrainian].

9. GOST 10705-80 *Electrically welded steel tubes. Specifications* [in Russian].
10. GOST 9.908-85 *Unified system of corrosion and ageing protection. Metals and alloys. Methods for determination of corrosion and corrosion resistance indices* [in Russian].
11. DSTU 3830-98 *Corrosion of metals and alloys. Terms and definitions of basic concepts* [in Ukrainian].
12. Zhuk, N.P. (2006) *Course in the theory of corrosion and protection of metals*. Moscow, Alliance [in Russian].
13. GOST 9.502-82 (СТ СМЕА 6194-88) *Unified system of corrosion and ageing protection. Inhibitors of metals corrosion for aqueous systems. Methods of corrosion tests* [in Russian].
14. GOST 5639-82 *Steels and alloys. Methods for detection and determination of grain size* [in Russian].

INVESTIGATION OF CORROSION OF ENAMEL COLD WATER SUPPLY PIPES

S.O. Osadchuk, L.I. Nyrkova, L.V. Goncharenko

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

E-mail: svetlanaosadchuk@meta.ua

The pipe of carbon steel with inner silicate-enamel coating was investigated, which was damaged during operation in the system of cold water supply during 5 years. According to the results of the visual inspection, it was revealed that the electric welded pipe and corrosion damages in the form of crevices were formed after damage to the protective coating on the electric weld. It is shown that the transitional specific electric resistance on the surface with an electric weld is low ($1.5 \text{ Ohm} \cdot \text{m}^2$) compared to this indicator on the base metal ($907 \text{ Ohm} \cdot \text{m}^2$), which indicates the practical absence of its protective ability. Metallographic examinations showed that the cause of fracturing the pipe specimen is defects of non-fusion of the sheet edges during manufacture. The identified type of corrosion is a crevice that propagated on the inner surface of the pipe at the points of non-fusion of weld edges. Over the 5 years of operation, the rate of crevice corrosion was 0.8 mm/year and was accompanied by the formation of through lesions, and the corrosion durability in the crevice was estimated in accordance with GOST 9.502, as "reduced" (from 0.5 to 1.0 mm/year). It was concluded that the corrosion durability and fatigue life of the studied enamel pipe is determined by the quality of producing electric welded joint. 14 Ref., 2 Tabl., 4 Fig.

Keywords: enamel pipes, carbon steel, silicate-enamel coatings, electric weld, corrosion durability, corrosion rate

Надійшла до редакції 29.03.2023

ПЕРЕДПЛАТА 2023



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



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



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

РЕКЛАМА В ЖУРНАЛАХ

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках журналів.

Перша сторінка обкладинки – $200 \times 200 \text{ мм}$.

Друга, третя і четверта сторінки обкладинки – $200 \times 290 \text{ мм}$.

Перша, друга, третя, четверта сторінки внутрішньої обкладинки – $200 \times 290 \text{ мм}$.

Вклейка А4 – $200 \times 290 \text{ мм}$. Розворот А3 – $400 \times 290 \text{ мм}$.

А5 – $185 \times 130 \text{ мм}$.

Розміри журналів після обрізу $200 \times 290 \text{ мм}$.

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

ВАРТІСТЬ РЕКЛАМИ

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

ВИДАВНИЦТВО

Міжнародна Асоціація «Зварювання»
03150, Київ, вул. Казимира Малевича, 11
Тел./факс: 38044 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<https://patonpublishinghouse.com>

ЗАСТОСУВАННЯ ПРИСАДКИ CuSi_3 ДЛЯ З'ЄДНАННЯ ДЕТАЛЕЙ ХУДОЖНІХ ВИРОБІВ ЕЛЕКТРОДУГОВИМ TIG ЗВАРЮВАННЯМ-ПАЯННЯМ

С.М. Мінаков, Є.П. Чвертко, Н.М. Стреленко, А.С. Мінаков

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». 03056, м. Київ, Берестейський проспект (Перемоги), 37. E-mail: minakovsergey61@gmail.com

Статтю присвячено виготовленню художніх виробів із низьковуглецевої сталі. Через особливості конструкції таких виробів, конфігурації та взаємного розташування нероз'єднаних з'єднань та їхніх елементів застосування технологій електродугового зварювання виявляється обмеженим. Розглянуто переваги електродугового зварювання-паяння для виготовлення таких конструкцій. Наведений детальний опис вирішення технологічних задач, які постали при виготовленні реальних скульптур зі сталі, а саме: з'єднання суцільних профілів, з'єднання деталей із дроту з трубою, з'єднання пучка тонких дротів з півсферою і з'єднання дротів різних діаметрів під гострими кутами. Подано фото і характеристики скульптур, які виготовлені зі застосуванням TIG зварювання-паяння. Бібліогр. 7, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: художні вироби зі сталі, TIG зварювання-паяння, присадка CuSi_3

Вступ. Зварювання та споріднені процеси отримання нероз'єднаних з'єднань на сьогодні успішно застосовують в багатьох галузях, зокрема при виготовленні художніх виробів. Особливостями конструкції таких виробів є наявність елементів різної товщини та різної геометричної форми, несиметричність конструкції в цілому та розташування на ній нероз'єднаних з'єднань зокрема. На додачу, місця з'єднання деталей та конфігурація з'єднань у першу чергу залежать від художнього задуму, через що вони не завжди є оптимальними і за умови використання традиційних способів електродугового зварювання на конструкції можуть виникати ділянки, які багаторазово піддаються циклам нагрівання-охолодження. У свою чергу, це призводить до погіршення механічних характеристик з'єднань і утворення несприятливих рівнів залишкових зварювальних напружень і деформацій.

Електродугове зварювання-паяння є сучасною технологією, яка широко застосовується для з'єднання тонколистового металу. Джерелом нагрівання при цьому способі виступає електрична дуга, а в якості присадного матеріалу використовують спеціальні дроти на основі міді та алюмінію. Оскільки температура плавлення таких дротів нижча за температуру плавлення сталей, то процес відбувається із нижчими у порівнянні із електродуговим зварюванням значеннями напруги та струму, що зменшує тепловий вплив на деталі та знижує розбрикування. Достатній рівень автоматизації процесів електродугового зварювання-паяння в інертних газах забезпечує хорошу контрольованість погонної енергії. Присадки з високим

рівнем фізико-хімічної сумісності до основного матеріалу конструкції/виробу забезпечують високий рівень фізико-механічних та антикорозійних характеристик з'єднання, низький рівень залишкових напружень і деформацій тонколистових елементів конструкції [1].

Проведений ряд експериментальних досліджень електродугового зварювання-паяння методом MIG (CMT) напусткових з'єднань із низьковуглецевої сталі мідними присадками показав часткове оплавлення кромки зразків в реакційній зоні на міжфазній границі взаємодії мідної присадки і основного матеріалу [2, 3], що не є характерним для процесу паяння. Тому у разі використання мідних присадок в іноземній англомовній літературі також використовують термін зварювання припоєм [4].

Оскільки для вирішення технологічних задач при виготовленні художніх зварних або паяних виробів часто необхідно рознести у часі процеси нагрівання деталей дугою та введення присадки за основу було обрано технологію електродугового зварювання-паяння неплавким електродом TIG.

Мета роботи – розробити технології електродугового зварювання-паяння методом TIG для отримання якісних нероз'єднаних з'єднань художніх виробів специфічної геометрії зі сталі.

Розробка технології електродугового зварювання-паяння методом TIG для художніх виробів. Процес складання та з'єднання нестандартних конструктивних елементів художніх виробів зі сталі потребує адаптації як оснастки для кожного виробу, так і існуючих сучасних технологій зварювання та паяння.

Мінаков С.М. – <https://orcid.org/0000-0001-8607-4120>, Чвертко Є.П. – <https://orcid.org/0000-0003-3073-1034>, Стреленко Н.М. – <https://orcid.org/0000-0002-8571-5958>, Мінаков А.С. – <https://orcid.org/0000-0002-1724-3100>

© С.М. Мінаков, Є.П. Чвертко, Н.М. Стреленко, А.С. Мінаков, 2023

Застосування присадок на основі міді (CuSi3, CuAl8) для з'єднання специфічної геометрії художніх виробів зі сталі способами електродугового паяння гарантовано забезпечує:

- високі антикорозійні характеристики отриманого шва [5];
- мінімальне вигорання наявного антикорозійного покриття в зоні термічного впливу, завдяки більш низькій у порівнянні зі сталями температурі плавлення мідних присадок (910...1025 °C);
- мінімальне розбризкування металу;
- контрольоване тепловкладення в основний метал;
- легку наступну обробку отриманого шва.

Найширше застосування на виробництві в різних галузях промисловості має присадка у формі дроту марки CuSi3 (ISO 24373: CuSi3Mn1, DIN 1733: SG-CuSi3). Її застосовують для з'єднання низьколегованих, нержавіючих і сталей з антикорозійним покриттям.

Оптимізація основних фізико-хімічних властивостей мідної присадки, таких як: розтікання в розплавленому стані, змочування поверхні основного матеріалу та дифузійні процеси на границі присадка-метал досягається завдяки хімічному складу присадки (таблиця) та термічному циклу зварювання-паяння [6, 7].

З'єднання квадратного профілю. Сформувати якісне з'єднання конструктивних елементів художнього виробу із квадратного профілю 10×10 мм суцільного перерізу. Матеріал виробу – низьковуглецева сталь.

Деталі у з'єднаннях розташовані під різними кутами – від 15 до 90°. Застосування традиційного зварювання методами MIG, MAG та TIG призводить до витікання зварювальної ванни по сторонам від поздовжньої осі профілю. Тому застосування вказаних способів зварювання вимагає переходу на багатошарову схему з'єднання та необхідність механічного знімання наявного підсилення шва, що виникає в наслідок витікання розплаву. При розташуванні елементів виробу під гострими кутами це зробити досить складно.

Електродугове TIG зварювання-паяння із застосуванням дроту CuSi3 дозволяє заповнити зазор присадкою між крайками без значних її витікань завдяки покращеному змочуванню. Через це отримане з'єднання майже не потребує механічної обробки, а якщо вона і потрібна, то її легко виконати внаслідок меншої міцності присадки і її гарної здатності до механічної обробки.

Беручи до уваги досить велику для процесів електродугового TIG зварювання-паяння тов-

Таблиця. Хімічний склад дроту CuSi3, мас. %

Cu	Si	Mn	Fe	Sn	Zn	Pb	Al	P
Основа	2,8...4,0	≤1,5	≤0,5	≤1,0	≤1,0	≤0,02	<0,01	<0,02

щину металу, перед з'єднанням суцільних профілів 10×10 мм на їхніх крайках на одній із граней профілю необхідно зробити скоси (рис. 1, а) та/або встановити їх із зазором 2...3 мм. Нагрівання дугою крайок деталей слід починати зі сторони скосів. На крайках формується тонкий прошарок розплаву. Необхідно прогріти профіль по всьому перерізу до температури вищої за температуру плавлення присадки. Нагрівання має бути рівномірним. Важливо вловити момент коли ділянка розплаву досягає максимальних розмірів – це значною мірою залежить від практичних навичок митця-зварника. На цьому етапі в зазор вводять присадку – дріт CuSi3. Якщо в процесі підігріву ділянки розплаву на протилежних кромках зливаються в єдину область розплаву, то присадку слід подавати максимально швидко. Підігрів проводять до заповнення присадкою всього перерізу (рис. 1, б). Рівень заповнення шва присадкою супроводжується різким зниженням рівня розплавлення присадки. Отримані таким способом з'єднання наведено на рис. 2.

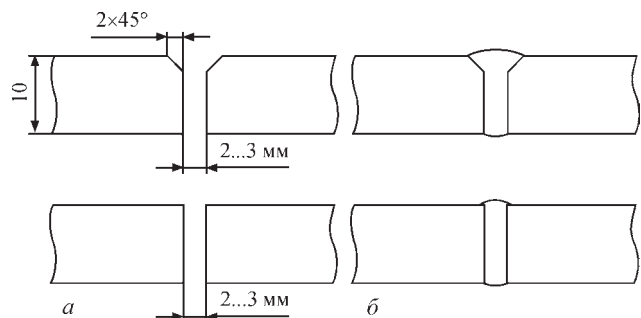


Рис. 1. З'єднання із суцільного профілю 10×10 мм: а – підготовка крайок; б – схема з'єднання

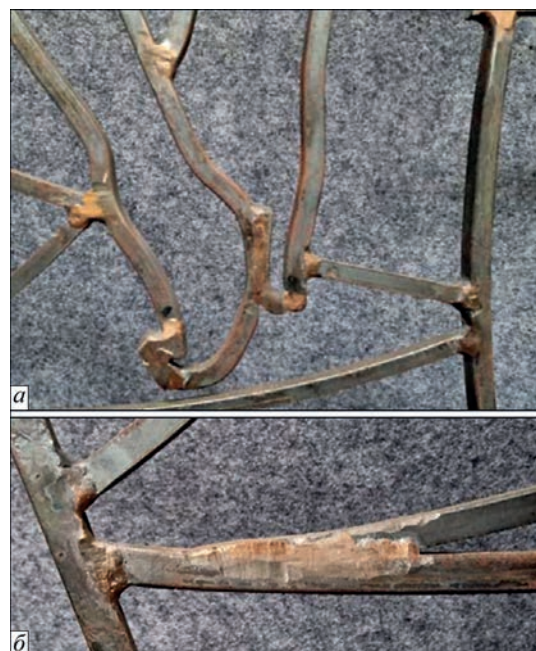


Рис. 2. Зовнішній вигляд з'єднань із суцільного профілю 10×10 мм

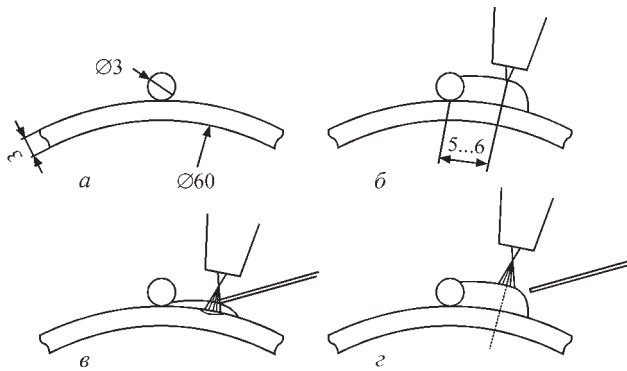


Рис. 3. З'єднання дроту з поверхнею труби: *a* – деталі перед з'єднанням; *б* – початок процесу; *в* – утворення першого шару з'єднання; *г* – утворення другого шару з'єднання

З'єднання дрiт-труба. Сформувати якісне з'єднання конструктивних елементів художнього виробу із дроту діаметром 3 мм, який розташований на поверхні труби діаметром 60 мм із товщиною стінки 3 мм. Матеріал виробу – низьковуглецева сталь.

Процес слід починати з підігрівання дугою поверхні труби на відстані 5...6 мм від бічної поверхні дроту (рис. 3). Коли з'являється ділянка рідкого металу слід подати присадку. Присадка завдяки гарному розтіканню змочує дрiт. Постійно додаючи присадку, переміщуємо пальник вздовж бічної поверхні дроту. Через приблизно 10 мм дугу і присадку можна перенести ближче до дроту. Розплавлена присадка завдяки нагріванню периферійними областями дуги та капілярному розтіканню піднімається до верхньої частини дроту. Другий прохід наносимо в протилежному напрямку. Дійшовши до кінця деталі із дроту закінчуємо процес, після чого слід виконати такий самий шов з протилежного боку.

З'єднання пучка дротів з півсферою. Сформувати якісне з'єднання конструктивних елементів художнього виробу із пучка (10 шт.) дротів діаметром 1,2 мм до півсфери товщиною 10 мм. Матеріал виробу – низьковуглецева сталь.

Для полегшення встановлення пучка дротів на поверхні сфери та запобігання деформації їхніх кінців під час нагрівання, у півсфері висвердлено отвір. Пучок дротів перед процесом з'єднання вставлений в отвір, а також зафіксований стяжкою на деякій відстані. Закріплюємо півсферу так щоб пучок був розташований горизонтально (рис. 5, *a*). Процес слід починати вище над пучком на відстані



Рис. 4. Зовнішній вигляд з'єднання деталі із дроту діаметром 3 мм та труби діаметром 60 мм із товщиною стінки 3 мм

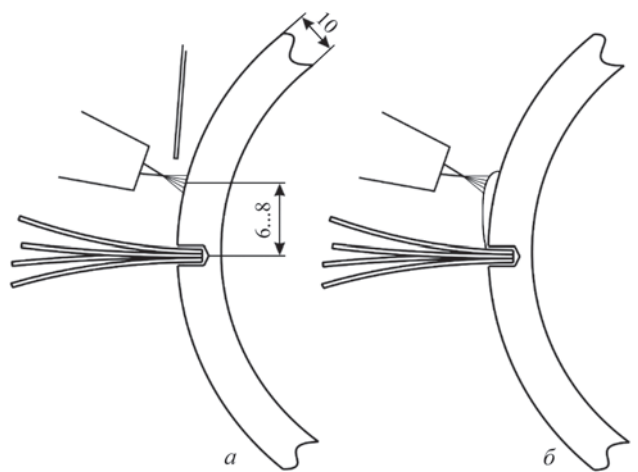


Рис. 5. ПЗ пучка дротів із півсферою: *a* – початок процесу; *б* – розтікання присадки на пучок

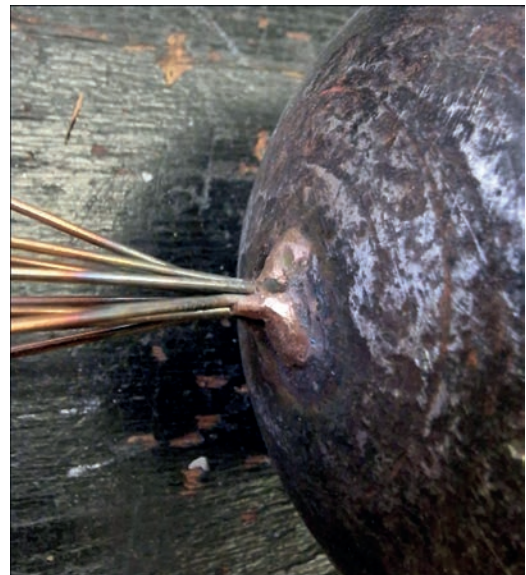


Рис. 6. Зовнішній вигляд ПЗ пучка дротів із півсферою

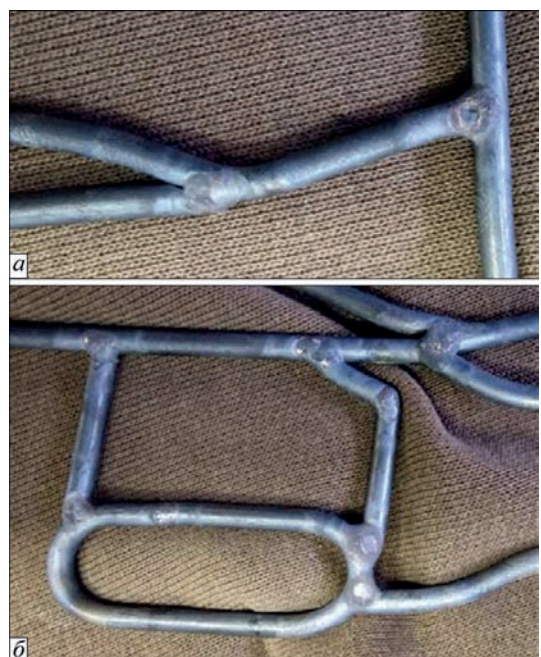


Рис. 7. Зовнішній вигляд з'єднання деталей із дротів діаметром 3, 4 та 5 мм



Рис. 8. Скульптури, отримані за технологією TIG зварювання-паяння, які виготовлені в творчому гуртку Smart Art на кафедрі зварювального виробництва НН ІМЗ ім. Є.О. Патона КПІ ім. Ігоря Сікорського: а – «Мачо»; б – «В Майбутне!»; в – «Мінйон»; г – процес створення скульптури «Мінйон»; д – відео скульптури «В Майбутне!»

6...8 мм. Після отримання тонкого шару розплаву на півсфері слід розпочати подавання присадки. Остання під дією сил тяжіння та фізико-хімічних властивостей присадки при нагрівання від тепла дуги розтікається на пучок дротиків (рис. 4, б). Після цього процес слід завершити, повернути півсферу навколо горизонтальної осі та повторити процес з інших двох/трьох сторін пучка.

З'єднання дротів встик. Сформувати якісне з'єднання конструктивних елементів художнього виробу із дротів діаметром 3, 4 та 5 мм, які розташовані в стик та під кутами від 15 до 90°. Матеріал виробу – низьковуглецева сталь.

При традиційному зварюванні дротів під гострим кутом методом TIG внаслідок значного тепловкладення тільки вздовж осі дротів часто призводить до перегріву деталей, розплавлення та

втрати геометричної форми. На додачу, деталі художньої конструкції попередньо згинають, тому при стикуванні вони не знаходяться в одній площині і втрата форми призводить до утворення з'єднань неналежної якості. При електродуговому TIG зварюванні-паянні зі застосуванням дроту CuSi3 процес відбувається при температурах значно нижчих від температур плавлення деталей, тому втрати форми останніх не відбувається (рис. 7).

При формуванні з'єднання дротів під кутами від 45 до 90° достатньо додати присадку і продовжити нагрів нерухою дугою до повного розтікання CuSi3 вздовж всього перерізу з'єднання. Для з'єднання дротів під гострими кутами від 15 до 45° необхідно починати із гострого кута поступово переміщуючи дугу до зворотної сторони цього кута, а потім повертатись на початок для

плавного розподілу присадки і формування гарного переходу.

Практичне застосування. Розроблені технології електродугового TIG зварювання-паяння з присадкою CuSi3 успішно застосовані при виготовленні скульптур «Мачо», «В Майбутнє!» та «Мінйон» (рис. 8). Роботи проведені у творчому гуртку Smart Art на кафедрі зварювального виробництва НН ІМЗ ім. Є.О. Патона КПІ ім. Ігоря Сікорського, творчий задум та дизайн Сергія Мінакова.

Скульптура «В Майбутнє!» прийнята до участі у виставці зварних художніх виробів «2023 UN Sustainable Development Goals Digital Collection», яка пройде 16–21 липня 2023 р. в Сінгапурі в рамках Щорічної асамблеї Міжнародного інституту зварювання.

Основними конструкційними елементами скульптури є: двотаврове кільце, фігури юнака і дівчини всередині земної кулі, основа та елементи жорсткості позаду кільця. Частина кільця під ногами хлопця та дівчини призначена для занурення в фундамент. Інша частина кільця над фундаментом символізує портал (вхід) в нове життя. Земна куля являє собою безмежні можливості для молодих людей в майбутньому житті.

Розміри скульптури: висота 2,3 м, ширина 2,3 м, глибина 1,5 м. Вага близько 150 кг.

Матеріал конструкції – низьковуглецева сталь.

У виготовленні задіяні технології:

– комп'ютерна обробка фотографії (адаптація реальної фотографії у графіку, створення 3D моделі скульптури);

– лазерне різання сегментів стінки круглого двотавра (гарячекатана сталь товщиною 5 мм);

– термомеханічне виправлення сегментів стінки круглого двотавра;

– холодне кування фігур (суцільний сталевий квадратний профіль 10×10 та 8×8 мм);

– механічне різання;

– вальцювання (земна куля та полиці двотавра);

– електродугове TIG зварювання-паяння присадкою CuSi3 (фігури, земна куля);

– зварювання MAG (з'єднання фігур та земної кулі до полиці двотавра (кільця діаметром 2,3 м),

зварювання двотавра, елемент жорсткості за кільцем двотавра (гнута труба 40×20 мм);

– ММА зварювання основи (швеллер 60 мм), з'єднання з кільцевим двотавром.

Висновки

Використання технології електродугового зварювання-паяння методом TIG із застосуванням мідного дроту CuSi3 значно розширює можливість якісного виготовлення художніх виробів складної геометричної форми із сталі, які мають велику кількість нестандартних з'єднань. Основні переваги технології: плавлення присадки CuSi3 відбувається при температурах менших від температури плавлення основного матеріалу, високий рівень рідкоплинності та гарне змочування поверхні основного матеріалу рідкою присадкою, низький рівень залишкових напружень і деформацій, достатньо високий рівень механічних властивостей з'єднання.

Список літератури/References

1. *Braze Welding* (2023) <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/braze-welding-134>.
2. Стреленко, Н.М. (2014) Фізико-хімічна взаємодія рідкого припою і основного металу в процесі паяння. *Технологіческіе системи*, 3 (68), 41-44.
Strelenko, N.M. (2014) Physical and chemical interaction of liquid solder and base metal in brazing and soldering. *Tekhnologichni Systemy*, 3(68), 41–44 [in Ukrainian].
3. Mou, G. et al. (2017) Study on weld seam surface deposits of CuSi3 CMT brazing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 92 (5–8), 2735–2742. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0349-3>.
4. Лобанов, Л.М., Демченко, Ю.В., Маковецька О.К. та ін. (2022) *Термінологічний словник зі зварювання і споріднених технологій*. Київ, Академперіодика, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України. DOI: <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.474.329>.
Lobanov, L.M., Demchenko, Yu.V., Makovetska, O.K. (2022) *Terminology dictionary on welding and related technologies*. Kyiv, Akademperiodyka, PWI, DOI: <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.474.329>.
5. Єрмолаєв, Г.В., Квасницький, В.В., Квасницький, В.Ф. та ін. (2015) *Паяння матеріалів*. Миколаїв, НУК.
Yermolaev, G.V., Kvasnytskyi, V.V., Kvasnytskyi, V.F. et al. (2015) *Brazing of materials*. Mykolaiv, NUK [in Ukrainian].
6. Weltsch, Z. (2020) Wetting of Non-Reactive and Reactive Metallic Substrates by Brazing Liquids, IOP Conference Series. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/903/1/012035>.
7. Хорунов, В. Ф., Зволінський, І. В., Максимова, С. В. (2013) Дугова пайка низкоуглеродистых сталей, *Автоматич. сварка*, 4, 23-27.
Khorunov, V.F., Zvolinskyi, I.V., Maksymova, S.V. (2013) Arc brazing of low-carbon steel. *The Paton Welding J.*, 4, 21–25.

CuSi3 APPLICATION FOR JOINING ART PRODUCTS BY ARC TIG BRAZE-WELDING

S.M. Minakov, E.P. Chvertko, N.M. Strelenko, A.S. Minakov

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Beresetskiy Ave., 03056, Kyiv.

E-mail: minakovsergey61@gmail.com

The paper is devoted to making art products from low-carbon steel. Due to the peculiarities of the design of such products, configuration and relative position of permanent joints and their elements, application of electric arc welding technologies turns out to be limited. The advantages of electric arc braze-welding for making such structures are considered. A detailed description of the implementation of technological tasks, arising in manufacture of real sculptures made of steel, is given, namely joining continuous profiles, joining wire parts to a tube, joining a bundle of thin wires to a semisphere and joining wires of different diameters at sharp angles. A photo and characteristics of the sculptures made with application of TIG braze-welding are given. 7 Ref., 1 Tabl., 8 Fig.

Keywords: steel art products work, TIG braze-welding, CuSi3 filler

Надійшла до редакції 18.04.2023

РИЗИКИ ТА НЕБЕЗПЕКА ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ РОБІТ

Зварювання – складний та відповідальний процес, саме тому він вимагає підвищеної уваги у плані дотримання безпеки. Вільно підібране обладнання з урахуванням факторів захисту, надійності та зручності використання може значно знизити ризики та запобігти травмуванню персоналу, а також гарантувати комфортні умови праці без зниження продуктивності.

Питаннями безпеки на робочому місці стурбовані як робітники, так і роботодавці, які прагнуть захистити здоров'я спеціалістів: зір, слух, голову, обличчя, легені, грудну клітину – найвразливіші місця людини на момент проведення зварювальних робіт. Запобігти негативним наслідкам на виробничому майданчику можна шляхом проведення тематичного навчання, дотримуючись запобіжних заходів, усуваючи небезпечні чинники. А також вибираючи максимально надійні та функціональні засоби індивідуального захисту зварювальника: пальники, маски, респіратори та вогнестійкий одяг. Тип і рівень захисту необхідно вибирати виходячи зі ступеня складності завдання, що виконується, а також тривалості впливу небезпечних факторів. Наприклад, використання легких зварювальних масок допускається при нетривалій роботі. Але у разі довготривалого перебування на зварювальній ділянці, коли вплив випарів, що містяться в повітрі і утворюються в процесі зварювання та шліфування, потрібен надійний захист органів дихання, який здатний зберегти здоров'я працівника.

До основних загроз здоров'ю при проведенні зварювальних процесів відносять: вплив тепла, УФ-випромінювання, сильний дим і світло, а також випари, що становлять загрозу для здоров'я спеціаліста та його оточення. Через багаторазовий тривалий вплив забруднень, що містяться в повітрі, виникає більша частина професійних легеневих захворювань, а для пошкодження легень достатньо навіть одноразового такого впливу. Також

зварювальники зазнають сильної втоми та професійних травм через необхідність виконувати роботи у складних просторових положеннях.

Ультрафіолетове випромінювання/яскраве світло в процесі зварювання. За красою від світла та іскор дуги, відомого символу зварювання, ховається небезпека. Якщо спостерігати за дугою, що горить, без потрібного захисту для очей – можна отримати пошкодження зору. Також слід враховувати, що навіть короткий вплив може спричинити опік поверхні ока (це явище називають «зловити зайчика»). Ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання, а також такі видимі елементи, як гарячі бризки, можуть пошкодити очі та обпалити незахищену шкіру.

Захист для очей у фокусі уваги. Зварювальна маска та зварювальний фільтр здатні забезпечити надійний захист очей. Світлофільтри (з фільтром, що автоматично затемнюється) і пасивні світлофільтри (схвалені кольорові захисні скла) гарантують 100%-ий захист від ультрафіолетового випромінювання.

Зварювальні маски почали використовувати досить давно. При виборі потрібної моделі необхідно орієнтуватися на характеристики їхнього класу захисту, ваги і балансування, оскільки ці властивості істотно різняться. Зварювальні або захисні маски з світлофільтром, що автоматично затемнюється, полегшують і прискорюють роботу фахівця протягом усієї роботи.

Захист легень – життєва необхідність у вирії зварювального процесу. Один з варіантів надійного захисту – маска зварювальна або маска для обличчя, що оснащена ущільненням для обличчя. У її конструкції є вентиляційна система очищення повітря (зварювальні респіратори та системи PAPR), яка здатна убезпечити людину від щоденної дії канцерогенних токсичних випарів та газів. Повна респіраторна система складається з фільтру, набору шлангів та лицьової маски. Зварювальні респіратори мають класифікацію за рівнями захисту, тобто рівнями очищення забрудненого повітря у зварювальному середовищі. Ця класифікація несе інформацію не тільки про ефективність фільтру системи фільтрації. Вона містить значення загального вимірного сукупного коефіцієнта витоків респіраторної системи – коефіцієнт проникнення (TIL).

Токсичні зварювальні гази та випаровування. Згідно з дослідженнями, за 8-годинну зміну людина вдихає 4000 літрів повітря. При цьому один зварювальник за годину роботи може спровокува-



ти утворення до 40 г диму та зважених у повітрі компонентів. Ці випари складаються з газів і дрібних частинок та можуть містити більше 40 різних речовин, які утворюються з оброблюваного матеріалу, присадкових металів, а також з таких поверхонь, як фарби і покриття. Випари небезпечні для здоров'я людини, а якщо нехтувати засобами захисту крихітні частинки диму можуть глибоко проникати в структуру легень і змінювати її. Крім того, тривала взаємодія з канцерогенами може спровокувати респіраторні недуги і рак. Професійним захворюванням легень можна запобігти, використовуючи надійний захист органів дихання.

Дотримуючись певних заходів безпеки, шкідливий вплив випарів і газів можна мінімізувати шляхом:

- забезпечення вентиляції в зоні зварювання з метою відведення випарів та газів з району проведення робіт;

- використання тільки сертифікованого зварювального респіратора.

Робота в обмеженому просторі. У тому випадку, коли зварювальнику необхідно працювати в обмеженому просторі (резервуари, труби, ями) інертні гази та деякі хімічні реакції можуть викликати зменшення або витіснення кисню у робочій зоні. Завжди перед зварюванням у таких умовах слід проводити оцінку ризиків, оскільки рівень кисню у робочому просторі може впасти нижче 17 %.

Запобіжні заходи при зварюванні в замкнутому просторі:

- використовуйте сертифікований зварювальний респіратор або маску, здатну захистити від зварювальних випарів;

- ознайомтесь з планом дій у надзвичайних ситуаціях;

- у зв'язку з високим ризиком займання не варто використовувати обладнання для подачі кисню; потрібно пам'ятати, що більшість зварювальних газів (у тому числі всі інертні) не мають запаху та можуть витіснити чисте повітря;

- варто переконатися у герметичності шлангів та з'єднувачів подачі захисного газу;

- ніколи не працюйте наодинці.

Нагрів і вогонь – високий ризик опіків. Для того, щоб уникнути загоряння в робочій зоні, потрібно звільнити її від легкозаймистих матеріалів, таких як дерево або тканина. Важливо пам'ятати, що іскри та вогонь можуть поширюватись на значну відстань.

Знайомство з планом дій у надзвичайних ситуаціях, а також із розташуванням вогнегасників на випадок пожежі – це не звичайна протокольна умова, а знання, які можуть врятувати життя. Серед основних вимог – необхідно розмістити вогнегасники у безпосередній близькості від місця зварювання. Важливо організувати несення пожежної вахти під

час зварювальних робіт та в період не менше 60 хв після їх завершення для відстеження іскор – якщо немає можливості утримувати робочу зону у повній чистоті від сторонніх легкозаймистих предметів. Проблема з огороженням зварювальної зони від навколишнього простору можуть вирішити вогнестійка ширма або листовий метал.

Серед поширених травм, які отримують зварювальники – опіки бризками (так зване татуювання дугою). При недостатньому захисті шийного відділу людини ця ділянка піддається впливу ультрафіолетового випромінювання, яке викликає опік, званий «шия зварювальника». Триваліший вплив може призвести до значних незворотних пошкоджень.

Багато видів травм можна запобігти, використовуючи сертифіковані засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) та захищаючи тіло під час зварювання. Товсті рукавички та вогнестійкий одяг з довгими рукавами – необхідні елементи спорядження будь-якого зварювальника.

Ураження електричним струмом. Ураження електричним струмом серйозна небезпека для зварювальника, яка може спричинити важкі травми та навіть смерть. Існує кілька способів зниження ризику ураження електричним струмом під час проведення зварювальних робіт:

- завжди перевіряйте справність обладнання;

- працюйте лише з тим обладнанням, яке ви добре знаєте та вмієте ним користуватися;

- ремонт та обслуговування техніки повинні виконуватися лише авторизованими ремонтними майстернями;

- використовуйте лише чисті та сухі зварювальні рукавички, не торкайтеся металевих частин тримача електрода шкірою або вологим одягом;

- носіть одяг, який повністю закриває тіло;

- використовуйте суху платформу, наприклад, циновку або дерев'яний піддон, щоб не контактувати з вологими або струмопровідними поверхнями.

Безпека для здоров'я. Як захистити себе від різних травм на робочому місці: від легких пошкоджень кінцівок до серйозних каліцтв? Відповідні ЗІЗ убезпечать від різних шкідливих фізичних впливів: навушники та беруші врятують від шуму, каски зможуть захистити голову, зварювальні маски та респіратори будуть оберігати ваші очі та легені.

Щоб уникнути нещасних випадків на робочому посту зварювальне обладнання та аксесуари слід вибирати виходячи з поставлених виробничих завдань та робочої обстановки. Забезпечення безпечної переміщення обладнання – важливий критерій, який може сприяти більш швидкому, безпечному та ефективному виконанню робіт.

За матеріалами сайту

https://kemppi.in.ua/articles/zahust_zvaryvalnuka.htm

Зварювання TIG стало простим – у чому ж секрет?



Непохитною рукою зварювальник подає присадковий метал у зварювальну ванну. Сантиметр за сантиметром. Метр за метром. Завжди з однаковими рівномірними рухами, створюючи напрочуд охайний зварний шов. Ми, звичайно, говоримо про зварювання TIG, найскладніший з усіх зварювальних процесів, що вимагає максимальної концентрації та спритності. Щоб досягти професійної обробки, потрібен значний досвід, роки практики та багато навичок. Тобто дотепер. Однак, зварювання TIG стало набагато простішим. Читайте далі, щоб дізнатися, як ...

TIG ТА ЯКІСТЬ – ІДЕАЛЬНЕ ПОЄДНАННЯ

Чи знаєте ви, що зварювання TIG – це єдиний процес зварювання, який може забезпечити високоякісні результати з усіма видами металу? Ось чому це завжди перший вибір при виробництві стійких до бактерій алюмінієвих або нержавіючих контейнерів для харчової промисловості. Зрештою, стандарти харчової гігієни вимагають не лише абсолютної чистоти, а й ідеальних зварних швів. Проблема полягає в тому, що не всі компоненти піддаються автоматизованому зварюванню, а це означає, що зараз і в майбутньому ці вироби все одно доведеться зварювати вручну. На жаль, професійних зварників, які володіють навичками ручного зварювання TIG, стає все менше. Брак зварювальників загалом є серйозною проблемою, і особливо погана ситуація зі зварюванням TIG.

TIG – НАВИЧКА, ЯКУ ВАЖКО ОСВОЇТИ

Для порівняння, зварюванню MIG/MAG набагато легше навчитися. При цьому виді зварювання присадковий метал або зварювальний дріт служить електродом, який запалює дугу. Під час роботи зварника він плавиться, і за допомогою пристрою подачі дроту автоматично подається більше присадкового металу або зварювального дроту. Тому зварювальник має вільну руку для підтримки руки, що тримає зварювальний палик, що значно полегшує контроль положення та напрямку палика. Зварювання TIG відрізняється: тут вольфрамовий електрод не плавиться, і зварювальник повинен подавати присадковий матеріал вільною рукою, крапля за краплею або безперервно. Щоб запобігти утворенню небажаних пор, зварювальний дріт (у формі стрижня) також повинен весь час залишатися в середовищі захисного газу. Отже, як бачите, зварювання TIG – це складне завдання, яке потребує великого досвіду, навичок і твердої руки.

DYNAMIC WIRE CONTROL – НОВА МАГІЧНА ФУНКЦІЯ

Однак, на щастя, є рішення – динамічне керування дротом (Dynamic Wire Control), нова інтелектуальна технологія, розроблена, щоб зро-

бити ручне зварювання TIG набагато легшим. Насправді набагато простіше, що зварювальники-початківці TIG можуть досягти високоякісних результатів з мінімальною підготовкою. Насправді ця технологія настільки хороша, що тепер навіть аматори можуть зробити ідеальний зварний шов TIG.

ОТЖЕ, ЯК ЦЕ ПРАЦЮЄ?

Технологія динамічного керування дротом автоматично вибирає правильну швидкість дроту залежно від напруги між дугою та деталлю. Це означає, що він адаптується до зварника, а не навпаки! Якщо бути більш точним: секрет цієї нової технології подачі дроту полягає в тому, що він автоматично саморегулюється. Зварювальна



Перевага динамічного керування дротом перед звичайним безперервним механізмом подачі дроту полягає в тому, що він автоматично саморегулюється.



Система зварювання iWave TIG та її інтелектуальне керування механізмом подачі дроту TIG DynamicWire пропонують ідеальне рішення, яке дозволяє недосвідченим зварювальникам відносно швидко досягати високоякісних результатів зварювання.

система активно регулює швидкість подачі дроту відповідно до режиму зварювання, положення пальника та поточних умов, навіть автоматично компенсуючи допуски компонентів до 30% – для листа завтовшки 10 мм це буде 3 мм!

ТОЧНИЙ І ЗРУЧНИЙ ДЛЯ КОРИСТУВАЧА

Цей інноваційний процес зварювання холодним дротом називається TIG DynamicWire. Окрім нової функції керування процесом, TIG DynamicWire також вражає своїм покращеним користувацьким досвідом. У процесі розробки було приділено велику увагу тому, щоб усі зварювальники могли працювати легко та комфортно, з якомога меншою кількістю кроків та налаштувань. Після встановлення пристрій подачі дроту залишається в стабільному положенні. Алюмінієвий тримач, створений за допомогою 3D-друку, також легкий, ергономічний і пропонує користувачеві фантастичну гнучкість. Зникли дратівливі вібрації через ручку пальника, оскільки, на відміну від аналогічних рішень, механічне переміщення дроту вперед і назад було повністю виключено з TIG DynamicWire.

ІДЕАЛЬНЕ РІШЕННЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ТА ВИСОКОЯКІСНІ РОБОЧІ ЧАСТИНИ ПАЛЬНИКА

Зіткнувшись із нестачею професійних зварювальників, система зварювання iWave TIG і її інтелектуальне керування механізмом подачі дроту TIG DynamicWire пропонують ідеальне рішення, яке дозволяє недосвідченим зварювальникам відносно швидко досягати високоякісних результатів зварювання. Активне регулювання швидкості подачі дроту компенсує будь-які відхилення, забезпечує безпеку зварювальників і забезпечує високоякісні зварні шви. Більше того, оскільки дріт не переміщується вперед і назад, деталі, що зношуються, як-от корпус пальника, кришка пальника та затискна втулка, служать довше, ніж аналогічні рішення.

Ми є Fronius.

У нас працює більш ніж 7000 працівників по всьому світі, частка експорту в нашому виробництві складає 89 %, а портфоліо наших винаходів і розробок нараховує 1366 активних патентів. Наша компанія була започаткована у 1945 р. як маленький приватний бізнес, а нині ми є потужним гравцем на світовому ринку, що підтверджує розвинена структура із 37 міжнародних дочірніх компаній та потужна мережа торгових партнерів у більш ніж 60 країнах світу. Та все ж по суті своїй залишаємося австрійським сімейним підприємством, яке працює в галузях виробництва та обслуговування фотовольтаїчних систем, зварювальних апаратів, а також технологій заряджання акумуляторних батарей. Наші товари та рішення завжди були спрямовані на формування гідного майбутнього, а замовники отримують комплексні пакети обслуговування: від професійного планування та надання консультацій до постійного моніторингу ефективності та ремонту обладнання відповідно до їхніх потреб. Ми створюємо інновації. Ми відкриті для всього нового. Ми є Fronius.

Стратегічною метою підрозділу Fronius Perfect Welding є максимальна якість зварювальної дуги, глибоке розуміння потреб наших клієнтів та жага до технічного прогресу. Ми є лідерами інновацій у галузі електродугового зварювання, а також світовими лідерами на ринку обладнання для роботизованого зварювання. Завдяки рівню нашого професіоналізму ми створили повноцінні автоматизовані зварювальні системи з високим рівнем гнучкості, а також цифрові зварювальні рішення, які відповідають вимогам та потребам епохи індустрії 5.0. Доповнюють вичерпний перелік нашої продукції інтуїтивно зрозумілі системи для ручного зварювання, високоякісне допоміжне приладдя для зварювання, а також надійні та ефективні вироби для захисту персоналу. Ми є глобальною компанією, і тому маємо чимало команд підтримки та обслуговування на регіональному рівні, які добре знають і розуміють потреби наших клієнтів у різних куточках світу. Наші технології відкривають нові горизонти та утворюють нові зв'язки: між металами, між різними галузями промисловості, а також між людьми.

ПрАТ «Дніпрометиз»

Ми створюємо нові рішення для максимального задоволення очікувань споживачів



ПрАТ «Дніпрометиз» знаходиться у місті Дніпро, відомому як центр промисловості, у тому числі й за межами України. Підприємство було засновано Акціонерним товариством металевих заводів німецького промисловця Бернарда Гантке у 1890 р.

Сьогодні завод – провідний виробник металовиробів в Україні, що спеціалізується на випуску низько- та високовуглецевого дроту. Вироби ПрАТ «Дніпрометиз» застосовуються у машинобудуванні, будівництві, сільському господарстві, при виконанні ремонтних робіт, у сфері обслуговування та інших сферах діяльності.

Продукція заводу має попит як в Україні, так і в країнах Європи. Географія експортного постачання охоплює понад 50 країн. Підприємство постійно працює над створенням нових рішень для кінцевих споживачів та замовників продукції.

В основі успіху заводу «Дніпрометиз» лежать:

ДОВІРА: завод цінує свою репутацію і вже більше 130 років зберігає довіру своїх клієнтів завдяки індивідуальному підходу та високому рівню клієнтоорієнтованості.

ІННОВАЦІЇ: підприємство інвестує кошти в інновації та пропонує екологічно чисту продукцію європейської якості.

КОМАНДА: віддані та професійні співробітники, об'єднані загальною корпоративною культурою та поділяючі ключові цінності компанії: увагу до клієнтів, ефективність та оперативність, повагу до людей, командну роботу, безпека в усіх проявах.

У грудні 2019 р. було здійснено запуск нового шведського обладнання Lämneå Bruk AB

для виготовлення зварювального дроту. Виробнича програма включає зварювальні дроти для автоматичного та механізованого зварювання та наплавлення вуглецевих та низьколегованих конструкційних сталей. Зроблений заводом зварювальний дріт використовують у широкому спектрі умов, у різних галузях економіки: суднобудуванні, вагонобудуванні, котлобудуванні, монтажних роботах, будівництві для зварювання металоконструкцій, автомобільній галузі, сільському машинобудуванні.

Сьогодні асортимент продукції заводу налічує широкий спектр діаметрів обміненного зварювального дроту, а також дроту зварювального без покриття полірованого.

Обмінений зварювальний дріт СВ-08Г2С та G4Si1 займає більшу частину в загальному обсязі виробництва зварювального дроту. Випускається обмінений зварювальний дріт суцільного перерізу діаметрами 0,8 мм; 1,0 мм; 1,2 мм; 1,4 мм, 1,6 мм, 2,0 мм на касетах по 15; 5; 2,5; 1кг з прецизійним намотуванням.

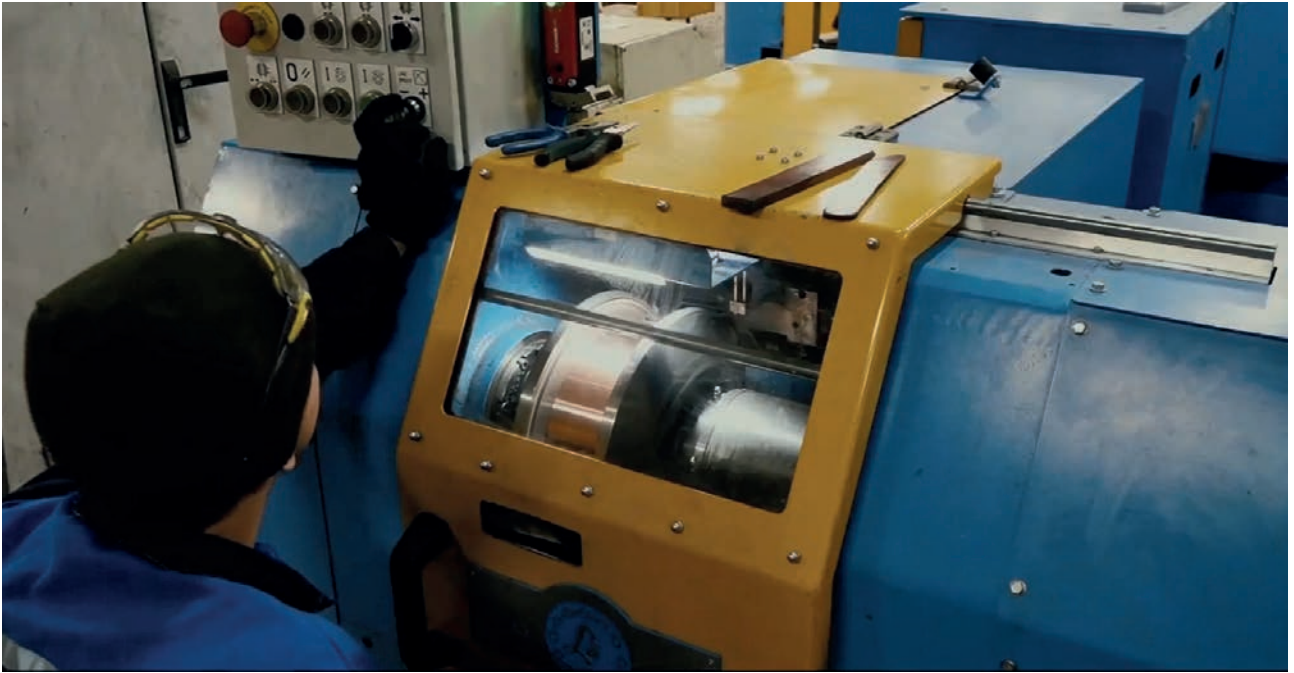
Для роботизованих комплексів ми пропонуємо зварювальний дріт у фірмовій упаковці – у діжках, масою 250 кг.

Зважаючи на те, що зварювальний дріт виробництва «Дніпрометиз» при використанні на великих промислових підприємствах продемонстрував хороші зварювальні та технологічні властивості, прийнято рішення доповнити продуктову лінійку підприємства найбільш затребуваними марками електродів:

- рутил-целюлозні електроди E6013 RC, АНО-36 – для ручного дугового зварювання рядових та відповідальних конструкцій з низьковуглецевих марок сталей;
- рутилові електроди: АНО-21, МР-3 – для особливо відповідальних конструкцій, таких як трубопроводи та котельне обладнання;
- електроди E7018, УОНІ 13/45, УОНІ 13/55 – для зварювальних робіт за низьких температур там, де потрібна пластичність.

Електроди заводу «Дніпрометиз» застосовуються для ручного дугового зварювання конструкцій із вуглецевих марок сталей, кутових, стикових та напускних швів конструкцій із металу завтовшки 1–5 мм у всіх просторових положеннях на постійному струмі будь-якої полярності та змінному струмі. Основна сфера використання – монтаж газопровідних та трубопроводних сис-





тем. Зокрема, це комунально-мережеві, судові та машинні трубопроводи. Зварювальні електроди «Дніпрометиз» відповідають усім необхідним вимогам до продукції такого виду і регулярно проходять сертифікацію відповідними українськими сертифікаційними центрами.

У виробництві зварювального дроту використовується найсучасніше обладнання від провідного шведського виробника Lämneå Bruk AB та високоякісна сировина. Контроль якості катанки, що використовується у виробництві, а також випробування готової продукції проводяться у власній акредитованій лабораторії, укомплектованій приладами та випробувальним обладнанням для хімічного аналізу, механічних тестів, а також зварювально-технологічних випробувань. Це дозволяє заводу випускати продукцію «екстра-класу», найвищу якість якої доведено при використанні на провідних промислових під-

приємствах. У 2020 р. зварювальний дріт 4Si1 був сертифікований на відповідність вимогам норм ЄС і розпочато регулярні поставки на ринки європейських країн. Зварювальний дріт виробництва «Дніпрометиз» СВ-08Г2С та G4Si1 поставляється відповідно до стандартів EN ISO, AWS, TУ.

Система менеджменту якості виробництва відповідає ISO 9001 та сертифікована органом сертифікації систем управління ТОВ «ГЛОБАЛ-СЕРТИФІК». ПрАТ «Дніпрометиз» надано право маркування продукції знаком СЕ.

Завод «Дніпрометиз» активно розвиває даний напрямок – сьогодні на завершальній стадії знаходиться процес організації нового майданчика з виробництва зварювального дроту. Після закінчення пусконаладжувальних робіт лінія нового майданчика зможе закрити всі потреби клієнтів і збільшити обсяг виробництва зварювального дроту в 2 рази.

Важливо відзначити, що вже зараз значна частина продукції заводу «Дніпрометиз» поставляється на експорт. У стратегії розвитку заводу це напрямок є одним із пріоритетних.

За останній час кількість країн, на ринки яких були здійснені поставки продукції, збільшилася у 1,5 рази. Цей факт дає можливість говорити про те, що висока надійність, європейська якість дають можливість зварювальному дроту виробництва «Дніпрометиз» успішно конкурувати з продукцією європейських виробників на ринках різних країн.

<https://dneprometiz.com>

