

З АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ 2023 6

Автоматическая сварка

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Automatic Welding

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

МЕТАЛОЗНАВСТВО

Головко В.В., Штофель О.О., Костін В.А. Фрактальна оцінка розгалуженості границь зерен у структурі металу зварних швів низьколегованих сталей 3

Барвінко А.Ю., Барвінко Ю.П., Яшнік А.М., Застосування конструкційних сталей у резервуаробудуванні після нормалізувального прокатування 8

Пулька Ч.В., Сенчишин В.С., Окіпний І.Б., Сенчишин Віт. С., Бішчак Р.Т. Структура та властивості наплавленого металу сплаву типу Сормайт-1 після природного старіння 18

ДУГОВЕ ЗВАРЮВАННЯ

Ахонін С.В., Білоус В.Ю., Пашинський В.В., Шваб С.Л. ТІГ зварювання у вузький зазор сталі 20 підвищеної товщини 21

ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ

Вігільняська Н.В., Сендеровський Ц., Янцевіч К.В., Духота О.І. Властивості покриттів, отриманих високошвидкісним газополуменевим напыленням композиційних порошоків на основі сплаву FeMoNiCrB, що аморфізується ... 27

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ

Махненко О.В., Міленін О.С., Мужиченко О.Ф., Кандаля С.М., Савицька О.М., Саприкіна Г.Ю. Математичне моделювання релаксації залишкових напружень при проведенні післязварювальної термообробки 35

ІНФОРМАЦІЯ

Стандартизація зварювального виробництва в Україні 44

Форум інженерів-механіків 59

Інноваційні технології HighUP у зварюванні металів 60

Пресове зварювання труб магнітокерованою дугою 62

CONTENT

METAL SCIENCE

Holovko V.V., Shtofel O.O., Kostin V.A. Fractal evaluation of grain boundaries branching in the structure of weld metal of low-alloy steels 3

Barvinko A.Yu., Barvinko Yu.P., Yashnyk A.M. Application of structural steels in above-ground cylindrical tanks construction after normalized rolling 8

Pulka Ch.V., Senchyshyn V.S., Okipnyi I.B., Senchyshyn Vit. S., Bishchak R.T. Structure and properties of deposited metal of an alloy of Soprmite-1 type after natural aging 18

ARC WELDING

Akhonin S.V., Bilous V.Yu., Selin R.V., Pashynskyi V.V., Shvab S.L. Narrow-gap TIG welding of thick Steel 20 21

PROTECTIVE COATINGS

Vigilanska N.V., Senderowski C., Yantsevych K.V., Dukhota O.I. Properties of coatings produced by hvof-spraying of composite powders based on amorphized FeMoNiCrB alloy 27

MODELING OF PROCESSES

Makhnenko O.V., Milenin O.S., Muzhychenko O.F., Kandala S.M., Savytska O.M., Saprykina G.Yu. Mathematical modeling of residual stress relaxation during performance of postweld heat treatment 35

INFORMATION

Standardization of welding production in Ukraine 44

Forum of mechanical engineers 59

HighUP innovative technologies in metal welding 60

Magnetically impelled arc butt welding 62



Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ представляє Україну в Міжнародному інституті зварювання та в Європейській зварювальній федерації

The E.O. Paton Electric Welding Institute of the NASU represents Ukraine in International Institute of Welding and in European Federation for Welding



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 15.06.2023.
Формат 60×84/8. Офсетний друк. Ум. друк. арк. 7,44
Друк ТОВ «ДІА».
03022, м. Київ-22, вул. Васильківська, 45.

ФРАКТАЛЬНА ОЦІНКА РОЗГАЛУЖЕНОСТІ ГРАНИЦЬ ЗЕРЕН У СТРУКТУРІ МЕТАЛУ ЗВАРНИХ ШВІВ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ

В.В. Головка, О.О. Штофель, В.А. Костін

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

Неметалеві включення, які є невід'ємною складовою зварних швів, можуть сприяти зменшенню розмірів структурних зерен, як центри кристалізації металу зварювальної ванни. Це сприяє підвищенню показників міцності металу швів, з одного боку. З іншого боку, кристалічна решітка зерен по границях знаходиться під впливом силових полів решіток обох дотичних кристалітів, насичена неметалевими включеннями, домішковими атомами, дислокаціями, вакансіями, має підвищену енергію границь зерен. Ці обставини сприяють тому, що саме границі зерен є місцями найбільш високої вірогідності зародження та розвитку тріщин. Для числового опису дуалізму впливу неметалевих включень на структуру металу швів запропоновано використання методів фрактального аналізу та металографічного аналізу на базі штучного інтелекту. Бібліогр. 7, табл. 4, рис. 3.

Ключові слова: низьколегована сталь, зварювання, метал шва, мікроструктура, фрактальний аналіз, металографічний аналіз, програма MIPAR

Вступ. Структура сталей, що використовуються для виготовлення зварних металоконструкцій, характеризується полікристалічною будовою. У полікристалічних матеріалах зерна або субзерна різної орієнтації та/або складу відокремлені одна від одної інтерфейсами (границями). В залежності від кута нахилу один до одного у структурі металу визначають малокутові (до 15°) або великокутові (більше 60°) границі. У деяких випадках при співпадінні не всіх, а лише окремих граничних атомів формуються так звані «спеціальні» границі. Ці «внутрішні» інтерфейси грають важливу і найчастіше домінуючу роль у визначенні механічних властивостей матеріалів [1]. Відомо, що основними механічними властивостями металу зварних швів низьколегованих сталей є міцність на розтяг, пластичність та в'язкість руйнування, де подрібнення зерен є особливо важливим механізмом, що забезпечує необхідний рівень властивостей. Розгалуженість границь зерен забезпечує певні переваги з погляду показників міцності і в'язкості руйнування, як при кімнатній так і при від'ємних температурах [2].

Кристалічна структура низьколегованої сталі складається з безлічі окремих кристалітів, пов'язаних одне з одним границями зерен. На цих границях атомна структура двох кристалічних решіток, що з'єднуються, сильно пошкоджена, тому границі зерен зазвичай мають високу енергію, що значно впливає на механічні властивості матеріалу. Вплив границь зерен лежить, наприклад, в основі співвідношення Холла-Петча, яке встановлює залежність міцності металів від розміру зерен (що більше роз-

галуженість меж зерен, тим міцніше метал), але вони також визначають показники їх пластичності та тріщиностійкості.

$$\sigma_T = \sigma_0 + Kd^{-1/2}, \quad (1)$$

де σ_0 – певна напруга тертя, яка необхідна для ковзання дислокацій в монокристалі; K – індивідуальна для кожного матеріалу константа, також звана «коефіцієнтом Холла-Петча»; d – розмір зерен у структурі металу.

Весь технологічний процес зварювання сталей базується на розумінні механізмів керування структурою металу, що зварюється та параметрами структури (розміром зерен, фаз, включень) у структурі металу зварних з'єднань. Чим більший контроль над цим процесом, тим вище може бути отримано рівень їх механічних властивостей.

У кристалічних матеріалах розрізняють дві різні категорії внутрішніх інтерфейсів: гомофазні границі та гетерофазні границі. Перші зазвичай називають границями зерен, а останні часто позначають як гетерофазні границі. Границі зерен включають границі двійників та границі доменів. Гетерофазні границі, навпаки, поділяють кристаліти двох термодинамічно різних фаз. Для гетерофазних границь, на відміну від границь зерен, необхідно враховувати їхню схильність до хімічних реакцій та дифузійних процесів. Поведінка сталей при руйнуванні, наприклад, помітно змінюється, внаслідок сегрегації до границь зерен певних домішок (особливо сірки, фосфору), які змінюють адгезію між сусідніми кристалітами. Якщо підвищення розгалуженості границь зерен супроводжується поліпшенням показників міцності металу, то наяв-

ність ліквуючих елементів і неметалевих включень на границях, як правило, викликає зниження його стійкості проти крихкого руйнування [2].

Разом з тим, визначити ступінь ліквідації елементів по границях зерен та енергію зв'язку легованих границь достатньо складне завдання. Відомо, що границі зерен є тонким шаром товщиною близько одного нанометра з низьким рівнем упорядкованим розташуванням атомів [3, 4], який поділяє дві області кристалічної решітки з різною орієнтацією. При травленні зразків низьколегованих сталей межі зерен виявляються набагато ширші, що свідчить як про високий рівень щільності дислокацій у цих ділянках, так і про присутність елементів, що сегрегують, і неметалевих включень у цих областях структури [5]. Тобто здається можливо встановити зв'язок між шириною границь зерен та ступенем їх легуванням та енергією границь.

Добре відомо, що розгалуженість границь зерен, з одного боку, а також їх засміченість, з іншого, суттєво впливають на механічні властивості металу швів низьколегованих сталей [6]. Тобто властивості границь зерен безпосередньо визначають властивості як самих сталей, так їх зварних з'єднань, а подальші дослідження їхньої структури припускають перспективні можливості для розробки нових матеріалів. Сучасні методи металографічних досліджень дозволяють вирізнити особливості дуалізму такого впливу.

Ціль роботи полягала у дослідженні можливостей числового опису границь зерен, який дозволяє візуалізувати дуалістичний характер їх структури.

Методика та матеріали досліджень. Дослідження проводили на зразках металу швів, які були виконані за методикою [3] при дуговому зварюванні в середовищі захисного газу (82 % Ar, 18 % CO₂) порошковим дротом діаметром 1,6 мм типу «metalcog» на постійному струмі 200 ± 5 А, напрузі на дузі 30 ± 2 В з погонною енергією 21 ± 2 кДж/см. Для визначення характеру розподілу неметалевих включень в металі швів до «холодної» частини зварювальної ванни вводили порошок дріт діаметром 1,6 мм, осердя якого містило суміш з 10 % частинок тугоплавких сполук розміром 0,040...0,200 мм та 90 % залізного порошку марки ПЖВ за ДСТУ 9849. В якості інокулянтів були обрані з'єднання на основі титану: оксид титану (шов

TiO₂), карбід титану (шов TiC), нітрид титану (шов TiN), а також оксид алюмінію (шов Al₂O₃) та карбід кремнію (шов SiC). Отримані результати порівнювали з даними зразків металу шва, отриманих при зварюванні порошковим дротом, до складу осердя якого вводили феротитан (шов Base).

Відповідно до своїх фізико-хімічних показників неметалеві включення можуть впливати на формування зеренної структури в процесі охолодження металу як центри кристалізації (TiN), мікроохолодильники (TiO₂), фази що змінюють енергію на фронті кристалізації (Al₂O₃), або гальмують дифузію вуглецю при розпаді аустеніту (SiC, TiC). Відповідно до цього неметалеві включення справляють різний вплив на розгалуженість границь зерен в структурі металу зварних швів. Метою проведених досліджень було встановлення можливості оцінювання розгалуженості границь зерен металевій матриці за допомогою методів фрактальної параметризації.

Металографічні дослідження проводили на поперечних шліфах, вирізаних із зварних з'єднань. Структуру металу швів досліджували на оптичному мікроскопі «Neophot 32». Виявлення мікроструктури у зразках проводили методом хімічного травлення у 4%-му спиртовому розчині азотної кислоти. Зразки для досліджень виготовляли за стандартними методиками із застосуванням алмазних паст різної дисперсності. Розмір структурних складових визначали відповідно до ГОСТ 5639.

Для визначення параметрів структури застосували програму аналізу зображень MIPAR (США) v.4.2.1. У програмі MIPAR використовується технологія глибокого навчання штучного інтелекту, яка дозволяє навчити програмне забезпечення адаптуватися до отриманих мікрофотографій, які характеризуються різним контрастом, яркістю та особливостями текстури, а також технікою підготовки зразків для досліджень.

В останніх версіях програми MIPAR (вище v.4.2) використовується велика бібліотека процедур (ресіре) для визначення розмірів зерен, об'ємної частки та розподілу за розмірами фаз та включень, визначення орієнтації та неоднорідності структури, особливості текстури тощо. У роботі було використано стандартні процедури (ресіре) програми MIPAR визначення розміру та розгалуженості гра-

Таблиця 1. Хімічний склад металу швів

| Шов | Хімічний елемент, мас. % | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------|-------|------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|
| | C | Si | Mn | S | P | Cr | Ni | Mo | Cu | Al | Ti |
| Base | 0,050 | 0,290 | 1,32 | 0,024 | 0,014 | 0,16 | 2,19 | 0,27 | 0,36 | 0,039 | 0,019 |
| TiC | 0,054 | 0,263 | 1,28 | 0,025 | 0,011 | 0,13 | 2,22 | 0,26 | 0,49 | 0,035 | 0,009 |
| TiN | 0,035 | 0,317 | 1,40 | 0,019 | 0,009 | 0,14 | 2,29 | 0,26 | 0,56 | 0,036 | 0,011 |
| SiC | 0,066 | 0,370 | 0,92 | 0,016 | 0,024 | 0,14 | 1,72 | 0,23 | 0,54 | 0,021 | 0,005 |
| TiO ₂ | 0,035 | 0,405 | 1,24 | 0,016 | 0,021 | 0,11 | 1,97 | 0,27 | 0,72 | 0,032 | 0,015 |
| Al ₂ O ₃ | 0,034 | 0,424 | 1,40 | 0,017 | 0,023 | 0,12 | 2,15 | 0,29 | 0,60 | 0,023 | 0,030 |

Таблиця 2. Склад вторинної структури металу швів

| Шов | Усереднена частка складових в мікроструктурі швів, об. % | | | | Розмір структурних зерен, мкм |
|--------------------------------|--|----------------|-----------|-------|-------------------------------|
| | Бейніт нижній | Бейніт верхній | Мартенсит | Ферит | |
| Base | 50 | 30 | 10 | 10 | 15 ± 1 |
| TiN | 30 | 57 | 10 | 3 | 15 ± 0,7 |
| SiC | 30 | 50 | 10 | 10 | 19 ± 1 |
| TiO ₂ | 25 | 45 | 10 | 10 | 20 ± 1 |
| Al ₂ O ₃ | 15 | 50 | 15 | 15 | 16 ± 1 |
| TiC | 25 | 60 | 10 | 5 | 18 ± 1 |

ниць зерен у низьколегованих сталях.

Результати досліджень. В табл. 1 наведено результати визначення хімічного складу металу досліджених швів, а в табл. 3 вміст структурних складових в зразках зварних швів.

Дані оптичної мікроскопії показали, що вторинна мікроструктура металу швів складається з бейнітно-мартенситної суміші з незначною часткою феритної складової (рис. 1). Склад вторинної структури та розмір структурних зерен наведено в табл. 2. Бейніт представлений морфологічними формами верхнього, нижнього та внутрішньозеренного бейніту, ферит – розірваними полігональними виділеннями та феритом Відманштєдта за межами зерен. Мартенсит сформований як традиційна голчаста структура.

Для проведення фрактального аналізу були відібрані по п'ять оптичних зображень вторинної структури при збільшенні ×1000 для кожного металу шва (рис. 1). Після обробки за програмою ImageJ отримали бінарні зображення відповідних структур (рис. 2), для яких визначали фрактальний параметр. Таблиця 3. Фрактальний параметр D_{13} розгалуження границь зерен отримані в результаті аналізу оптичних зображень структури металу швів

| Шов | Base | SiC | TiN | TiC | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ |
|-----------------------------------|--------|--------|--------|--------|------------------|--------------------------------|
| Фрактальний параметр (D_{13}) | 1,9069 | 1,8916 | 1,9387 | 1,8765 | 1,8149 | 1,8252 |

Результати фрактальної параметризації наведено в табл. 3.

Для обчислення фрактальної розмірності було використано клітинний метод. [7]. Згідно цього методу підготовлене зображення фракталу (рис. 1) покривають сітками з квадратними клітками («box counting method») із зменшенням кроку сітки d до $1\text{px} = 0,0377\text{ мкм}$ і підраховують кількість кліток $N(d)$, у які потрапила інформаційна границя (границя зерна) досліджуваного фрактального об'єкту – структури. Фрактальну розмірність зображення D визначають внаслідок апроксимації отриманого набору точок за допомогою методу найменших квадратів за виразом (2).

$$D = \lim_{d \rightarrow 0} \frac{\ln N(d)}{\ln \frac{1}{d}} \quad (2)$$

Результати аналізу оптичних зображень структури металу досліджених швів за програмою MIPAR (рис. 2), яка дозволила визначити загальну сумарну довжину границь зерен наведено в (табл. 4).

Обговорення результатів досліджень. Фрактальній параметризації структури передують бінаризація її чорно-білих зображень, що базується на визначенні певного рівня чорного кольору як носія інформації. Тому наведені на рис. 1 зображення треба розглядати як інформаційні границі зерен.

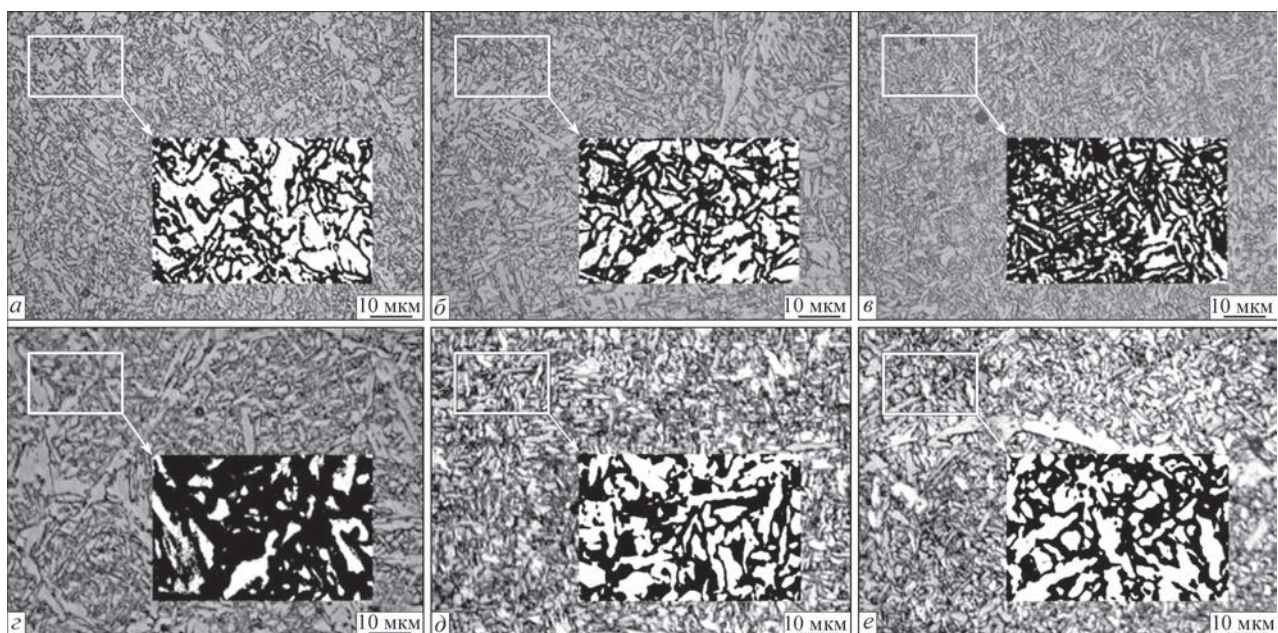


Рис. 1. Мікроструктура металу та бінаризована мікроструктура швів: а – Base; б – SiC; в – TiN; г – TiC; д – TiO₂; е – Al₂O₃

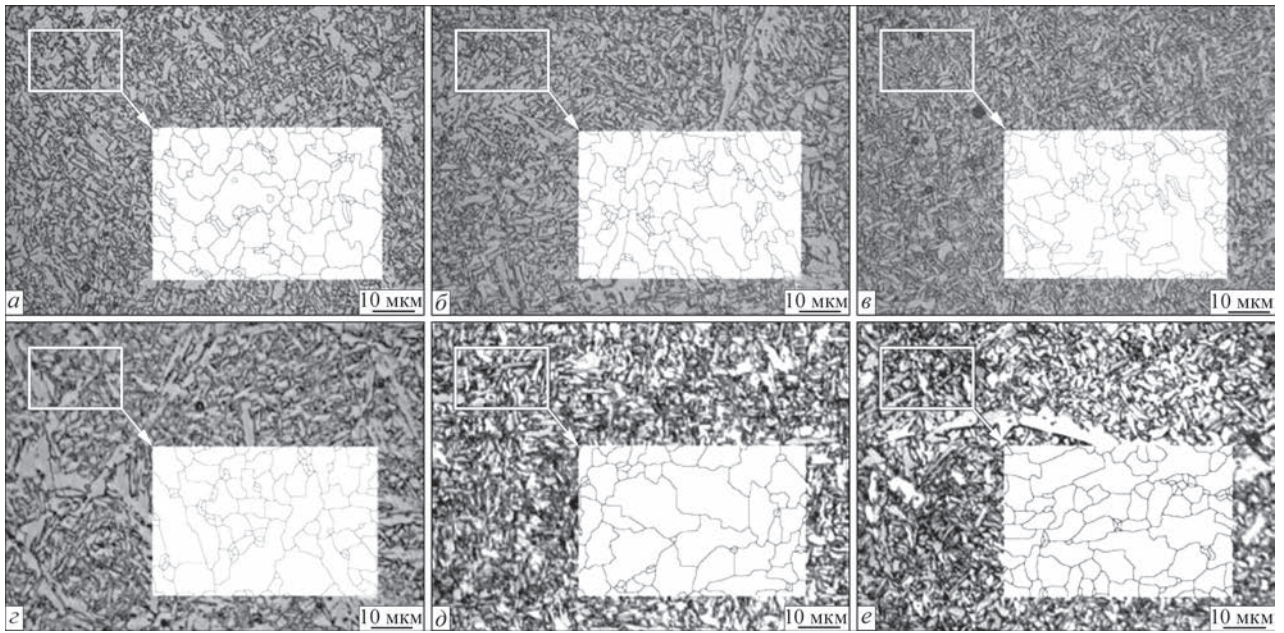


Рис. 2. Мікроструктура та границі зерен металу швів, модифікованих сполуками: а – Base; б – SiC; в – TiN; г – TiC; д – TiO₂; е – Al₂O₃

Таблиця 4. Сумарна довжина границь зерен ($L_{г3}$) в ділянках металу швів

| Шов | Base | SiC | TiN | TiC | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ |
|----------------|----------|----------|----------|----------|------------------|--------------------------------|
| $L_{г3}$, мкм | 16112,14 | 14226,94 | 17078,15 | 13893,75 | 13174,61 | 12949,53 |

Чорним кольором на зображеннях показано області підвищеної інтенсивності корозії металу в процесі травлення. В зв'язку з тим, що ямки травлення співпадають з місцями підвищеної концентрації дислокацій та ліквуючих елементів, виділені границі можливо розглядати як області, що мають підвищену схильність до крихкого руйнування металу.

Програма MIPAR виявляє «чисті» ідеалізовані границі зерен. Розрахована за цією програмою сумарна довжина границь зерен може бути використана для встановлення середнього розміру зерен (d) в формулі (1) для визначення показників міцності металу.

Аналіз отриманих результатів показав (рис. 3), що між фрактальним параметром $D_{г3}$ розгалуження границь зерен та сумарною довжиною границь зерен $L_{г3}$ існує досить проста залежність (коефіцієнт

кореляції $R^2 = 0,93$) яку можна описати квадратичним виразом. Тобто при відносно низькому рівні фрактального параметру $D_{г3} \leq 1,86$ його зміна майже не впливає на сумарний периметр границь зерен, тоді як при наближенні цього параметру до $D_{г3} = 2,0$ сумарний периметр границь різко підвищується.

Результати аналізу, які наведено на рис. 3, дозволяють візуалізувати дуалізм впливу неметалевих включень на показники границь зерен в структурі металу швів. Так, наприклад, при інокулюванні до зварювальної ванни частин TiO₂ та Al₂O₃ помітно знижується у порівнянні з варіантом Base як сумарний периметр границь, так і розмір області з підвищеною схильністю до крихкого руйнування. Введення до зварювальної ванни частинок TiN приводить до зростання цих двох показників відносно до варіанту Base. Присутність в зварювальній ванні частинок SiC та TiC дають можливість підвищити показник $L_{г3}$ без суттєвого зростання показника $D_{г3}$.

Таким чином, наведений приклад системного аналізу свідчить про можливість розширення бази знань щодо особливостей впливу неметалевих включень на границі зерен в структурі металу швів і проведенні більш обґрунтованого вибору зварювальних матеріалів при виготовленні металоконструкцій з низьколегованих високоміцних сталей.

Висновки

Проведено дослідження з візуалізації дуалізму впливу неметалевих включень на показники границь зерен в структурі металу зварних швів низьколегованих сталей. Для аналізу впливу неметалевих включень TiO₂, TiC, TiN, SiC, Al₂O₃ TiO₂ були залучені методика фрактального аналізу та програма MIPAR. У результаті проведених досліджень було встановлено:

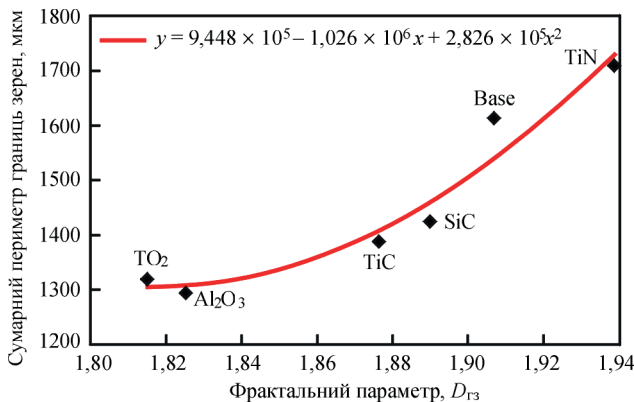


Рис. 3. Вплив фрактального параметру на сумарний периметр границь зерен

1. Залучення програми MIPAR для аналізу оптичних зображень структури дозволяє виконати числовий опис границь структурних зерен через встановлення показника сумарного периметру границь $L_{г3}$.
2. Методами фрактального аналізу можливо виконати числовий опис границь зерен через фрактальний параметр $D_{г3}$.
3. Параметр $L_{г3}$ описує ідеалізований («чистий») розмір границь зерен.
4. Параметр $D_{г3}$ описує інформаційні границі зерен.
5. Системний аналіз показників $L_{г3}$ і $D_{г3}$ дозволяє розширити уявлення про дуалізм впливу неметалевих включень на структуру границь зерен.

Список літератури

1. Priester, L. (2012) *Grain Boundaries: From Theory to Engineering* Springer Science & Business Media, Dordrecht.
2. Reiser, J., Hartmaier, A. (2020) Elucidating the dual role of grain boundaries as dislocation sources and obstacles and its impact on toughness and brittle-to-ductile transition. *Scientific Reports*, **10**, 2739.
3. Sinha, S., Kim, D-I., Fleury, E. et al. (2015) Effect of grain boundary engineering on the microstructure and mechanical properties of copper containing austenitic steel. *Mater. Sci. Eng.*, 626, 175–185.
4. Zhang, I., Lu, C., Tieu, K. (2016) A review on atomistic simulation of grain boundary behaviors in face-centered cubic metals. *Computer Mater. Sci.*, 118, 180–191.
5. Погребна Н.Е., Кудова В.З., Котова Т.В. (2021) *Механічна стабільність матеріалів: навчальний посібник*. Дніпро, НметАУ.

6. Васильєв О.Д., Бродніковська І.В., Бродніковський Є.М. та ін. (2018) Межі поділу та їх вплив на властивості полікристалів. Частина 1 (огляд). *Металознавство та обробка металів*, **1**, 44–51.
7. Усов В.В., Рабікіна М.Д., Шкатуляк Н.М. та ін. (2014) Фрактальна розмірність меж зерен і механічні властивості металу кисневих балонів. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **4**, 117–124.

References

1. Priester, L. (2012) *Grain Boundaries: From Theory to Engineering*. Springer Science & Business Media, Dordrecht.
2. Reiser, J., Hartmaier, A. (2020) Elucidating the dual role of grain boundaries as dislocation sources and obstacles and its impact on toughness and brittle-to-ductile transition. *Scientific Reports*, **10**, 2739.
3. Sinha, S., Kim, D-I., Fleury, E. et al. (2015) Effect of grain boundary engineering on the microstructure and mechanical properties of copper containing austenitic steel. *Mater. Sci. Eng.*, 626, 175–185.
4. Zhang, I., Lu, C., Tieu, K. (2016) A review on atomistic simulation of grain boundary behaviors in face-centered cubic metals. *Computer Mater. Sci.*, 118, 180–191.
5. Pogrebna, N.E., Kutsova, V.Z., Kotova, T.V. (2021) *Mechanical stability of materials: Tutorial*. Dnipro, NmetAU [in Ukrainian].
6. Vasyliiev, O.D., Brodnikovska, I.V., Brodnikovskiyi, Ie.M. et al. (2018) Interfaces and their influence on properties of polycrystals. Pt 1 (Review). *Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv*, **1**, 44–51 [in Ukrainian].
7. Usov, V.V., Rakkina, M.D., Shkatulyak, N.M. et al. (2014) Fractal dimension of grain boundaries and mechanical properties of oxygen containers. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, **4**, 117–124 [in Ukrainian].

FRactal Evaluation of Grain Boundaries Branching in the Structure of Weld Metal of Low-Alloy Steels

V.V. Holovko, O.O. Shtofel, V.A. Kostin

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: v_golovko@ukr.net

Non-metallic inclusions, which are an integral part of welds, can facilitate the reduction in the sizes of structural grains, playing the role of crystallization centers of the weld pool metal. This helps to increase the strength values of the weld metal on the one hand. On the other hand, the crystalline lattice of grains on the grain boundaries is influenced by the force fields of both tangent crystallites, saturated with non-metallic inclusions, impurity atoms, dislocations, vacancies, has an increased energy of grain boundaries. These circumstances contribute to the fact that namely grain boundaries are the places of the highest probability of cracks origination and propagation. For the numerical description of the dualism of the influence of non-metallic inclusions on the weld metal structure, it is proposed to use methods of fractal analysis and metallographic analysis based on artificial intelligence. 7 Ref., 4 Tabl., 3 Fig.

Keywords: low-alloy steel, welding, weld metal, microstructure, fractal analysis, metallographic analysis, MIPAR software

Надійшла до редакції 31.05.2023



7-а Міжнародна конференція «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи діагностування і прогнозування»

18–20 жовтня 2023 року на базі Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя відбудеться 7-а Міжнародна конференція «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи діагностування і прогнозування» (VII International Conference «In-service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction»).

Організатори заходу — Європейське товариство з цілісності конструкцій (ESIS), Українське товариство з механіки руйнування матеріалів, Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України та Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України.

Наукові напрями конференції: методи оцінювання, прогнозування та виявлення пошкодження матеріалів, неруйнівний контроль, методи оцінювання деградації та запобігання руйнуванню, проблеми впливу середовища на руйнування і міцність матеріалів, довговічність, цілісність та подовження терміну служби конструкцій. Робоча мова: англійська. Форма участі у конференції: очна, онлайн. Кінцевий термін реєстрації учасників — 1 вересня 2023 року. Тези доповідей приймаються до 1 вересня 2023 року. Виголошені доповіді після рецензування буде опубліковано у спецвипуску «Procedia Structural Integrity», що індексується базами «Scopus» і «WoS».

ЗАСТОСУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ У РЕЗЕРВУАРОБУДУВАННІ ПІСЛЯ НОРМАЛІЗУВАЛЬНОГО ПРОКАТУВАННЯ

А.Ю. Барвінко, Ю.П. Барвінко, А.М. Яшник

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

У роботі досліджено структуру та в'язкість в площині X–У листового прокату сталей класу міцності S355 і 420. Показано, що застосування нормалізувального прокатування не забезпечує листовому прокату сталі S355+N стан, рівноцінний стану після нормалізації. В результаті проведення нормалізувального прокатування, завдяки додатковому обтисненню листа в температурній області біля температури A_{c3} , у сталі формується смугаста структура, яка має високу анізотропію механічних властивостей. Формування вираженої волокнистої структури призводить до крихкого стану металу в площині X–У при розрахунковій температурі. Для запобігання крихкому шаруватому руйнуванню необхідно застосовувати конструкційні сталі класу міцності S355 і S420, виготовлені згідно зі стандартом ДСТУ EN 10025-3:2007, в стані після нормалізації та обмежувати вміст сірки $S \leq 0,010$ %. У разі використання зазначених сталей в стані після нормалізувального прокатування рекомендується застосовувати метал товщиною не більше 15 мм, що забезпечить безпечну роботу металу у зварних вузлах у напрямку товщини. Додатковим критерієм стійкості листового прокату сталей S355 і S420 до крихкого шаруватого руйнування, крім групи якості прокату Z, запропоновано використовувати такий показник, як робота удару, що визначається на зразках з V-подібним надрізом в площині прокатування X–У (по вісі листа). Бібліогр. 24, табл. 10, рис. 3.

Ключові слова: конструкційні сталі класу міцності 355 і 420, нормалізувальне прокатування, крихке шарувате руйнування, вертикальні циліндричні сталеві резервуари

Вступ. У зв'язку із переходом будівельної галузі на застосування конструкційних сталей, які виготовляються згідно зі стандартами ДСТУ EN 10025, актуальним є питання відповідності механічних властивостей цих сталей та їхніх зварних з'єднань вимогам чинної нормативної бази України. Традиційно в Україні для зварних металоконструкцій використовувалися вуглецева сталь Ст3сп5-зв [1] (клас міцності S255) і низьколегована сталь 09Г2С-12 [2] (клас міцності S325 за товщини $10 \leq t \leq 20$ мм), які постачалися в гарячекатаному стані або після нормалізування. Вказані сталі мають високу пластичність, достатній рівень холодостійкості та хорошу зварюваність, що обумовило широке їх застосування у відповідальних конструкціях [3], зокрема для вертикальних циліндричних резервуарів [4]. Конструкційні сталі згідно з ДСТУ EN 10025-2-S355J2+N [5], ДСТУ EN 10025-3-S355N(NL) [6] та ДСТУ EN 10025-3-S420N(NL) [6] відносяться до більш високого класу міцності й доволі часто постачаються після нормалізувального прокатування. Особливістю вказаних сталей є їх випуск металургійними комбінатами з низьким вмістом сірки: $S \leq 0,010$ % та фосфору: $P \leq 0,015$ %, що має забезпечувати їхню високу холодостійкість [3].

У стандартах [5, 6] зазначається, що стан сталі після нормалізувального прокатування є рівноцінним (еквівалентним) стану після нормалізації.

Водночас в роботах [7–9] відмічено, що на відміну від нормалізації, в процесі нормалізувального прокатування на завершальній стадії проводиться додаткова деформація металу в аустенітній області за близьких до точки A_{c3} значеннях температури, що дозволяє при достатніх обтисненнях отримати дрібнозернисту структуру завдяки багаторазовій повній рекристалізації [9]. У цьому разі додаткова деформація має призводити до більшої структурної неоднорідності в порівнянні із нормалізованим станом і, відповідно, до більшої анізотропії механічних властивостей металу [10]. З цієї точки зору представляється доцільним проведення додаткових досліджень властивостей листового прокату сталей, що виготовляються згідно з ДСТУ EN [5, 6] у стані нормалізувального прокатування, які широко застосовуються в будівництві з метою врахування їхніх особливостей. У випадку вертикальних циліндричних резервуарів необхідно брати до уваги роботу металу в напрямку товщини (Z-напрямок), що має місце при вварюванні патрубків (зварне з'єднання внапуск, що підсилює лист-стінку; T-подібне з'єднання приварюванням стінки до патрубка) та у вузлі сполучення «стінка-контурні листи днища». З метою запобігання виникненню шаруватого руйнування металу додатково проводиться післязварювальна термічна обробка (PWHT) для зняття зварювальних залишкових напружень в місцях вварювання

Таблиця 1. Нормативні вимоги до проведення післязварювальної термічної обробки (PWHT) місць врізок патрубків та люків в стінку вертикальних циліндричних резервуарів

| Стандарт проектування | Марка сталі | Товщина поясу, мм | Діаметр патрубка, мм |
|----------------------------|--|-------------------|----------------------|
| API 650-13 [11] | S235 | $t > 25$ | ≥ 300 |
| | S275J0; S355J0; S355(J2 або K2); A841M, grade A, class 1, 2 (ReH ≥ 461 МПа) | $t > 13$ | ≥ 50 |
| EN 14015 [12] | S275; S355 | $t > 25$ | ≥ 300 |
| | S420 | $t > 20$ | всі діаметри |
| ДСТУ Б В.2.6-183:2011 [13] | ReH ≥ 345 МПа | $t > 25$ | ≥ 300 |

Примітки. 1. В таблиці наведено вимоги не для повного переліку марок сталей. 2. ReH – мінімальна гарантована границя текучості.

патрубків та люків у стінку з метою нівелювання їх впливу при роботі металу в напрямку товщини [11-13]. Умови, за яких необхідно проводити обробку PWHT місць зварювання патрубків в стінку суттєво відрізняються залежно від стандарту проектування (табл. 1).

Аналіз наведених у табл. 1 даних показує відсутність єдиного підходу до розв'язання питання вибору умов, за яких необхідно виконувати PWHT. Основними факторами, що впливають на необхідність її проведення є клас міцності сталі та діаметр отвору. Найжорсткіші вимоги висуваються у стандарті API 650-13 [11]: для сталі класу міцності S275J0 і більше за товщини листа $t \geq 13$ мм вже необхідно виконання PWHT. У стандарті EN 14015 [12]: для сталей S275 і S355 при товщині $t \geq 25$ мм, а для сталі класу міцності S420 при товщині $t \geq 20$ мм. Найменш жорсткі вимоги містить вітчизняний стандарт ДСТУ Б В.2.6-183:2011 [13], що вимагає проведення додаткових досліджень для умов проведення PWHT.

Одним з критеріїв якості листового прокату та його опору шаруватому руйнуванню, який отримав широке розповсюдження на практиці, є гарантована його відповідність класу якості Z15, Z25, Z35 за результатами випробувань на розтягун-

ня зразків в напрямку товщини листа [14, 15]. Однак, слід зазначити, що на величину відносного звуження ψ_z впливає в основному наявність у сталі скупчень неметалевих включень значної протяжності [3, 16, 17]. В нашому ж випадку можна очікувати підвищену структурну смугастість металу та низький вміст глобулярних неметалевих включень. З огляду на те, що розвиток тріщин визначається в'язкістю металевої матриці [16], застосування вказаного критерію може виявитися недостатнім. Крім того, визначення відносного звуження ψ_z відбувається за додатної температури, яка не відповідає розрахунковій температурі експлуатації, що також не може повною мірою гарантувати відсутність крихкого шаруватого руйнування зварної металоконструкції під час її подальшої експлуатації.

У зв'язку з вищенаведеним оцінка стійкості крихкому шаруватому руйнуванню листового прокату сталей S355 і S420 в площині прокатування X–Y проводилася на основі оцінювання величини ударної в'язкості за результатами випробувань стандартних зразків Шарпі з V-подібним надрізом.

Характеристика вихідних матеріалів та методи-ка досліджень. Для дослідження стійкості листо-

Таблиця 2. Хімічний склад листового прокату сталей S355J2+N, P355NL2, S420NL

| Джерело даних | Масова частка, % | | | | | | | | | | | |
|---|------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|----------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|
| | C | Mn | Si | P | S | Cr | Ni | Cu | Al | V | Nb | Ti |
| S355J2+N, $t = 25$ мм, нормалізувальне прокатування | | | | | | | | | | | | |
| Контрольний аналіз ІЕЗ | 0,14 | 1,34 | 0,18 | 0,022 | 0,016 | 0,036 | 0,03 | 0,05 | 0,028 | < 0,005 | 0,023 | 0,015 |
| S355J2+N, $t = 20$ мм, нормалізувальне прокатування | | | | | | | | | | | | |
| Контрольний аналіз ІЕЗ | 0,15 | 1,37 | 0,20 | 0,017 | 0,009 | не визначалося | | 0,028 | – | 0,023 | 0,017 | |
| ДСТУ EN10025-2:2007, табл. 4 | $\leq 0,23$ | $\leq 1,70$ | $\leq 0,60$ | $\leq 0,35$ | $\leq 0,35$ | – | | – | $\leq 0,55$ | – | $\leq 0,13$ | |
| P355NL2, $t = 20$ мм, нормалізація | | | | | | | | | | | | |
| Контрольний аналіз ІЕЗ | 0,17 | 1,33 | 0,33 | 0,009 | 0,002 | 0,036 | 0,045 | 0,010 | 0,033 | 0,006 | 0,033 | 0,003 |
| ДСТУ EN10028-3:2018, табл. 1 | $\leq 0,18$ | 1,10...1,70 | $\leq 0,50$ | $\leq 0,020$ | $\leq 0,005$ | $\leq 0,30$ | $\leq 0,50$ | $\leq 0,70$ | 0,025 | $\leq 0,10$ | $\leq 0,05$ | $\leq 0,03$ |
| S420NL, $t = 25$ мм, нормалізація | | | | | | | | | | | | |
| Контрольний аналіз ІЕЗ | 0,13 | 1,50 | 0,26 | 0,015 | $\leq 0,002$ | 0,07 | 0,07 | 0,05 | 0,041 | 0,054 | 0,035 | < 0,005 |
| ДСТУ EN 10025-3:2007, табл. 3 | $\leq 0,22$ | 0,95...1,80 | $\leq 0,65$ | $\leq 0,030$ | $\leq 0,025$ | $\leq 0,35^*$ | $\leq 0,85$ | $\leq 0,60$ | – | V+Nb+Ni $\leq 0,26$ % | | |

*Mo+Cr $\leq 0,38$ %.

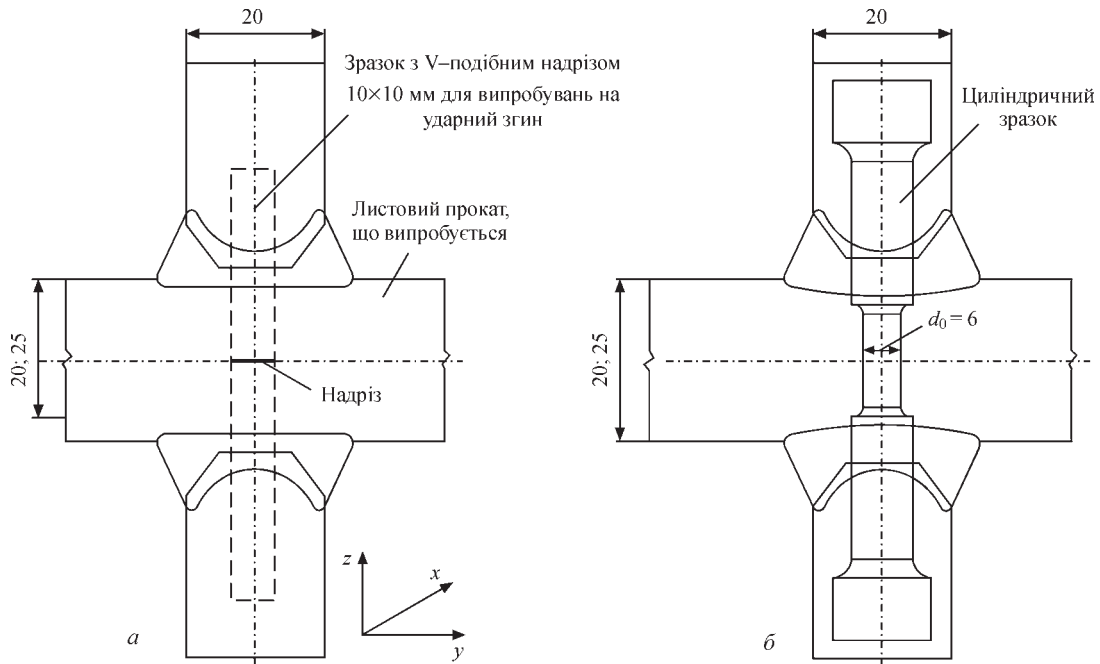


Рис. 1. Схема вирізання зразків з хрестоподібних зварних з'єднань: а – на ударний згин з виконанням надрізів в площині X-Y; б – на розтяг для визначення класу якості сталі

вого прокату сталей S355 і S420 проти крихкого шаруватого руйнування виготовлювалися хрестоподібні заготовки [18] (рис. 1), з яких вирізали зразки для визначення ударної в'язкості KCV_{x-y} з надрізом в площині X-Y та зразки для визначення величини поперечного звуження при розтягуванні в напрямку товщини металу [15].

Досліджувалися зразки листового прокату сталей S355J2+N [5], P355NL2 [19] і S420NL [6] товщиною $t = 20$ мм та $t = 25$ мм. Хімічний склад та вид термічної обробки сталей наведено в табл. 2. Вказані сталі є мікролегованими ніобієм Nb та алюмінієм Al, а сталь S420NL додатково легована ванадієм V. Фактичний вміст сірки для сталей

Таблиця 3. Механічні властивості основного металу випробуваних зразків зі сталей S355J2+N, P355NL2, S420NL

| Джерело даних | σ_r , МПа | $\sigma_{ш'}$, МПа | σ_t/σ_b | δ_5 , % | Ψ , % | Ударна в'язкість KCV_{x-y} , Дж/см ² , за температури: | | | | | |
|----------------------|------------------|---------------------|---------------------|----------------|------------|---|---------------|--------------------|----------------|--------------------|------|
| | | | | | | -20 °C | | -30 °C | | -50 °C | |
| | | | | | | L | T | L | T | L | T |
| S355J2+N, t = 25 мм | | | | | | | | | | | |
| Випробування ІЕЗ | 345,1 | 495,3 | 0,69 | 35,9 | 72,9 | 265; 352; 214 | 168; 192; 185 | 163; 170; 171; 179 | 63; 60; 58; 57 | — | — |
| | 346,8 | 492,8 | 0,70 | 35,0 | 73,9 | 277 | 182 | 171 | 59,5 | — | — |
| S355J2+N, t = 20 мм | | | | | | | | | | | |
| Випробування ІЕЗ | 410 | 530 | 0,77 | 33 | 67 | 282; 275; 291 | 131; 163; 127 | 306; 287; 304 | 141; 134; 140 | — | — |
| | 402 | 526 | 0,76 | 37 | 71 | 283 | 140 | 299 | 138 | — | — |
| ДСТУ EN 10025-2:2007 | ≥ 345 | 470 – 630 | — | ≥ 22 | — | ≥ 34 | Не нормується | — | — | — | — |
| P355NL2, t = 20 мм | | | | | | | | | | | |
| Випробування ІЕЗ | 414 | 544 | 0,76 | 31 | — | — | — | — | 241; 282; 329 | 73; 104; 113 | — |
| | 410 | 549 | 0,75 | 33 | — | — | — | — | 284 | 97 | — |
| ДСТУ EN 10028-3:2018 | ≥ 345 | 490 – 630 | — | ≥ 22 | — | — | — | — | — | — | ≥ 34 |
| S420NL, t = 25 мм | | | | | | | | | | | |
| Випробування ІЕЗ | 430 | 583 | 0,73 | 33 | 66,2 | — | — | 327; 344; 338 | 246,4...333,6 | 160; 120; 138; 139 | — |
| | 433 | 589 | 0,74 | 33 | 67,3 | — | — | 336 | 294,1 | 139 | — |
| ДСТУ EN 10025-3:2007 | ≥ 400 | 520 – 680 | — | ≥ 19 | — | — | — | — | ≥ 29 | ≥ 34 | — |

Примітка. L – випробування на повздовжніх зразках, T – випробування на поперечних зразках.

P355NL2 і S420NL становить $S = 0,003$ мас. %. Для сталі S355J2+N вміст сірки $S = 0,016$ мас. % при $t = 25$ мм і $S = 0,009$ мас. % при $t = 20$ мм. Механічні властивості зазначених сталей наведені в табл. 3.

Мікрошліфи для металографічних досліджень вирізали вздовж напрямку прокатування та полірували до 14 класу чистоти з використанням алмазних паст. Для проявлення мікроструктури зразки протравлювали у 4%-му спиртовому розчині азотної кислоти. Мікроструктуру досліджували за допомогою мікроскопу НЕОРНОТ-32. Твердість за Віккерсом заміряли на твердомірі М-400 LECO при навантаженнях 98 мН і 9,8 Н. Вміст неметалевих включень в досліджуваних зразках визначали на полірованих непротравлених мікрошліфах [21].

Аналіз експериментальних даних табл. 2, 3 показує, що хімічний склад і механічні властивості сталей S355J2+N, P355NL2 і S420NL відповідають вимогам [5, 6, 19]. Величина співвідношення границя текучості/тимчасовий опір $\sigma_T/\sigma_{пл} \leq 0,75$ є близькою до вимог [13]. При цьому за температури $T = -30$ °С величина ударної в'язкості KCV_{-30} для

сталі S355J2+N завтовшки 25 мм, що визначена із застосуванням поперечних зразків, відповідає вимогам [6] для сталі S355NL. За результатами контрольних випробувань сталі P355NL2 і S420NL можна віднести до одного класу міцності S420.

Результати досліджень та їх обговорення.

Результати дослідження якості прокату сталей S355J2+N, P355NL2, S420NL в напрямку товщини [15] представлено в табл. 4. Аналіз цих даних показує, що до групи найнижчої якості Z15 належить сталь S355J2+N в товщині $t = 25$ мм, яка постачається в стані нормалізувального прокатування з підвищеним вмістом сірки 0,016 %. Конструкційна сталь S355J2+N ($t = 20$ мм) після нормалізувального прокатування і нормалізованої сталі P355NL2 та S420NL належать до групи високої якості Z35, що пов'язано з більш низьким вмістом сірки: $S \leq 0,010$ % [3]. З наведених даних можна зробити висновок, що основним фактором, який впливає на показник якості прокату вищенаведених сталей (групу Z), є вміст сірки в сталі, а не вид термічної обробки [3].

На другому етапі досліджень була визначена ударна в'язкість зазначених сталей в площині про-

Таблиця 4. Дослідження на групу якості Z листового прокату сталей S355J2+N, P355NL2, S420NL

| Номер зразка | Марка сталі, товщина листа | Стан постачання сталі | Ψz, % | Група якості Z | Масова доля сірки, % |
|--------------|----------------------------|------------------------------|-------|----------------|----------------------|
| 1 | S355J2+N, $t = 25$ мм | Нормалізувальне прокатування | 22,0 | Z15 | 0,016 |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 1 | S355J2+N, $t = 20$ мм | Нормалізувальне прокатування | 41 | > Z35 | 0,009 |
| 2 | | | 42 | | |
| 1 | P355NL2, $t = 20$ мм | Нормалізація | 69,1 | > Z35 | 0,002 |
| 2 | | | 73,2 | | |
| 1 | S420 NL, $t = 25$ мм | Нормалізація | 66,2 | > Z35 | 0,002 |
| 2 | | | 67,3 | | |

Таблиця 5. Вплив виду термічної обробки (стану постачання) на ударну в'язкість KCV_{x-y} листового прокату сталей S355J2+N, P355NL2 та S420NL2 при розташуванні надрізу в площині X–У

| Стандарт, марка сталі, товщина листа | Масова доля сірки, % | Вид термічної обробки | Ударна в'язкість KCV_{x-y} , Дж/см ² , за температури: | |
|--|----------------------|---|---|---|
| | | | –30 °С | –50 °С |
| ДСТУ EN 10025-2 S355J2+N, $t = 25$ мм | 0,016 | Нормалізувальне прокатування | 11,4; 9,6; 8,1 9,7 | — |
| ДСТУ EN10028-3 P355NL2, $t = 20$ мм | 0,002 | Нормалізація | 58,9; 51,6; 67,4 59,3 | 26,9; 13,4; 27,7 22,7 |
| ДСТУ EN 10025-3 S420NL, $t = 25$ мм | 0,002 | Нормалізація | 19,9; 18,2; 16,3 18,1 | 21,0; 21,7; 19,9 20,9 |
| ДСТУ Б В.2.6-183:2011 | $\leq 0,010$ | Будь-яка | $\geq 35,0$; при $R_y \leq 360$ МПа; $\geq 50,0$; при $R_y > 360$ МПа поперечні зразки* | |
| ДСТУ EN 10025-2:2007 | $\leq 0,035$ | Нормалізувальне прокатування | $\geq 34,00$ (27 Дж) повздовжні зразки* | — |
| ДСТУ EN 10025-3:2007 | $\leq 0,025$ | Нормалізація або нормалізувальне прокатування | $\geq 29,00$ (23 Дж) поперечні зразки* | $\geq 20,00$ (16 Дж) поперечні зразки* |
| ДСТУ EN10028-3:2018 | $\leq 0,005$ | Нормалізація | $\geq 37,50$ (30 Дж) поперечні зразки* | $\geq 34,00$ (27 Дж) поперечні зразки* |

Примітка. *Ударна в'язкість (робота удару) в площині X–У не нормується.

Таблиця 6. Ударна в'язкість KCV_{x-y} листового прокату сталі S355J2+N завтовшки $t = 20$ мм після різних видів термічної обробки

| Стандарт, марка сталі | Вид термічної обробки | Ударна в'язкість KCV_{x-y} , Дж/см ² , за температури: | | |
|--|---|---|----------------------------|-------------------------|
| | | -20 °C | 0 °C | +20 °C |
| ДСТУ EN 10025-2:2007 S355J2+N | Нормалізувальне прокатування | <u>28; 5; 5,5</u> 9,7 | <u>5,5; 26; 24</u> 18,5 | <u>26; 37; 15</u> 26 |
| | Нормалізувальне прокатування + високотемпературний відпуск ($T = 650$ °C, 1 год) | <u>11; 13; 7</u> 10,3 | <u>7; 27; 23</u> 19 | — |
| Вимоги стандарту ДСТУ Б В.2.6-183:2011 [13] до величини KCV | Для всіх видів термообробки | $\geq 35,0$ поперечні зразки* | — | — |
| Вимоги стандарту ДСТУ EN 10025-2:2007 [5] до величини KCV (KV) | Нормалізувальне прокатування | $\geq 34,75$ (27 Дж) повздовжні зразки* | — | — |

Примітка. *Ударна в'язкість (робота удару) в площині X-Y не нормується.

катування KCV_{x-y} (табл. 5, 6) та вплив на неї високотемпературного відпуску $T = 650$ °C (імітація PWHТ) для сталі S355J2+N (табл. 6).

Аналіз наведених у табл. 5, 6 результатів вказує на те, що у разі вмісту сірки $S \leq 0,010$ % основним фактором, що впливає на в'язкість прокату в площині X-Y, стає вид термічної обробки сталі. Так, за результатами випробувань на ударний згин сталі S355J2+N, $t = 20$ мм, після нормалізувального прокатування має низьку ударну в'язкість в площині X-Y: $KCV_{-20} = 9,7$ Дж/см² (табл. 6), що менше ніж це вимагається стандартом – $KCV_{-20} \geq 35$ Дж/см² [13]. При цьому листовий прокат належить до класу якості Z35: $\psi_z = 41$ %, з низьким вмістом сірки: $S = 0,009$ %.

Високий рівень в'язкості в площині X-Y, яка задовольняє вимогам [19], має нормалізована сталь P355NL2, $t = 20$ мм, вміст сірки $S = 0,002$ %: $KCV_{-30} = 59,3$ Дж/см² (табл. 5), що підтверджується також і випробуваннями на розтягування в напрямку товщини: $\psi_z = 69$ %. Для сталі S420NL2, $t = 25$ мм, в стані нормалізації при вмісті сірки: $S = 0,002$ % і високій пластичності в напрямку площини $\psi_z = 66$ % (табл. 4, 7) ударна в'язкість в площині X-Y дорівнює $KCV_{-30} = 18...24$ Дж/см² (табл. 5, 7), що не задовольняє вимозі $KCV_{-30} \geq 29,75$ Дж/см² [6]. Однак на відміну від сталі S355J2+N метал осьової зони

після нормалізації зберігає достатню в'язкість [6, 13] до температури $T = -20$ °C, а в разі проведення високотемпературного відпуску критична температура знижується до $T = -30$ °C (табл. 7).

Дослідження залежності ударної в'язкості KCV_{x-y} осьової зони сталі S355J2+N, $t = 20$ мм, вміст сірки $S = 0,009$ % (табл. 6) від температури показали, що навіть за температури $T = +20$ °C вона знаходиться в нижній зоні S-подібної кривої, відповідно і ризик утворення ламелярних тріщин навіть при зварюванні в заводських умовах за додатної температури може бути достатньо високим. Високотемпературний відпуск не впливає на в'язкість сталі S355J2+N в площині X-Y.

За результатами металографічних досліджень було встановлено, що мікроструктура сталей S355J2+N, P355NL2 і S420NL є феритно-перлітною (рис. 2). Оцінка смугастості [20] цих сталей (табл. 8) показує, що S355J2+N після нормалізувального прокатування має значно більший ступінь смугастості, ніж P355NL2 і S420NL.

З аналізу мікроструктури сталей (рис. 2) видно, що на відміну від S355J2+N, де перліт є пластинчастим (рис. 2, а, б), в сталі P355NL2 після нормалізації утворюється сорбітоподібний перліт з розорієнтованими зернами (рис. 2, в). У фериті спостерігається велика кількість виділень карбідів, що перетворює феритну складову на

Таблиця 7. Ударна в'язкість KCV_{x-y} в площині X-Y листового прокату сталі S420NL завтовшки $t = 25$ мм після нормалізації та високотемпературного відпуску

| Температура випробування зразків, °C | Ударна в'язкість KCV , Дж/см ² | |
|--------------------------------------|---|--|
| | у стані постачання (нормалізація) | після високотемпературного відпуску ($T = 650$ °C, 1 год) |
| 0 | <u>104; 105; 95</u> 101 | <u>33; 81; 39</u> 51 |
| -10 | <u>51; 74; 48</u> 58 | <u>82; 91; 62</u> 78 |
| -20 | <u>51; 97; 45</u> 64 | <u>48; 61; 38</u> 49 |
| -30 | <u>20; 16; 29; 31</u> 24 | <u>65; 37; 38</u> 47 |
| -50 | <u>21; 22; 20</u> 21 | <u>20; 11; 9</u> 13 |

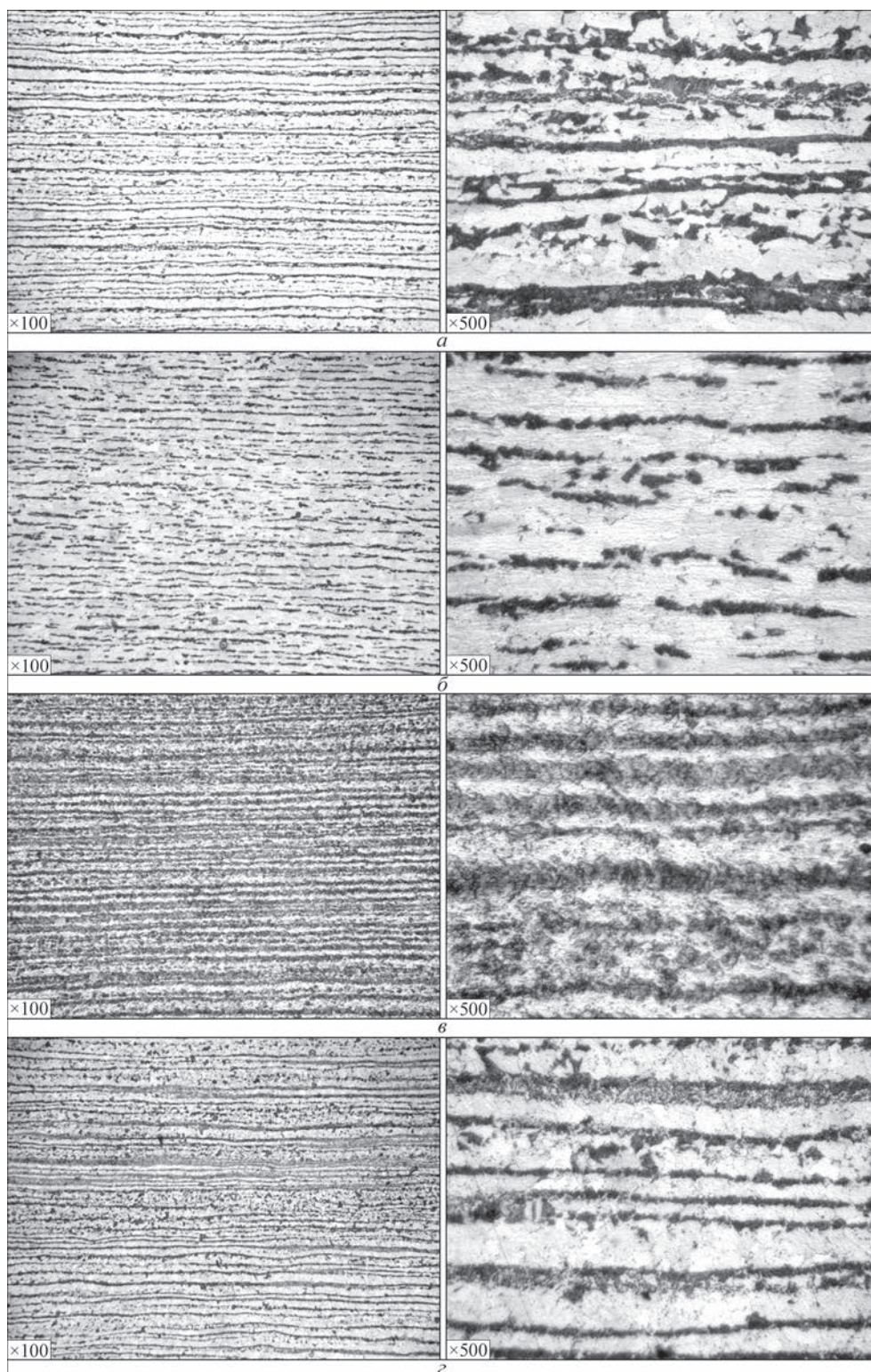


Рис. 2. Мікроструктура осьової зони сталей, що досліджені: *a* – сталь S355J2+N, товщина 20 мм; *б* – сталь S355J2+N, товщина 25 мм; *в* – сталь P355J2+N, товщина 20 мм; *г* – сталь S420NL2, товщина 25 мм

Таблиця 8. Смугастість структури листового прокату сталей S355J2+N, P355NL2, S420NL згідно з ДСТУ 8974:2019 [20]

| Стандарт, марка сталі, товщина | Оцінювання смугастості |
|---------------------------------------|--|
| ДСТУ EN 10025-2 S355J2+N, $t = 20$ мм | рис. 8(4), шкала 3, ряд Б ($\times 100$) |
| ДСТУ EN 10025-2 S355J2+N, $t = 25$ мм | рис. 8(4), шкала 3, ряд Б ($\times 100$) |
| ДСТУ EN 10028-3 P355NL2, $t = 20$ мм | рис. 8(3), шкала 3, ряд Б ($\times 100$) |
| ДСТУ EN 10025-3 S420NL, $t = 25$ мм | рис. 9(5), шкала 3, ряд В ($\times 100$) |

феритно-карбідну суміш. Це призводить до збільшення твердості фериту сталі P355NL2 у порівнянні з S355J2+N (табл. 9) та зменшенню механічної неоднорідності структури. В сталі S355J2+N ($t = 20$ мм, 25 мм) спостерігається більша різниця між величинами твердості феритної та перлітної складових, вміст карбідів у фериті є невисоким (табл. 9, рис. 2, а, б).

Сталь S420NL займає проміжне положення: в ній утворюється як пластинчатий, так і сорбітоподібний перліт (рис. 2, з), виділення карбідів у фериті відсутні. Механічна неоднорідність структури (різниця у твердості фериту і пластинчатого перліту) HV0,098N дещо нижча, ніж для сталі S355J2+N, $t = 20$ мм (табл. 9). Для сорбітоподібного перліту різниця твердості з феритом досягає 943HV, що значно більше, ніж для сталі S355J2+N (табл. 9). Але в цьому випадку негативний вплив механічної неоднорідності менший через меншу смугастість прокату та більшу в'язкість сорбіто-

подібного перліту, ніж пластинчатого. Для сталі S355J2+N спостерігається збільшення перлітної складової в осьовій зоні [7], що пов'язано із дифузійною вуглецю до центру листа. Це призводить до збільшення інтегральної твердості HV (9.8N) і різниці у твердості HV0,098N фериту і пластинчатого перліту (анізотропія структури) для осьової зони (табл. 9). Відповідно, в осьовій зоні слід очікувати мінімальну в'язкість металу по товщині листа.

Беручи до уваги те, що для досліджених сталей характерні дрібнодисперсні неметалеві включення, які суттєво не впливають на в'язкість металу (табл. 10), можна зробити висновок, що основною причиною зниження в'язкості в площині X–У для листового прокату сталі S355+N, підданого нормалізувальному прокатуванню, є утворення в результаті такої обробки вираженої смугастої структури з формуванням волокон фериту та перліту, які мають високу анізотропію механічних властивостей (рис. 2, а, б, табл. 9).

Таблиця 9. Результати замірів твердості металу листового прокату сталей S355J2+N, P355NL2, S420NL

| Стандарт, марка сталі, товщина, місце вимірювання | Твердість складових мікроструктури HV (0,098 N) | | Різниця твердості фериту та перліту, МПа | Інтегральна твердість HV (9,8N), МПа |
|--|---|---------------------------------|--|--------------------------------------|
| | структурна складова | твердість, МПа | | |
| ДСТУ EN 10025-2 S355J2+N, $t = 20$ мм осьова частина | Ферит | 1088; 1088; 1264; 1176 1154 | 720 | 1548; 1548; 1450; 1470 1504 |
| | Перліт | 1813; 1784; 1813; 1686 1874 | | |
| ДСТУ EN 10025-2 S355J2+N, $t = 20$ мм поверхнева частина | Ферит | 1284; 1245; 1264; 1274 1266 | 713 | 1450; 1499; 1499; 1480 1482 |
| | Перліт | 1931; 1931; 1813; 1764; 1979 | | |
| ДСТУ EN 10025-2 S355J2+N $t = 25$ мм осьова частина | Ферит | 1587; 1587; 1587; 1587 1587 | 392 | 1597; 1637; 1558; 1558 1587 |
| | Перліт | 1891; 2009; 2009; 2009 1979 | | |
| ДСТУ EN 10025-2 S355J2+N $t = 25$ мм поверхнева частина | Ферит | 1528; 1646; 1646; 1528 1587 | 304 | 1529; 1539; 1666; 1588 1580 |
| | Перліт | 1813; 1813; 1930; 2009 1891 | | |
| ДСТУ EN 10028-3 P355NL2, $t = 20$ мм осьова частина | Ферит | 1646; 1744; 1617; 1646 1663 | 294 | 1646; 1852; 1627; 1752 1719 |
| | Сорбітоподібний перліт | 1970; 1852; 2009; 1999 1957 | | |
| ДСТУ EN 10028-3 P355NL2, $t = 20$ мм поверхнева частина | Ферит | 1499; 1548; 1617; 1499 1540 | 214 | 1646; 1646; 1656; 1558 1626 |
| | Сорбітоподібний перліт | 1617; 1744; 2009; 1646 1754 | | |
| ДСТУ EN 10025-3 S420NL, $t = 25$ мм, осьова частина | Ферит | 1303; 1480; 1401; 1480 1416 | 593 | 1784; 1833; 1612; 1950 1795 |
| | Перліт | 2009; 2009; 2009; 2009 2009 | 943 | |
| | Сорбітоподібний перліт | 2244; 2519; 2254; 2421 2359 | | |
| ДСТУ EN 10025-3 S420NL, $t = 25$ мм, поверхнева частина | Ферит | 1324; 1480; 1372; 1372 1387 | 390 | 1637; 1735; 1735; 1656 1691 |
| | Перліт сорбітоподібний | 1715; 1784; 1784; 1784 1777 | | |
| | Перліт | 2225; 2401; 2450; 2254 2332 | 945 | |

Таблиця 10. Оцінка забрудненості неметалевими включеннями листового прокату сталей S355J2+N, P355NL2, S420NL [21]

| Стандарт, марка сталі, товщина | Забрудненість | | | | | |
|--|-----------------------|-------|--------------|-------------|-------|--------------|
| | глобулярними оксидами | | | сульфідами | | |
| | бал і | серія | товщина, мкм | бал і | серія | товщина, мкм |
| ДСТУ EN 10025-2 S355J2+N, $t = 20$ мм | 0,5 | тонка | від 3 до 8 | 0,5 | тонка | від 2 до 4 |
| ДСТУ EN 10025-2 S355J2+N, $t = 25$ мм | 1,0 | | | 0,5 | тонка | від 13 до 76 |
| ДСТУ EN 10028-3 P355NL2, $t = 20$ мм | 1,5 | | | 0,5 | тонка | від 2 до 4 |
| ДСТУ EN 10025-3 S420NL, $t = 25$ мм | 0,5 | | | не виявлено | | |

Наявність такої анізотропії є причиною крихкого руйнування під час випробування на ударний згин в площині X–Y [10] для сталі після нормалізувального прокатування, в процесі якого проводиться додаткова його деформація в аустенітній області при температурах близьких до точки A_{c3} , що обумовлює утворення вираженої волокнистої структури. В сталях P355NL2 і S420NL, підданих нормалізації, завдяки зменшенню рівня смугастості та зниженню механічної анізотропії між феритом та перлітом, а також утворенню дрібнозернистої структури сорбітоподібного перліту з розорієнтованими границями (рис. 2, в, г, табл. 9) в'язкість металу в площині X–Y значно зростає і, відповідно, відбувається перехід від крихкого грубокристалічного руйнування [22] для сталі S355J2+N до крихко-в'язкого для сталі P355NL2 і S420NL (рис. 3 а, в). Значна анізотропія механічних властивостей між волокнами фериту та перліту в сталі S355J2+N також проявляється в шаруватому руйнуванні металу у випадку випробування на ударний згин зразків Шарпі, вирізаних вздовж прокату (рис. 3, б), внаслідок об'ємного напруженого стану перед фронтом тріщини [16].

Слід очікувати, що завдяки низькому вмісту неметалевих включень в сталі після нормалізу-

вального прокатування деформація металу осьової зони під час зварювання відбуватиметься в інтервалі температур, де матеріал має достатню пластичність, відповідно, шарувате руйнування буде відсутнє. Прояв крихкого або квазікрихкого шаруватого руйнування може відбуватися при подальшій експлуатації зварної конструкції при низьких температурах за наявності тріщиноподібних дефектів в осьовій зоні прокату у разі дії розтягувальних зусиль в напрямку товщини. Такими ініціювальними дефектами можуть бути наявні розшарування металу або окремі протяжні скупчення неметалевих включень у сталі. У цьому випадку для попередження таких шаруватих руйнувань важливо застосовувати листовий прокат із контролем суцільності та обмежувати вміст сірки $S \leq 0,010$ % і фосфору: $P \leq 0,015$ %.

Таким чином, структура сталі S355J2+N [5] після нормалізувального прокатування є волокнистою, з вираженою анізотропією, яка відрізняється від структури, отриманої після нормалізації. Відповідно, це стосується і механічних властивостей [10], наприклад в'язкості металу в площині прокатування X–Y. Це означає, що для використання сталей [5, 6] після нормалізувального прокатування для резервуарів або інших відпові-

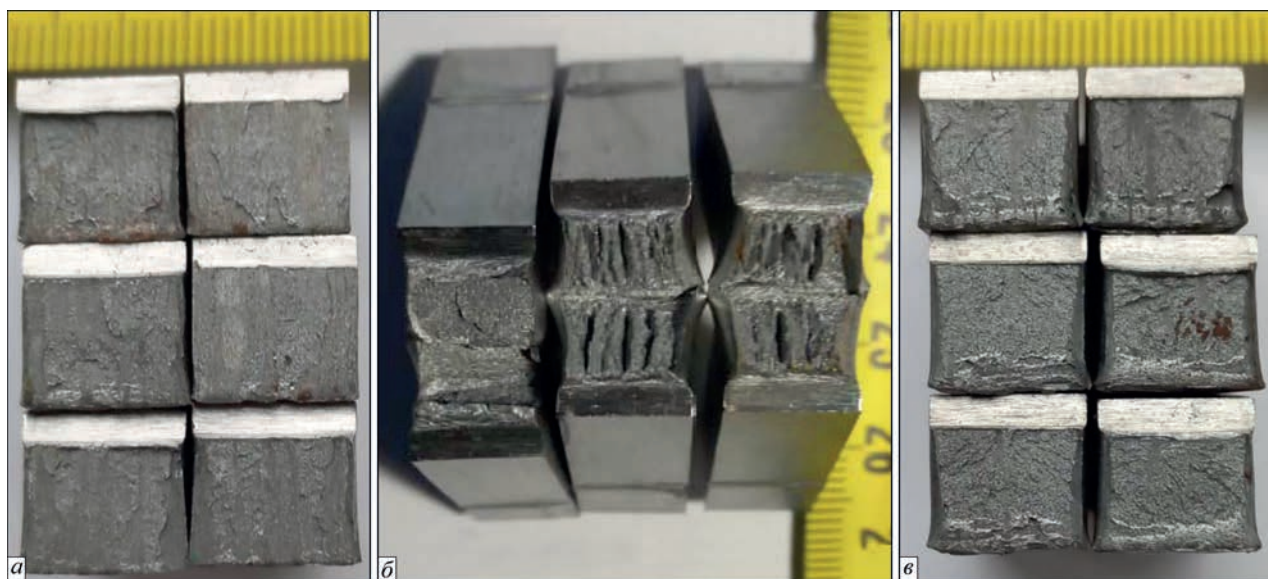


Рис. 3. Злами зразків Шарпі сталей, що досліджені: а – сталь S355J2+N, товщина 20 мм, надріз в площині X–Y (осьова зон), температура випробувань $T = 0$ °C; б – сталь S355J2+N, товщина 25 мм, повздовжній зразок, температура випробувань $T = -20$ °C; в – сталь S420NL2, товщина 25 мм, надріз в площині X–Y (осьова зон), температура випробувань $T = -30$ °C

дальних конструкцій (мости, платформи тощо) у вузлах, де потрібно враховувати роботу металу в напрямку товщини, необхідно застосовувати додаткові умови [23, 24]. Для циліндричних сталевих резервуарів доцільно обмежити товщину листової сталі, що постачається після нормалізувального прокатування, величиною $t \leq 15$ мм, для якої норматив [15] не передбачає вимоги по забезпеченню групи якості Z.

Високотемпературний відпуск, що імітував проведення PWHT для сталі S355J2+N після нормалізувального прокатування не зменшує суттєво смугастість і механічну неоднорідність між феритом та перлітом, тому після його проведення відсутнє збільшення ударної в'язкості KCV_{X-Y} в площині X–Y (табл. 6). Для нормалізованої сталі S420NL високотемпературний відпуск сприяє подальшій коагуляції карбідів, що підвищує об'ємну долю сорбітоподібного перліту і, відповідно, зменшує механічну неоднорідність між перлітом та феритом. У результаті перехідна температура зміщується в область нижчих температур: з $T = -20$ °C до $T = -30$ °C (табл. 7).

Висновки

1. Застосування нормалізувального прокатування не забезпечує листовому прокату сталі S355+N стан, рівноцінний стану після нормалізації. В результаті проведення нормалізувального прокатування, завдяки додатковому обтисненню листа в температурній області біля температури A_{c3} , в сталі формується мікроструктура, яка має виражену смугастість і в якій утворюються волокна фериту та перліту, що мають високу анізотропію механічних властивостей. Формування такої волокнистої структури призводить до крихкого руйнування металу в площині X–Y при розрахунковій температурі.

Для осьової зони листа анізотропія структури є максимальною. Відповідно, в цій зоні слід очікувати мінімальну в'язкість металу по товщині листа, й її можливо розглядати як ймовірне місце утворення ламелярних тріщин.

2. Забезпечення якості сталевого прокату Z відповідно до ДСТУ EN 10164:2009, що визначається при розтягуванні зразків у перпендикулярному до поверхні виробу напрямку, може бути недостатнім для запобігання крихкому шаруватому руйнуванню металу в зварних з'єднаннях у разі застосування сталей після нормалізувального прокатування з низьким вмістом сірки: $S \leq 0,010$ %. В цьому випадку як додаткову умову стійкості листового прокату сталей S355 і S420 крихкому шаруватому руйнуванню, крім групи якості прокату Z, рекомендується використовувати такий показник, як мінімальна робота удару, яка визначається на зразках з надрізом в площині прокату X–Y (по вісі листа) KV_{X-Y} і величина якої, до накопичення статичних даних, пропонується приймати згідно

ДСТУ–Н Б EN 1993-1-10:201: $KV_{X-Y} \geq 27$ (40) Дж або згідно з ДСТУ EN 10025-2:2007 та ДСТУ EN 10025-3:2007, залежно від умов експлуатації, типу конструкції та ступеню відповідальності зварних вузлів. Температура випробувань зразків визначається з урахуванням вимог відповідного стандарту на проектування металокопункцій резервуарів, мостів тощо.

3. Для металокопункцій резервуарів групи А (стінка, контурні листи днища) за умови необхідності врахування роботи металу в напрямку товщини пропонується використовувати листовий прокат сталей S355 і S420 в стані після нормалізації або нормалізації з високотемпературним відпуском. При цьому вміст сірки в сталі не має перевищувати $S \leq 0,010$ %, і для неї необхідно проводити контроль на суцільність. У випадку застосування сталей в стані нормалізувального прокатування для стінки та контурних листів днища резервуарів доцільно обмежувати товщину листа величиною $t \leq 15$ мм, для якої не передбачено вимоги щодо забезпечення спеціальних властивостей у перпендикулярному напрямку до поверхні листа.

Автори висловлюють подяку за підтримку в проведенні досліджень ПрАТ «Укрсталь Конструкція».

Список літератури

1. ДСТУ 8803:2018 *Прокат товстолистовий з вуглецевої сталі звичайної якості. Технічні умови.*
2. ДСТУ 8541:2015 *Прокат сталевий підвищеної міцності. Технічні умови.*
3. Скороходов В.Н., Одесский П.Д., Руденко А.В. (2002) *Строительная сталь.* Москва, Металлургиздат.
4. Билецкий С.М., Голинько В.М. (1983) *Индустриальное изготовление негабаритных сварных конструкций.* Киев, Наукова думка.
5. ДСТУ EN 10025-2:2007 *Вироби гарячекатані з конструкційної сталі. Частина 2. Технічні умови постачання нелегованих конструкційних сталей.*
6. ДСТУ EN 10025-3:2007 *Вироби гарячекатані з конструкційної сталі. Частина 3. Технічні умови постачання зварувальних дрібнозернистих конструкційних сталей, підданих нормалізації або нормалізувальному прокатуванню.*
7. Матвиенков С.А., Шебаниц Э.Н., Тарасенко О.С. и др. (2012) Производство стали и проката стали марки S355...N для изготовления металлоконструкций под строительством НСК «Олимпийский» в Киеве. *Металл и литье Украины*, 2-3 (225-226), 35–38.
8. Faria, R., Gorni, A., Matsubara, D. et al. (2019) Influence of the Normalizing Rolling Parameters on the Toughness of a Nb, V and Ti Microalloyed Steel Processed in the Gerdau Plate Mill. *Iron & Steel Technology Conference – AISTech 2019, Association for Iron and Steel Technology, Pittsburgh, May 2019.* DOI:10.33313/377/191.
9. Хайстеркамф Ф., Хулка К., Матросов Ю.И. и др. (1999) *Низкоуглеродистые низколегированные стали.* Москва, СП Итермет Инжиниринг.
10. Броек Д. (1980) *Основы механики разрушения.* Москва, Высшая школа.
11. API 650 (2020) *Welded tanks for oil storage 13th edition.*
12. EN 14015-2017. *Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above, CEN/TC 265, Secretariat: BSI.*
13. ДСТУ Б В.2.6-183:2011 *Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти і нафтопродуктів. Загальні технічні умови.* Мінрегіон України.

14. ДСТУ-Н Б EN 1993-1-1:2010 Єврокод 3. *Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-1. Загальні правила і правила для споруд.*
15. ДСТУ EN 10164:2009. *Вироби сталеві з поліпшеними деформаційними властивостями у перпендикулярному напрямку до поверхні виробу. Технічні умови постачання.*
16. Гиренко В.С., Бернацкий А.В., Рабкина М.Д. и др. (1987) Слоистое, слоисто-хрупкое и слоисто-вязкое разрушение сварных соединений. *Проблемы прочности*, 3, 70–76.
17. Laddha, S.S., Pandurang, S.S., Deepashri, D.N. (2016) Lamellar Tearing: A Failure Case Study// *Journal of Failure Analysis and Prevention*, https://www.researchgate.net/publication/304577342_Lamellar_Tearing_A_Failure_Case_Study
18. Поздняков В.Д., Барвинко А.Ю., Барвинко Ю.П. и др. (2012) Хладостойкость и сопротивляемость слоистому разрушению сварных соединений стали 06ГБ-390. *Автомат. сварка*, 3, 45–49.
19. ДСТУ EN 10028-3:2015 *Вироби пласкі сталеві для використання під тиском. Частина 3. Нормалізовані зварювані дрібнозернисті сталі.*
20. ДСТУ 8974:2019 *Металграфічний метод оцінювання мікроструктури листів та стрічки.*
21. ДСТУ ISO 4967:2017 *Сталь. Визначення вмісту неметалевих включень. Металграфічний метод оцінювання за стандартними шкалами.*
22. ДСТУ 3715-98 *Метали. Види поверхонь руйнування (зломів).*
23. Girenko, V.S., Bernatskii, A.V., Rabkina, M.D. et al. (1987) Lamellar, lamellar-brittle, and lamellar-ductile failure of welded joints. *Strength of Materials*, 19, 372–378.
24. ДСТУ – Н Б EN 1993-1-10:2012 Єврокод 3. *Проектування сталевих конструкцій. Частина 1-10. Властивості трицистичності і міцності матеріалу у напрямку товщини прокату.*
8. Faria, R., Gorni, A., Matsubara, D. et al. (2019) Influence of the Normalizing Rolling Parameters on the Toughness of a Nb, V and Ti Microalloyed Steel Processed in the Gerdau Plate Mill. *Iron & Steel Technology Conf. – AISTech 2019, Association for Iron and Steel Technology, Pittsburgh, May 2019*. DOI:10.33313/377/191.
9. Khaisterkamp, F., Hulka, K., Matrosov, Yu.I. et al. (1999) *Niobium-containing low-alloy steels*. Moscow, SP Internet Engineering [in Russian].
10. Broek, D. (1980) *Fundamentals of mechanics of fracture*. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
11. API 650 (2020) *Welded tanks for oil storage. 13th edition*.
12. EN 14015-2017. *Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above, CEN/TC 265, Secretariat: BSI*.
13. DSTU B V.2.6-183:2011 *Vertical cylindrical steel tanks for oil and oil products. Specifications*. Minregion Ukrainy [in Ukrainian].
14. DSTU-N B EN 1993-1-1:2010 Eurocode 3. *Design of steel structures - Pt 1-1. General rules and rules for buildings* [in Ukrainian].
15. DSTU EN 10164:2009 *Steel products with improved deformation properties perpendicular to the surface of the product. Technical delivery conditions* [in Ukrainian].
16. Girenko, V.S., Bernatsky, A.V., Rabkina, M.D. et al. (1987) Lamellar, lamellar-brittle and lamellar-ductile failure of welded joints. *Problemy Prochnosti*, 3, 70–76 [in Russian].
17. Laddha, S.S., Pandurang, S.S., Deepashri, D.N. (2016) Lamellar tearing: A failure case study. *J. of Failure Analysis and Prevention*, https://www.researchgate.net/publication/304577342_Lamellar_Tearing_A_Failure_Case_Study
18. Poznyakov, V.D., Barvinko, A.Yu., Barvinko, Yu.P. et al. (2012) Cold resistance and lamellar fracture resistance of welded joints on steel 06GB-390. *The Paton Welding J.*, 3, 35-39.
19. DSTU EN 10028-3:2015 *Flat products made of steels for pressure purposes. Pt 3: Weldable fine grain steels, normalized* [in Ukrainian].
20. DSTU 8974:2019 *Metallographic method for determination of microstructure of sheets and bands* [in Ukrainian].
21. DSTU ISO 4967:2017 *Steel. Determination of content of nonmetallic inclusions. Metallographic method of evaluation using standard diagrams* [in Ukrainian].
22. DSTU 3715-98 *Metals. Types of rupture surfaces (fractures)* [in Ukrainian].
23. Girenko, V.S., Bernatskii, A.V., Rabkina, M.D. et al. (1987) Lamellar, lamellar-brittle, and lamellar-ductile failure of welded joints. *Strength of Materials*, 19, 372–378.
24. DSTU – N B EN 1993-1-10:2012 Eurocode 3. *Design of steel structures. Pt 1-10. Properties of crack resistance and strength through the rolled stock thickness* [in Ukrainian].

References

1. DSTU 8803:2018 *Rolled plate from carbon steel of general quality Specifications* [in Ukrainian].
2. DSTU 8541:2015 *High-strength rolled steel. Specifications* [in Ukrainian].
3. Skorokhodov, V.N., Odesskij, P.D., Rudenko, A.V. (2002) *Building steel*. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
4. Biletsky, S.M., Golinko, V.M. (1983) *Industrial production of oversized welded structures*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
5. DSTU EN 10025-2:2007 *Hot rolled products of structural steels. Pt 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels*.
6. DSTU EN 10025-3:2007 *Hot rolled products of structural steels — Pt 3: Technical delivery conditions for normalized/normalized rolled weldable fine grain structural steels* [in Ukrainian].
7. Matvienkov, S.A., Shebanits, E.N., Tarasenko, O.S. et al. (2012) Production of steel and rolled steel of S355...N grade for manu-

APPLICATION OF STRUCTURAL STEELS IN ABOVE-GROUND CYLINDRICAL TANKS CONSTRUCTION AFTER NORMALIZED ROLLING

A.Yu. Barvinko, Yu.P. Barvinko, A.M. Yashnyk

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

E-mail: tanksweld@gmail.com

The work investigates the structure and ductility of sheet rolled steels of the strength class 355 and 420 in the plane X-Y. It is shown that the use of normalized rolling does not provide sheet rolled steel S355+N the state, which is equivalent to the state after normalization. As a result of carrying out normalized rolling, due to the additional compression of the sheet in the temperature region near the temperature A_{c3} , a banded structure is formed in steel, which has a high anisotropy of mechanical properties. The formation of such a fibrous structure leads to a brittle state of the metal in the plane X-Y at a design metal temperature. To prevent brittle layered fracture, it is necessary to use structural steels of the strength class S355 and S420, produced in accordance with the standard DSTU EN 10025-3:2007 in a state after normalization and limit the content of sulphur $S \leq 0.010\%$. In the case of using the mentioned steels in the state after normalized rolling, it is recommended to use a metal with a thickness of not more than 15 mm, which will provide a safe service of a metal in welded assemblies over the direction of thickness. An additional criterion for stability of sheet rolled steels S355 and S420 to the brittle layered fracture, in addition to the rolled metal quality Z group, it is proposed to use such an indicator as impact energy, which is determined on the specimens with a V-shaped notch in the plane of rolling X-Y (along the sheet axis). 24 Ref., 10 Tabl., 3 Fig.

Keywords: structural steels of strength class 355 and 420, normalized rolling, lamellar-brittle failure, above-ground cylindrical steel tanks

Надійшла до редакції 03.04.2023

СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ СПЛАВУ ТИПУ СОРМАЙТ-1 ПІСЛЯ ПРИРОДНОГО СТАРІННЯ

Ч.В. Пулька¹, В.С. Сенчишин¹, І.Б. Окіпний¹, Віт. С. Сенчишин¹, Р.Т. Бішак²

¹Тернопільський нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя. 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56

²Івано-Франківський нац. техн. ун-т нафти і газу. 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15

Проведено дослідження властивостей наплавленого металу, отриманого із застосуванням індукційного способу на деталі робочих органів сільськогосподарської ґрунтообробної техніки в процесі природного старіння. Аналіз показав, що запасні частини, які зберігаються на складах протягом 3–5 років через різні обставини можуть піддаватися природньому старінню. Це в свою чергу може призвести до зміни властивостей та структури як основного, так і наплавленого металів. За результатами проведених досліджень зразків наплавлених деталей до і після природнього старіння встановлено, що структура і мікротвердість наплавленого металу практично ідентичні. Результати мікрорентгеноспектрального аналізу показали, що збагачення вуглецем ділянок наплавленого металу у лінії сплавлення не виявлено. Показано, що зносостійкість наплавленого металу типу Сормайт-1 на сталь 3, наплавленого індукційним способом, залишається практично без змін. Бібліогр. 6, рис. 4.

Ключові слова: індукційне наплавлення, порошкоподібний твердий сплав (Сормайт-1), мікроструктура, зносостійкість, природне старіння

Вступ. Сплави типу Сормайт-1 у вигляді порошків свого часу широко застосовувалися для індукційного наплавлення робочих органів сільськогосподарської техніки: лемешів плугів і культиваторів, дискових ножів бурякозбиральних комбайнів та ін. Ці деталі виготовлялися мільйонними партіями, зокрема, і як запасні частини [1]. Як показує аналіз, згадані запасні частини, через різні обставини, можуть зберігатися на складах протягом 3–5 років, що може призвести до природного старіння наплавленого металу та зміни його структури та властивостей.

Слід також відзначити той факт, що в металургійній промисловості та машинобудуванні також досить широко застосовується електрошлакове наплавлення дробом або дугове наплавлення порошковими стрічками, які забезпечують отримання наплавленого металу, що за хімічним складом відповідає високохромистим чавунам типу Сормайт-1, додатково легованим іншими елементами [2]. Деталі, які наплавлені цими матеріалами, також можуть експлуатуватися або зберігатися досить тривалий час, причому в умовах підвищених температур, що може призвести до зміни структури і властивостей наплавленого металу. Ці процеси в якійсь мірі можуть бути аналогічними процесам природного старіння наплавленого металу.

Процеси старіння металу описані у ряді монографій [3–5], проте в них немає згадки про особливості старіння наплавленого металу, що, виходячи з викладеного вище, є досить актуальними для металургійного, машинобудівного та сільськогосподарського виробництва.

Окіпний І.Б. – <https://orcid.org/0000-0003-1059-3375>, Пулька Ч.В. – <https://orcid.org/0000-0003-4611-1497>,
Сенчишин В.С. – <https://orcid.org/0000-0002-0286-7754>, Бішак Р.Т. – <https://orcid.org/0000-0001-6876-7142>,
Сенчишин В.С. – <https://orcid.org/0009-0005-8367-9497>

© Ч.В. Пулька, В.С. Сенчишин, І.Б. Окіпний, Віт. С. Сенчишин, Р.Т. Бішак, 2023

Метою даної роботи є дослідження можливої зміни структури та властивостей наплавленого металу типу Сормайт-1 у процесі природного старіння при тривалому зберіганні наплавлених деталей або їх тривалій експлуатації на прикладі деталей, наплавлених індукційним методом сплавом типу Сормайт-1.

Матеріали та методики проведення досліджень. Зразки для досліджень мікроструктури та властивостей наплавленого металу були вирізані з дисків серійних ножів, наплавлених індукційним способом сплавом типу Сормайт-1. Частина зразків вирізалася з дискових ножів, які зберігалися на складі запасних частин не менше 5 років. Для порівняння досліджувалися нові наплавлені зразки. Хімічний склад наплавленого металу, мас. %: 2,5...3,3 C; 2,8...4,2 Si; 0,1...1,5 Mn; 27,0...31,0 Cr; 3,0...5,0 Ni. Твердість $HRC \geq 51$. Основний метал – сталь 3.

Підготовку зразків для металографічних досліджень виконували за стандартними методиками на високошвидкісних полірувальних кругах, з використанням алмазних паст різної дисперсності. Виявлення структури наплавленого металу проводили шляхом електролітичного травлення в 20%-му водяному розчині хромової кислоти. Дослідження мікроструктури здійснювали на металографічному оптичному мікроскопі МІМ-7 при збільшеннях 90...200. Твердість фазових складових вимірювали на мікротвердомірі Лесо М-400, навантаження становило 1Н, час навантаження – 10 с.

Аналіз розподілу легуючих елементів у зоні сплавлення проводили на мікроаналізаторі MS-46 фірми «САМЕСА».



Рис. 1. Мікроструктура ($\times 200$, зменш. 2/3) наплавленого зразка сталь 3+Сормайт-1: *a* – після наплавлення; *б* – після старіння

Дослідження зносостійкості наплавленого металу до і після старіння проводили на установці НК-М [6]. Умови випробувань: абразив – кварцовий пісок з розміром частинок 0,2...0,4 мм; шлях тертя 400 м; питомий тиск – 3 МПа; еталон – відпалена сталь 45.

Результати досліджень та їх обговорення. У мікроструктурі наплавленого металу типу Сормайт-1 до процесу старіння спостерігаються первинні хромисті карбіди у вигляді великих пластин прямокутної або ромбовидної форми, достатньо рівномірно розподілені в матриці (рис. 1, *a*). Із сторони наплавленого металу до межі розділення прилягають скупчення карбідної евтектики. Біла смужка на межі розділення між основним і наплавленим металом має змінну ширину 18...20 мкм. Мікротвердість карбідів 13320...14270 Н/мм², матриці – 5720 Н/мм², зони сплавлення – 4640...3510 Н/мм². На краях наплавленого металу структура являє собою суміш карбідів різної дисперсності, при цьому первинних великих пластинчастих карбідів не спостерігається.

На рис. 1, *б* наведено мікроструктуру наплавленого металу після 5 років зберігання. У ній також спостерігаються хромисті карбіди у вигляді великих пластин. Мікротвердість структурних складових після старіння складає: карбідів – 12890...14950 Н/мм², матриці – 4390...4860 Н/мм², зони сплавлення – 3340...3680 Н/мм². Ширина білої смужки в зоні сплавлення складає 13,6...17,4 мкм. Результати досліджень двох зразків до і після старіння показують, що по типу структури і значенню мікротвердості вони практично ідентичні.

З метою визначення складу структурних складових був проведений мікрорентгеноспектральний аналіз наплавлених зразків до та після старіння.

На рис. 2 показаний розподіл нікелю і хрому в зразках до та після старіння. Запис виконувався посередині ширини зони наплавлення, перпендикулярно лінії сплавлення, як правило, на гли-

бині 200 мкм від основного металу. Встановлено, що у зразку внаслідок старіння на відстані до 40 мкм від основного металу спостерігається зона, яка характеризується дрібнодисперсним виділенням карбідів з максимальним вмістом хрому до 30 % і середнім вмістом нікелю в матриці біля 3 %. На відстані 40 мкм виявлено наявність більш крупних карбідів, де концентрація хрому майже до 60 %.

Вміст нікелю в твердому розчині складає біля 5%. Відомо, що при підвищених температурах в зоні сплавлення зварного з'єднання різнорідних сталей може відбуватися дифузія вуглецю з менш легованого металу в більш легований, наприклад, з низьколегованого основного металу в аустенітний шов. В зв'язку з цим, вивчали якісний розподіл вуглецю і хрому у зразках до та після старіння (рис. 3). Як видно з рис. 3 помітного збагачення вуглецем ділянки наплавленого металу біля лінії

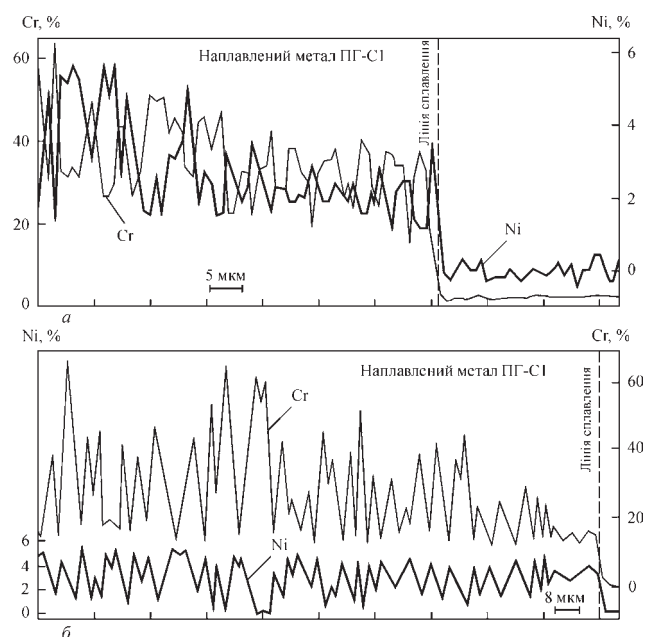


Рис. 2. Розподіл хрому і нікелю по висоті наплавленого металу зразка сталь 3+Сормайт-1: *a* – після наплавлення; *б* – після старіння

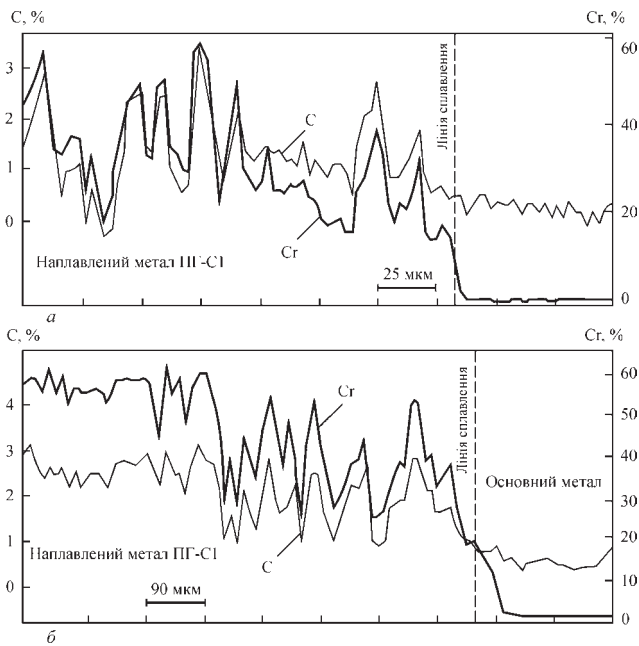


Рис. 3. Розподіл вуглецю і хрому в зоні сплавлення зразка сталь 3+Сормайт-1: а – після наплавлення; б – після старіння

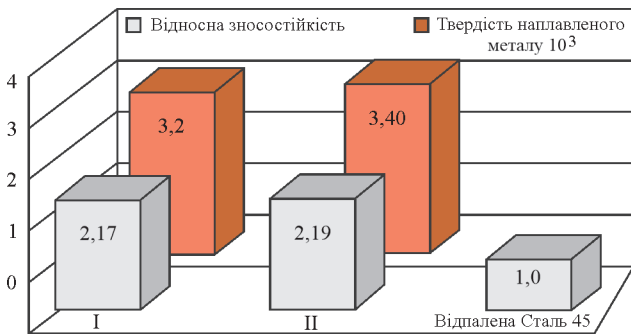


Рис. 4. Відносна зносостійкість та твердість досліджуваних зразків сталь 3+Сормайт-1: I – після наплавлення; II – після старіння

сплавлення не спостерігається. Результати рентгеноструктурного аналізу показують, що вуглець зв'язаний в карбідах типу $(Fe, Cr)_7C_3$ та $(Fe, Cr)_3C$.

Були проведені лабораторні дослідження зносостійкості наплавленого металу зразків до та після старіння на машині НК-М. Як видно з рис. 4, зразки до і після старіння мають приблизно однакову зносостійкість, відповідно, 2,17 і 2,19. Також було проведено вимірювання твердості наплавленого металу,

результати яких також приведені на рис. 4. Твердість наплавленого металу також мало змінилася.

Висновок

Структура та зносостійкість металу типу Сормайт-1, наплавленого індукційним способом, після природного старіння залишається без змін, що дає підстави для використання наплавлених деталей після тривалого зберігання за призначенням у виробництві.

Список літератури

1. Бол А.А., Лесков С.П. (1985) *Индукционная наплавка деталей в сельскохозяйственном машиностроении. Наплавка. Опыт и эффективность применения.* Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, 72–76.
2. Рябцев И.А., Сенченков И.К., Турык Э.В. (2015) *Наплавка. Материалы, технологии, математическое моделирование.* г. Гливице (Gliwice), Польша, Изд-во Силезского политехн. ин-та (Wydawnictwo Politechniki Śląskiej).
3. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. (1990) *Материаловедение.* Москва, Машиностроение. ISBN 5-217-00858-X
4. Хильчевский В.В. (2002) *Материалознавство і технологія конструкційних матеріалів: Навчальний посібник.* Київ, Либідь. ISBN 966-06-0247-2
5. (2013) *Мала гірнича енциклопедія: у 3 т.* Білецький В.С. (ред.). Донецьк, Східний видавничий дім. Т. 3.
6. Юзвенко Ю.А., Гавриш В.А., Марьенко В.А. (1979) *Лабораторные установки для оценки износостойкости наплавленного металла. Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла.* Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, сс. 23–27.

References

1. Bol, A.A., Leskov, S.P. (1985) *Induction surfacing of parts in agricultural engineering. Surfacing. Experience and effectiveness of application.* Kyiv, PWI, 72–76 [in Russian].
2. Ryabtsev, I.A., Senchenkov, I.K., Turyk, E.V. (2015) *Surfacing. Materials, technologies, mathematical modeling.* Poland, Gliwice, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
3. Lakhtin, Yu.M., Leontieva, V.P. (1990) *Materials science.* Moscow, Mashinostroenie [in Russian]. ISBN 5-217-00858-X
4. Khilchevsky, V.V. (2002) *Materials science and technology of structural materials: Tutorial.* Kuiv, Lybid [in Ukrainian]. ISBN 966-06-0247-2
5. (2013) *Small mining encyclopaedia: In: 3 Vol.* Ed. by V.S. Biletskyi. Donetsk, Shidnyi Vydavnychi Dim, Vol. 3 [in Ukrainian].
6. Yuzvenko, Yu.A., Gavrish, V.A., Marienko, V.A. (1979) *Laboratory units for evaluation of wear resistance of deposited metal. Theoretical and technological fundamentals of surfacing. Properties and tests of deposited metal.* Kyiv, PWI, 23–27 [in Russian].

STRUCTURE AND PROPERTIES OF DEPOSITED METAL OF AN ALLOY OF SOPRMITE-1 TYPE AFTER NATURAL AGING

Ch.V. Pulka¹, V.S. Senchyshyn¹, I.B. Okipnyi¹, Vit. S. Senchyshyn¹, R.T. Bishchak²

¹Ternopil Puluj National Technical University. 56 Ruska Str., 46001, Ternopil

²Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. 15 Karpatska Str., 76019, Ivano-Frankivsk

Properties of metal deposited with application of induction method on the parts of working tools of soil-cultivating agricultural machinery during natural aging were studied. Analysis showed that the spare parts stored for 3 to 5 years can undergo natural aging because of various circumstances. This, in its turn, can lead to a change in the properties and structure of both the base and deposited metals. Proceeding from the results of the conducted investigations of the surfaced parts before and after natural aging, it was determined that the structure and microhardness of the deposited metal are practically identical. Results of X-ray microprobe analysis demonstrated no carbon enrichment of deposited metal regions near the fusion line. It is shown that wear resistance of metal of Sormite-1 type deposited on steel 3 by the induction method remains practically unchanged. 6 Ref., 4 Fig.

Keywords: induction surfacing, powderlike hard alloy (Sormite-1), microstructure, wear resistance, natural aging

Надійшла до редакції 02.05.2023

TIG ЗВАРЮВАННЯ У ВУЗЬКИЙ ЗАЗОР СТАЛІ 20 ПІДВИЩЕНОЇ ТОВЩИНИ

С.В. Ахонін, В.Ю. Білоус, Р.В. Селін, В.В. Пашинський, С.Л. Шваб

ІЕЗ ім. ЄО. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: belousvy@gmail.com

Дугове зварювання з'єднань з вуглецевих сталей завтовшки 20...100 мм може виконуватися, як плавким електродом, так і неплавким, із застосуванням захисних газів або під флюсом. Для підвищення продуктивності зварювальних робіт для металів середньої і великої товщин може застосовуватись багатопшарове зварювання у вузький зазор (ЗВЗ) із подачею присадного дроту. В даній роботі розглядається застосування ЗВЗ вольфрамовим електродом без та із використанням керуючого магнітного поля для зварювання зразків із сталі 20 завтовшки 40 мм. Приведені результати досліджень макрота мікроструктури, мікротвердості зварних з'єднань. Установлено, що застосування зовнішнього керуючого магнітного поля для ЗВЗ з'єднань зі сталі 20 забезпечує більш високу якість зварних з'єднань. Бібліогр. 14, рис. 8.

Ключові слова: аргано-дугове зварювання у вузький зазор, вольфрамовий електрод, сталь 20, керуюче магнітне поле, структура, мікроструктура, мікротвердість

Вступ. Дугове зварювання з'єднань з вуглецевих сталей товщиною 20...100 мм може виконуватися, як плавким електродом, так і неплавким, із застосуванням захисних газів або під флюсом. У даній час зварювання вольфрамовим електродом вважається надійним, але малопродуктивним способом дугового зварювання стикових з'єднань великих товщин. Одним з методів підвищення продуктивності зварювальних робіт для різних металів середньої та великої товщини є багатопшарове зварювання в щільну обробку, а саме ЗВЗ з подачею присадного дроту. Його відмінною особливістю є форма оброблення кромки у вигляді прямокутного паза, в якому, дуговим способом здійснюється наплавлення одного валика на інший по всій ширині зазору. В результаті утворюється шар металу, що заповнює проміжок на певну висоту. Послідовне виконання цих операцій проводить до заповнення всього обсягу зазору наплавленим металом [1, 2]. Основні переваги ЗВЗ – це істотне скорочення необхідної кількості металу, що наплавляється (в порівнянні з обробкою кромки звичайної форми), скорочення витрат присадного дроту, зменшення ширини шва, ширини зони термічного впливу (ЗТВ), а також зменшення зварювальних напруг і деформацій [2]. ЗВЗ з'єднань зі сталей проводиться в основному із застосуванням технології зварювання плавким електродом [3]. Для забезпечення якісних зварних з'єднань необхідно забезпечити надійне розплавлення бічних стінок при ЗВЗ і сплавлення металу шва з основним металом [5, 6]. При зварюванні електродом, що плавиться, застосовується деформований дріт або зварювання з коливаннями при-

садного дроту, зварювання з поворотом присадного дроту [3, 7, 8]. Спосіб ЗВЗ електродом, що плавиться, має таку перевагу в порівнянні зі ЗВЗ вольфрамовим електродом, як більш високу продуктивність [4].

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона розроблена технологія ЗВЗ вольфрамовим електродом, що добре зарекомендувала себе для зварювання титану та деяких інших кольорових металів [1, 9]. Успішна реалізація цього процесу вимагає подолання певних труднощів, головна з яких – забезпечення надійного оплавлення бічних стінок обробки. Для забезпечення надійного оплавлення бічних стінок необхідно перерозподіляти теплову енергію між кромками, що зварюються. З цією метою при ЗВЗ може застосовуватися як механічне переміщення вольфрамового електрода, так і зовнішнє магнітне поле [10]. Оскільки вуглецеві сталі мають власне магнітне поле і високі магнітні властивості, застосування зовнішнього керуючого магнітного поля для ЗВЗ ускладнюється, так як власне магнітне поле деталей, що зварюються, може накладатись на зовнішнє керуюче магнітне поле, що формується магнітною системою зварювальної головки.

Мета роботи. Дослідити можливість виконання ЗВЗ вольфрамовим електродом з зовнішнім керуючим магнітним полем зварних з'єднань з вуглецевої сталі завтовшки 40 мм.

Матеріали та методи дослідження. З метою вивчення можливостей виконання ЗВЗ вольфрамовим електродом виконувалося зварювання зразків товщиною 40 мм, виготовлених із сталі марки сталь 20 ГОСТ 1050-88. Для зварювання був за-

стосований присадний дріт марки Св-08Г2С діаметром 1,6 мм. Причому зварювання виконувалося як без зовнішнього управляючого поля, так і з зовнішнім керуючим магнітним полем. Схема процесу представлена на рис. 1. Для зварювання було використано вольфрамові електроди, діаметром 5 мм, марки ЭВИ-1. Використовувалося зварювальне джерело живлення ВДУ501. Величина струму зварювання становила 460...500 А, напруга на дузі 12 В, подача присадного металу присадного дроту Св-08Г2С діаметром 1,6 у зварювальну ванну складала на рівні 20...25 гр/хв. Підтримка заданої напруги на дузі проводилася автоматичною системою, що регулювала напругу на дузі. Відхилення зварювальної дуги до бокових стінок забезпечувалося накладанням зовнішнього керуючого магнітного поля, з частотою 10...20 Гц, яке генерує зовнішній електромагніт (рис. 1). Контроль процесу зварювання, положення вольфрамового електрода в обробці контролювалися системою відеоспостереження (рис. 2). Схема збирання зразка для зварювання у ЗВЗ наведено на рис. 2, підкладка для збирання зразків, також виготовлено з сталі 20. Довжина зразків для зварювання становила 600 мм.

Результати досліджень. ЗВЗ вольфрамовим електродом відрізняється великою часткою участі присадного металу у формуванні металу шва,

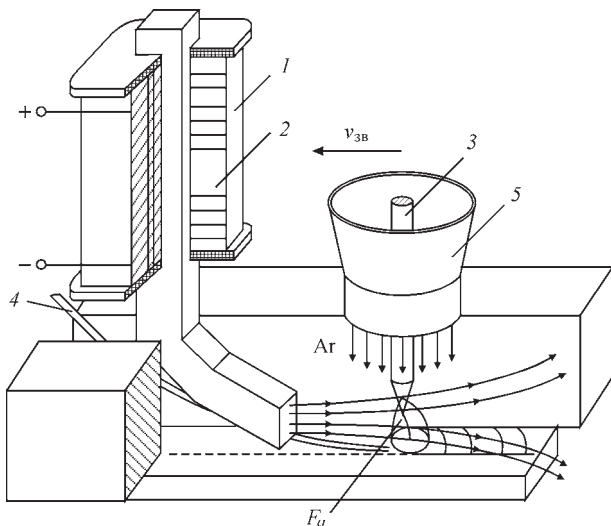


Рис. 1. Схема процесу ЗВЗ вольфрамовим електродом із зовнішнім керуючим магнітним полем: 1 – котушка електромагніту; 2 – сердечник електромагніту; 3 – вольфрамовий електрод; 4 – присадний дріт; 5 – захисне сопло

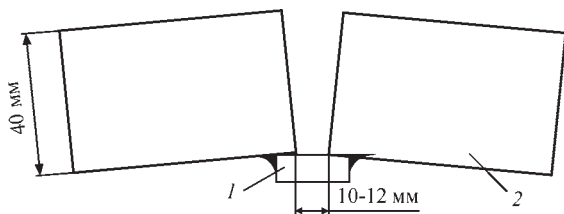


Рис. 2. Схема збирання зразка для зварювання у вузький зазор вольфрамовим електродом: 1 – підкладка; 2 – зразки, що зварюються

в наших експериментах вона склала $\approx 90\%$, тому властивості металу зварних з'єднань виконаних ЗВЗ визначаються головним чином властивостями матеріалу присадного дроту і впливом зовнішнього керуючого магнітного поля.

Металографічне дослідження поперечних макрошліфів не виявило наявності пір у металі шва, виконаного із зовнішнім керуючим магнітним полем. У металі шва, виконаного без зовнішнього керуючого магнітного поля і без перерозподілу теплової енергії зварювальної дуги були несплавлення, непровари і фіксувалися окремі пори.

Фотографії поперечних макрошліфів, виконаних зварних з'єднань наведено на рис. 3.

Проведені металографічні дослідження з'єднань, виконаних ЗВЗ без використання зовнішнього керуючого магнітного поля з подачею присадного матеріалу на рівні 20...25 гр/хв, показали, що зварні шви мали велику глибину проплавлення нижньої стінки оброблення та малу ширину в нижній частині, в зварних швах є непровари та несплавлення (рис. 3, а). Проплавлення вертикальних бічних стінок виявилось нерівномірним, так само, як і форма наплавлених шарів, з чим пов'язана поява таких дефектів, як непровари і несплавлення. Застосування магнітного поля для відхилення зварювальної дуги забезпечило рівномірне проплавлення бічних стінок та хороше формування шва (рис. 3, б). Наплавлені шари мають гладку увігнуту поверхню, що свідчить про надійне сплавлення присадного та основного металу. Проплавлення основного металу та попереднього валіка незначне. Рентгенівський контроль зварних з'єднань виконаних із зовнішнім керуючим магнітним полем на оптимальних режимах не показали непроварів, несплавлень і пор у металі шва, виконаного із зовнішнім керуючим магнітним полем.

Окрім впливу зовнішнього керуючого електромагнітного поля (ЗКЕМП) на макроструктуру зварного з'єднання, значний інтерес становить

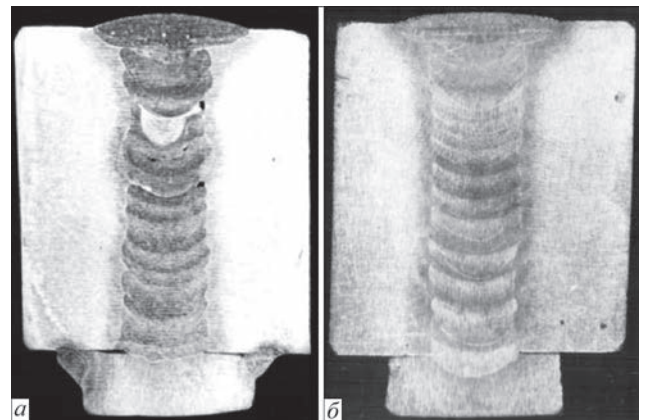


Рис. 3. Поперечні макрошліфи сполук вуглецевої сталі сталь 20, виконаних ЗВЗ вольфрамовим електродом: а – без зовнішнього керуючого магнітного поля; б – із зовнішнім керуючим магнітним полем

оцінка впливу такої обробки на його мікроструктуру. Наявність такого впливу встановлена у багатьох дослідженнях, зокрема в роботах [11, 12, 14] приведено огляд варіантів обробки та можливих механізмів впливу магнітного поля на мікроструктуру сплавів. Слід зауважити, що єдиного загальноприйнятого механізму, що описує вплив поля, не існує. Це пов'язано з тим, що існує багато варіантів технології обробки і вона застосовується для сплавів різного хімічного складу та фізичних властивостей (феромагнітні та не феромагнітні матеріали). Тому може існувати декілька варіантів механізму впливу у залежності від таких факторів, як питома потужність поля, частота, тривалість впливу та температурний інтервал, у якому проводиться обробка. Однак найбільш достовірним фактом є те, що накладення ЗКЕМП приводить до подрібнення структури.

На рис. 4 приведено мікроструктуру металу шва, який не піддавався впливу (ЗКЕМП), та шва, який виконано в умовах прикладення поля. Видно, що у обох випадках при збільшен-

ні $\times 200$ формується однорідна дисперсна структура (рис. 4 *a, б*). Явна різниця між структурами не виявляється. Однак при збільшеннях $\times 500$ (рис. 4 *в, г*) видно, що вплив ЗКЕМП робить структуру більш дисперсною. Ще одна особливість впливу ЗКЕМП становиться помітною при використанні збільшення $\times 1250$ (рис. 4 *д, е*). Вона полягає у тому, що крім подрібнення структури, змінюється морфологія зерен і вони перетворюються з витягнутих (рис. 4, *д*) на рівноосні (рис. 1, *е*). Раніше такий вплив поля був виявлений при дослідженні кристалізації неферомагнітного матеріалу (олов'янистої бронзи) [13], дані цього аналізу дозволяють припустити, що ефект має більш загальний характер.

Прояв цього ефекту видно і при аналізі структури зони сплавлення (рис. 2).

При збільшенні $\times 50$ (рис. 5 *a, б*) в зоні сплавлення виявляється первинна дендритна будова металу, яка в обох випадках подібна і ефект ЗКЕМП явно не виявляється, але при збільшеннях $\times 500$ (рис. 5, *в, г*) та $\times 1250$ (рис. 5, *д, е*) вид-

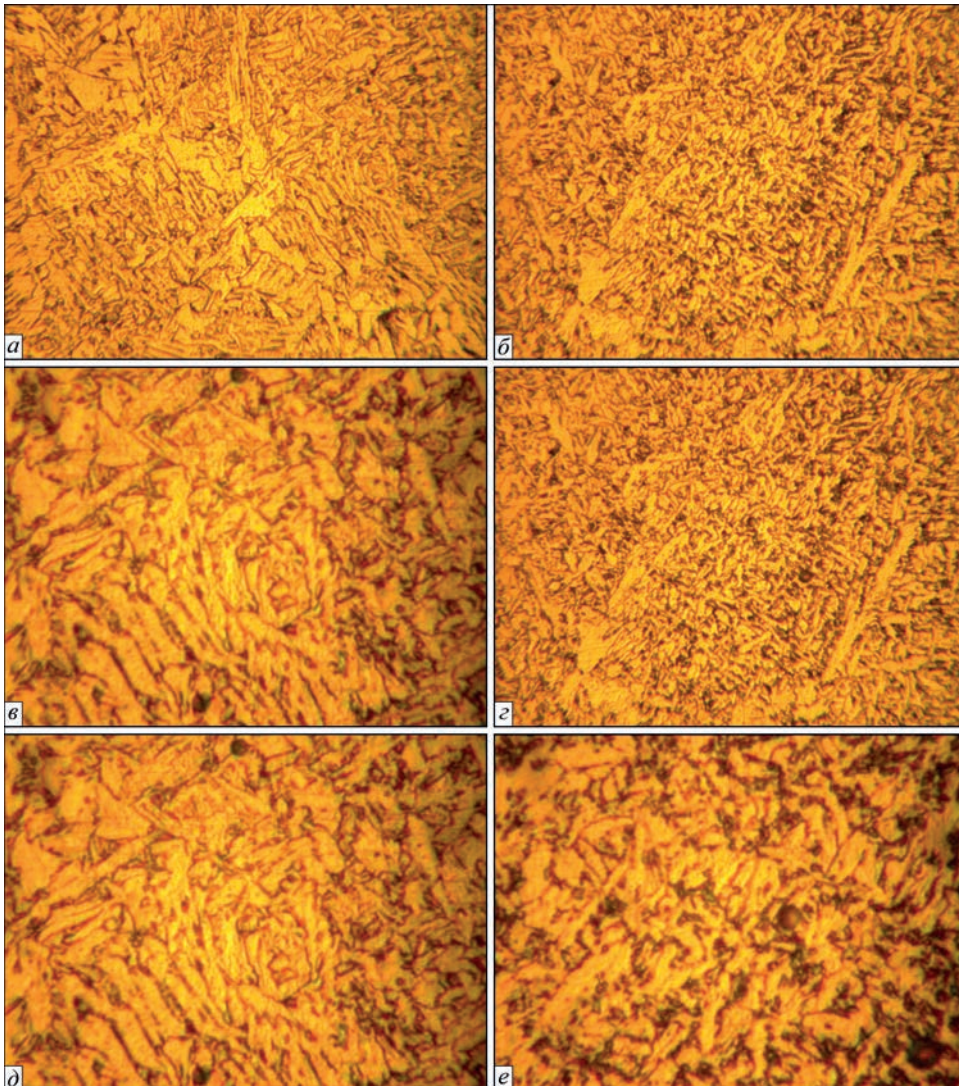


Рис. 4. Мікроструктура металу зварного шва без впливу (*a, в, д*) та з впливом (*б, г, е*) зовнішнього електромагнітного поля: *a, б* – $\times 200$; *в, г* – $\times 500$; *д, е* – $\times 1250$

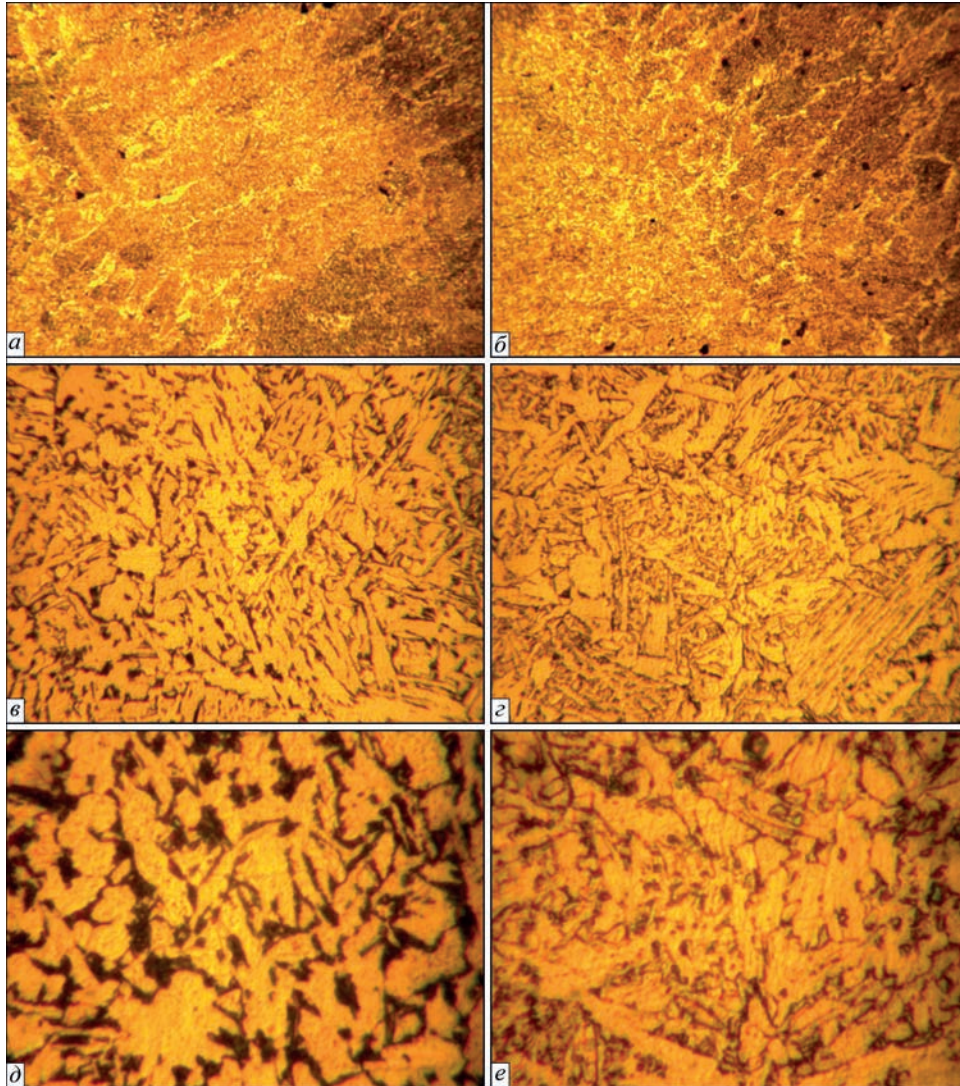


Рис. 5. Мікроструктура металу зони сплавлення без впливу (а, в, д) та з впливом (б, д, е) зовнішнього керуючого електромагнітного поля: а, б – $\times 50$; в, з – $\times 500$; д, е – $\times 1250$

но, що мікроструктура стає більш дисперсною і перлітні колонії практично зникають, змінючись рівномірно розподіленою карбідною фазою.

Встановлення розподілу мікротвердості металу зварних з'єднань з сталі 20, виконаних як з впли-

вом ЗКЕМП, так і без нього проводили з використанням мікротвердометру ПМТ-2 з навантаженням в 100 г (рис. 6).

Значення мікротвердості основного металу (сталі 20) знаходяться на рівні 1700 МПа (рис. 7 та рис. 8). В металі показники мікротвердості знаходяться в середньому на рівні 2000 МПа, що в свою чергу, скоріш за все, пов'язано з утворенням нової гартівної структури. Мікротвердість $HV, \text{ МПа}$

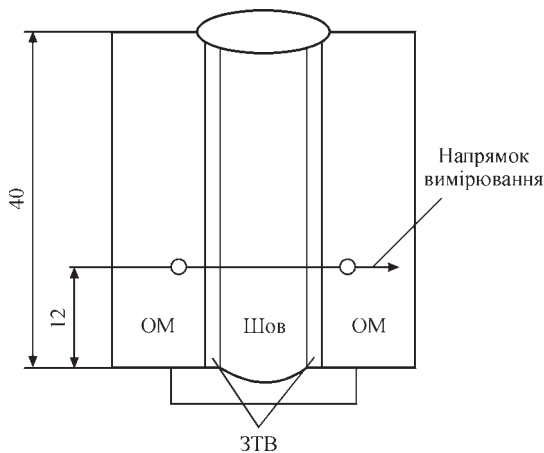


Рис. 6. Схема вимірювання розподілу мікротвердості в зварному з'єднанні сталі 20, виконаному ЗВЗ з присадним дротом Св-08Г2С діаметром 1,6 мм

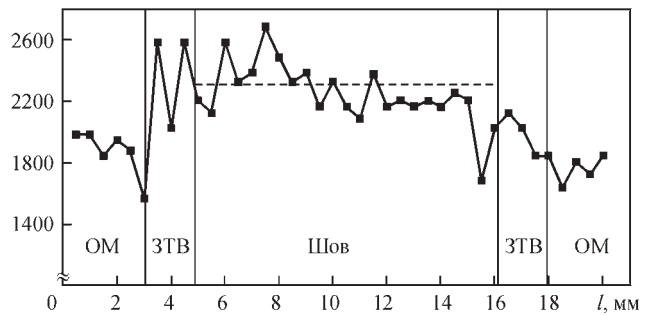


Рис. 7. Розподіл мікротвердості в зварному з'єднанні сталі 20, виконаному ЗВЗ з присадним дротом Св-08Г2С діаметром 1,6 мм, без впливу ЗУЕМП, в стані після зварювання

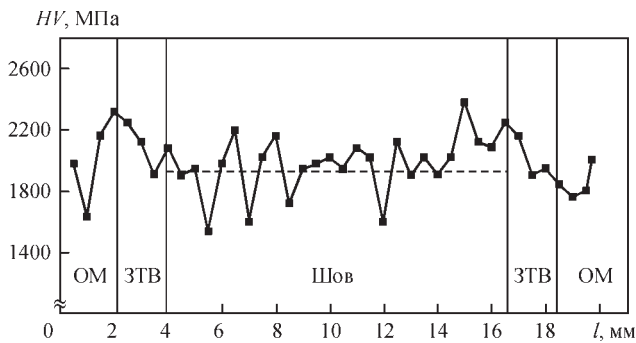


Рис. 8. Розподіл мікротвердості в зварному з'єднанні сталі 20, виконаному ЗВЗ з присадним дротом Св-08Г2С діаметром 1,6 мм, з впливом ЗКЕМП, в стані після зварювання

металу шва, отриманого без участі магнітного поля, знаходиться на рівні 2300 МПа (рис. 7), а металу шва, отриманого під впливом зовнішнього магнітного поля – на рівні 1900 МПа (рис. 8). Це може бути пов'язане з тим, що під час застосування зовнішнього магнітного впливу утворюється більш дрібнозерниста структура зі зміненою морфологією цементитної фази. Карбідні частки не утворюють колонії з пластинчатою морфологією, а розподілені рівномірно у фериті. Як наслідок метал шва, отриманий таким способом має більшу пластичність і меншу мікротвердість, ніж такий же зразок, отриманий без впливу зовнішнього магнітного поля.

Обговорення результатів. Технологія ЗВЗ вольфрамовим електродом із зовнішнім керуючим магнітним полем, що раніше добре зарекомендувала себе для зварювання титану та деяких інших кольорових металів може бути застосована для зварювання з'єднань, виготовлених із магнітних сталей, таких як сталь 20 завтовшки 40 мм, та більше. Магнітне керування перерозподілу теплової енергії зварювальної дуги виконує свою функцію – відхилення зварювальної дуги та зміщення анодної плями на необхідну величину, що забезпечує відсутність у швах непроварів, несплавлень і пор, при цьому проплавлення бічних стінок – рівномірне, з гарним формуванням шва. В зварних швах виконаних без застосування магнітного керування і без перерозподілу теплової енергії дуги фіксуються численні дефекти – непровари та несплавлення. Застосування ЗВЗ з магнітним керуванням зварювальною дугою дозволяє, також, збільшити коефіцієнт наплавки та довести подачу присадного металу присадного дроту Св-08Г2С діаметром 1,6 у зварювальну ванну до рівня 35 г/хв. Наплавляти методом ЗВЗ вольфрамовим електродом без магнітного керування з такою подачею присадного металу авторам не вдалося. Таким чином застосування магнітного керування зварювальною дугою дозволяє дещо компенсувати головний недолік аргоно-дугового зварювання вольфрамовим електродом – низьку продук-

тивність наплавлення. Крім того, дослідження мікроструктури зварних з'єднань та встановлення розподілу мікротвердості металу зварних з'єднань з сталі 20, виконаних як з впливом ЗКЕМП, так і без нього, дозволило зробити висновок, що в цілому рівень мікротвердості в шві з впливом ЗКЕМП характеризується високою рівномірністю без значних перепадів та надмірного зміцнення зони зварного шва у порівнянні з розподілом твердості у зразку, що отриманий без впливу ЗКЕМП. Це дозволяє очікувати більшої стійкості металу зварного з'єднання до дії динамічних та циклічних навантажень.

Таким чином використання ЗКЕМП в процесі зварювання дозволило не тільки запобігти формуванню дефектів макроструктури шва, але й позитивно вплинуло на його мікроструктуру. Подальші дослідження слід направити на встановлення залежності характеристик мікроструктури від параметрів ЗКЕМП з метою підсилення ефектів, що спостерігаються.

Висновки

1. Для зварювання з'єднань, виготовлених зі сталі 20 завтовшки 40 мм застосована технологія ЗВЗ вольфрамовим електродом із зовнішнім керуючим магнітним полем, що раніше добре зарекомендувала себе для зварювання титану та деяких інших кольорових металів.

2. Дослідження зварних швів, виконаних ЗВЗ вольфрамовим електродом із застосуванням зовнішнього керуючого магнітного поля показали практично повну відсутність у швах непроварів, несплавлень і пор, при цьому проплавлення бічних стінок – рівномірне, з гарним формуванням шва.

3. Виконані дослідження дозволяють зробити висновок про більш високу якість зварних з'єднань сталі 20, виконаних ЗВЗ вольфрамовим електродом із зовнішнім керуючим магнітним полем з подачею присадного матеріалу на рівні 20...25 г/хв, порівняно з ЗВЗ вольфрамовим електродом без зовнішнього магнітного керуючого поля.

4. Застосування зовнішнього керуючого електромагнітного поля в процесі зварювання з'єднань сталі 20 у вузький зазор позитивно вплинуло на мікроструктуру з'єднань. Мікроструктура з'єднань стала більш дисперсною, перлітні колонії зникають, змінюючись рівномірно розподіленою карбідною фазою, що супроводжується отриманням рівномірного розподілу мікротвердості металу зварного шва.

Список література/References

1. Ахонин, С.В., Белоус В.Ю., Романюк В.С. и др. (2010) Сварка в узкий зазор высокопрочных титановых сплавов толщиной до 110 мм. *Автоматическая сварка*, 5, 44-48.

- Akhonin, S.V., Belous, V.Yu., Romanyuk, V.S. et al. (2010) Narrow-gap welding of up to 110 mm thick high-strength titanium alloys. *The Paton Welding J.*, **5**, 34-37.
- Malin, V. (1987) Monograph on Narrow-Gap Welding Technology. WRC, Bulletin 323.
 - Хори К., Ханэда М. (1999) Дуговая сварка в узкий зазор. *Журн. Япон. свароч. общества*, **3**, 41–62.
 - Hori, K., Haneda, M. (1999) Narrow gap arc welding. *J. of J.W.S.*, **3**, 41–62.
 - Jun, J.H., Kim, S.R., Cho, S.M. (2016) A Study on Productivity Improvement in Narrow Gap TIG Welding. *Journal of Welding and Joining*, **34** (1), 68-74.
 - Dak, G., Khanna, N., Pandey, C. (2023) Study on narrow gap welding of martensitic grade P92 and austenitic grade AISI 304L SS steel for ultra-supercritical power plant application. *Archiv. Civ. Mech. Eng.* **23**, 14-24. <https://doi.org/10.1007/s43452-022-00540-3>
 - Luo, Y., Zhang, Z.L., Zhou, C.F. et al. (2017) Effect of oscillation parameters of narrow groove MAG welding on weld formation. *J. Hebei Univ. Sci. Technol*, **38**, **6**. <https://doi.org/10.7535/hbkd.2017yx01002>
 - Nguyen, D.H. (2014) *Research on Droplet Transfer and Welding Process of Oscillation arc Narrow Gap GMAW*. Master's Thesis, Harbin Institute of Technology, Harbin, China.
 - Fang, D.S. (2017) *Study on the Characteristics of Three-Wire Indirect arc and Its Thick-Wall Narrow Gap Welding Process under Gas Protection*. Ph.D. Thesis, Dalian University of Technology, Dalian China.
 - Shoichi, M., Yukio, M., Koki, T. et al. (2013) Study on the application for electromagnetic controlled molten pool welding process in overhead and flat position welding. *Sci. Technol. Weld. Join.* **18**, 38–44. <https://doi.org/10.1179/1362171812Y.0000000070>
 - Белоус В.Ю., Ахонин С.В. (2007) Влияние параметров управляющего магнитного поля на формирование сварных швов титановых сплавов при сварке в узкий зазор. *Автоматическая сварка*, **4**, 3–6.
 - Belous, V.Yu., Akhonin, S.V. (2007) Influence of controlling magnetic field parameters on weld formation in narrow-gap argon-arc welding of titanium alloys. *The Paton Welding J.*, **4**, 2-5.
 - Xinyu, B., Yonglin, M., Shuqing, X. et al. (2022) Effects of Pulsed Magnetic Field Melt Treatment on Grain Refinement of Al-Si-Mg-Cu-Ni Alloy Direct-Chill Casting Billet. *Metals*, **12**(7), 1080. <https://doi.org/10.3390/met12071080>
 - Yujun, H., Hongjin, Z., Xuede, Y. et al. (2022) Research Progress of Magnetic Field Regulated Mechanical Property of Solid Metal Materials. *Metals*, **12**, 1988. <https://doi.org/10.3390/met12111988>
 - Pashynskaya, E.G., Pashynskiy, V.V. (1998) Effect of weakpulsed magnetic field on structure and properties of Cu-Sn base alloy. *Physic of Metals and Metallography*, **6**, 670-674.
 - Ахонин С.В., Белоус В. Ю. (2011) Формирование сварного соединения при сварке титана в узкий зазор с управляющим магнитным полем. *Автоматическая сварка*, **4**, 22-26.
 - Belous, V.Yu., Akhonin, S.V. (2011) Formation of narrow-gap welded joints on titanium using the controlling magnetic field. *The Paton Welding J.*, **4**, 19-22.

NARROW-GAP TIG WELDING OF THICK STEEL 20

S.V. Akhonin, V.Yu. Bilous, R.V. Selin, V.V. Pashynskiy, S.L. Shvab

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

E-mail: belousvy@gmail.com

Arc welding of joints of carbon steels 20...100 mm thick can be performed both by consumable and nonconsumable electrode, using shielding gases or flux. In order to increase the efficiency of welding operations, multilayer narrow-gap welding with filler wire feeding can be used for metals of medium and large thicknesses. This study deals with application of narrow-gap tungsten electrode welding with and without application of a controlling magnetic field for welding samples from steel 20 of 40 mm thickness. Results of investigations of the macro- and microstructure and microhardness of the welded joints are given. It was found that application of an external magnetic field for narrow-gap welding of steel 20 joints ensures a higher quality of the welded joints. 14 Ref., 8 Fig.

Keywords: narrow-gap argon-arc welding, tungsten electrode, steel 20, controlling magnetic field, structure, microstructure, microhardness

Надійшла до редакції 16.05.2023



Обладнання для ТІГ зварювання у вузький зазор

ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТІВ, ОТРИМАНІХ ВИСОКОШВИДКІСНИМ ГАЗОПОЛУМЕНЕВИМ НАПИЛЕННЯМ КОМПОЗИЦІЙНИХ ПОРОШКІВ НА ОСНОВІ СПЛАВУ FeMoNiCrB, ЩО АМОРФІЗУЄТЬСЯ

Н.В. Вігілянська¹, Ц. Сендеровскі², К.В. Янцевич¹, **О. І. Духота**³

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

²Варшавський політехнічний університет. 00661, Польща, м. Варшава, пл. Політехніки, 1

³Національний авіаційний університет. 03058, м. Київ, просп. Любомира Гузара, 1

Методом високошвидкісного газополуменевого напилення з використанням механічно-легованих порошків на основі сплаву FeMoNiCrB, що аморфізується, з добавками сполук (Ti, Cr)C та FeTiO₃ одержані покриття з аморфно-кристалічною гетерофазною структурою. Покриття систем FeMoNiCrB-(Ti, Cr)C та FeMoNiCrB-FeTiO₃ мають щільну дрібнозернисту структуру з пористістю 2,4 та 1,2 % та твердістю 5510 ± 250 та 4410 ± 190 МПа, відповідно. Проведено дослідження корозійної тривкості та стійкості до фретинг-корозії розроблених покриттів. Показано, що використання в якості матеріалів для напилення композиційних порошків на основі сплаву FeMoNiCrB з додаванням сполук (Ti, Cr)C та FeTiO₃ дозволяє підвищити захисні властивості покриттів, порівняно з покриттям зі сплаву FeMoNiCrB. Встановлено, що у випадку нанесення композиційних покриттів FeMoNiCrB-(Ti, Cr)C та FeMoNiCrB-FeTiO₃ на сталеву основу Ст3 корозійна тривкість зразків у розчинах 3%-го NaCl, 10%-го H₂SO₄ та 10%-го KOH підвищується у 7,3, 9; 3,9, 5,3 та 9,5, 9,7 разів, відповідно. Покриття FeMoNiCrB-(Ti, Cr)C та FeMoNiCrB-FeTiO₃ володіють досить високою стійкістю до фретинг-корозії, яка в 4,6 та 5,8 разів перевищує стійкість титанового сплаву OT4-1. Отримані результати свідчать про перспективність використання високошвидкісного газополуменевого напилення розроблених покриттів FeMoNiCrB-(Ti, Cr)C та FeMoNiCrB-FeTiO₃ для зміцнення-відновлення поверхонь, що працюють в агресивних середовищах та підвержених фретинг-корозії. Бібліогр. 26, табл. 6, рис. 4.

Ключові слова: високошвидкісне газополуменеве напилення, аморфна фаза, аморфний сплав на основі заліза, композиційне покриття, корозійна тривкість, фретинг-корозія

Вступ. У порівнянні з кристалічними матеріалами матеріали з аморфною структурою внаслідок відсутності границь зерен і дислокацій мають такі властивості, як висока міцність, висока межа пружності, зносостійкість і корозійна стійкість [1]. Серед систем аморфних металевих матеріалів сплави на основі заліза представляють великий інтерес для використання в промисловості не тільки через їх властивості, а й через відносно низьку вартість і доступність матеріалу [2]. Крім того, знижений вміст або відсутність Ni і Co в сплавах на основі заліза, що аморфізуються, робить використання цих сплавів економічно більш вигідним, ніж стандартних матеріалів на основі нікелю і кобальту (таких як сплави, що самофлюсуються, Ni-Cr-B-Si, стелітні сплави і т. д.).

Застосування Fe-сплавів, що аморфізуються, в якості матеріалів для газотермічного напилення покриттів дозволяє формувати на поверхні деталей шари з аморфною і нанокристалічною структурою, які володіють захисними властивостями. Для формування покриттів на основі аморфних Fe-сплавів застосовують методи плазмового [3, 4], надзвукового плазмового [5], електродугового

[6], детонаційного [7, 8], високошвидкісного газополуменевого (High Velocity Oxygen Fuel (HVOF), High Velocity Air Fuel (HVAF)) [9, 10] напилення. Покриття, що одержуються, характеризуються поєднанням твердості, корозійної стійкості і зносостійкості, здатності поглинати нейтрони та гідрофобністю, що робить їх досить перспективними для застосування в різних областях (військовій, атомній, нафтогазовій та інших галузях промисловості) [11].

Захисні властивості можуть бути додатково покращені шляхом додавання в покриття невеликої (до 30 об. %) кількості керамічних частинок (наприклад, WC/Co, B₄C, TiN, Al₂O₃, ZrO₂ та ін.). Композиційні покриття систем FeSiBCrMo-TiN, FeCSiBPCrMoAl-B₄C, FeCrMoCB-WC/Co, отримані методами плазмового та HVOF напилення, мають не тільки більш високу твердість, але й самозмащуваність, демонструючи підвищену зносостійкість у 2...5 разів порівняно з однофазним покриттям [12–14]. Показано [15], що введення 20 мас. % ZrO₂ у плазмове покриття на базі FeCrMoCB в 2 рази підвищує зносостійкість покриття в умовах тертя-ковзання; в плазмове покриття на базі

Вігілянська Н.В. – <https://orcid.org/0000-0001-8576-2095>, Сендеровскі Ц. – <https://orcid.org/0000-0002-0331-3702>,

Янцевич К.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3975-7727>, **Духота О.І.** – <https://orcid.org/0000-0001-8091-1717>

© Н.В. Вігілянська, Ц. Сендеровскі, К.В. Янцевич, **О.І. Духота**, 2023

сплаву FeCrNbBSi – теплозахисні властивості [16]. Введення 20 мас. % Al_2O_3 до покриття сплаву FeCrMoCBY, напиленого методом HVOF, підвищує зносостійкість та корозійну стійкість покриттів у середовищі 3,5 % NaCl у 2...3 рази [17].

Метою роботи було дослідження корозійної стійкості та стійкості до фретинг-корозії композиційних покриттів, отриманих методом високошвидкісного газополуменевого напилення (ВШГПН) порошків на основі сплаву FeMoNiCrB, що аморфізується, з додаванням до їх складу зміцнюючих сполук (Ti, Cr)C та $FeTiO_3$.

Матеріали та методики досліджень. В якості матеріалів для ВШГПН покриттів використовували порошок сплаву FeMoNiCrB, що аморфізується, і композиційні керметні порошки на базі сплаву FeMoNiCrB зі зміцнюючими добавками подвійного карбиду (Ti, Cr)C і титанату заліза $FeTiO_3$. Вибір зміцнюючих компонентів досліджуваних покриттів ґрунтувався на їх корозійній стійкості та трибологічних характеристиках [18, 19]. Композиційні порошки одержували шляхом механічного легування у планетарному млині «Активатор 2SL» сумішей порошків, що складаються зі сплаву FeMoNiCrB та добавки однієї зі сполук (Ti,Cr)C (твердий розчин 24 об. % Cr_3C_2 у TiC) та $FeTiO_3$ (ільменіт). Вміст зміцнюючого компонента в порошковій суміші вибрано на підставі рекомендацій з розробки керметних покриттів на основі аморфних Fe-сплавів, згідно з якими оптимальним вмістом зміцнюючих фаз в керметних покриттях є 10...30 об. % [12–17, 20]. В результаті механічного легування (МЛ) були сформовані аморфно-нанокристалічні керметні порошки на основі твердого пересиченого розчину Fe(Ni, Cr) з добавками зміцнюючих фаз. Детальний опис процесу механічного легування порошків цих складів наведено у роботі [21]. У табл. 1 наведено характеристики порошків, використаних у даній роботі для ВШГПН-покриттів.

Високошвидкісне газополуменеве напилення покриттів проводили за допомогою установки УВШГПН-М1 з використанням наступних технологічних параметрів [22]: тиск пропан-бутану – 4 атм, тиск кисню – 7 атм, тиск повітря – 6 атм, тиск азоту – 5 атм, дистанція напилення 120 мм. Для підвищення міцності зчеплення зі сталеву основою керметні покриття FeMoNiCrB–(Ti, Cr)

С та FeMoNiCrB– $FeTiO_3$ напилювали на підшар NiCr (товщина 50...100 мкм), який було нанесено методом електродугового напилення.

Для дослідження структури покриттів використовували методи металографії (мікроскоп NEOPHOT 32, оснащений приставкою для цифрової зйомки марки SIGETA); мікродюрометричний аналіз покриттів проводили на мікротвердомірі ПМТ-3 при навантаженні на індентор 50 г. Рентгеноструктурний фазовий аналіз (РСФА) виконували на дифрактометрі ДРОН-3 в $CuK\alpha$ -випромінюванні з графітовим монохроматором при кривому переміщенні $0,1^\circ$ та часом експозиції в кожній точці 4с з подальшою комп'ютерною обробкою отриманих цифрових даних. Ідентифікацію фаз проводили з використанням бази даних ASTM. Пористість покриттів визначали на металографічних шліфах методом аналізу зображення (стандарт) ASTM B-276 за допомогою програми «Image-Pro Plus».

Корозійну тривкість покриттів, нанесених на зразки зі Ст3 завтовшки 500 мкм, досліджували потенціостатичним методом на потенціостаті П-5827М при швидкості розгортки 2 мВ/с в розчинах 10% H_2SO_4 , 3% NaCl та у 10% KOH. Дані електроліти були обрані для дослідження впливу природи агресивного середовища (різного виду аніонів) на корозійні процеси. В якості електроду порівняння застосовували хлоридсрібний електрод, допоміжним електродом слугувала платина. За експериментальними значеннями були побудовані катодні і анодні поляризаційні криві в координатах: $E = f(\lg i)$, де E_c – потенціал корозії, В; i_c – струм, А/см² [23, 24]. Струм корозії і потенціал корозії визначали графічним методом по поляризаційним кривим шляхом екстраполяції тафелевих ділянок катодної та анодної кривих до $E = E_c$. Використовуючи значення струмів корозії був розрахований масометричний (K_B) та глибинний (K_P) показники корозії за формулами [23]:

$$K_B = \frac{i \cdot A \cdot 1000}{n \cdot F},$$

де K_B – ваговий показник корозії, г/м²·год; i – струм корозії, А/см²; A – атомна вага металу, г/моль, (для заліза та сталі $A = 56$); n – валентність іона металу, який перейшов в розчин (для заліза $n = 2$); F – число Фарадея, 26,8 А·год/моль;

Таблиця 1. Характеристика порошків для високошвидкісного газополуменевого напилення покриттів

| Склад, мас. % | Розмір частинок, мкм | Метод отримання | Фазовий склад |
|--|----------------------|----------------------------|---|
| FeMoNiCrB (36,2Fe–29,9Mo–23,6Ni–7,6Cr–2,7B) | <40 | Розпилення розплаву азотом | Твердий розчин Fe(Ni, Cr), Fe_2B , Mo_2FeB_2 , CrB_2 |
| 77FeMoNiCrB–23(Ti, Cr)C | <40 | МЛ 1,5 год | Твердий розчин Fe(Ni, Cr), Mo_2FeB_2 , (Ti, Cr)C, TiC, Cr_3C_2 , аморфна фаза |
| 75FeMoNiCrB–10 $FeTiO_3$ | <40 | МЛ 1,5 год | Твердий розчин Fe(Ni, Cr), Mo_2FeB_2 , $FeTiO_3$, аморфна фаза |

$$K_{\Pi} = K_{\text{в}} \cdot \frac{8,76}{\rho},$$

де K_{Π} – глибинний показник корозії, мм/рік; ρ – густина металу, г/см³ ($\rho_{\text{Fe}} = 7,85$ г/см³); 8,76 – перекладний коефіцієнт для переходу від вагового показника корозії до розрахунку на 1 год до глибинного показника до 1 року, розрахований з кількості годин на рік (24 год 365 = 8760 год) і розділений на 1000.

Захисну дію покриттів оцінювали за допомогою коефіцієнту гальмування швидкості корозії γ :

$$\gamma = \frac{K_{\text{в}}(\text{с})}{K_{\text{в}}(\Pi)},$$

де γ – коефіцієнт гальмування корозії; $K_{\text{в}}(\text{с})$ і $K_{\text{в}}(\Pi)$ – ваговий показник швидкості корозії сталі та сталі з покриттями в корозійних середовищах (г/м²·год).

Ступінь захисту від корозії $Z(\%)$ розраховували за формулою:

$$Z = \frac{K_{\text{в}}(\text{с}) - K_{\text{в}}(\Pi)}{K_{\text{в}}(\text{с})} \cdot 100\%.$$

Для порівняльної характеристики корозійної стійкості була використана десятибальна шкала оцінки, заснована на використанні глибинного показника корозії (K_{Π}) [23].

Випробування з оцінювання порівняльної зносостійкості досліджуваних покриттів проводилось в умовах фретинг-корозійного зношування.

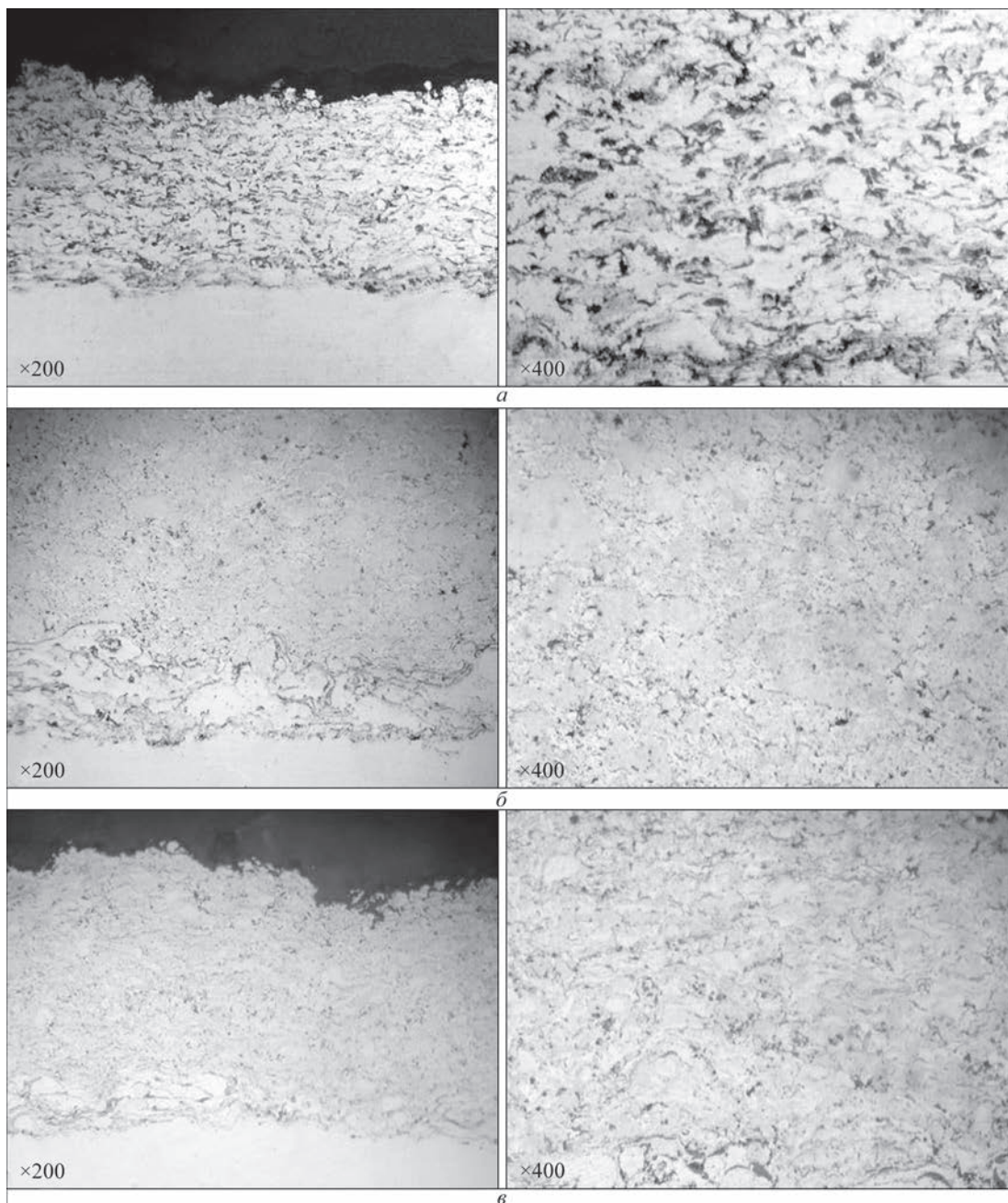


Рис. 1. Мікроструктура покриттів, отриманих методом ВШГПН: а – FeNiCrMoB; б – FeNiCrMoB – (Ti, Cr)C; в – FeNiCrMoB–FeTiO₃

Товщина покриттів складала 500 мкм, після напилення було проведено механічну обробку із збереженням товщини 300 мкм, включаючи підшар.

Умови віброциклічного навантаження: амплітуда відносного вібраційного переміщення зразків $A = 120$ мкм, питоме навантаження на контактні поверхні зразків $P = 20$ МПа, частота коливань $f = 25$ Гц, кількість циклів вібропереміщень зразків (база випробувань) $N = 5 \cdot 10^5$ цикл. Зразки випробувались на повітрі за температури $T = 293$ К. У кожній парі тертя нерухомими були зразки з досліджуваними покриттями, рухомими – контрзразки із сталі 45, загартованої на твердість $HRC \sim 48...50$ од. Базовим варіантом для порівняння зносостійкості слугував титановий сплав ОТ4-1. Після випробування визначався знос зразків лінійним методом.

Результати досліджень та їх обговорення.

Дослідження мікроструктури ВШГПН-покриттів (рис. 1) показало, що при напиленні як порошок сплаву FeMoNiCrB, так і композиційних порошоків FeNiCrMoB-(Ti, Cr)C та FeNiCrMoB-FeTiO₃ формуються щільні, однорідні по товщині покриття. Пористість та мікротвердість покриттів FeMoNiCrB, FeNiCrMoB-(Ti, Cr)C та FeNiCrMoB-FeTiO₃ складає 3,4, 2,4, 1,2 % та 4390, 5510 та 4410 МПа, відповідно. Покриття мають типову для ВШГПН дрібнозернисту структуру, яка сформована з повністю розплавлених частинок, що розтеклися і кристалізувалися, та частково деформованих частинок, що мають овальну та близьку до сферичної форми. На границях частково деформованих частинок спостерігаються прошарки темно-сірого кольору, що є ре-

зультатом взаємодії в процесі напилення частинок порошку з киснем та утворенням оксидних шарів.

Рентгенофазовим аналізом (рис. 2) встановлено, що в результаті ВШГПН порошоків на основі сплаву FeMoNiCrB формуються багатофазні покриття з аморфно-кристалічною структурою.

Фазовий склад отриманих покриттів дещо відрізняється від фазового складу вихідних порошоків. При напиленні кристалічного порошку FeNiCrMoB відбувається його часткова аморфізація, про що свідчить наявність на рентгенограмі гало від аморфної фази (рис. 2, а). При напиленні композиційних порошоків відбувається взаємодія вихідного сплаву FeNiCrMoB зі зміцнюючими добавками з утворенням фази Fe₂Ti в покритті FeNiCrMoB-(Ti, Cr)C (рис. 2, б) та фази NiTi в покритті FeNiCrMoB-FeTiO₃ (рис. 2, в). В усіх покриттях присутні оксиди заліза, причому в композиційних покриттях FeMoNiCrB-(Ti, Cr)C та FeMoNiCrB-FeTiO₃ вони наявні в невеликій кількості. Слід зазначити, що за рахунок утворення в покритті FeNiCrMoB-(Ti, Cr)C твердих фаз карбонітриду титану воно має дещо більшу (на 1100 МПа) мікротвердість в порівнянні з покриттям FeNiCrMoB.

Характеристику ВШГПН-покриттів на основі сплаву FeMoNiCrB наведено в табл. 2.

Дослідження кінетики електродних потенціалів покриттів на основі FeMoNiCrB у досліджених електролітах дозволило встановити, що значення стаціонарного потенціалу стабілізується через 15...40 хв. На поверхні покриттів потенціал корозії зсувається у позитивну сторону, в порівнянні зі зразком Ст3, струм корозії знижується на один-два

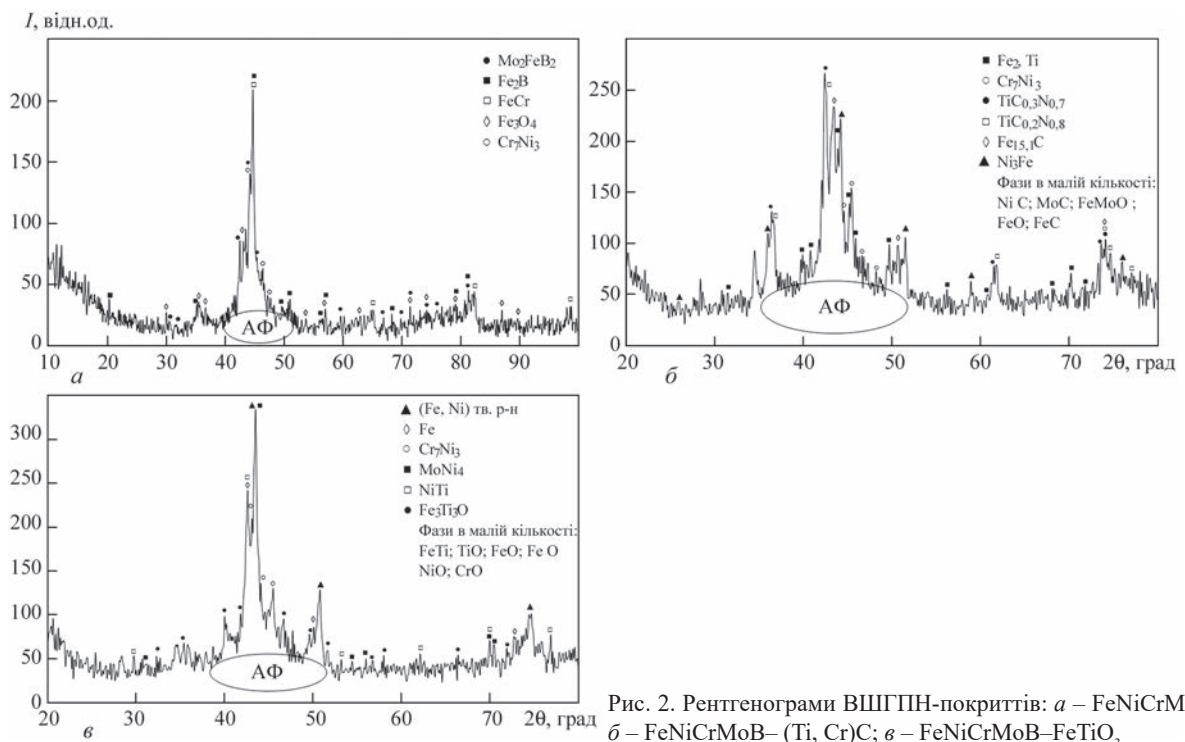


Рис. 2. Рентгенограми ВШГПН-покриттів: а – FeNiCrMoB; б – FeNiCrMoB-(Ti, Cr)C; в – FeNiCrMoB-FeTiO₃

Таблиця 2. Характеристика покриттів на основі сплаву FeMoNiCrB, отриманих методом високошвидкісного газополуменевого напильня

| Матеріал покриття | Пористість, % | Мікротвердість $HV_{0,05}$, МПа | Фазовий склад |
|------------------------------|---------------|----------------------------------|---|
| FeMoNiCrB | $3,4 \pm 0,7$ | 4390 ± 290 | Mo_2FeB_2 ; Fe_2B ; $FeCr$; Fe_3O_4 ; Cr_7Ni_3 ; аморфна фаза |
| FeMoNiCrB-(Ti, Cr)C | $2,4 \pm 0,4$ | 5510 ± 250 | Fe_2Ti ; Cr_7Ni_3 ; $TiC_{0,3}N_{0,7}$; $TiC_{0,2}N_{0,8}$; $Fe_{15}C$; Ni_3Fe ; аморфна фаза; фази в малій кількості: Ni_3C ; MoC ; $FeMoO_4$; FeO ; FeC_8 |
| FeMoNiCrB-FeTiO ₃ | $1,2 \pm 0,3$ | 4410 ± 190 | твердий розчин (Fe, Ni); Cr_7Ni_3 ; $MoNi_4$; $NiTi$; Fe_3Ti_3O ; аморфна фаза; фази в малій кількості: $FeTi$; TiO ; FeO ; Fe_3O_4 ; NiO ; CrO |

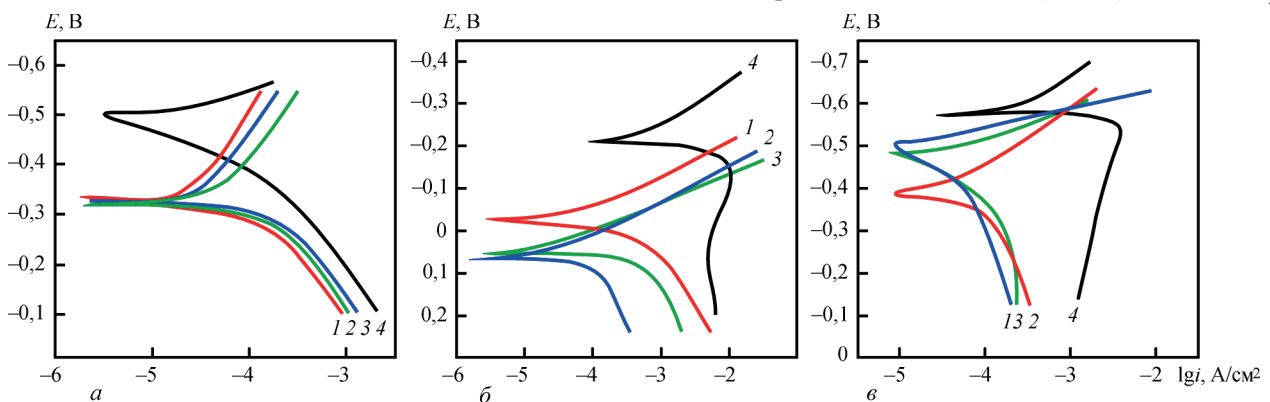
порядки, відбувається гальмування як катодного, так і анодного процесу (рис. 3). У 10%-му розчині H_2SO_4 відбувається зниження перенапруги виділення водню на поверхні покриттів, у 3%-му розчині NaCl та у 10%-му розчині KOH відбувається гальмування процесу відновлення кисню (рис. 3). Незалежно від складу покриття у розчині 3%-го NaCl катодні та анодні поляризаційні криві мають практично однаковий хід, у 10%-му розчині H_2SO_4 та у 10%-му розчині KOH на анодних поляризаційних кривих з'являються ділянки пасивного стану. На поверхні зразків з покриттями після експонування в цих розчинах відсутні пітинги та виразки. Після очищення поверхні темніють, що свідчить про перебіг анодного розчинення.

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що для всіх досліджених покриттів струм корозії в 3%-му NaCl (pH 7) та у 10 % KOH (pH 11) є на порядок вищим, ніж у розчині 10% H_2SO_4 (pH 2-3), тобто швидкість корозії корелює з pH розчину. Також на корозійну тривкість впливає зміна характеру деполяризації корозійного процесу (від водневої у розчині сульфатної кислоти до

переважно кисневої у розчині 3%-го хлориду натрію та розчині луку).

Електрохімічні дослідження у 3%-му розчині NaCl показали, що на зразках з покриттями струм корозії знижується на порядок, відносно зразків Ст3 без покриття (з $2 \cdot 10^{-5}$ для сталі до $2,9 \dots 6,5 \cdot 10^{-6}$ А/см² для покриттів) (табл. 3). Відсутність пасивації в 3%-му NaCl може бути обумовлена тим, що цей розчин належить до агресивного з високим вмістом Cl⁻, в присутності якого відбувається поступове витіснення кисню з захисної плівки на поверхні електроду та неможливістю формування пасивної плівки. У 10%-му розчині H_2SO_4 на поверхні покриттів, відносно зразків Ст3 без покриття, відбувається зміщення потенціалу корозії в область пасивного стану, струм корозії знижується на два порядки (з $3 \cdot 10^{-3}$ для сталі до $2,5 \dots 5,8 \cdot 10^{-5}$ А/см² для покриттів). Дослідження покриттів у 10%-му розчині KOH показали, що відносно зразків Ст3 без покриття, струм корозії знижується на один порядок (з $4 \cdot 10^{-5}$ для сталі до $4 \dots 5 \cdot 10^{-6}$ А/см² для покриттів).

Встановлено, що при використанні композиційних порошоків з добавками (Ti, Cr)C та FeTiO₃

Рис. 3. Поляризаційні криві ВШГПН-покриттів у 3%-му розчині NaCl (а), у 10%-му розчині H_2SO_4 (б), у 10%-му розчині KOH (в) (1 – FeMoNiCrB; 2 – FeMoNiCrB-(Ti,Cr)C; 3 – FeMoNiCrB-FeTiO₃; 4 – Ст3)

Таблиця 3. Результати електрохімічних випробувань ВШГПН-покриттів

| Покриття | 3 % NaCl | | | 10 % H_2SO_4 | | | 10 % KOH | | |
|------------------------------|--------------|-----------|---------------------------|----------------|-----------|---------------------------|--------------|-----------|---------------------------|
| | E_{cp} , В | E_c , В | i_c , А/см ² | E_{cp} , В | E_c , В | i_c , А/см ² | E_{cp} , В | E_c , В | i_c , А/см ² |
| FeMoNiCrB | -0,43 | -0,44 | $6,5 \cdot 10^{-4}$ | -0,2 | -0,18 | $5,8 \cdot 10^{-5}$ | -0,44 | -0,4 | $5 \cdot 10^{-4}$ |
| FeMoNiCrB-(TiCr)C | -0,38 | -0,34 | $4,3 \cdot 10^{-6}$ | -0,06 | -0,04 | $4,2 \cdot 10^{-5}$ | -0,50 | -0,48 | $4,2 \cdot 10^{-6}$ |
| FeMoNiCrB-FeTiO ₃ | -0,34 | -0,3 | $2,9 \cdot 10^{-6}$ | -0,06 | -0,05 | $2,5 \cdot 10^{-5}$ | -0,56 | -0,53 | $4 \cdot 10^{-6}$ |
| Зразок Ст3 без покриття | -0,52 | -0,5 | $2 \cdot 10^{-5}$ | -0,24 | -0,22 | $3 \cdot 10^{-3}$ | -0,6 | -0,58 | $4 \cdot 10^{-5}$ |

Таблиця 4. Корозійна тривкість ВШГПН-покриттів у 3%-му розчині NaCl

| Покриття | K_v , г/м ² год | K_p , мм/рік | γ | Z, % | Бал корозійної тривкості |
|------------------------------|------------------------------|----------------|----------|------|--------------------------|
| FeMoNiCrB | 0,052 | 0,05 | 5,8 | 82,7 | 4 |
| FeMoNiCrB-(TiCr)C | 0,036 | 0,04 | 7,3 | 86,3 | 4 |
| FeMoNiCrB-FeTiO ₃ | 0,031 | 0,032 | 9,0 | 89,2 | 4 |
| Ст3 без покриття | – | 0,293 | – | – | 6 |

Таблиця 5. Корозійна тривкість ВШГПН-покриттів у 10%-му розчині H₂SO₄

| Покриття | K_v , г/м ² год | K_p , мм/рік | γ | Z, % | Бал корозійної тривкості |
|------------------------------|------------------------------|----------------|----------|------|--------------------------|
| FeMoNiCrB | 0,18 | 0,16 | 3,6 | 72,2 | 6 |
| FeMoNiCrB-(TiCr)C | 0,16 | 0,15 | 3,9 | 74,3 | 6 |
| FeMoNiCrB-FeTiO ₃ | 0,12 | 0,11 | 5,3 | 81,1 | 6 |
| Ст3 без покриття | – | 0,59 | – | – | 7 |

Таблиця 6. Корозійна тривкість ВШГПН-покриттів у 10%-му розчині КОН

| Покриття | K_v , г/м ² год | K_p , мм/рік | γ | Z, % | Бал корозійної тривкості |
|------------------------------|------------------------------|----------------|----------|------|--------------------------|
| FeMoNiCrB | 0,05 | 0,056 | 8,2 | 87,8 | 4 |
| FeMoNiCrB-(TiCr)C | 0,044 | 0,048 | 9,5 | 89,4 | 4 |
| FeMoNiCrB-FeTiO ₃ | 0,042 | 0,047 | 9,7 | 89,6 | 4 |
| Ст3 без покриття | – | 0,34 | – | – | 6 |

корозійна тривкість в досліджуваних розчинах підвищується в 1,2...2,3 рази відносно покриття зі сплаву FeMoNiCrB. Найбільшу корозійну тривкість має покриття FeMoNiCrB-FeTiO₃, що може бути пов'язано з його низькою пористістю та наявністю в фазовому складі сполук NiTi та складного оксиду Fe₃Ti₃O, які підвищують корозійну тривкість (табл. 2).

Значення струмів корозії, обчислених з поляризаційних кривих, дозволили розрахувати ваговий і глибинний показники корозії (табл. 4–6).

За десятибальною шкалою корозійної тривкості [24] аморфні покриття на основі сплаву FeMoNiCrB у 3 %-му розчині NaCl та у 10%-му розчині КОН мають бал стійкості 4 та відносяться до групи «стійких», 10%-му розчині H₂SO₄ мають бал стійкості 6 та відносяться до групи «знижено стійких».

Проведені електрохімічні випробування показали, що при нанесенні композиційних покриттів на основі FeMoNiCrB швидкість корозії Ст3 у 3%-му розчині NaCl, у 10%-му розчині H₂SO₄ та у 10%-му розчині КОН знижується в 7,3... 9, 3,9... 5,3 та у 9,5...9,7 разів, відповідно; ступінь захисту при цьому складає 86,3... 89,2, 74,3...81,1 та 89,4... 89,6 %, відповідно.

Результати проведених досліджень ВШГПН-покриттів на основі сплаву FeMoNiCrB свідчать про їх корозійну тривкість у 3%-му розчині NaCl на рівні сплаву ВТ-6 ($i_c \sim 10^{-6}$ А/см²) [25].

Результати досліджень покриттів на стійкість до фретинг-корозії (рис. 4) показали, що зносостійкість ВШГПН-покриттів FeMoNiCrB, FeNiCrMoB-(Ti, Cr)C та FeNiCrMoB-FeTiO₃ пе-

ревищує зносостійкість титанового сплаву ОТ4-1 в 3,3, 4,6 та 5,8 разів, відповідно. Така висока зносостійкість покриттів досягається завдяки специфічності структури покриттів гетерогенного типу, де тверді включення рівномірно розподілені у м'якшій в'язкій матриці. В умовах фретинг-корозії та під дією високих питомих навантажень в процесі експлуатації пластикна матриця легко переноситься на сполучену поверхню, захищає її від пошкоджень і сприяє релаксації напружень [26]. Наявність дисперсних твердих включень, що сприймають основне силове навантаження, зумовлює підвищення опору контактуючих матеріалів втомному руйнуванню.

Згідно з результатами проведених досліджень, найбільш фретингостійким є композиційне покриття FeNiCrMoB-FeTiO₃, а ряди за зростанням стійкості ВШГПН-покриттів мають вигляд: FeMoNiCrB → FeNiCrMoB-(Ti, Cr)C → FeNiCrMoB-FeTiO₃. Така закономірність, вочевидь, пов'язана з відносним вмістом пор в покриттях, оскільки пористість знижує стійкість по-

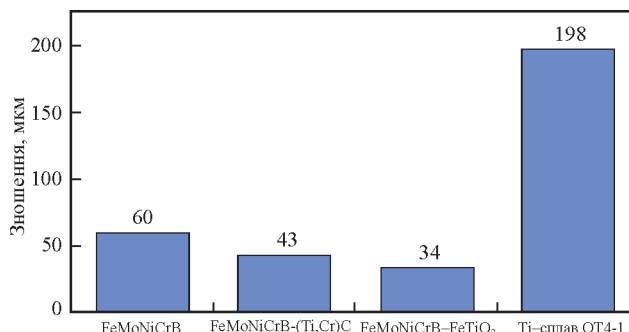


Рис. 4. Результати досліджень ВШГПН-покриттів на стійкість до фретинг-корозії

криттів в умовах тертя без мастильних матеріалів з огляду на те, що пори є концентраторами напружень та зародками мікротріщин.

Виходячи з проведених досліджень захисних властивостей отримані композиційні ВШГПН-покриття на основі сплаву FeNiCrMoV, що аморфізується, можуть бути запропоновані для підвищення стійкості деталей машин і механізмів, що експлуатуються в умовах агресивних середовищ та схильних до руйнування при фретинг-корозії, зокрема, для захисту титанових деталей авіаційної техніки.

Висновки

Методом високошвидкісного газополуменевого напилення з використанням механічно-легованих порошків на основі сплаву FeMoNiCrB, що аморфізується, з добавками (Ti, Cr)C та FeTiO₃ сполук отримані щільні гетерогенні покриття, пористість яких не перевищує 3 %. Результати фазового аналізу покриттів FeMoNiCrB–(Ti, Cr)C та FeMoNiCrB–FeTiO₃ свідчать про їх аморфно-кристалічну структуру.

Корозійна тривкість газотермічних композиційних покриттів на базі сплаву FeMoNiCrB виміряна у розчинах 3%-го NaCl, 10%-го H₂SO₄ та у 10%-го KOH, за показниками глибинної корозії перевищує тривкість сталі Ст3 у 7,3... 9; 3,9... 5,3 та 9,5... 9,7 разів, відповідно, з показниками 0,032... 0,04; 0,11... 0,15 та 0,047... 0,048 мм/рік. За показником струму корозії отримані аморфні покриття мають корозійну тривкість на рівні титанового сплаву VT-6 ($i_c \sim 10^{-6}$ А/см²).

Визначення стійкості покриттів до фретинг-корозії показало, що зносостійкість керметних покриттів FeMoNiCrB–(Ti, Cr)C та FeMoNiCrB–FeTiO₃ перевищує стійкість титанового сплаву OT4-1 в 4,6 та 5,8 разів, відповідно, що робить ці покриття перспективними при використанні для зміцнення деталей вузлів авіаційної техніки, які підвержені фретинг-корозії.

Список літератури/References

1. Stachurski, Z.H. (2011) On Structure and Properties of Amorphous Materials. *Materials*, 4(9), 1564–1598. Doi:10.3390/ma4091564
2. Hashimoto, K. (2011) What we have learned from studies on chemical properties of amorphous alloys. *Applied Surface Science*, 257(19), 8141–8150. Doi:10.1016/j.apusc.2010.12.142
3. An, Y., Hou, G., Chen, J. et al. (2014) Microstructure and tribological properties of iron-based metallic glass coatings prepared by atmospheric plasma spraying. *Vacuum*, 107, 132–140. Doi:10.1016/j.vacuum.2014.04.021
4. Yugeswaran, S., Kobayashi, A. (2014) Metallic glass coatings fabricated by gas tunnel type plasma spraying. *Vacuum*, 110, 177–182. Doi:10.1016/j.vacuum.2014.04.016
5. Li, G., Gan, Y., Liu, C. et al. (2020) Corrosion and Wear Resistance of Fe-Based Amorphous Coatings. *Coatings*, 10(1), 73. Doi:10.3390/coatings10010073
6. Lin, J., Wang, Z., Lin, P. et al. (2014) Microstructure and cavitation erosion behavior of FeNiCrBSiNbW coating prepared by twin wires arc spraying process. *Surface and Coatings Technology*, 240, 432–436. Doi:10.1016/j.surfcoat.2013.12.07
7. Артемчук В.В. (2011) Структура та властивості аморфних детонаційних покриттів на основі заліза. *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*, 36, 39–44. DOI:10.15802/stp2011/8707
8. Борисов Ю.С., Борисова А.Л., Цимбаліста Т.В. та ін. (2021). Отримання і властивості детонаційних покриттів на основі аморфізованого сплаву FeMoNiCrB з введенням зміцнюючих фаз. *Автоматичне зварювання*, 12, 38–45 <https://doi.org/10.37434/as2021.12.05>
9. Borysov, Yu.S., Borysova, A.L., Tsybalista, T.V. et al. (2021) Producing and properties of detonation coatings based on FeMoNiCrB amorphizing alloy with addition of strengthening phases. *The Paton Welding J.*, 12, 29–35. <https://doi.org/10.37434/as2021.12.05>
10. Ma, H.R., Chen, X.Y., Li, J.W. et al. (2016) Fe-based amorphous coating with high corrosion and wear resistance. *Surface Engineering*, 33(1), 56–62. Doi:10.1080/02670844.2016.1176718
11. Wang, G., Huang, Z., Xiao, P., Zhu, X. (2016) Spraying of Fe-based amorphous coating with high corrosion resistance by HVAE. *Journal of Manufacturing Processes*, 22, 34–38. doi:10.1016/j.jmapro.2016.01.009
12. Liu, L., Zhang, C. (2014) Fe-based amorphous coatings: Structures and properties. *Thin Solid Films*, 561, 70–86. doi:10.1016/j.tsf.2013.08.029
13. Yugeswaran, S., Kobayashi, A., Suresh, K., Subramanian, B. (2013) Characterization of gas tunnel type plasma sprayed TiN reinforced Fe-based metallic glass coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 551, 168–175. doi:10.1016/j.jallcom.2012.09.111
14. Yoon, S., Kim, J., Kim, B.D., Lee, C. (2010) Tribological behavior of B₄C reinforced Fe-base bulk metallic glass composite coating. *Surface and Coatings Technology*, 205(7), 1962–1968. Doi:10.1016/j.surfcoat.2010.08.078
15. Terajima, T., Takeuchi, F., Nakata, K. et al. (2010) Composite coating containing WC/12Co cermet and Fe-based metallic glass deposited by high-velocity oxygen fuel spraying. *Journal of Alloys and Compounds*, 504, S288–S291. Doi:10.1016/j.jallcom.2010.03.209
16. Chu, Z., Yang, Y., Chen, X. et al. (2016) Characterization and tribology performance of Fe-based metallic glassy composite coatings fabricated by gas multiple-tunnel plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*, 292, 44–48. Doi:10.1016/j.surfcoat.2016.03.024
17. Zhou, Z., Han, F.-X., Yao, H.-H. et al. (2021) Novel Fe-Based Amorphous Composite Coating with a Unique Interfacial Layer Improving Thermal Barrier Application. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13(19), 23057–23066. Doi:10.1021/acsami.0c22868
18. Yasir, M., Zhang, C., Wang, W. et al. (2015) Wear behaviors of Fe-based amorphous composite coatings reinforced by Al₂O₃ particles in air and in NaCl solution. *Materials & Design*, 88, 207–213. Doi:10.1016/j.matdes.2015.08.142
19. Umanskii, A.P., Konoval, V.P., Panasyuk, A.D. et al. (2007) Plasma coatings of (TiCrC)–(FeCr) composite powder alloys: Structure and properties. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 46(3–4), 133–138. Doi:10.1007/s11106-007-0022-8
20. Abdou, M.I., Ayad, M.I., Diab, A.S.M. et al. (2017) Influence of surface modified ilmenite/melamine formaldehyde composite on the anti-corrosion and mechanical properties of conventional polyamine cured epoxy for internal coating of gas and oil transmission pipelines. *Progress in Organic Coatings*, 113, 1–14. Doi:10.1016/j.porgcoat.2017.08.003
21. Surzhenkov, A., Antonov, M., Goljandin, D. et al. (2013) Sliding wear of TiC–NiMo and Cr₃C₂–Ni cermet particles reinforced FeCrSiB matrix HV0F sprayed coatings. *Estonian Journal of Engineering*, 19(3), 203–211. <https://doi.org/10.3176/eng.2013.3.03>
22. Borysov, Yu.S., Borysova, A.L., Burlachenko, O.M. (2021) Composite powders based on FeMoNiCrB amorphizing alloy with additives of refractory compounds for thermal spraying

- of coatings. *The Paton Welding J.*, **11**, 38–47. <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.11.07>
22. Borysov, Yu.S., Vihilianska, N.V., Demianov, I.A. et al. (2022) Studies of coatings produced by high-velocity oxy-fuel spraying using cermet powder based on FeMoNiCrB amorphizing alloy. *The Paton Welding J.*, **2**, 33–36. <https://doi.org/10.37434/as2022.02.05>
 23. Похмурський В.І., Хома М.С. (2008) *Корозійна втома металів та сплавів*. Львів, СПОЛОМ.
Pokhmurskyi, V.I., Khoma, M.S. (2008) *Corrosion fatigue of metals and alloys*. Lviv, SPOLOM [in Ukrainian].
 24. Алімов В.І., Дурягіна З.А. (2012) *Корозія та захист металів від корозії*. Донецьк, Східний видавничий дім.
 - Alimov, V.I., Duryagina, Z.A. (2012) *Corrosion and corrosion protection of metals*. Donetsk, Skhidnyi Vydavnychy Dim [in Ukrainian].
 25. Томашов Н.Д., Чернова Г.П., Корниенко Л.П. (1982) *Коррозійна стійкість титана в технологічних середовищах хімічної промисловості*. Москва, НІИ ТЭХИМ.
Tomashov, N.D., Chernova, G.P., Kornienko, L.P. (1982) Corrosion resistance of titanium in technological environments of chemical industry. Moscow, NII Tekhim [in Russian].
 26. Hariharasakthisudhan, P., Rajan, B.S., Sathickbasha, K. (2020) Inspiration of reinforcements, manufacturing methods, and microstructural changes on wear behavior of metal matrix composites – a recent review. *Materials Research Express*, **7**(1), 012006. Doi:10.1088/2053-1591/ab6918

PROPERTIES OF COATINGS PRODUCED BY HVOF-SPRAYING OF COMPOSITE POWDERS BASED ON AMORPHIZED FeMoNiCrB ALLOY

N.V. Vigilanska¹, C. Senderowski², K.V. Yantsevych¹, O.I. Dukhota³

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

² Warsaw University of Technology, Pl. Politechniki 1, 00661, Warsaw, Poland

³ National Aviation University, 1, Lubomir Husar Ave, 03058 Kyiv, Ukraine

Applying the method of HVOF-spraying with the use of mechanically-alloyed powders based on the amorphized FeMoNiCrB alloy with the additions of (Ti, Cr)C and FeTiO₃ compounds, the coatings with amorphous crystalline heterophase structure were produced. The coatings of FeMoNiCrB–(Ti, Cr)C and FeMoNiCrB–FeTiO₃ systems have a dense fine-grained structure with a porosity of 2.4 and 1.2 % and a hardness of 5510 ± 250 and 4410 ± 190 MPa, respectively. The study of corrosion resistance and resistance to fretting corrosion of the developed coatings was conducted. It is shown that the use of composite powders based on FeMoNiCrB alloy with the addition of (Ti, Cr)C and FeTiO₃ compounds as spraying materials allows increasing the protective properties of the coatings compared to the coating of FeMoNiCrB alloy. It was found, that in the case of producing composite FeMoNiCrB–(Ti, Cr)C and FeMoNiCrB–FeTiO₃ coatings on the steel base St3, the corrosion resistance of the specimens in the solutions of 3% NaCl, 10% H₂SO₄ and 10% KOH is increased by 7.3, 9; 3.9, 5.3 and 9.5, 9.7 times, respectively. FeMoNiCrB–(Ti, Cr)C and FeMoNiCrB–FeTiO₃ coatings have a fairly high resistance to fretting corrosion, which is 4.6 and 5.8 times higher than the resistance of titanium OT4-1 alloy. The obtained results indicate the prospect of using HVOF-spraying of the developed FeMoNiCrB–(Ti, Cr)C and FeMoNiCrB–FeTiO₃ coatings to strengthen and restore surfaces operating in aggressive environments and those subjected to fretting corrosion. 26 Ref., 6 Tabl., 4 Fig.

Keywords: HVOF-spraying, amorphous phase, amorphous iron-based alloy, composition coating, corrosion resistance, fretting corrosion

Надійшла до редакції 03.05.2023



ГЕНЕРАЛЬНА АСАМБЛЕЯ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ ФЕДЕРАЦІЇ ЗВАРЮВАННЯ

16 травня в Амстердамі на базі Nederlands Instituut voor Lastechniek пройшла 62-га Генеральна Асамблея Європейської федерації зварювання (EFW). Традиційно на порядку денному стояли питання розвитку та вдосконалення системи навчання, атестації та сертифікації персоналу, задіяного у зварюванні та споріднених процесах. Робочі групи прозвітували про розробку та оновлення програм навчання для ряду виробничих технологій. При цьому зацікавленим виробничим підприємствам EWF пропонує не просто рекомендації стосовно тематик лекційних і практичних занять, а комплекс, який включає кваліфікаційні характеристики персоналу відповідно до Європейської рамки кваліфікацій, набір гармонізованих екзаменів, рекомендації для навчальних центрів. На додачу, такі програми пропонуються не тільки для навчання безпосередньо операторів або зварників, а й для дизайнерів продукції, координаторів робіт та осіб, відповідальних за контроль і забезпечення якості.

Окрім нових програм звітували й про вдосконалення уже існуючих, зокрема, найпопулярнішої серед представників промисловості програми навчання Європейських інженерів зі зварювання. Наразі поставлено задачу повністю переробити дану програму з чотирьох великих блоків на дрібніші модулі компетентностей, подібно до програми навчання персоналу адитивним технологіям. Такий підхід дозволяє зробити навчання більш гнучким і уникнути необхідності повторного проходження одних і тих самих тем при підвищенні рівня кваліфікації або при отриманні кваліфікації із суміжної категорії персоналу.

Також представники Європейської федерації зварювання відзвітували про результати робіт з атестації та сертифікації персоналу у 2022 р. та про поточний стан виконання проєктів.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЛАКСАЦІЇ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ПІСЛЯЗВАРЮВАЛЬНОЇ ТЕРМООБРОБКИ

О.В. Махненко, О.С. Міленін, О.Ф. Мужиченко, С.М. Кандала, О.М. Савицька, Г.Ю. Саприкіна

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

З метою зниження рівня залишкових напружень зварні з'єднання ряду конструкційних сталей піддають загальній чи локальній післязварювальній термообробці за режимом високого відпуску. Для забезпечення постійно зростаючих вимог до якості зварних з'єднань і оптимізації технології зварювання поряд з експериментальними методами досліджень широко використовують методи математичного моделювання. При математичному моделюванні процесу термічної обробки зварних з'єднань часто використовують спрощену функцію повзучості за законом Нортона-Бейлі при фіксованій температурі витримки, але при цьому не враховуються процеси в'язкого деформування, які мають місце при нижчих температурах під час повільного тривалого нагрівання і охолодження. Також існують більш загальні моделі, що дозволяють простежити процеси повзучості при проведенні післязварювальної термообробки під час витримки, нагрівання та охолодження. В роботі досліджувалась ефективність використання різних моделей температурної повзучості для математичного моделювання процесів релаксації залишкових напружень в зварних з'єднаннях з метою розробки рекомендацій за їх використанням для різних характерних випадків післязварювальної термообробки. Порівняння результатів моделювання процесу релаксації напружень, проведене на ряді прикладів, показало, що спрощена функція повзучості при короткотерміновій витримці під час загальної пічної термообробки може давати суттєву похибку відносно більш загальної моделі повзучості. Моделювання технології локальної термообробки показало, що складна геометрія вузла і невдалий вибір розташування нагрівальних елементів може призводити до негативних наслідків – утворення нових високих залишкових напружень. Належне моделювання процесів релаксації і перерозподілу залишкових напружень у зварних з'єднаннях та конструкціях у результаті загального (пічного) або локального післязварювального термооброблення може оптимізувати процес термічної обробки та покращити якість та довговічність зварних конструкцій. Бібліогр. 16, табл. 1, рис. 12.

Ключові слова: післязварювальна термообробка, високий відпуск, залишкові зварювальні напруження, релаксація напружень, математичне моделювання, функція повзучості

Вступ. Забезпечення постійно зростаючих вимог промисловості до якості зварних з'єднань з позицій їх надійності пов'язане з відповідними фундаментальними дослідженнями основних фізичних процесів, які визначають якість зазначеної вище продукції після виготовлення та певного терміну експлуатації. Поряд з експериментальними дослідженнями широко застосування знаходять методи математичного моделювання та сучасні інформаційні технології.

Зварні з'єднання цілого ряду конструкційних сталей (феритно-перлітного, бейнітного, мартенситного класів), зокрема, зварні з'єднання великих товщин, піддають загальній (у печі) або локальній термообробці (ТО) за режимом високого відпуску для зниження рівня залишкових зварювальних напружень [1, 2]. Ця технологічна операція особливо необхідна в тому випадку, коли конструкція буде експлуатуватися при низьких температурах, циклічних навантаженнях, в агресивному середовищі, тобто, коли роль залишкових напружень в забезпеченні структурної цілісності може стати вельми суттєвою [3, 4].

Режими післязварювальної ТО не завжди бувають оптимальними. В ряді випадків застосуван-

ня локального або загального відпуску зварних з'єднань залишкові зварювальні напруження під час нагрівання можуть частково релаксувати, але потім при охолодженні утворюються нові, якщо нагрівання або охолодження матеріалу з'єднання відбувалось нерівномірно [5, 6] чи теплофізичні властивості матеріалів не співпадають, як у випадку різнорідних з'єднань і наплавлень [7, 8]. Через це розробка адекватних режимів технології післязварювальної ТО, зокрема, з використанням методів математичного моделювання, може дозволити істотно знизити матеріальні витрати, пов'язані із забезпеченням надійної експлуатації відповідального обладнання. Тому метою роботи є дослідження ефективності використання різних моделей температурної повзучості для математичного моделювання процесів релаксації залишкових напружень в зварних з'єднаннях і розробка рекомендацій за їх використанням для різних характерних випадків післязварювальної ТО.

Методологія. За деформаційною теорією пластичності для пружнопластичного тіла існує залежність між деформацією та напруженням. Для ізотропного тіла інтенсивність деформації дорів-

ное сумі інтенсивностей пластичних та пружних деформацій [9, 10]. Пластична деформація, яка збільшується з часом при постійному напруженні, називається деформацією повзучості (ϵ^c). Графічне зображення залежності пластичної деформації від часу t випробувань у разі дії постійних напружень і температури називають кривою повзучості (рис. 1) [9].

В загальному випадку термомеханічного навантаження для визначення характеру та величини деформації виробу необхідні дані про модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, границю текучості матеріалу в залежності від температури, а також швидкості деформацій повзучості матеріалу при заданій температурі залежно від величини навантаження (напружень).

В зварних елементах, що піддаються ТО, спільний вплив високих температур і внутрішніх залишкових напружень зумовлює появу та розвиток пружнопластичних деформацій. Для математичної моделі, яка використовується для моделювання пружнопластичного деформування матеріалу зварного з'єднання, приймається, що приріст тензора деформацій $d\epsilon_{ij}$ у довільній точці (x, y, z) в момент часу t подається у виді суми [3]:

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

де $d\epsilon_{ij}^e$ – пружна складова тензора деформацій; $d\epsilon_{ij}^p$ – складова від миттєвої пластичності та $d\epsilon_{ij}^c$ – складова деформації повзучості (дифузійної пластичності).

Для моделювання процесу термічної обробки зварних з'єднань часто використовують функцію повзучості матеріалу відповідно до закону Нортона-Бейлі [11], а саме степенева залежність між інтенсивністю напружень σ_i та швидкістю повзучості при фіксованій температурі витримки ТО:

$$\frac{d\epsilon^c}{dt} = A\sigma_i^n, \quad (2)$$

або в модифікованій формі з додатковим впливом часу витримки t [12]

$$\frac{d\epsilon^c}{dt} = A\sigma_i^n t^m, \quad (3)$$

де A, n, m – коефіцієнти, що визначають експериментально як характеристики матеріалу при заданій температурі $T = \text{const}$.

Приведена модель розроблена для прогнозування накопичення деформацій повзучості в залежності від часу на стадії I неусталеної повзучості і стадії II усталеної повзучості (рис. 1), що відповідає умовам деформування під час післязварювальної ТО. Але при використанні такої моделі повзучості при моделюванні процесів релаксації залишкових напружень не враховуються процеси повзучості, які мають місце при більш низьких температурах ніж температура витримки при ТО, тобто при нагріванні і охолодженні матеріалу або в зонах зварного з'єднання, де температура матеріалу під час локальної ТО нижче заданої температури витримки.

Розглянемо математичну модель повзучості Ареніуса, що враховує накопичення деформацій повзучості в широкому діапазоні температур матеріалу [13].

$$\frac{d\epsilon^c}{dt} = B\sigma_i^n \exp\left(\frac{Q/k}{T(K)}\right) = B\sigma_i^n \exp\left(\frac{G}{T(^{\circ}\text{C}) + 273}\right), \quad (4)$$

де Q – енергія активації повзучості; k – постійна Больцмана; $T(K)$ – абсолютна температура за шкалою Кельвіна; $T(^{\circ}\text{C})$ – температура в градусах Цельсія; B, G, n – константи.

Представлена модель (4) повзучості при підвищених температурах – досить загальна, вона дозволяє простежити деформаційні процеси при ТО. Ця модель ефективна при моделюванні процесів релаксації залишкових напружень при локальній або пічній ТО зварних конструкцій за короткий час витримки, коли по об'єму зварної конструкції або вузла не забезпечується рівномірне прогрівання до заданої температури витримки.

Відповідно до наведених моделей високотемпературної повзучості та відомих моделей пружнопластичного деформування матеріалу [3] можуть бути побудовані математичні моделі спільного розвитку пружних деформацій, миттєвої пластичності та повзучості для високотемпературного нагрівання елементів в результаті післязварювальної ТО. Тут значною мірою можуть бути використані сучасні розробки розв'язання задач теорії пружності та будівельної механіки, які базуються на широкому застосуванні методу скінченних елементів. Метод послідовного простежування дозволяє врахувати кінетику розвитку напруженого стану не тільки від послідовно виконаних зварювальних проходів, а й від операції післязварювальної ТО. Достовірність отриманих за описаною методикою кінцевих результатів

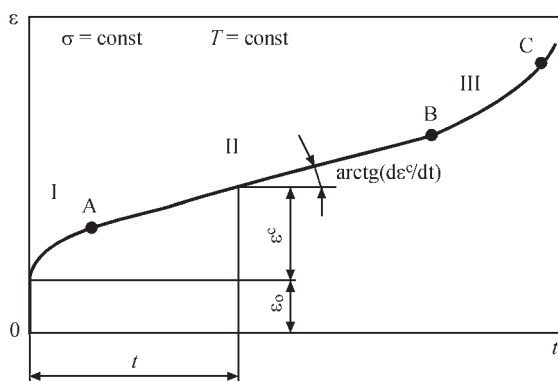


Рис. 1. Крива повзучості: I – стадія неусталеної повзучості; II – стадія усталеної повзучості; III – стадія руйнування; ϵ_0 – миттєва початкова деформація

у значній мірі залежить від вихідних даних про теплофізичні та механічні властивості матеріалу досліджуваного об'єкту і параметрів теплового та силового впливу.

Розглянемо низку прикладів використання математичних моделей повзучості (1) і (4) при моделюванні характерних (типових) випадків післязварювальної ТО.

Приклад 1. Повздовжнє зварне з'єднання циліндричної оболонки внутрішньокорпусної шахти реактора ВВЕР-1000.

Внутрішньокорпусна шахта (ВКШ) ядерного реактора ВВЕР-1000 це зварна циліндрична обичайка з аустенітної сталі 08X18H10T із зовнішнім діаметром 3610 мм і товщиною стінки 60 мм, що містить повздовжні та кільцеві стикові з'єднання, які можуть бути виконані багатопрхідним дуговим зварюванням під флюсом з наступною ТО для релаксації залишкових напружень.

Для повздовжнього багатопрхідного зварного з'єднання (10...12 проходів) циліндричної обичайки ВКШ методом математичного моделювання отримані розподіли залишкових зварювальних напружень [14]. Після зварювання процедура загальної (пічної) ТО зварного з'єднання змодельована для режиму: $T = 650$ °C, тривалість витримки 10 год. Для сталі 08X18H10T при температурі $T = 650$ °C значення коефіцієнтів A , n у рівнянні Нортон-Бейлі (2) були прийняті наступними [15]:

$$A = 6,07307 \cdot 10^{-14} \text{ МПа}^{-n}/\text{год}, n = 4,8351.$$

Для цієї математичної моделі параметри A і n прийняті однаковими для основного металу та металу шва. На рис. 2 показано графік функції повзучості для сталі 08X18H10T при температурі $T = 650$ °C і прийнятих параметрах A і n , який демонструє, що при високих значеннях інтенсивності напружень (більше 100 МПа), утворення деформацій повзучості відбувається з досить високою швидкістю ($0,0003 \dots 0,01 \text{ год}^{-1}$). При низьких напруженнях процеси їх релаксації значно уповільнюються.

Зварна конструкція ВКШ може піддаватись загальній пічній ТО. Таку ТО можна моделювати на основі використання двох принципово різних підходів визначення температурних розподілів. Перший підхід максимально спрощений і припускає, що під час нагрівання, витримки та охолодження температура матеріалу примусово задається рівномірною по всьому об'єму зварного вузла. Другий підхід враховує можливу нерівномірність розподілу температури по товщині конструкції за рахунок конвекційного нагрівання з поверхні.

Результати розрахунку напружено-деформованого стану ВКШ після зварювання і ТО показали, що максимальні осьові напруження σ_{zz} , які після зварювання були на рівні 200 МПа, після ТО знизилися до 48 МПа. Максимальні окружні напру-

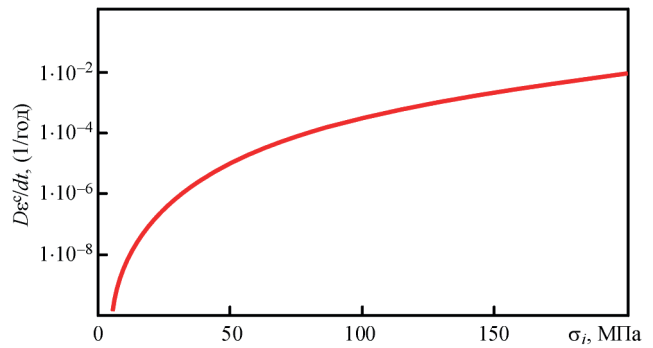


Рис. 2. Функція повзучості для сталі 08X18H10T при температурі $T = 650$ °C

ження $\sigma_{\theta\theta}$ в результаті ТО знизилися з 174 до 50 МПа, радіальні σ_{rr} – з 63 до 10 МПа.

На рис. 3 показано зміну температури повітря в об'ємі печі, які відповідають заданим параметрам ТО, а також розрахункові результати кінетики максимальної температури нагрівання металу зварного з'єднання за рахунок конвекційного теплообміну та результати кінетики релаксації залишкових напружень σ_{zz} при різних швидкостях нагрівання та охолодження. Коефіцієнт конвекційного теплообміну на поверхні зварного з'єднання з повітрям в об'ємі печі приймався в діапазоні $\alpha = (1,5 \dots 3,0) \cdot 10^{-4} \text{ Дж}/(\text{мм}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{град})$ в залежності від температури нагрітого металу.

При нагріванні відбувається релаксація залишкових напружень за рахунок миттєвої пластичності, а після нагрівання до температури 650 °C під час витримки – за рахунок процесу температурної повзучості. Треба зазначити, що в розробленій спрощеній моделі прийнято припущення про те, що процес повзучості починається при температурі витримки. Таким чином, процес повзучості при 650 °C починається досить інтенсивно, за першу годину витримки відбувається значна релаксація напружень, після чого швидкість повзучості помітно знижується. Після охолодження рівень залишкових напружень трохи підвищується за рахунок підвищення температурної залежності границі текучості матеріалу.

При розглянутих варіантах швидкостей нагрівання та охолодження зварне з'єднання завтовшки 60 мм прогрівається по товщині досить рівномірно та відрізняється величиною затримки при досягненні температури витримки 650 °C. У досить тривалому періоді витримки (10 год), що прийнятий при розрахунку, результати за ефективністю релаксації залишкових напружень для різних швидкостей нагрівання та охолодження майже не відрізняються (рис. 4). Максимальні σ_{zz} , які після зварювання були на рівні 200 МПа, після ТО знижуються до 45...48 МПа.

Залежність ефективності релаксації залишкових зварювальних напружень σ_{zz} від часу витримки представлена на рис. 5. Результати розрахунку при ТО для підходу конвекційного нагрівання в печі при швидкості нагрівання до 650 °C та охо-

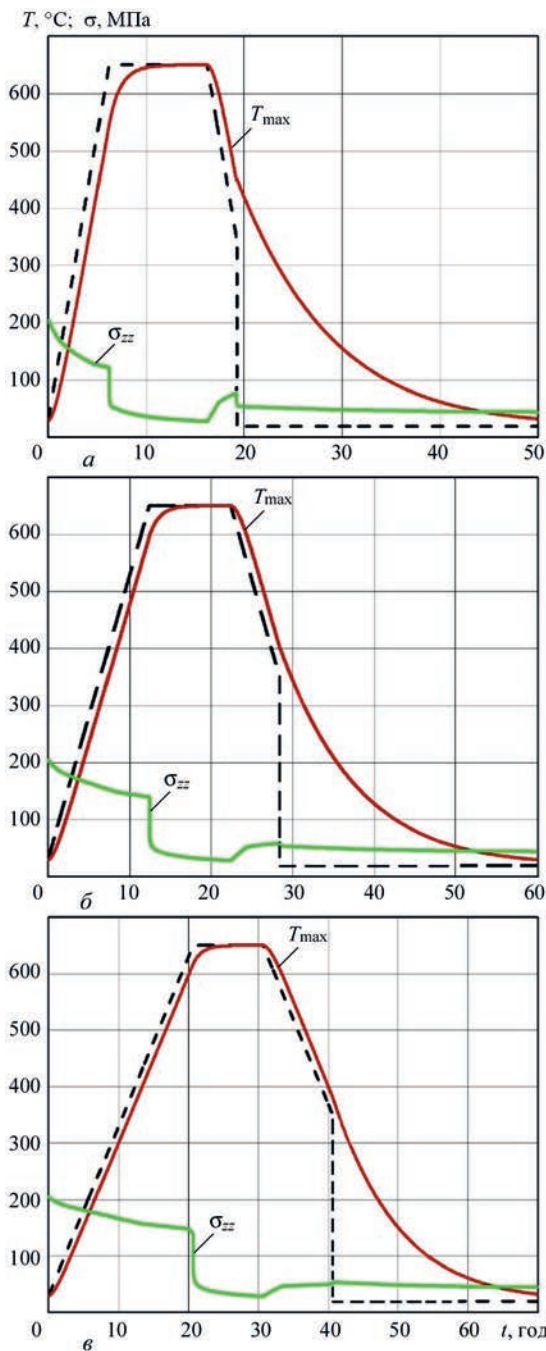


Рис. 3. Зміна температури повітря в печі (штрихова лінія) і розрахункові результати кінетики максимальної температури нагрівання металу зварного з'єднання та релаксації максимальних залишкових напружень (осьова компонента σ_{zz}) при різних швидкостях нагрівання та охолодження: а – 100 град/год; б – 50; в – 30

лодження 100 град/год показують, що час витримки – дуже важливий параметр. Різниця в релаксації залишкових напружень при витримці 10 і 5 год невелика: залишкові напруження σ_{zz} знижуються до 45 і 50 МПа відповідно. При більш короткому терміні витримки при 650 °C ефективність ТО знижується. При тригодинній витримці σ_{zz} знизилась до 60 МПа, за 2 год – до 86 МПа.

На рис. 6 наведено порівняння результатів моделювання релаксації залишкових зварювальних напружень σ_{zz} при ТО у випадку примусового

рівномірного нагрівання (підхід 1) з результатами моделювання ТО нагріванням за рахунок конвекції (підхід 2) для витримки протягом 2 і 10 год при 650 °C, швидкість нагрівання та охолодження 100 град/год.

При досить тривалій витримці, коли зварне з'єднання повністю нагрівається по товщині, результати чисельного прогнозування релаксації залишкових напружень за спрощеним підходом 1 близькі до більш точного підходу 2, який враховує ступінь нагрівання по товщині та затримку нагрівання до температури витримки. Так, при витримці 10 год результати релаксації максимальних залишкових напружень σ_{zz} (рис. 6), отримані за підходами 1 і 2, дають відповідно 45 і 43 МПа. Для короткотермінової витримки (2 год) спрощений підхід 1 дає суттєву похибку, а саме 59 МПа проти 86 МПа за більш точним підходом 2, отже, похибка складає приблизно 30 %.

Приклад 2. Кільцеве зварне з'єднання трубопроводу зі сталі підвищеної міцності перлітного класу.

Зварні з'єднання трубопроводів енергетичного обладнання, як правило, підлягають післязварювальній ТО. Наприклад, зварні з'єднання головного циркуляційного трубопроводу (ГЦТ) Ду850 зі сталі 10ГН2МФА (перлітного класу) виконують ручним або автоматичним зварюванням. Корінь зварного шва виконують вручну аргонодуговим зварюванням з присадковим дротом 08Г2С

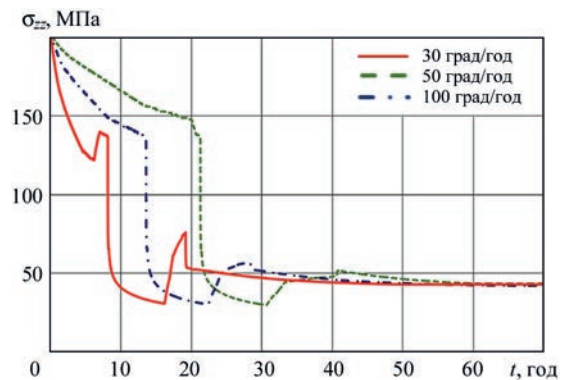


Рис. 4. Кінетика релаксації максимальних залишкових напружень σ_{zz} при ТО в зоні зварного з'єднання при різних швидкостях нагрівання та охолодження (100, 50, 30 град/год), час витримки 10 год, $T_{max} = 650$ °C, для моделі конвекційного нагрівання в печі

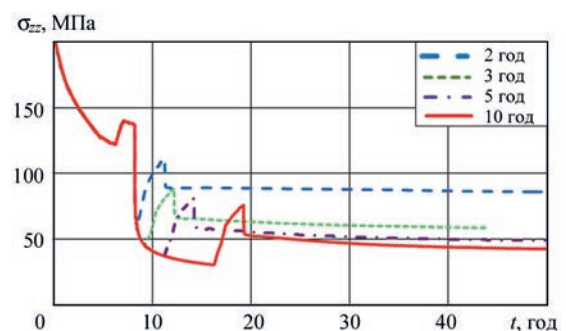


Рис. 5. Кінетика релаксації максимальних залишкових напружень σ_{zz} при ТО в зоні зварного з'єднання від часу витримки (2, 3, 5, 10 год, $T_{max} = 650$ °C), при швидкості нагрівання та охолодження 100 град/год, для моделі конвекційного нагрівання в печі

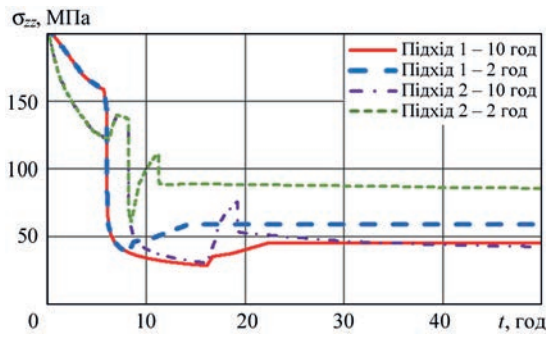


Рис. 6. Порівняння умов примусового рівномірного нагрівання (підхід 1) з нагріванням за рахунок конвекції (підхід 2) при ТО за результатами моделювання релаксації максимальних залишкових зварювальних напружень σ_{zz} для різного часу витримки 2 і 10 год., $T_{max} = 650 \text{ }^\circ\text{C}$, швидкість нагрівання та охолодження 100 град/год діаметром 2...3 мм, висота кореневого проходу 6...8 мм. Заповнення основної частини шва виконують ручним зварюванням електродами ПТ-30 діаметром 4 мм, а при автоматичному зварюванні використовується дріт Св10ГН1МА діаметром 2 мм. Зварювання виконують з попереднім і супутнім підігріванням до 150 $^\circ\text{C}$.

Для визначення залишкових зварювальних напружень проведено математичне моделювання в двомірній осесиметричній постановці задач нестационарної теплопровідності і термопластичного деформування при зварювальному нагріві кільцевого багатопрохідного зварного з'єднання (112 проходів) циліндричної обичайки з внутрішнім діаметром $D_{внутр.} = 850 \text{ мм}$, товщиною $\delta = 60 \text{ мм}$, режим дугового зварювання проходу $I_{зв} = 250 \text{ А}$, $U_{зв} = 11,5 \text{ В}$, $v_{зв} = 5,5 \text{ мм/с}$, $Q_{п} = 520 \text{ Дж/мм}$, коефіцієнт теплової ефективності дорівнює 0,8.

Отримано досить високий рівень окружної компоненти залишкових напружень $\sigma_{\theta\theta}$ до 400...500 МПа, тобто до межі текучості матеріалу, а в локальній зоні завершальних зварювальних проходів максимальні розрахункові окружні напруження досягають навіть 690 МПа.

Після зварювання з метою релаксації залишкових напружень застосовується високий відпуск при температурі 650 $^\circ\text{C}$, час витримки при заданій температурі 6...7 год, охолодження до 200 $^\circ\text{C}$ в печі при заданій швидкості охолодження до 100 град/год, потім на повітрі вільне охолодження до температури 20 $^\circ\text{C}$.

Для моделювання процесу релаксації залишкових напружень при ТО використано дві функції повзучості для визначення можливої розбіжності результатів і забезпечення необхідної точності прогнозування. Перша – спрощена (2), не залежить від температури і діє тільки при досягненні температури витримки при ТО. Друга (4) – більш загальна і залежить від температури матеріалу, починаючи з температури 550 $^\circ\text{C}$ і вище.

Коефіцієнти функції повзучості для основного матеріалу трубопроводу ГЦТ (сталі 10ГН2МФА) визначені на основі обробки експериментальних даних. На рис. 7 приведені дані роботи [3] відповідно до ступеня релаксації розтягуючих за-

лишкових повздовжніх напружень за період витримки 2 год ТО після зварювання пластин зі сталі 10ГН2МФА в залежності від температури відпуску $T = 550...700 \text{ }^\circ\text{C}$. У таблиці наведено результати розрахунку констант A, B, G, n функцій повзучості (2) і (4) з використанням цих експериментальних даних.

Спрощену функцію повзучості можна отримати на основі даних тільки для температури витримки $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ при ТО і представити у вигляді (2)

$$\text{при } n = 6, A = 1,73 \cdot 10^{-14} \text{ 1/(МПа}^n \cdot \text{год)},$$

Відповідно функцію повзучості в загальному вигляді в залежності від температури матеріалу, починаючи з температури 550 $^\circ\text{C}$ і вище, можна апроксимувати типовою залежністю (4) з відповідними коефіцієнтами B, G, n з таблиці.

Отримані результати моделювання релаксації залишкових напружень в зоні кільцевого зварного з'єднання ГЦТ Ду850 після ТО та повного охолодження до 20 $^\circ\text{C}$ свідчать про досить високий рівень ефективності релаксації залишкових напружень при заданих параметрах ($T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$, час витримки 7 год). Рівень максимальних залишкових напружень розтягу, а саме окружної компоненти $\sigma_{\theta\theta}$ і осьової σ_{zz} не перевищує 30...40 МПа,

Результати розрахунку коефіцієнтів функцій повзучості (2) і (4) з використанням експериментальних даних [3]

| $T, \text{ }^\circ\text{C}$ | $A, \text{ 1/(МПа}^n \cdot \text{год)}$ | $B, \text{ 1/(МПа}^n \cdot \text{год)}$ | $G, \text{ (K)}$ |
|-----------------------------|---|---|------------------|
| | $n = 6$ | $n = 6$ | $n = 6$ |
| 550 | $0,43 \cdot 10^{-17}$ | exp(41,28) | - 66394 |
| 600 | $1,13 \cdot 10^{-15}$ | | |
| 650 | $1,73 \cdot 10^{-14}$ | | |
| 700 | $3,77 \cdot 10^{-12}$ | | |

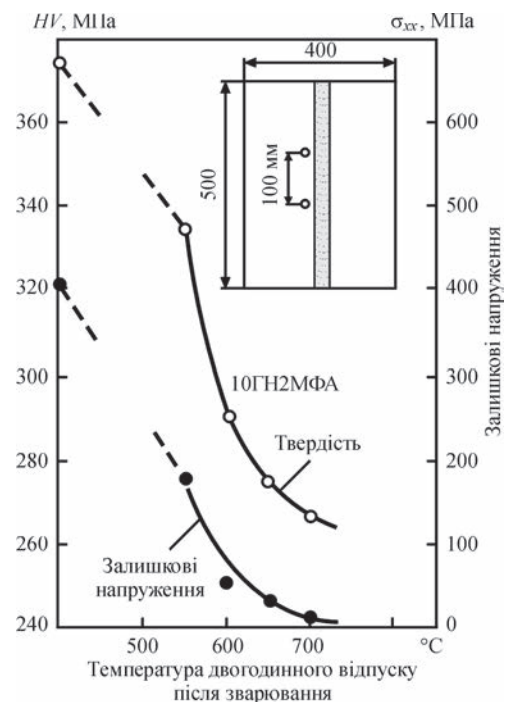


Рис. 7. Вплив температури двогодинного відпуску на рівень залишкових напружень і твердість в зоні зварного з'єднання зі сталі 10ГН2МФА [16]

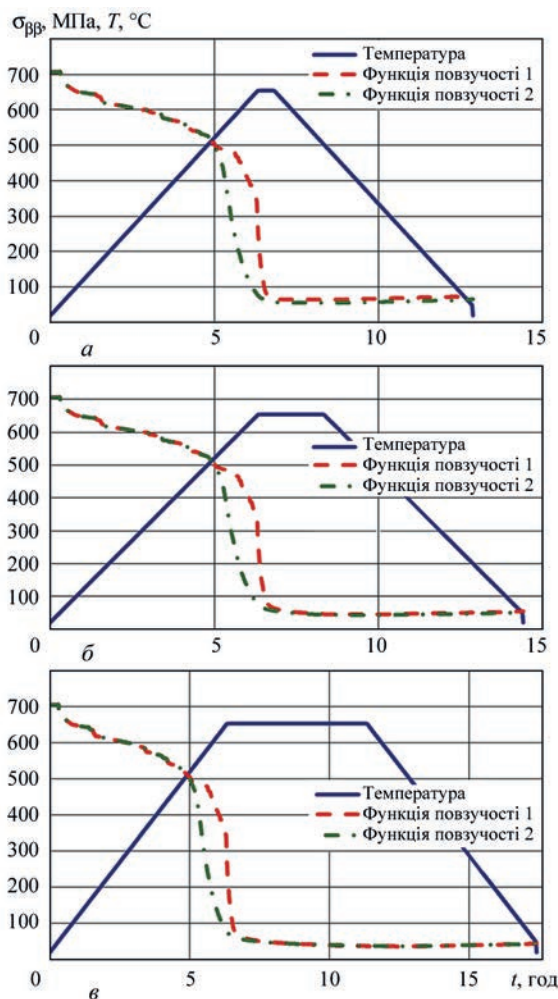


Рис. 8. Залежність ефективності релаксації залишкових напружень σ_{pp} (окружна компонента) в зоні стикового зварного з'єднання ГЦТ Ду850 при ТО від вибору функції повзучості та часу витримки ($T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$): а – 0,5; б – 2 і в – 5 год

напруження стискання на внутрішній поверхні трохи вищі – від -70 до -80 МПа.

Порівняння точності моделювання процесу релаксації напружень з використанням спрощеної функції повзучості на основі закону Нортона-Бейлі для фіксованої температури витримки та більш загальної функції повзучості представлені на рис. 8. Порівнювались саме ефективності релаксації залишкових окружних напружень σ_{pp} в зоні стикового зварного з'єднання ГЦТ Ду850 при ТО у залежності від вибору функції повзучості та часу витримки при $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ (0,5; 2 і 5 год), швидкість нагрівання та охолодження 100 град/год. Можна відзначити, що в залежності від функції повзучості змінюється кінетика релаксації напружень: при більш загальній функції повзучості процеси релаксації за рахунок повзучості починаються раніше при температурі $T = 550 \text{ }^\circ\text{C}$, але під час витримки криві повзучості зближуються і майже співпадають. Максимальні залишкові напруження σ_{pp} в зоні зварного з'єднання знижуються з 710 до 50 МПа. Тільки у випадку дуже короткої витримки (0,5 год) релаксація напружень за спрощеною моделлю не встигає відбу-

тися та різниця у величині залишкових напружень після ТО становиться помітною – 50 та 65 МПа. Таким чином, спрощена функція повзучості у випадках дуже короткої витримки може давати суттєву похибку результатів моделювання релаксації залишкових напружень відносно більш загальної функції повзучості, яка враховує залежність процесу повзучості від температури на стадії нагрівання та охолодження. В розглянутому випадку відносна похибка склала приблизно 30% .

Приклад 3. Локальна ТО зварного з'єднання № 111 колектора до патрубку Ду1200 парогенератора ПГВ-1000

Патрубок Ду1200 парогенератора та колектор виготовляють зі сталі перлітного класу 10ГН2МФА. Зварний шов виконують ручним або автоматичним зварюванням, корінь зварного шва виконують вручну аргонодуговим зварюванням з присадковим дротом Св08Г2С, висота кореневого проходу $6 \dots 8$ мм. Заповнення основної частини шва виконують ручним зварюванням електродами ЦУ-7 або УОНИ-13/55 діаметром 4 або 5 мм, а при автоматичному зварюванні використовується дріт Св08ГСМТ і Св10ГН1МА діаметром 2 мм і флюс ФЦ-16 або АН-17. Операції проміжного та остаточного високого відпуску (рис. 9) виконуються кільцевими нагрівачами (рис. 10) з метою релаксації залишкових напружень, пов'язаних або з монтажним зварюванням або з локальним ремонтом окремих дефектів за схемою багатошарового заповнення відповідних розробок зварного з'єднання № 111.

Додаткові джерела нагрівання, що забезпечують локальну ТО зварного вузла, можуть бути задані відповідним тепловим потоком через поверхню нагрівання або зміною поверхневої температури в зоні нагрівання, якщо остання проводиться за заданою програмою, як зазначено для режиму високого відпуску.

В результаті проведеного математичного моделювання задач нестационарної теплопровідності і термопластичного деформування при зварювальному нагріві під час виконання всіх (до 100) проходів заповнення розробки зварного з'єднання № 111 і наступного повного охолодження отримані розподіли компонент залишкових напружень, які є досить нерівномірні по товщині зварного з'єднання. Найбільш високий рівень мають окружні розтягуючі напруження σ_{pp} (до 650 МПа). Осьові залишкові напруження σ_{zz} є стискаючими (до -170 МПа) на внутрішній поверхні з'єднання і розтягуючими на зовнішній (до 350 МПа). Радіальна компонента σ_{rr} має напруження розтягу до 200 МПа.

З точки зору забезпечення опірності зварного з'єднання № 111 руйнуванню за механізмом стрес-корозійного розтріскування особливо важливі розподіли окружних і осьових залишкових напружень на внутрішній поверхні з'єднання. Після

монтажного зварювання в указаній зоні визначені досить високі окружні залишкові напруження розтягнення (до 300 МПа) і осьові напруження стискання. З урахуванням геометричної складності вузла зварного з'єднання № 111, технологічна операція локальної післязварювальної ТО може не тільки знизити рівень, а викликати утворення нових залишкових напружень.

При виконанні даного дослідження, аналогічно до попередніх прикладів, було використано два підходи моделювання температурних розподілів під час проведення післязварювальної ТО. Так, перший спрощений підхід відповідає умовам загальної пічної ТО, коли примусово рівномірно нагрівається весь вузол зварного з'єднання згідно заданого режиму ТО. Другий підхід відповідає реальним умовам локальної ТО, тобто в зоні установки нагрівачів (рис. 10) температура поверхні змінюється в часі t (починаючи з початку роботи нагрівача) за графіком режиму ТО (рис. 9). Решта поверхні вузла має теплоізоляцію або теплообмін з навколишнім середовищем за законом Ньютона-Ріхмана.

Виконання загальної ТО зварного з'єднання № 111, моделювання якої забезпечується рівномірним прогріванням (підхід 1) вузла до температури витримки 650 °С, призводить при тривалості витримки 8 год до значної релаксації залишкових напружень, а саме, рівень всіх компонент залишкових напружень знизився до 100 МПа і нижче (рис. 11).

При моделюванні релаксації та перерозподілу залишкових напружень в зварному з'єднанні

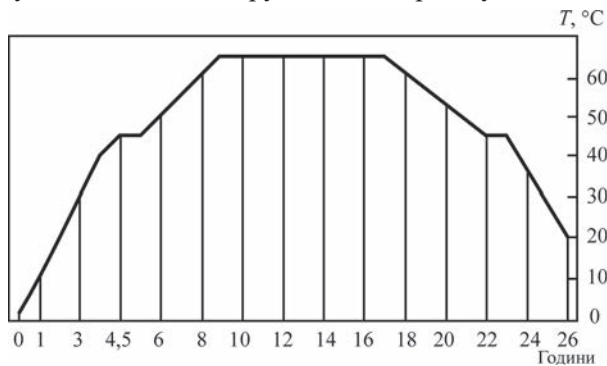


Рис. 9. Графік ТО за режимом високого відпуску

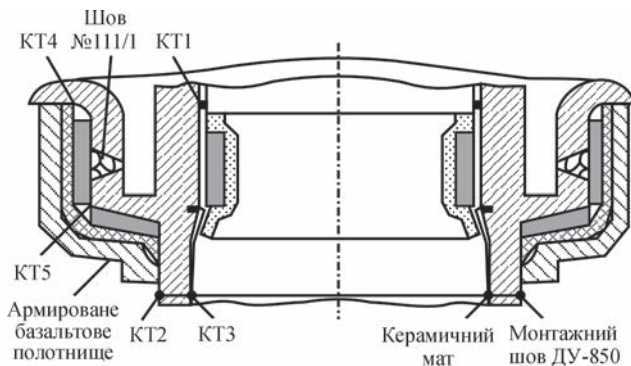


Рис. 10. Схема встановлення нагрівачів і теплоізолюючих матеріалів на ділянці зварного з'єднання № 111 при проведенні післязварювальної ТО (КТ1-КТ5 – контрольні точки)

№ 111 при виконанні локальної ТО шляхом прикладення теплових потоків від нагрівачів з поверхні вузла (підхід 2), отримані результати принципово відрізняються. По-перше, через складну геометрію вузла нагрівання за допомогою локально розташованих нагрівачів не забезпечує рівномірності розподілу температури в зоні зварного з'єднання в процесі витримки (рис. 12). В результаті, суттєво нерівномірне нагрівання викликає утворення нових залишкових напружень, розподіл і рівень яких значно відрізняється від залишкових напружень після зварювання (рис. 11).

Після локальної ТО окружні зварювальні залишкові напруження $\sigma_{\phi\phi}$ на внутрішній поверхні з'єднання майже не змінюються і досягають рівня 350 МПа, а на зовнішній поверхні досить високі після зварювання окружні залишкові напруження розтягу на рівні 400 МПа знижуються до 0...100 МПа (рис. 11, а). Осьові залишкові напруження σ_{zz} на внутрішній поверхні, які були після зварювання напруженнями стиску на рівні -100 МПа, після локальної ТО стають напруженнями розтягу і досягають рівня 200...300 МПа, а на зовнішній поверхні мають значення стиску до -300 МПа (рис. 11, б).

Таким чином, локальний високий відпуск з нерівномірним розподілом температури в зоні зварного з'єднання в умовах досить жорсткого вузла зварного з'єднання № 111 призводить до певного зниження окружних залишкових напружень на зовнішній поверхні шва, але утворюється нова зона високих осьових напружень розтягу на внутрішній поверхні з'єднання.

Представлені результати щодо вивчення ефективності технології локальної ТО зварного з'єднання № 111 показали, що невдалий вибір роз-

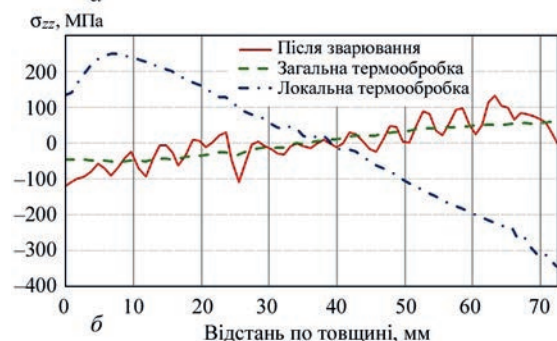
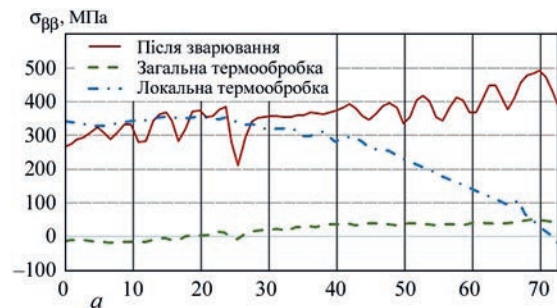


Рис. 11. Розподіл залишкових напружень осьових σ_{zz} (а) і окружних $\sigma_{\phi\phi}$ (б) по товщині зварного з'єднання № 111 після зварювання та після загальної та локальної ТО

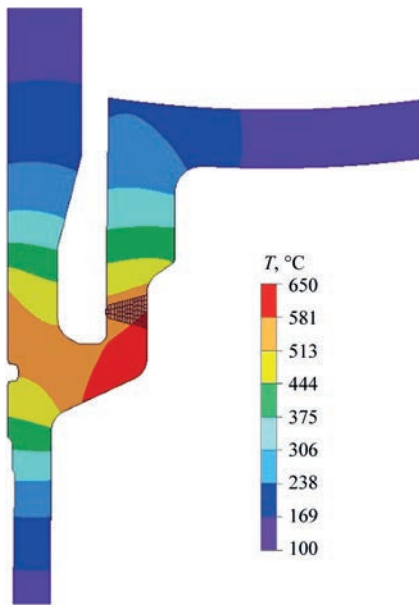


Рис. 12. Розподіли температури в процесі витримки при проведенні локальної післязварювальної ТО

міщення нагрівачів при локальній ТО може призводити до негативних наслідків, а саме, утворення нових залишкових напружень розтягу в небезпечних зонах зварного вузла. Низька ефективність розглянутої технології післязварювальної ТО та можливо навіть її негативний вплив на забезпечення цілісності зварного з'єднання № 111 свідчать про необхідність оптимізації технології локальної ТО із залученням, в тому числі, методів математичного моделювання.

Висновки

1. При загальній пічній ТО зварної конструкції теплові процеси можна моделювати на основі використання двох різних підходів. Перший, більш економічний за реалізацією підхід припускає, що під час нагрівання, витримки і охолодження температура матеріалу задається згідно заданого режиму термообробки примусово рівномірною за об'ємом зварного вузла. Другий, більш точний підхід враховує можливу нерівномірність розподілу температури конструкції в результаті нагрівання і охолодження з поверхні за рахунок конвекції з навколишнім повітрям у печі.

2. Порівняння результатів моделювання релаксації залишкових зварювальних напружень при ТО у випадку примусового рівномірного нагрівання з результатами моделювання ТО нагріванням за рахунок конвекції показало, що у випадку досить тривалої витримки при ТО, коли зварне з'єднання встигає повністю прогрітися по товщині, перший підхід дає результати за релаксацією залишкових напружень дуже близькі до другого, який враховує ступінь нагрівання по товщині та затримку нагрівання до температури витримки. Для короткого часу витримки перший підхід може давати суттєву похибку.

3. Для моделювання процесу ТО зварних з'єднань часто використовують спрощену функцію повзучості матеріалу за законом Нортона-Бейлі як степеневу залежність між інтенсивністю напружень та швидкістю деформацій повзучості при фіксованій температурі витримки. Більш загальні математичні моделі повзучості, наприклад, модель Ареніуса, можуть враховувати накопичення деформацій повзучості в широкому діапазоні температур матеріалу, дозволяють простежити деформаційні процеси не тільки при температурі витримки, але і при нижчих температурах матеріалу і можуть бути ефективними при моделюванні процесів релаксації залишкових напружень при локальній ТО зварних конструкцій або у випадку загальної пічної термообробки за короткий час витримки, коли за об'ємом зварної конструкції або вузла не забезпечується рівномірне прогрівання до заданої температури витримки.

4. Порівняння результатів з ефективності релаксації залишкових напружень показали, що в залежності від функції повзучості змінюється розрахункова кінетика релаксації напружень. Так, при більш загальній функції повзучості процеси релаксації за рахунок повзучості починаються раніше при нагріванні, але в процесі витримки криві повзучості за спрощеною та загальною моделями зближуються і майже співпадають. У випадках дуже короткої витримки спрощена функція повзучості може давати суттєву похибку результатів моделювання релаксації залишкових напружень відносно більш загальної функції повзучості, яка враховує залежність процесу повзучості від температури на стадії нагрівання та охолодження. В розглянутому випадку ТО стикового зварного з'єднання ГЦТ Ду850 відносна похибка склала 30 %.

5. Вивчення ефективності технології локальної ТО зварних з'єднань показало, що складна геометрія вузла та невдалий вибір розміщення нагрівачів може призводити до негативних наслідків, а саме, до утворення нових залишкових напружень розтягу в небезпечних зонах зварного вузла. Це пов'язано з досить значною нерівномірністю розподілу температури при локальному нагріванні вузла. Для підвищення ефективності технології післязварювальної локальної ТО і виключення її можливого негативного впливу на забезпечення цілісності зварних з'єднань доцільно проводити оптимізацію нових технологій локальної ТО із залученням методів математичного моделювання.

Список літератури

1. Корольков П.М. (2006) *Термическая обработка сварных соединений*. Київ, Екотехнологія.
2. (2007) *ASME boiler & pressure vessel code VIII Div 2e an international code*. New York, The American society of Mechanical Engineers.
3. Махненко В.И. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Київ, Наукова думка.

4. (2013) *Guide to methods of assessing the acceptability of flaws in metallic structures*. The British Standards Institution. BS7910:2013.
5. Махненко О.В., Кандаля С.М., Басистюк Н.Р., Черкашин М.В. (2021) Математичне моделювання залишкових напружень во внутрішньокорпусних елементах ВВЕР-1000 після термічної обробки. *Автоматичне зварювання*, **3**, 10–16. <https://doi.org/10.37434/as2021.03.02>
6. Степанов Г.В., Харченко В.В., Бабуцкий А.И. и др. (2006). Напряженно-деформированное состояние узла приварки коллектора к патрубку корпуса парогенератора при локальной термообработке. *Проблемы прочности*, **6**, 43–50.
7. Макаренко А.А., Махненко О.В. (2022) Математичне моделювання залишкових напружень в композитних зварних з'єднаннях кришки корпусу реактора ВВЕР-1000 з патрубками СУЗ. *Автоматичне зварювання*, **1**, 33–40. <https://doi.org/10.37434/as2022.01.05>
8. Махненко О.В., Костеневич Е.С. (2020) Вплив технологічних параметрів дугового наплавлення антикорозійного шару в корпусі реактора ВВЕР-1000 на розподіл залишкових напружень. *Там само*, **12**, 3–16. <https://doi.org/10.37434/as2020.12.01>
9. Работнов Ю.Н. (1966) *Ползучесть элементов конструкций*. Москва, ГИФМЛ.
10. Ильющин А.А. (2004) *Труды (1946–1966). Т. 2. Пластичность*. Москва, Физматлит.
11. Катанаха Н.А., Семенов А.С., Гецов Л.В. (2013) Единая модель длительной и кратковременной ползучести и идентификация ее параметров. *Проблемы прочности*, **4**, 143–157.
12. Betten J. (2008) *Creep mechanics*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-85051-9>
13. Naumenko, K., Altenbach, H. (2007) *Modeling of Creep for Structural Analysis*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer. <https://www.springer.com/gb/book/9783540708346>
14. Махненко О.В., Мирзов И.В., Порохонько В.Б. (2016) Моделирование остаточных сварочных напряжений, радиационного распухания и напряженного состояния выгордки реактора ВВЕР-1000 в процессе эксплуатации. *Автоматическая сварка*, **4** (752), 35–41.
15. Margolin, B.Z., Gulenko, A.G., Kursevich, I.P., Buchatskii, A.A. (2006) Modeling for fracture in materials under long-term static creep loading and neutron irradiation. Part 2. Prediction of creep rupture strength for austenitic materials. *Strength of Materials*, **38**(5), 449–457.
16. Гривняк И. (1984) *Свариваемость сталей*. Москва, Mashinostroeniye.
2. (2007) *ASME boiler & pressure vessel code VIII Div 2e an international code*. New York, The American Society of Mechanical Engineers.
3. Makhnenko, V.I. (2006) *Safe service life of welded joints and assemblies of modern structures*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
4. (2013) *Guide to methods of assessing the acceptability of flaws in metallic structures*. The British Standards Institution. BS7910:2013.
5. Makhnenko, O.V., Kansala, S.M., Basystyuk, N.R., Cherkashyn, M.V. (2021) Mathematical modeling of residual stresses in WWER-1000 elements after heat treatment. *The Paton Welding J.*, **3**, 10–16. <https://doi.org/10.37434/as2021.03.02>
6. Stepanov, G.V., Kharchenko, V.V., Babutsky, A.I. et al. (2006) Stress-strain state of unit of collector welding-up to branch pipe of steam generator vessel during local heat treatment. *Problemy Prochnosti*, **6**, 43–50 [in Russian].
7. Makarenko, A.A., Makhnenko, O.V. (2022) Mathematical modeling of residual stresses in composite welded joints of WWER-1000 reactor vessel cover with CSS nozzles. *The Paton Welding J.*, **1**, 33–40. <https://doi.org/10.37434/as2022.01.05>.
8. Makhnenko, O.V., Kostenevych, O.S. (2020) Impact of technological parameters of arc deposition of an anticorrosion layer in the vessel of WWER-1000 reactor on residual stress distribution. *The Paton Welding J.*, **12**, 2-14. <https://doi.org/10.37434/as2020.12.01>
9. Rabotnov, Yu.N. (1966) Creep of structure elements. Moscow, GIFML [in Russian].
10. Iliyushin, A.A. (2004) *Transactions (1946-1966). Vol. 2: Ductility*. Moscow, Fizmatlit [in Russian].
11. Katanakha, N.A., Semenov, A.S., Getsov, L.V. (2013) Unified model of long-term and short-time creep and identification of its parameters. *Problemy Prochnosti*, **4**, 143–157 [in Russian].
12. Betten, J. (2008) *Creep mechanics*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-85051-9>
13. Naumenko, K., Altenbach, H. (2007) *Modeling of Creep for Structural Analysis*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer. <https://www.springer.com/gb/book/9783540708346>
14. Makhnenko, O.V., Mirzov, I.V., Porokhonko, V.B. (2016) Modeling of residual stresses, radiation swelling and stressed state of in-service WWER-1000 reactor baffle. *The Paton Welding J.*, **4**, 32-38.
15. Margolin, B.Z., Gulenko, A.G., Kursevich, I.P., Buchatskii, A.A. (2006) Modeling for fracture in materials under long-term static creep loading and neutron irradiation. Pt 2: Prediction of creep rupture strength for austenitic materials. *Strength of Materials*, **38**(5), 449–457.
16. Hrivnyak, I. (1984) *Weldability of steels*. Moscow, Mashinostroeniye [in Russian].

References

MATHEMATICAL MODELING OF RESIDUAL STRESS RELAXATION DURING PERFORMANCE OF POSTWELD HEAT TREATMENT

O.V. Makhnenko, O.S. Milenin, O.F. Muzhychenko, S.M. Kandala, O.M. Savytska, G.Yu. Saprykina
 E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
 E-mail: office@paton.kiev.ua

In order to lower the level of residual stresses, welded joints of a number of structural steels are subjected to general or local postweld heat treatment by the high-temperature tempering mode. Mathematical modeling methods are widely used, alongside the experimental investigation methods, to satisfy the continuously growing requirements to welded joint quality and to optimize the welding technology. Mathematical modeling of the process of welded joint heat treatment is often performed using a simplified creep function by Norton-Bailey law at a fixed soaking temperature, but here the processes of ductile deformation taking place during slow prolonged heating and cooling, are ignored. The effectiveness of application of different models of temperature creep for mathematical modeling of the processes of relaxation of residual stresses in welded joints was studied in this work with the purpose of developing recommendations for their application for various characteristic cases of postweld heat treatment. Comparison of the results of modeling the process of stress relaxation performed on a number of examples, showed that the simplified creep function at short-term soaking during general furnace treatment can give an error compared to a more general creep model. Modeling of the local heat treatment technology revealed that the complex geometry of the component and poor choice of the heating element arrangement may lead to negative consequences, namely formation of new high residual stresses. Proper modeling of the processes of relaxation and redistribution of residual stresses in welded joints and structures as a result of general (furnace) or local post-weld heat treatment may optimize the process of furnace heat treatment and improve the quality and fatigue life of the welded structures. 16 Ref., 1 Tabl., 12 Fig.

Keywords: postweld heat treatment, high-temperature annealing, residual welding stresses, stress relaxation, mathematical modeling, creep function

Надійшла до редакції 10.05.2023

СТАНДАРТИЗАЦІЯ В ГАЛУЗІ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ПРОЦЕСІВ

Стандартизація – основа керування якістю. Вона глибоко ввійшла в життя людей для встановлення і застосування правил з метою упорядкування у визначеній області на користь і при участі всіх зацікавлених сторін і зокрема для досягнення загальної економії при дотриманні умов експлуатації (використання) і вимог безпеки.

Нижче представлені структура стандартизації в галузі зварювання та споріднених процесів, категорії стандартів та перелік діючих державних стандартів у зварювальному виробництві України.

Правові та організаційні засади стандартизації в Україні, порядок формування та реалізації державної політики у цій сфері визначаються Законом України «Про стандартизацію» від 05.06.2014 № 1315-VII.

Функції Національного органу стандартизації України (далі НОС) виконує ДП «Український науково-дослідний та навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості».

Україна є повноправним членом Міжнародної організації зі стандартизації (ISO), Міжнародної електротехнічної комісії (IEC), афілійованим членом Європейського комітету стандартизації (CEN), Європейського комітету – стандартизації у галузі електротехніки (CENELEC).

В рамках міжнародного та регіонального співробітництва НОС укладено ліцензійні угоди з:

- Американським товариством випробування матеріалів (ASTM International)
- німецьким інститутом стандартів (DIN);
- Європейським інститутом телекомунікаційних стандартів (ETSI);
- Міжнародною електротехнічною комісією (IEC), а також укладено низку меморандумів про взаєморозуміння у сфері стандартизації з:
 - Американським національним інститутом стандартів (ANSI);
 - Американським товариством інженерів-механіків (ASME);
 - Американським нафтовим інститутом (API).

В Україні існують такі категорії стандартів:

- державні стандарти України (ДСТУ);
- державні стандарти України, за допомогою яких запроваджені міжнародні стандарти (ДСТУ ISO);
- державні стандарти України, за допомогою яких запроваджені стандарти Міжнародної електротехнічної комісії (ДСТУ IEC);
- державні стандарти України, за допомогою яких впроваджені стандарти спільного комітету міжнародних організацій зі стандартизації (ДСТУ ISO/IEC);
- державні стандарти України, за допомогою яких запроваджено європейські стандарти (ДСТУ EN, ДСТУ EN ISO).

Структура Міжнародного інституту стандартизації (ISO) має Технічний комітет TC 44 «Зварювання та споріднені процеси», до складу якого входять підкомітети (SC) та робочі групи (WG):

| Номер підкомітету | Назва |
|--------------------------------|--|
| ISO/TC 44/SC 3 | Зварювальні матеріали |
| ISO/TC 44/SC 5 | Випробування та контроль зварних швів |
| ISO/TC 44/SC 6 | Контактне зварювання та відповідні механічні з'єднання |
| ISO/TC 44/SC 7 | Визначення та терміни |
| ISO/TC 44/SC 8 | Устаткування для газового зварювання, різання та споріднених процесів |
| ISO/TC 44/SC 9 | Здоров'я та безпека |
| ISO/TC 44/SC 10 | Менеджмент якості в галузі зварювання |
| ISO/TC 44/SC 11 | Кваліфікаційні вимоги для персоналу зварювальних та споріднених процесів |
| ISO/TC 44/SC 12 | Матеріали для паяння |
| ISO/TC 44/SC 13 ISO/TC 44/WG 3 | Матеріали і процеси паяння |
| ISO/TC 44/SC 14 ISO/TC 44/WG 4 | Зварювання та паяння в аерокосмічній галузі |
| ISO/TC 44/SC 15 ISO/TC 44/WG 1 | Підводне зварювання |
| ISO/TC 44/WG 5 | Моделювання зварювання |
| ISO/TC 138 | Пластикові труби, фітінги та клапани для транспортування рідин |
| ISO/TC269 | Залізничні програми «SC1» Інфраструктура |

Міжнародна електротехнічна комісія (IEC) – це міжнародна організація зі стандартизації у сфері електричних, електронних і суміжних технологій. Деякі із стандартів IEC розробляються спільно з Міжнародною організацією із стандартизації (ISO/IEC).

Структура Європейського комітету стандартизації (CEN) має Технічний комітет CEN TC 121 «Зварювання», до складу якого входять підкомітети (SC) та робочі групи (WG).

| Номер підкомітету | Назва |
|-------------------|--|
| CEN/TC 121/SC 1 | Вимоги та атестація технології зварювання металевих матеріалів |
| CEN/TC 121/SC 2 | Вимоги до атестації персоналу, який займається зварюванням і суміжними процесами |
| CEN/TC 121/SC 3 | Витратні матеріали для зварювання |
| CEN/TC 121/SC 4 | Управління якістю у сфері зварювання |
| CEN/TC 121/SC 5 | Випробування зварних швів (руйнівне та неруйнівне) |
| CEN/TC 121/SC 6 | Зварювання – визначення та терміни |
| CEN/TC 121/SC 7 | Обладнання для газового зварювання, різання та суміжних процесів |
| CEN/TC 121/SC 8 | Паяння |
| CEN/TC 121/SC 9 | Здоров'я та безпека під час зварювання та суміжних процесів |
| CEN/TC 121/WG 11 | Зварювання шпильок |
| CEN/TC 121/WG 12 | Зварювання тертям |
| CEN/TC 121/WG 13 | Руйнівний контроль |
| CEN/TC 121/WG 14 | Оцінка придатності для експлуатації |
| CEN/TC 121/WG 15 | Зварювання. Цехові ґрунтовки |
| CEN/TC 121/WG 16 | Зварювання арматурної сталі |
| CEN/TC 121/WG 17 | Зварювання та суміжні процеси. Екологічний контрольний список |
| CEN/TC 121/WG 18 | Термінологія |
| CEN/TC 121/WG 19 | Обладнання для газового зварювання, різання та суміжних процесів |
| CEN/TC 121/WG 20 | Пайка |
| CEN/TC 121/WG 21 | Випробування зварних швів |
| CEN/TC 121/WG 3 | Витратні матеріали для зварювання |
| CEN/TC 121/WG 9 | Здоров'я та безпека під час зварювання та суміжних процесів |

Європейський комітет стандартизації у галузі електротехніки (CENELEC) є асоціацією, яка об'єднує національні електротехнічні комітети 34 європейських країн CENELEC, готує добровільні стандарти в електротехнічній галузі CEN і CENELEC – це європейські організації зі стандартизації. CEN (Європейський комітет зі стандартизації) і CENELEC (Європейський комітет з електротехнічної стандартизації) – це дві організації, що працюють разом для розроблення стандартів у Європі.

Для розробки та впровадження державних стандартів у зварювальному виробництві України на базі ІЕЗ ім. Є.О. Патона створено Технічний комітет ТК 44 «Зварювання та споріднені процеси», до складу якого входять підкомітети (ПК).

| Номер підкомітету | Назва |
|-------------------|--|
| ПК 1 | Матеріали для зварювання |
| ПК 2 | Електрозварювальне обладнання |
| ПК 3 | Оцінка відповідності в галузі зварювання |
| ПК 4 | Персонал у зварювальному виробництві |
| ПК 5 | Руйнівне випробування |
| ПК 6 | Зварні конструкції |
| ПК 7 | Паяння |
| ПК 8 | Наплавлення, нанесення покриттів |
| ПК 9 | Зварювання полімерних та інших неметалічних матеріалів |
| ПК 10 | Безпека праці в зварювальному виробництві |

Примітка. В переліку стандартів відсутні роки введення в дію з урахування постійних змін років введення. Актуальні дати введення можливо знайти на сайті: УкрНДНЦ каталог.

Нижче наведено Перелік діючих державних стандартів ДСТУ ISO, ДСТУ ІЕС, ДСТУ ISO/ІЕС, ДСТУ EN, ДСТУ EN ISO у зварювальному виробництві України, закріплених за ТК 44 «Зварювання та споріднені процеси».

Матеріали для зварювання та споріднених процесів, вимоги до якості

| | |
|----------------------|---|
| ДСТУ EN ISO 1071 | Матеріали зварювальні. Електроди покриті, дроти, прутки та дроти порошкові для зварювання плавленням чавуну. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 2560 | Матеріали зварювальні. Електроди покриті для ручного дугового зварювання нелегованої та дрібнозернистої сталі. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 3580 | Матеріали зварювальні. Електроди з покриттям для ручного дугового зварювання жароміцних сталей. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 3581 | Матеріали зварювальні. Електроди з покриттям для ручного дугового зварювання нержавіючих та жароміцних сталей. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 18275 | Матеріали зварювальні. Електроди для ручного дугового зварювання жароміцних сталей. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 14172 | Матеріали зварювальні. Електроди з покривом для ручного дугового зварювання нікелю та його сплавів. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 18273 | Матеріали зварювальні. Електроди, дріт та прутки для зварювання алюмінію та його сплавів. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 2401 | Електроди покриті. Визначення коефіцієнта використання, переходу металу та коефіцієнта наплавлення |
| ДСТУ EN ISO 24598 | Матеріали зварювальні. Дроти електродні суцільні й порошкові та комбінації дріт електродний/флюс для дугового зварювання під флюсом жароміцних сталей. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 636 | Матеріали зварювальні. Прутки, дріт та наплавлений метал для зварювання нелегованих і дрібнозернистих сталей вольфрамовим електродом в інертних газах. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 14343 | Матеріали зварювальні. Дроти та стрічки електродні, дроти та прутки для дугового зварювання нержавіючих і жароміцних сталей. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 24373 | Матеріали зварювальні. Дріт і прутки суцільні для зварювання плавленням міді та мідних сплавів. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 24034 | Матеріали зварювальні. Дроти електродні суцільні, дроти та прутки суцільні для зварювання плавленням титану та його сплавів. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 18274 | Матеріали зварювальні. Дроти та стрічки електродні, дроти та прутки для зварювання плавленням нікелю та нікелевих сплавів. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 16834 | Матеріали зварювальні. Дроти електродні, дроти, прутки та наплавлений метал для дугового зварювання високоміцних сталей у захисному газі. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 12153 | Матеріали зварювальні. Дроти порошкові для дугового зварювання нікелю та його сплавів у захисному газі чи без захисного газу. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 21952 | Матеріали зварювальні. Дроти електродні, дроти, прутки та наплавлений метал для дугового зварювання жароміцних сталей у захисних газах. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 12153 | Матеріали зварювальні. Дроти порошкові для дугового зварювання нікелю та його сплавів у захисному газі або без захисного газу. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 21952 | Матеріали зварювальні. Дроти електродні, дроти, прутки та наплавлений метал для дугового зварювання жароміцних сталей у захисних газах. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 17632 | Матеріали зварювальні. Дроти порошкові для дугового зварювання нелегованих та дрібнозернистих сталей у захисному газі чи без захисного газу. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 17633 | Матеріали зварювальні. Дроти та прутки порошкові для дугового зварювання нержавіючих і жароміцних сталей у захисному газі або без захисного газу. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 17633/A1 | Матеріали зварювальні. Дроти та прутки порошкові для дугового зварювання нержавіючих і жароміцних сталей у захисному газі або без захисного газу. Класифікація. Поправка 1 |
| ДСТУ EN ISO 17634 | Матеріали зварювальні. Дроти порошкові для дугового зварювання жароміцних сталей у захисних газах. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 18276 | Матеріали зварювальні. Дроти порошкові для дугового зварювання високоміцних сталей у захисних газах або без захисного газу. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 26304 | Матеріали зварювальні. Дроти електродні суцільні, порошкові та комбінації дріт електродний/флюс для дугового зварювання під флюсом високоміцних сталей. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 14171 | Матеріали зварювальні. Дроти електродні суцільні й порошкові та комбінації дріт електродний/флюс для дугового зварювання під флюсом нелегованих та дрібнозернистих сталей. Класифікація |
| ДСТУ EN ISO 14174 | Матеріали зварювальні. Флюси для дугового зварювання під флюсом. Класифікація |
| ДСТУ EN 14700 | Матеріали зварювальні. Зварювальні матеріали для наплавлення |
| ДСТУ EN ISO 6847 | Матеріали зварювальні. Наплавлення шару металу для хімічного аналізу |
| ДСТУ EN 12074 | Матеріали зварювальні. Вимоги до якості виготовлення, постачання і продажу зварювальних матеріалів для зварювання та споріднених процесів |

| | |
|--------------------|---|
| ДСТУ EN 13479 | Матеріали зварювальні. Загальні вимоги до зварювальних матеріалів та флюсів для зварювання плавленням металевих матеріалів |
| ДСТУ EN ISO 544 | Матеріали зварювальні. Технічні умови постачання присадних матеріалів і флюсів. Тип продукції, розміри, допуски та маркування |
| ДСТУ EN ISO 14344 | Зварювальні матеріали. Постачання зварювальних матеріалів та флюсів |
| ДСТУ EN ISO 5182 | Контактне зварювання. Матеріали для електродів і допоміжного обладнання |
| ДСТУ EN 21089 | Конусоподібний електрод для точкового зварювального обладнання. Розміри |
| ДСТУ EN 20693 | Розміри заготовок кругів для шовного зварювання |
| ДСТУ ISO 1089 | Електроди для точкового зварювального обладнання. Розміри |
| ДСТУ ISO 5184 | Електроди для контактного точкового зварювання |
| ДСТУ EN ISO 18496 | Паяння. Флюси для паяння. Класифікація та технічні умови постачання |
| ДСТУ EN ISO 9454-1 | Флюси для м'якого паяння. Класифікація та вимоги. Частина 1. Класифікація, маркування та пакування |
| ДСТУ EN ISO 9454-2 | Флюси для м'якого паяння. Класифікація та вимоги. Частина 2. Вимоги до продуктивності |
| ДСТУ EN ISO 3677 | Матеріали присадні для паяння м'яким і твердим припоєм. Позначення |
| ДСТУ EN ISO 17672 | Паяння. Присадні матеріали |
| ДСТУ EN ISO 13918 | Зварювання. Шпильки та керамічні втулки для дугового зварювання шпильок |

Процеси, технології зварювання, технологічні інструкції (WPS), протоколи підтвердження (WPQR)

| | |
|------------------------|---|
| ДСТУ EN 1011-1 | Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів Частина 1. Загальні правила щодо дугового зварювання |
| ДСТУ EN 1011-2 | Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів Частина 2. Дугове зварювання феритних сталей |
| ДСТУ EN 1011-2/A1 | Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів Частина 2. Дугове зварювання феритних сталей. Розроблення Зміни № 1 до ДСТУ EN 1011-2 |
| ДСТУ EN 1011-3 | Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів Частина 3. Дугове зварювання нержавіючих сталей |
| ДСТУ EN 1011-4 | Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 4. Дугове зварювання алюмінію та алюмінієвих сплавів. |
| ДСТУ EN 1011-4/A1 | Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 4. Дугове зварювання алюмінію та алюмінієвих сплавів |
| ДСТУ EN 1011-5 | Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 5. Зварювання плакованої сталі |
| ДСТУ EN 1011-6 | Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 6. Зварювання лазерним променем |
| ДСТУ EN 1011-7 | Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 7. Електронно-променево зварювання |
| ДСТУ EN 1011-8 | Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 8. Зварювання чавунів |
| ДСТУ EN ISO 4063 | Зварювання та споріднені процеси. Перелік й умовні позначки процесів |
| ДСТУ EN ISO 6947 | Зварювання та споріднені процеси. Робочі положення |
| ДСТУ EN ISO 11970 | Технічні умови та атестація технології виробничого зварювання сталевих виливок |
| ДСТУ CEN/TR 14745 | Зварювання. Параметри термічної обробки сталі після зварювання |
| ДСТУ EN ISO 25239-2 | Зварювання тертям із перемішуванням. Алюміній. Частина 2. Проектування зварних з'єднань |
| ДСТУ EN ISO 25239-4 | Зварювання тертям із перемішуванням. Алюміній. Частина 4. Технічні умови та атестація технології зварювання |
| ДСТУ EN ISO 8167 | Зварювання контактне. Рельєфне зварювання виступів. Виступи для контактного зварювання |
| ДСТУ EN ISO 18595 | Зварювання контактне. Точкове зварювання алюмінію та алюмінієвих сплавів. Зварюваність, зварювання та випробування |
| ДСТУ EN ISO 15607 | Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Загальні правила |
| ДСТУ EN ISO 15614-1 | Технічні умови і атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 1. Дугове і газове зварювання сталей та дугове зварювання нікелю і нікелевих сплавів. |
| ДСТУ EN ISO 15614-1/A1 | Технічні умови й атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 1. Дугове та газове зварювання сталі та дугове зварювання нікелю та нікелевих сплавів. |
| ДСТУ EN ISO 15614-2 | Технічні умови і атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 2. Дугове зварювання алюмінію та алюмінієвих сплавів. |
| ДСТУ EN ISO 15614-3 | Технічні умови і атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 3. Зварювання плавленням нелегованих та низьколегованих чавунів |
| ДСТУ EN ISO 15614-4 | Технічні умови й атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 4. Дугове зварювання дефектів алюмінієвих відливок |

| | |
|------------------------|--|
| ДСТУ EN ISO 15614-4/AC | Технічні умови й атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 4. Дугове зварювання дефектів алюмінієвих відливок |
| ДСТУ EN ISO 15614-5 | Технічні умови й атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 5. Дугове зварювання титану, цирконію та їхніх сплавів |
| ДСТУ EN ISO 15614-6 | Технічні умови й атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 6. Дугове і газове зварювання міді та її сплавів |
| ДСТУ EN ISO 15614-8 | Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 8. Зварювання труб із трубною плитою |
| ДСТУ EN ISO 15614-10 | Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 10. Зварювання сухе гіпербаричне |
| ДСТУ EN ISO 15614-11 | Технічні умови й атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 11. Електронно-променево та лазерно-променево зварювання |
| ДСТУ EN ISO 15614-12 | Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 12. Зварювання точкове, шовне та рельєфне |
| ДСТУ EN ISO 15614-13 | Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 13. Зварювання опором встик та зварювання встик з оплавленням |
| ДСТУ EN ISO 15614-14 | Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Випробування процесів зварювання. Частина 14. Лазерно-дугове гібридне зварювання сталей, нікелю та нікелевих сплавів |
| ДСТУ EN ISO 15610 | Технічні умови та атестація технологічних процесів зварювання металевих матеріалів. Атестація на основі випробуваних зварювальних матеріалів |
| ДСТУ EN ISO 15611 | Технічні умови та атестація технологічних процесів зварювання металевих матеріалів. Атестація на основі набутого зварювально-технічного досвіду |
| ДСТУ EN ISO 15612 | Технічні умови та атестація технологічних процесів зварювання металевих матеріалів. Атестація через прийняття стандартної технологічної інструкції зі зварювання |
| ДСТУ EN ISO 15613 | Технічні умови та атестація технологій зварювання металевих матеріалів. Атестація на основі до виробничих випробувань |
| ДСТУ EN ISO 18785-2 | Точкове зварювання тертям із перемішуванням. Алюміній. Частина 2. Проектування зварних з'єднань |
| ДСТУ EN ISO 18785-4 | Точкове зварювання тертям із перемішуванням. Алюміній. Частина 4. Технічні умови та атестація технології зварювання |
| ДСТУ EN ISO 2553 | Зварювання та споріднені процеси. Умовні позначки на кресленнях. Зварні з'єднання |
| ДСТУ EN ISO 15609-1 | Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Технологічна інструкція зі зварювання. Частина 1. Дугове зварювання |
| ДСТУ EN ISO 15609-2 | Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Технологічна інструкція зі зварювання. Частина 2. Газове зварювання |
| ДСТУ EN ISO 15609-3 | Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Технологічна інструкція зі зварювання. Частина 3. Електронно-променево зварювання |
| ДСТУ EN ISO 15609-4 | Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Технологічна інструкція зі зварювання. Частина 4. Лазерне зварювання |
| ДСТУ EN ISO 15609-5 | Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Технологічна інструкція зі зварювання. Частина 5. Контактне зварювання |
| ДСТУ EN ISO 15609-6 | Технічні умови та атестація технології зварювання металевих матеріалів. Технологічна інструкція зі зварювання. Частина 6. Гібридне лазерно-дугове зварювання |
| ДСТУ EN ISO 17279-1 | Зварювання. Мікроз'єднання високотемпературних надпровідників 2-го покоління. Частина 1. Загальні вимоги до атестації технологій |
| ДСТУ EN ISO 14373 | Зварювання опором. Процедура точкового зварювання низько вуглецевих сталей без покриву та з покривом |
| ДСТУ EN ISO 18278-1 | Контактне зварювання. Зварюваність Частина 1. Загальні вимоги до оцінювання зварюваності контактного точкового, шовного та рельєфного зварювання металевих матеріалів |
| ДСТУ EN ISO 18278-2 | Контактне зварювання. Зварюваність Частина 2. Процедури оцінювання зварюваності під час точкового зварювання |
| ДСТУ EN ISO 18278-3 | Контактне зварювання. Зварюваність Частина 3. Процедури оцінювання зварюваності під час точкового зварювання (з адгезивним склеюванням) |
| ДСТУ CEN ISO/TR 14745 | Зварювання. Параметри термічної обробки сталі після зварювання |
| ДСТУ EN ISO 13916 | Зварювання. Вимірювання температури попереднього підігріву, температури між проходами та температури підтримки попереднього підігріву |
| ДСТУ EN ISO 15620 | Зварювання. Зварювання тертям металевих матеріалів |
| ДСТУ CEN ISO/TR 17844 | Зварювання. Порівняння стандартизованих методів уникнення холодних тріщин |
| ДСТУ CEN/TS 14751 | Зварювання. Використання дифракційно-часового методу (TOFD) для контролю зварних швів |
| ДСТУ EN ISO 6520-1 | Зварювання та споріднені процеси. Класифікація геометричних дефектів у металевих матеріалах. Частина 1. Зварювання плавленням |

| | |
|-----------------------|--|
| ДСТУ EN ISO 6520-2 | Зварювання та споріднені процеси. Класифікація геометричних дефектів у металевих матеріалах. Частина 2. Зварювання тиском |
| ДСТУ EN ISO 9692-1 | Зварювання та споріднені процеси. Рекомендації щодо підготування зварних з'єднань. Частина 1. Ручне дугове зварювання, зварювання в захисному газі, газове зварювання, TIG – зварювання та променеве зварювання сталей |
| ДСТУ EN ISO 9692-2 | Зварювання та споріднені процеси. Рекомендації щодо підготування зварних з'єднань. Частина 2. Дугове зварювання сталей під флюсом |
| ДСТУ EN ISO 9692-3 | Зварювання та споріднені процеси. Рекомендації щодо підготування зварних з'єднань. Частина 3. Дугове зварювання алюмінію та алюмінієвих сплавів в інертному газі плавким і вольфрамовим електродом |
| ДСТУ EN ISO 9692-4 | Зварювання та споріднені процеси. Рекомендації щодо підготування зварних з'єднань. Частина 4. Плаковані сталі |
| ДСТУ EN ISO 13916 | Зварювання. Настанова щодо вимірювання температури попереднього нагрівання, температури металу між проходами зварювання та температури підтримуваного попереднього нагрівання |
| ДСТУ EN ISO 17660-1 | Зварювання. Зварювання арматурної сталі. Частина 1. Зварні з'єднання, що несуть навантаження |
| ДСТУ EN ISO 17660-2 | Зварювання. Зварювання арматурної сталі. Частина 2. Зварні з'єднання, що не несуть навантаження |
| ДСТУ ISO/TR 17671-1 | Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 1. Настанови щодо дугового зварювання |
| ДСТУ ISO/TR 17671-2 | Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 2. Дугове зварювання феритних сталей |
| ДСТУ ISO/TR 17671-3 | Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 3. Дугове зварювання нержавіючих сталей |
| ДСТУ ISO/TR 17671-4 | Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 4. Дугове зварювання алюмінію та його сплавів |
| ДСТУ ISO/TR 17671-5 | Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 5. Зварювання плакованої сталі |
| ДСТУ ISO/TR 17671-6 | Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 6. Зварювання лазерне |
| ДСТУ ISO/TR 17671-7 | Зварювання. Рекомендації щодо зварювання металевих матеріалів. Частина 7. Електронно-променеве зварювання |
| ДСТУ EN ISO 16432 | Зварювання опором. Процедура рельєфного зварювання низьковуглецевих сталей без покриву та з покривом з використанням рельєфних проекцій |
| ДСТУ EN ISO 16433 | Зварювання опором. Процедура шовного зварювання низьковуглецевих сталей без покриву та з покривом |
| ДСТУ ISO 16338 | Зварювання в авіаційно-космічній промисловості. Точкове та шовне зварювання |
| ДСТУ EN ISO 13920 | Зварювання. Загальні допуски для зварних конструкцій. Розміри лінійні та кутові. Форма та положення |
| ДСТУ ISO/TR 581 | Зварюваність. Металеві матеріали. Загальні положення |
| ДСТУ ISO/TR 18491 | Зварювання та споріднені процеси. Настанови з вимірювання енергії зварювання |
| ДСТУ EN 1708-1 | Зварювання. Зварні з'єднання сталевих елементів Частина 1. Зварні з'єднання конструкційних елементів, що працюють під тиском |
| ДСТУ EN 1708-2 | Зварювання. Зварні з'єднання сталевих елементів. Частина 2. Зварні з'єднання конструкційних елементів, на які не діє внутрішній тиск |
| ДСТУ EN 1708-3 | Зварювання. Зварні з'єднання сталевих елементів. Частина 3. Зварні з'єднання з плакованих і промаслених, зморшкуватих конструкційних елементів, що працюють під тиском |
| ДСТУ EN ISO 14555 | Зварювання. Дугове приварювання шпильок з металевих матеріалів |
| ДСТУ EN ISO 3690 | Зварювання та споріднені процеси. Визначення вмісту водню в металі шва під час дугового зварювання |
| ДСТУ CEN ISO/TS 17845 | Зварювальні та споріднені процеси. Система позначення дефектів |
| ДСТУ CEN ISO/TR 15608 | Зварювання. Настанови щодо класифікації металевих матеріалів за групами |
| ДСТУ CEN ISO/TR 20172 | Зварювання. Системи групування матеріалів. Європейські матеріали |
| ДСТУ CEN ISO/TR 20173 | Зварювання. Системи групування матеріалів. Американські матеріали |
| ДСТУ CEN ISO/TR 20174 | Зварювання. Системи групування матеріалів. Японські матеріали |

Споріднені процеси і технології

| | |
|--------------------|--|
| ДСТУ EN ISO 2063-1 | Напилення термічне. Цинк, алюміній та їх сплави. Частина 1. Вимоги до проектування та якості систем захисту від корозії. |
| ДСТУ EN ISO 2063-2 | Напилення термічне. Цинк, алюміній та їх сплави Частина 2. Виконання систем антикорозійного захисту. |

| | |
|------------------------------|--|
| ДСТУ EN ISO 12670 | Напилення термічне. Компоненти з термічно напиленим покриттям. Технічні умови постачання. |
| ДСТУ EN ISO 12679 | Напилення термічне. Рекомендації щодо термічного напилення. |
| ДСТУ EN ISO 14713-1 | Покриття цинкові. Настанови та рекомендації щодо захисту від корозії конструкцій із чавуну та сталі Частина 1. Загальні принципи проектування та корозійної стійкості. |
| ДСТУ EN ISO 14713-2 | Покриття цинкові. Настанови та рекомендації щодо захисту від корозії конструкцій із чавуну та сталі Частина 2. Гаряче цинкування. |
| ДСТУ EN 12799 | Паяння. Неруйнівний контроль паяних з'єднань |
| ДСТУ EN 12799/A1 | Паяння. Неруйнівний контроль паяних з'єднань |
| ДСТУ EN 14324 | Паяння твердим припоем. Настанова щодо застосування паяних з'єднань |
| ДСТУ EN 13134 | Паяння твердим припоем. Випробування процесу |
| ДСТУ EN ISO 18279 | Паяння. Дефекти в паяних швах |
| ДСТУ CEN/TS 16892 | Пластмаси. Зварювання термопластів. Технологічна інструкція зі зварювання |
| ДСТУ EN 12943 | Матеріали присадкові для термопластів. Область застосування, призначення, вимоги, випробування |
| ДСТУ EN 14728 | Дефекти у зварних швах термопластів. Класифікація |
| ДСТУ EN 15085-1 | Залізниця. Зварювання рейкового рухомого складу та його елементів. Частина 1. Загальні положення |
| ДСТУ EN 15085-2 | Залізниця. Зварювання рейкового рухомого складу та його елементів. Частина 2. Вимоги щодо якості та сертифікації зварників |
| ДСТУ EN 15085-3 | Залізниця. Зварювання рейкового рухомого складу та його елементів. Частина 3. Вимоги щодо проектування |
| ДСТУ EN 15085-3/Поправка № 1 | Залізниця. Зварювання рейкового рухомого складу та його елементів. Частина 3. Вимоги щодо проектування |
| ДСТУ EN 15085-4 | Залізниця. Зварювання рейкового рухомого складу та його елементів. Частина 4. Технологічні вимоги |
| ДСТУ EN 15085-5 | Залізниця. Зварювання рейкового рухомого складу та його елементів. Частина 5. Контролювання, випробування та документування |
| ДСТУ EN ISO 15620 | Зварювання. Зварювання тертям металевих матеріалів |
| ДСТУ EN ISO 9013 | Газове різання. Класифікація. Вимоги до геометричних розмірів та якості |

Випробування

| | |
|---------------------|--|
| ДСТУ EN ISO 4136 | Випробування на руйнування зварних швів металевих матеріалів. Випробування на поперечний розтяг |
| ДСТУ EN ISO 5173 | Випробування зварних з'єднань металевих матеріалів руйнівні. Випробування на згин |
| ДСТУ EN ISO 5178 | Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Випробування на поздовжнє розтягування металу зварного шва в з'єднаннях, виконаних зварюванням плавленням |
| ДСТУ EN ISO 8249 | Зварювання. Визначення феритної фази (FN) у металі зварного шва аустенітних і дуплексних феритно-аустенітних Cr-Ni нержавіючих сталей |
| ДСТУ EN ISO 9015-1 | Випробування зварних з'єднань металевих матеріалів руйнівні. Випробування на твердість. Частина 1. Випробування на твердість зварних з'єднань, виконаних дуговим зварюванням |
| ДСТУ EN ISO 9015-2 | Випробування зварних з'єднань металевих матеріалів руйнівні. Випробування на твердість. Частина 2. Випробування на мікротвердість зварних з'єднань |
| ДСТУ EN ISO 9016 | Руйнівні випробування зварних швів металевих матеріалів. Випробування на удар. Розташування зразка для випробування, орієнтація надрізу та випробування |
| ДСТУ EN ISO 9017 | Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Випробування на руйнування |
| ДСТУ EN ISO 9018 | Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Випробування на розтягування хрестоподібних з'єднань і з'єднань внакладку |
| ДСТУ EN ISO 17652-1 | Зварювання. Випробування заводської ґрунтовки для зварювання та споріднених процесів. Частина 1. Загальні вимоги. |
| ДСТУ EN ISO 17652-2 | Зварювання. Випробування заводської ґрунтовки для зварювання та споріднених процесів. Частина 2. Зварювальні властивості заводських ґрунтовок. |
| ДСТУ EN ISO 17652-3 | Зварювання. Випробування заводської ґрунтовки для зварювання та споріднених процесів. Частина 3. Термічне різання. |
| ДСТУ EN ISO 17652-4 | Зварювання. Випробування заводської ґрунтовки для зварювання та споріднених процесів. Частина 4. Викид парів та газів. |
| ДСТУ EN ISO 1461 | Покриття, нанесене методом гарячого цинкування на вироби із чавуну та сталі. Технічні вимоги та методи випробування. |
| ДСТУ EN ISO 14272 | Зварювання контактне. Руйнівні випробування зварних швів. Розміри зразка та процедура випробування на поперечний розтяг точкових і рельєфних виступаючих зварних швів |
| ДСТУ EN ISO 18594 | Контактне точкове, рельєфне та шовне зварювання. Метод визначення перехідного опору на алюмінієвих і сталевих матеріалах |

| | |
|---------------------|---|
| ДСТУ EN ISO 14271 | Контактне зварювання. Випробування на твердість за Віккерсом (низька сила та мікротвердість) опорного точкового, виступаючого та шовного зварювання |
| ДСТУ CEN/TR 15481 | Зварювання арматурної сталі. Зварюваність прихваток. Методи випробування та вимоги до продуктивності |
| ДСТУ EN ISO 17657-1 | Зварювання контактне. Вимірювання зварювального струму контактного зварювання. Частина 1. Наставови щодо вимірювання |
| ДСТУ EN ISO 17657-2 | Зварювання контактне. Вимірювання зварювального струму для контактного зварювання. Частина 2. Вимірювач зварювального струму з котушкою, що визначає струм |
| ДСТУ EN ISO 17657-3 | Зварювання контактне. Вимірювання зварювального струму для контактного зварювання. Частина 3. Котушка вимірювання струму |
| ДСТУ EN ISO 17657-4 | Зварювання контактне. Вимірювання зварювального струму для контактного зварювання. Частина 4. Система калібрування |
| ДСТУ EN ISO 17657-5 | Зварювання контактне. Вимірювання зварювального струму для контактного зварювання. Частина 5. Перевірка системи вимірювання зварювального струму |
| ДСТУ EN ISO 9455-1 | Флюси для паяння м'яким припоєм. Методи випробувань Частина 1. Визначення вмісту нелетких речовин, гравіметричний метод |
| ДСТУ EN ISO 9455-2 | Флюси для паяння м'яким припоєм. Методи випробувань Частина 2. Визначення вмісту нелетких речовин, ебуліометричний метод |
| ДСТУ EN ISO 9455-3 | Флюси для м'якого паяння. Методи випробувань. Частина 3. Визначення кислотного числа, потенціометричні та візуальні методи титрування |
| ДСТУ EN ISO 9455-5 | Флюси для паяння м'яким припоєм. Методи випробувань. Частина 5. Випробування за допомогою мідного дзеркала |
| ДСТУ EN ISO 9455-6 | Флюси для м'якого паяння. Методи випробувань. Частина 6. Визначення та виявлення вмісту галогенідів (за винятком фториду) |
| ДСТУ EN ISO 9455-8 | Флюси для м'якого паяння. Методи випробувань. Частина 8. Визначення вмісту цинку |
| ДСТУ EN ISO 9455-9 | Флюси для м'якого паяння. Методи випробувань. Частина 9. Визначення вмісту аміаку |
| ДСТУ EN ISO 9455-10 | Флюси для м'якого паяння. Методи випробувань. Частина 10. Випробування ефективності флюсу, метод розподілу припою |
| ДСТУ EN ISO 9455-11 | Флюси для м'якого паяння. Методи випробувань. Частина 11. Розчинність залишків флюсу |
| ДСТУ EN ISO 9455-13 | Флюси для паяння м'яким припоєм. Методи випробувань. Частина 13. Визначення розбризкування флюсу |
| ДСТУ EN ISO 9455-14 | Флюси для паяння м'яким припоєм. Методи випробувань. Частина 14. Оцінка липкості залишків флюсу |
| ДСТУ EN ISO 9455-15 | Флюси для м'якого паяння. Методи випробувань. Частина 15. Випробування на корозію міді |
| ДСТУ EN ISO 9455-16 | Флюси для м'якого паяння. Методи випробувань. Частина 16. Випробування ефективності флюсу, метод балансу змочування |
| ДСТУ EN ISO 9455-17 | Флюси для паяння м'яким припоєм. Методи випробувань. Частина 17. Випробування гребінчастим опором ізоляції поверхні та випробування на електрохімічну міграцію залишків флюсу |
| ДСТУ EN ISO 12224-2 | Дріт порошковий для паяння. Технічні умови та методи випробувань Частина 2. Визначення вмісту флюсу |
| ДСТУ EN 12797 | Паяння. Випробування руйнівні паяних з'єднань |
| ДСТУ EN 14532-1 | Матеріали зварювальні. Методи випробування та вимоги до якості. Частина 1. Основні методи та оцінювання відповідності зварювальних матеріалів для сталі, нікелю та нікелевих сплавів |
| ДСТУ EN 14532-2 | Матеріали зварювальні. Методи випробування та вимоги до якості. Частина 2. Додаткові методи та оцінювання відповідності матеріалів зварювальних для зварювання сталі, нікелю та нікелевих сплавів |
| ДСТУ EN 14532-3 | Матеріали зварювальні. Методи випробування та вимоги до якості Частина 3. Оцінка відповідності електродних дротів, дротів та прутків для зварювання алюмінієвих сплавів |
| ДСТУ EN ISO 17654 | Зварювання контактне. Руйнівні випробування зварних швів. Випробування під тиском роликів зварних швів |
| ДСТУ EN ISO 17279-3 | Зварювання. Мікроз'єднання високотемпературних надпровідників другого покоління. Частина 3. Методи випробування з'єднань |
| ДСТУ EN ISO 14372 | Матеріали зварювальні. Визначення вологостійкості електродів для ручного дугового зварювання вимірюванням дифузійного водню |
| ДСТУ EN ISO 15792-1 | Матеріали зварювальні. Методи випробувань Частина 1. Методи випробування зразків наплавленого металу зі сталі, нікелю і нікелевих сплавів |
| ДСТУ EN ISO 15792-2 | Матеріали зварювальні. Методи випробувань. Частина 2. Підготовка зразків для випробування одно- та двосторонніх з'єднань зі сталі |
| ДСТУ EN ISO 15792-3 | Матеріали зварювальні. Методи випробувань. Частина 3. Класифікаційні випробування зварювальних матеріалів за положенням при зварюванні та проплавленням кореня шва в кутових зварних швах |

| | |
|------------------------------|---|
| ДСТУ EN 12814-1 | Випробування зварних з'єднань напівфабрикатів з термопластів. Частина 1. Випробування на згин |
| ДСТУ EN 12814-1/Поправка № 1 | Випробування зварних з'єднань напівфабрикатів з термопластів. Частина 1. Випробування на згин |
| ДСТУ EN 12814-2 | Випробування зварних з'єднань напівфабрикатів з термопластів. Частина 2. Випробування на розтяг |
| ДСТУ EN 12814-3 | Випробування зварних з'єднань напівфабрикатів з термопластів. Частина 3. Випробування на повзучість під час розтягу |
| ДСТУ EN 12814-4 | Випробування зварних з'єднань напівфабрикатів з термопластів. Частина 4. Випробування на відривання |
| ДСТУ EN 12814-4/AC | Випробування зварних з'єднань напівфабрикатів із термопластів. Частина 4. Випробування на відривання. |
| ДСТУ EN 12814-5 | Випробування зварних з'єднань напівфабрикатів з термопластів. Частина 5. Макроскопічне дослідження |
| ДСТУ EN 12814-6 | Випробування зварних з'єднань напівфабрикатів з термопластів. Частина 6. Випробування на розтяг за низьких температур |
| ДСТУ EN 12814-7 | Випробування зварних з'єднань напівфабрикатів з термопластів. Частина 7. Випробування на розтяг випробних зразків зі звуженою частиною у зварному шві |
| ДСТУ EN 12814-8 | Випробування зварних з'єднань напівфабрикатів з термопластів. Частина 8. Вимоги |
| ДСТУ EN 12814-8/Поправка № 1 | Випробування зварних з'єднань напівфабрикатів з термопластів. Частина 8. Вимоги |
| ДСТУ EN ISO 17641-1 | Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Випробування на опірність утворенню гарячих тріщин. Дугове зварювання. Частина 1. Загальні положення |
| ДСТУ EN ISO 17641-2 | Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Випробування на опірність утворенню гарячих тріщин. Дугове зварювання. Частина 2. Випробування на самозакріплених зразках |
| ДСТУ EN ISO 17639 | Руйнівні випробування зварних з'єднань металевих матеріалів. Макроскопічне та мікроскопічне оцінювання зварних з'єднань |
| ДСТУ CEN ISO/TR 16060 | Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Травлення для макро-та мікроскопічного дослідження |
| ДСТУ EN ISO 17642-1 | Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Випробування на опірність утворенню холодних тріщин у зварних з'єднаннях. Дугове зварювання. Частина 1. Загальні положення |
| ДСТУ EN ISO 17642-2 | Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Випробування на опірність утворенню холодних тріщин у зварних з'єднаннях. Дугове зварювання. Частина 2. Випробування на самозакріплених зразках |
| ДСТУ EN ISO 17642-3 | Випробування руйнівні зварних з'єднань металевих матеріалів. Випробування на опірність утворенню холодних тріщин у зварних з'єднаннях. Дугове зварювання. Частина 3. Випробування під зовнішнім навантаженням |

Вимоги до якості зварювальних виробництв і рівня якості

| | |
|------------------------|---|
| ДСТУ EN ISO 3834-1 | Вимоги до якості для зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 1. Критерії вибору належного рівня вимог до якості |
| ДСТУ EN ISO 3834-2 | Вимоги до якості зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 2. Всебічні вимоги до якості |
| ДСТУ EN ISO 3834-3 | Вимоги до якості зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 3. Типові вимоги до якості |
| ДСТУ EN ISO 3834-4 | Вимоги до якості для зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 4. Основні вимоги до якості |
| ДСТУ EN ISO 3834-5 | Вимоги до якості зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 5. Документи, вимоги яких потрібно виконувати для підтвердження відповідності ISO 3834-2, ISO 3834-3 чи ISO 3834-4 |
| ДСТУ CEN ISO/TR 3834-6 | Вимоги до якості для зварювання плавленням металевих матеріалів. Частина 6. Наставови щодо впровадження ISO 3834 |
| ДСТУ EN ISO 5817 | Зварювання. Зварні шви під час зварювання плавленням сталі, нікелю, титану та інших сплавів (крім променевого зварювання). Рівні якості залежно від дефектів |
| ДСТУ EN ISO 10042 | Зварювання. З'єднання з алюмінію та його сплавів, виконані дуговим зварюванням. Рівні якості залежно від дефектів |
| ДСТУ EN ISO 14554-1 | Вимоги до якості зварювання. Зварювання опором металевих матеріалів. Частина 1. Всебічні вимоги до якості зварювання |
| ДСТУ EN ISO 14554-2 | Вимоги до якості зварювання. Зварювання опором металевих матеріалів. Частина 2. Елементарні вимоги до якості |
| ДСТУ EN ISO 12932 | Зварювання. Гібридне лазерно-дугове зварювання сталей, нікелю та нікелевих сплавів. Рівні якості залежно від дефектів |

| | |
|---------------------|--|
| ДСТУ EN ISO 17663 | Зварювання. Вимоги до якості термічного оброблення в процесі зварювання та споріднених процесів |
| ДСТУ EN ISO 25239-5 | Зварювання тертям з перемішуванням. Алюміній Частина 5. Вимоги до якості та контролю |
| ДСТУ EN ISO 13919-1 | З'єднання, виконані електронно-променевим та лазерним зварюванням. Настанова щодо оцінювання рівня якості залежно від дефектів. Частина 1. Сталь |
| ДСТУ EN ISO 13919-2 | З'єднання, виконані електронно-променевим та лазерним зварюванням. Настанова щодо оцінювання рівня якості залежно від дефектів. Частина 2. Алюміній та його сплави |
| ДСТУ EN ISO 18785-5 | Точкове зварювання тертям із перемішуванням. Алюміній. Частина 5. Вимоги до якості та контролю |
| ДСТУ EN 16296 | Дефекти у зварних з'єднаннях термопластів. Рівні якості |

Охорона здоров'я та безпека під час зварювання та споріднених процесів

| | |
|----------------------------|---|
| ДСТУ EN ISO 15011-1 | Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Лабораторний метод відбирання проб аерозолів і газів, утворюваних під час дугового зварювання. Частина 1. Визначення швидкості виділення та відбирання проб для аналізування мікрочастинок аерозолів |
| ДСТУ EN ISO 15011-2 | Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Лабораторний метод відбору проб диму та газів. Частина 2. Визначення рівнів викидів монооксиду вуглецю (CO), вуглекислого газу (CO ₂), монооксиду азоту (NO) та діоксиду азоту (NO ₂) під час дугового зварювання, різання та стругання |
| ДСТУ EN ISO 15011-4 | Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Лабораторний метод відбору проб диму та газів. Частина 4. Таблиці даних про аерозолі |
| ДСТУ EN ISO 15011-5 | Охорона здоров'я та безпека під час зварювання та споріднених процесів. Лабораторний метод відбору проб диму та газів. Частина 5. Ідентифікація продуктів термічної деградації, що утворюються під час зварювання або різання продуктів, що повністю або частково складаються з органічних матеріалів, за допомогою піролізної газової хроматографії та маспектрометрії |
| ДСТУ CEN ISO/TS 15011-6/AC | Охорона здоров'я та безпека під час зварювання та споріднених процесів. Лабораторний метод відбирання проб диму та газів. Частина 6. Процедура кількісного визначення диму та газів під час контактного точкового зварювання |
| ДСТУ EN ISO 10882-1 | Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Відбирання проб аерозолів і газів у зоні дихання оператора. Частина 1. Відбирання проб частинок аерозолів |
| ДСТУ ISO 10882-2 | Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Відбирання проб аерозолів і газів у зоні дихання оператора. Частина 2. Відбирання газів |
| ДСТУ ISO 15012-1 | Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Вимоги щодо перевірки та маркування устаткування для фільтрування повітря. Частина 1. Перевірка ступеня очищення від зварювального аерозолу |
| ДСТУ ISO 15012-2 | Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Перевірка і маркування обладнання для фільтрування повітря. Частина 2. Визначення мінімального об'єму потоку повітря через зонти і насадки |
| ДСТУ EN ISO 15012-4 | Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Устаткування для уловлювання та відокремлення диму від зварювання. Частина 4. Загальні вимоги |
| ДСТУ EN ISO 21904-1 | Охорона здоров'я та безпечність під час зварювання і суміжних процесів. Устаткування для уловлювання і відділення зварювального диму. Частина 1. Загальні вимоги |
| ДСТУ EN ISO 21904-2 | Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Устаткування для уловлювання та відокремлення диму від зварювання. Частина 2. Вимоги до випробування та маркування ефективності відокремлення диму від зварювання |
| ДСТУ EN ISO 21904-3 | Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Устаткування для уловлювання та відокремлення диму від зварювання. Частина 3. Визначення ефективності уловлювальних пристроїв на пальнику для видалення диму від зварювання |
| ДСТУ EN ISO 21904-4 | Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Устаткування для уловлювання та відокремлення диму від зварювання. Частина 4. Визначення мінімального об'єму потоку повітря через пристрої уловлювання |
| ДСТУ ISO 17846 | Охорона здоров'я та безпека у зварюванні та споріднених процесах. Символи попереджувальні для обладнання та матеріалів, використовуваних у дуговому зварюванні та різанні |
| ДСТУ EN 50445 | Стандарт на сімейство продукції для підтвердження відповідності обладнання резистивного зварювання, дугового зварювання та споріднених процесів основним обмеженням стосовно дії на людину електромагнітних полів (0 Гц...300 ГГц) |
| ДСТУ EN ISO 17916 | Безпечність машин термічного різання |

Персонал зварювального виробництва

| | |
|--------------------|---|
| ДСТУ EN ISO 14731 | Координація зварювальних робіт. Завдання та функції |
| ДСТУ CEN/TR 16862 | Супервайзер зі зварювання пластмас. Завдання, обов'язки, знання, навички та компетентність. |
| ДСТУ EN ISO 9606-1 | Кваліфікаційні випробування зварників. Зварювання плавленням. Частина 1. Сталі. |

ІНФОРМАЦІЯ

| | |
|-------------------------------|---|
| ДСТУ EN ISO 9606-2 | Атестаційне випробування зварників. Зварювання плавленням. Частина 2. Алюміній та алюмінієві сплави |
| ДСТУ EN ISO 9606-3 | Атестаційне випробування зварників. Зварювання плавленням. Частина 3. Мідь та мідні сплави |
| ДСТУ EN ISO 9606-4 | Атестаційне випробування зварників. Зварювання плавленням. Частина 4. Нікель та сплави нікелю |
| ДСТУ EN ISO 9606-5 | Атестаційне випробування зварників. Зварювання плавленням. Частина 5. Титан та сплави титану, цирконій та сплави цирконію |
| ДСТУ EN 287-6 | Кваліфікаційні випробування зварників. Зварювання плавленням. Частина 6. Чавуни |
| ДСТУ EN ISO 18785-3 | Точкове зварювання тертям із перемішуванням. Алюміній. Частина 3. Кваліфікація зварювального персоналу |
| ДСТУ EN ISO 25239-3 | Зварювання тертям із перемішуванням. Алюміній. Частина 3. Кваліфікація операторів зварювання |
| ДСТУ EN ISO 17279-2 | Зварювання. Мікроз'єднання високотемпературних надпровідників 2-го покоління. Частина 2. Кваліфікація зварювального та випробувального персоналу |
| ДСТУ EN ISO 15618-1 | Кваліфікаційні випробування зварювальників для підводного зварювання. Частина 1. Зварювальники-підводники, що працюють у гіпербаричному мокрому середовищі |
| ДСТУ EN ISO 15618-2 | Кваліфікаційні випробування зварювальників для підводного зварювання. Частина 2. Зварювальники-підводники та оператори зварювання, що працюють у гіпербаричному сухому середовищі |
| ДСТУ EN 13067 | Персонал, який виконує зварювання пластмас. Кваліфікаційні випробування зварників. Зварні термопластичні конструкції |
| ДСТУ ISO 24394 | Зварювання в аерокосмічній галузі. Атестаційне випробування зварників та операторів. Зварювання плавленням металевих компонентів |
| ДСТУ ISO 11745 | Паяння для аерокосмічного застосування. Кваліфікаційні випробування для паяльщиків та операторів паяльного устаткування. Паяння металевих компонентів |
| ДСТУ ISO 11745:2015/Зміна № 1 | Паяння для аерокосмічного застосування. Кваліфікаційні випробування для паяльщиків та операторів паяльного устаткування. Паяння металевих компонентів |
| ДСТУ EN ISO 13585 | Паяння. Кваліфікаційні випробування паяльщиків і операторів |

Обладнання та устаткування

| | |
|-------------------------|--|
| ДСТУ EN IEC 60974-1 | Обладнання для дугового зварювання. Частина 1. Джерела живлення для зварювання |
| ДСТУ EN IEC 60974-2 | Обладнання для дугового зварювання. Частина 2. Системи рідинного охолодження |
| ДСТУ EN IEC 60974-3 | Обладнання для дугового зварювання. Частина 3. Пристрої запалювання і стабілізації дуги |
| ДСТУ EN 60974-4 | Обладнання для дугового зварювання. Частина 4. Періодичні перевірки та випробування |
| ДСТУ EN IEC 60974-5 | Обладнання для дугового зварювання. Частина 5. Пристрої подавання дроту |
| ДСТУ EN 60974-6 | Обладнання для дугового зварювання. Частина 6. Обладнання з обмеженим навантаженням |
| ДСТУ EN IEC 60974-7 | Обладнання для дугового зварювання. Частина 7. Пальники |
| ДСТУ EN IEC 60974-8 | Обладнання для дугового зварювання. Частина 8. Газові тримачі для систем зварювання та плазмового різання. |
| ДСТУ EN IEC 60974-9 | Обладнання для дугового зварювання. Частина 9. Встановлення та використання |
| ДСТУ EN IEC 60974-10 | Обладнання для дугового зварювання. Частина 10. Вимоги до електромагнітної сумісності (ЕМС) |
| ДСТУ EN IEC 60974-11 | Обладнання для дугового зварювання. Частина 11. Електродотримачі |
| ДСТУ EN 60974-12 | Обладнання для дугового зварювання. Частина 12. З'єднувальні пристрої для зварювальних кабелів |
| ДСТУ EN IEC 60974-13 | Обладнання для дугового зварювання. Частина 13. Затискач зворотного зварювального струму |
| ДСТУ EN IEC 60974-14 | Обладнання для дугового зварювання. Частина 14. Калібрування, валідація та перевірка відповідності |
| ДСТУ EN IEC 60974-14/AC | Обладнання для дугового зварювання. Частина 14. Калібрування, валідація та перевірка відповідності |
| ДСТУ EN IEC 62822-1 | Обладнання електрозварювальне. Оцінювання обмежень, пов'язаних із впливом на людину електромагнітних полів (від 0 Гц до 300 ГГц). Частина 1. Стандарт на групу виробів |
| ДСТУ EN 62822-2 | Обладнання електрозварювальне. Оцінювання обмежень щодо впливу на людину електромагнітних полів (від 0 Гц до 300 ГГц). Частина 2. Обладнання для дугового зварювання |
| ДСТУ EN IEC 62822-3 | Обладнання електрозварювальне, оцінювання обмежень, пов'язаних із впливом на людину електромагнітних полів (від 0 Гц до 300 ГГц). Частина 3. Обладнання для контактного зварювання |
| ДСТУ EN 62135-1 | Обладнання резистивного зварювання. Частина 1. Вимоги щодо безпеки побудови, виготовлення та встановлення |
| ДСТУ EN IEC 62135-2 | Обладнання для контактного зварювання. Частина 2. Вимоги до електромагнітної сумісності (ЕМС) |
| ДСТУ EN ISO 7287 | Графічні символи для обладнання для термічного різання |

| | |
|---------------------|---|
| ДСТУ EN ISO 15615 | Обладнання для газового зварювання. Ацетиленові колекторні системи для зварювання, різання та споріднених процесів. Вимоги щодо безпеки в апаратах високого тиску |
| ДСТУ EN ISO 5826 | Обладнання для контактного зварювання. Трансформатори. Загальні специфікації, що застосовуються до всіх трансформаторів |
| ДСТУ EN ISO 9012 | Обладнання для газового зварювання. Повітряні труби ручні. Специфікації та випробування |
| ДСТУ EN ISO 14113 | Обладнання для газового зварювання. Шланги гумові та пластмасові та їх з'єднання для промислових газів, стиснених до робочого тиску не більше ніж 450 бар (45 МПа) |
| ДСТУ EN ISO 9539 | Устаткування для газового зварювання. Матеріали для обладнання, що використовується в газовому зварюванні, різанні та споріднених процесах |
| ДСТУ EN ISO 9539/A1 | Устаткування для газового зварювання. Матеріали для обладнання, що використовується в газовому зварюванні, різанні та споріднених процесах |
| ДСТУ EN ISO 7285 | Пневматичні циліндри для механізованого багатоточкового зварювання |
| ДСТУ EN ISO 22829 | Обладнання для контактного зварювання. Трансформатори. Інтегрований трансформатор-випрямляч для зварювальних гармат, що працюють на частоті 1000 Гц |
| ДСТУ EN ISO 3821 | Обладнання для газового зварювання. Гумові шланги для зварювання, різання та споріднених процесів |
| ДСТУ EN ISO 8205 | Обладнання для контактного зварювання. Кабелі вторинного з'єднання з водяним охолодженням |
| ДСТУ EN ISO 5830 | Контактне точкове зварювання. Ковпачки для електродів |
| ДСТУ EN ISO 10656 | Обладнання для контактного зварювання. Трансформатори. Інтегровані трансформатори для зварювальних гармат |
| ДСТУ CEN/TR 13259 | Обладнання для газового зварювання. Промислові ручні та машинні газові пальники для нагріву полум'ям, паяння полум'ям та споріднених процесів |
| ДСТУ EN 29313 | Обладнання для контактного точкового зварювання. Охолоджувальні труби |
| ДСТУ EN 1256 | Обладнання для газового зварювання. Технічні умови для шлангів для обладнання для зварювання, різання та споріднених процесів |
| ДСТУ EN ISO 15616-1 | Приймальні випробування для машин з CO ₂ -лазером для високоякісного зварювання та різання. Частина 1. Загальні принципи, умови приймання |
| ДСТУ EN ISO 15616-2 | Приймальні випробування машин з CO ₂ лазерним променем для високоякісного зварювання та різання. Частина 2. Вимірювання статичної та динамічної точності |
| ДСТУ EN ISO 15616-3 | Приймальні випробування машин із лазерним променем CO ₂ для високоякісного зварювання та різання. Частина 3. Калібрування приладів для вимірювання витрати газу та тиску |
| ДСТУ EN ISO 15616-4 | Приймальні випробування машин для високоякісного зварювання та різання CO ₂ -лазером. Частина 4. Машини з 2-D рухомою оптикою |
| ДСТУ EN ISO 5172 | Обладнання для газового зварювання. Труби для газового зварювання, нагрівання та різання. Специфікації та випробування |
| ДСТУ EN ISO 5172/A2 | Обладнання для газового зварювання. Труби для газового зварювання, нагрівання та різання. Специфікації та випробування |
| ДСТУ EN ISO 9312 | Обладнання для контактного зварювання. Ізольовані штирі для використання в резервних електродах |
| ДСТУ EN ISO 5183-1 | Обладнання для контактного зварювання. Адаптери для електродів з зовнішнім конусом 1:10. Частина 1. Конусне кріплення, конус 1:10 |
| ДСТУ EN ISO 5183-2 | Контактне точкове зварювання. Адаптери для електродів, зовнішній конус 1:10. Частина 2. Паралельне кріплення хвостовика для кінцевих електродів |
| ДСТУ EN ISO 5828 | Обладнання для контактного зварювання. Вторинні з'єднувальні кабелі з клемми, з'єднаними з наконечниками водяного охолодження. Розміри та характеристики |
| ДСТУ EN ISO 14744-1 | Зварювання. Приймальний контроль електронно-променевих зварювальних машин. Частина 1. Принципи та умови приймання |
| ДСТУ EN ISO 14744-2 | Зварювання. Контрольне приймання електронно-променевих зварювальних машин. Частина 2. Вимірювання характеристик прискорювальної напруги |
| ДСТУ EN ISO 14744-3 | Зварювання. Приймальний контроль електронно-променевих зварювальних машин. Частина 3. Вимірювання характеристик струму променя |
| ДСТУ EN ISO 14744-4 | Зварювання. Контрольне приймання електронно-променевих зварювальних машин. Частина 4. Вимірювання швидкості зварювання |
| ДСТУ EN ISO 14744-5 | Зварювання. Перевірка приймання електронно-променевих зварювальних машин. Частина 5. Вимірювання точності оброблення |
| ДСТУ EN ISO 14744-6 | Зварювання. Приймальний контроль електронно-променевих зварювальних машин. Частина 6. Вимірювання стабільності позиції точки |
| ДСТУ EN ISO 7291 | Устаткування для газового зварювання. Регулятори тиску для колекторних систем, використовуваних під час зварювання, різання та споріднених процесів до 300 бар (30 МПа) |
| ДСТУ EN ISO 7291/A1 | Газове зварювальне обладнання. Регулятори тиску для колекторних систем, які використовуються під час зварювання, різання та споріднених процесів до 30 МПа (300 бар) |
| ДСТУ EN ISO 669 | Контактне зварювання. Обладнання для контактного зварювання. Механічні та електричні вимоги |

| | |
|---------------------|---|
| ДСТУ EN ISO 14114 | Обладнання для газового зварювання. Системи колекторні ацетиленові для зварювання, різання та споріднених процесів. Загальні вимоги |
| ДСТУ EN ISO 5175-1 | Обладнання для газового зварювання. Запобіжні пристрої. Частина 1. Пристрої, що містять полум'ягасник |
| ДСТУ EN ISO 5175-2 | Обладнання для газового зварювання. Запобіжні пристрої. Частина 2. Пристрої, що не містять полум'ягасника (зворотнього розрядника) |
| ДСТУ EN 20865 | Прорізи в плитах для проєкційних зварювальних машин |
| ДСТУ CEN/TR 15068 | Обладнання для газового зварювання. Вимірювання шуму, випромінюваного паяльною трубою під час зварювання, різання, нагрівання, паяння твердим та м'яким припоєм. Метод вимірювання |
| ДСТУ EN ISO 5821 | Контактне зварювання. Кришки електродів для точкового зварювання |
| ДСТУ EN ISO 8430-1 | Контактне точкове зварювання. Тримачі електродів. Частина 1. Конусне кріплення 1:10 |
| ДСТУ EN ISO 8430-2 | Контактне точкове зварювання. Тримачі електродів Частина 2. Кріплення за допомогою конуса Морзе |
| ДСТУ EN ISO 8430-3 | Контактне точкове зварювання. Тримачі електродів. Частина 3. Паралельне кріплення хвостовика для торцевої тяги |
| ДСТУ EN ISO 9090 | Герметичність устаткування для газового зварювання та споріднених процесів |
| ДСТУ EN ISO 5829 | Контактне точкове зварювання. Наконечники для електродів, внутрішній конус 1:10 |
| ДСТУ EN ISO 10225 | Обладнання для газового зварювання. Маркування обладнання, що використовується для газового зварювання, різання та споріднених процесів |
| ДСТУ EN 27931 | Ізоляційні кришки та втулки для обладнання контактного зварювання |
| ДСТУ EN 1326 | Обладнання для газового зварювання – невеликі набори для газового паяння та зварювання |
| ДСТУ EN 25827 | Точкове зварювання. Підпори та затискачі електродів |
| ДСТУ EN 28206 | Приймальні випробування машин для кисневого різання. Відтворювана точність. Експлуатаційні характеристики |
| ДСТУ EN ISO 22827-1 | Приймальні випробування для лазерних зварювальних апаратів з лазерним променем Nd:YAG. Машини з подачею оптичного волокна. Частина 1. Лазерна збірка |
| ДСТУ EN ISO 22827-2 | Приймальні випробування для лазерних зварювальних апаратів Nd:YAG. Машини з подачею оптичного волокна. Частина 2. Механізм руху |
| ДСТУ EN ISO 5171 | Обладнання для газового зварювання. Манометри, які використовуються під час зварювання, різання та споріднених процесів |
| ДСТУ EN 25822 | Обладнання для точкового зварювання. Калібри для конічних пробок і кільцевих калібрів |
| ДСТУ EN ISO 2503 | Устаткування для газового зварювання. Регулятори тиску та регулятори тиску з витратомірами для газових балонів, використовуваних під час зварювання, різання та суміжних процесів з тиском газу до 300 бар (30 МПа) |
| ДСТУ EN 50063 | Обладнання для контактного зварювання та споріднених процесів. Вимоги безпеки до конструкції та монтажу |
| ДСТУ ISO 7286 | Устаткування для контактного зварювання. Графічні умовні позначки апаратів для контактного зварювання |
| ДСТУ ISO 7289 | Устаткування для газового зварювання, різання та споріднених процесів. Муфти з'єднувальні швидкодійні з відсічними клапанами для газового зварювання, різання та споріднених процесів. Загальні технічні умови |
| ДСТУ ISO 15615 | Устаткування для газового зварювання. Системи колекторні ацетиленові для зварювання, різання та споріднених процесів. Вимоги щодо безпеки пристроїв високого тиску |
| ДСТУ ISO 12176-1 | Пластмасові труби та з'єднувальні деталі. Устаткування для зварювання поліетиленових систем. Частина 1. Зварювання встик |
| ДСТУ ISO 12176-2 | Труби та з'єднувальні деталі пластмасові. Устаткування для зварювання поліетиленових систем. Частина 2. Терморезисторне зварювання |
| ДСТУ ISO 12176-3 | Пластмасові труби та з'єднувальні деталі. Устаткування для зварювання поліетиленових систем. Частина 3. Вимоги до кваліфікації зварника пластмас |
| ДСТУ ISO 12176 - 4 | Пластмасові труби та з'єднувальні деталі. Устаткування для поліетиленових систем, що з'єднують плавленням. Частина 4. Кодування простежуваності |
| ДСТУ EN 13705 | Зварювання термопластів. Машини та устаткування для зварювання нагрітим газом (охоплюючи екструзійне зварювання) |
| ДСТУ EN ISO 17662 | Зварювання. Калібрування, перевіряння й атестація устаткування для зварювання та споріднених процесів |

Словники, довідники та термінологія

| | |
|---------------------|--|
| ДСТУ EN ISO 17677-1 | Контактне зварювання. Словник. Частина 1. Точкове, виступаюче та шовне зварювання |
| ДСТУ EN ISO 17658 | Зварювання. Недосконалості різання кисневим полум'ям, різання лазерним променем і плазмове різання. Термінологія |
| ДСТУ CEN/TR 14599 | Терміни та визначення зварюванні у зв'язку з EN 1792 |
| ДСТУ EN 1792 | Зварювання – багатомовний список термінів для зварювання та споріднених процесів |

| | |
|--|---|
| ДСТУ EN ISO 18785-1 | Точкове зварювання тертям із перемішуванням. Алюміній. Частина 1. Словник |
| ДСТУ EN ISO 25239-1 | Зварювання тертям з перемішуванням. Алюміній. Частина 1. Словник |
| ДСТУ CEN ISO/TS 18166 | Чисельне моделювання зварювання. Виконання та документація |
| ДСТУ ISO 15296 | Газополуменеве зварювання та споріднені процеси. Устаткування для газополуменевого зварювання. Словник термінів |
| <i>Примітка.</i> Проводиться підготовка нових словників серії ДСТУ 25901 щодо зварювального виробництва. | |

Перелік діючих державних стандартів щодо зварювальних виробництв України, які потребують перегляду

| | |
|--|--|
| ДСТУ 2099-92 | Конструкції зварні. Розряди точності. Граничні відхилення лінійних розмірів, допуски форми та розташування поверхонь |
| ДСТУ 2100-92 | Обертачі з програмним керуванням. Типи. Основні параметри. Загальні технічні вимоги |
| ДСТУ 2309-93 | Пристрої аспіраційні до зварювальних пальників при напівавтоматичному зварюванні. Основні параметри та загальні технічні вимоги |
| ДСТУ 2456-94 | Зварювання дугове і електрошлакове. Вимоги безпеки |
| ДСТУ 2489-94 | Система стандартів безпеки праці. Контактне зварювання. Вимоги безпеки |
| ДСТУ 2490-94 | Спонукачі тяги однопостові переносні для аспіраційних пристроїв до зварювальних пальників під час напівавтоматичного зварювання. Загальні технічні вимоги та параметри |
| ДСТУ 2491-94 | Покриття металеві та неметалеві неорганічні. Терміни та визначення |
| ДСТУ 2592-94 | Обертачі зварювальні вертикальні. Типи, основні параметри та розміри |
| ДСТУ 2593-94 Обертачі зварювальні горизонтальні двостоякові. Типи, основні параметри та розміри | |
| ДСТУ 2594-94 | Обертачі зварювальні універсальні. Типи, основні параметри та розміри |
| ДСТУ 2692-94 | Деталі та складальні одиниці складально-розбірних пристроїв для складально-зварювальних робіт. Технічні вимоги. Правила приймання. Методи контролю. Маркування, пакування, транспортування та зберігання |
| ДСТУ 2693-94 | Деталі та складальні одиниці складально-розбірних пристроїв для складально-зварювальних робіт. Основні конструктивні елементи та параметри. Норми точності |
| ДСТУ 2875-94 | Обертачі зварювальні роликів. Типи, основні параметри та розміри |
| ДСТУ 2877-94 | Колони для зварювальних автоматів. Типи, основні параметри та розміри |
| ДСТУ 3014-95 | Устави для електронно-променевого зварювання. Методи випробувань і вимірювань |
| ДСТУ 3072-95 | Маніпулятори для контактного точкового зварювання. Типи, основні параметри та розміри |
| ДСТУ 3086-95 | Припої олов'яно-свинцеві. Об'ємний трилометричний метод визначення свинцю від 2 до 98 % |
| ДСТУ 3159-95 | Ресурсозбереження. Нормування витрат зварювальних матеріалів. Загальні вимоги, методи визначення нормативів ручного і механізованого електрозварювання |
| ДСТУ 3183-95 | Зварювання дефектів литва із сталі та чавуну. Загальні вимоги |
| ДСТУ 3259-95 | Пристрої збірно-розбірні переналаджувальні для установаження деталей під зварювання на плоских поверхнях. Загальні вимоги до проектування, складання та експлуатації |
| ДСТУ 3261.0-95 | Флюси зварювальні плавлені. Загальні вимоги до методів аналізу |
| ДСТУ 3261.1-95 | Флюси зварювальні плавлені. Методи розкладання флюсів |
| ДСТУ 3261.2-95 | Флюси зварювальні плавлені. Методи визначення оксиду кремнію |
| ДСТУ 3261.3-95 | Флюси зварювальні плавлені. Методи визначення оксиду марганцю (II) |
| ДСТУ 3261.4-95 | Флюси зварювальні плавлені. Методи визначення оксиду алюмінію |
| ДСТУ 3261.5-95 | Флюси зварювальні плавлені. Методи визначення оксиду кальцію та оксиду магнію |
| ДСТУ 3261.6-95 | Флюси зварювальні плавлені. Методи визначення оксиду заліза (III) |
| ДСТУ 3261.7-95 | Флюси зварювальні плавлені. Методи визначення оксиду фосфору |
| ДСТУ 3261.8-95 | Флюси зварювальні плавлені. Методи визначення оксиду цирконію |
| ДСТУ 3261.9-95 | Флюси зварювальні плавлені. Методи визначення оксиду титану (IV) |
| ДСТУ 3261.10-95 | Флюси зварювальні плавлені. Методи визначення оксиду натрію та оксиду калію |
| ДСТУ 3261.11-95 | Флюси зварювальні плавлені. Методи визначення фториду кальцію |
| ДСТУ 3261.12-95 | Флюси зварювальні плавлені. Методи визначення сірки |
| ДСТУ 3261.13-95 | Флюси зварювальні плавлені. Методи визначення вуглецю |
| ДСТУ 3309-96 | Маніпулятори для контактного точкового зварювання. Загальні технічні умови |
| ДСТУ 3318-96 | Устаткування для зварювання кільцевих швів. Типи, основні параметри та розміри |
| ДСТУ 3319-96 | Устаткування для наплавлення поверхонь тіл обертання. Типи, основні параметри та розміри |
| ДСТУ 3328-96 | Дугове зварювання конструкційних чавунів. Вимоги до технологічного процесу |
| ДСТУ 3341-96 | Кантувачі зварювальні. Типи, основні параметри та розміри |
| ДСТУ 3366-96 | Покриття газотермічні зносостійкі. Триботехнічні методи випробувань. Загальні вимоги |
| ДСТУ 3459-96 | Устаткування зварювальне механічне. Терміни та визначення |
| ДСТУ 3490-96 | Електрошлакове зварювання сталей. Вимоги до технологічного процесу |
| ДСТУ 3671-97 | Дріт сталевий наплавний. Технічні умови |

| | |
|----------------------|---|
| ДСТУ 3761.1-98 | Зварювання та споріднені процеси. Частина 1. Зварюваність. Визначення |
| ДСТУ 3761.2-98 | Зварювання та споріднені процеси. Частина 2. Процеси зварювання та паяння. Терміни та визначення |
| ДСТУ 3761.3-98 | Зварювання та споріднені процеси. Частина 3. Зварювання металів: з'єднання та шви, технологія, матеріали та устаткування. Терміни та визначення |
| ДСТУ 3761.4-98 | Зварювання та споріднені процеси. Частина 4. Процеси паяння та лудіння. Терміни та визначення |
| ДСТУ 3761.5-98 | Зварювання та споріднені процеси. Частина 5. Газотермічне напилювання. Терміни та визначення |
| ДСТУ 3951.1-2000 | Технічні умови та процедура підтвердження відповідності технологічних процесів зварювання металевих матеріалів. Частина 1. Загальні правила зварювання плавленням |
| ДСТУ 3951.3-2000 | Технічні умови та процедура підтвердження відповідності технологічних процесів зварювання металевих матеріалів. Частина 3. Випробування технологічних процесів дугового зварювання сталей |
| ДСТУ 3999-2000 | Покриття захисні полімерні, нафтобітумні і кам'яновугільні. Методи лабораторних випробувань на біостійкість |
| ДСТУ 4025-2001 | Флюси для електрошлакових технологій. Загальні технічні умови |
| ДСТУ 4857:2007 | Неруйнівний контроль. Зварні з'єднання устаткування й конструкцій. Метод магнітної пам'яті металу |
| ДСТУ 7789:2015 | Зварювання полімерних матеріалів. Терміни та визначення понять |
| ДСТУ ГОСТ 30829:2005 | Генератори ацетиленові пересувні. Загальні технічні умови |

Лобанов Л.М., голова ТК 44 «Зварювання та споріднені процеси»,
Проценко Н.О., відповідальний секретар ТК 44 «Зварювання та споріднені процеси»

РІШЕННЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ, КОЛИ БРАКУЄ РЕСУРСІВ І КВАЛІФІКОВАНИХ КАДРІВ

На виставці-ярмарку SCHWEISSEN & SCHNEIDEN в Ессені (11–15 вересня 2023 р.) Fronius представить технології, здатні вирішити основні проблеми галузі. Вимоги до якості невпинно зростають у всіх галузях, а кваліфіковані зварники нині рідкість. Обмеженість ресурсів теж грає велику роль з економічної та екологічної перспективи, особливо коли мова йде про присадні матеріали, газ і електроенергію. У таких умовах особливо важливо зробити так, щоб помилок виробництва було якомога менше, а результати не доводилося переробляти. Восени підрозділ Fronius Perfect Welding представить на найвідомішій галузевій виставці зварювальних технологій найновітнішу техніку.

Компанія Fronius розширила асортимент зварювальної техніки кількома рішеннями, здатними компенсувати брак кваліфікованих спеціалістів. «Наш підхід полягає в тому, щоб за допомогою цифрових засобів забезпечити високу якість зварювання, зменшити споживання ресурсів, полегшити роботу з обладнанням і технологічну підтримку для початківців і фахівців, – підсумовує Гаральд Шерляйтнер, генеральний директор відділу продажів і маркетингу підрозділу Perfect Welding компанії Fronius International GmbH. – Усі дослідження та розробки ми проводимо за участю наших клієнтів і для них. Ми розуміємо їх проблеми і раді представити на цій виставці всі наші інновації».

Головне – люди. Люди, їхні навички та вміння лежать в основі всіх рішень, які Fronius виставляє на ярмарку. Високотехнологічні зварювальні системи Fronius пропонують весь набір необхідних технологій для створення ідеального зварного шва, однак, щоб навчитися робити шви, які не треба потім переробляти чи доробляти, потрібно довго навчатися. Ось де приховано найбільший потенціал заощадження часу та ресурсів! І це стосується не тільки зварювання вручну, але й роботи з автоматизованими лініями.

Реалістичне відпрацювання навичок зварювання на симуляторі *Welducation*. Симулятор Fronius Welducation виводить віртуальне навчання зварюванню на цілком новий рівень. Він має стандартний корпус зварювальної системи, справжні зварювальні пальники та реалістичне представлення в доповненій реальності. Платформа *Welducation Campus*, що йде в комплекті з симулятором, пропонує повний курс підготовки кваліфікованого зварника, включно з теорією, завданнями зі зварювання та тестуванням знань. Для такого тренування не потрібен газ, матеріали, дровий електрод, тому воно заощаджує кошти та не псує доквілля.

Для отримання додаткової інформації звертайтеся до
Fronius Ukraine GmbH, Lilya Korzin
korzin.lilya@fronius.com

ФОРУМ ІНЖЕНЕРІВ-МЕХАНІКІВ

30 травня – 1 червня 2023 р. у Національному технічному університеті «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» було проведено Форум інженерів-механіків, присвячений 125-річчю заснування «КПІ ім. Ігоря Сікорського» та заснуванню навчально-наукового механіко-машинобудівного інституту. Організаторами форуму виступили НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» та навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут.

У роботі форуму, який був організований у вигляді сесій пленарних та секційних доповідей, взяли участь понад 60 науковців та спеціалістів з України. Форум відкрив ректор НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» академік М.З. Згуровський. У своєму виступі він відзначив актуальність підготовки фахівців для авіаційної промисловості, важливість проведення наукових та науково-практичних конференцій по актуальним задачам авіаційної промисловості, життєву важливість і актуальність підготовки та реалізації програм післявоєнного відновлення економіки країни.

У конференції взяли участь представники ДП «Антонов», ВАТ «Український науково-дослідний інститут авіаційної технології», ДП «Івченко-Прогрес», ІЕЗ ім. Є.О. Патона, ДП «Харківське КБ з машинобудування ім. О.О. Морозова», АТ «Турбоатом», ДП «КБ Південне ім. М.К. Янгеля», Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Подстригача НАН України, Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України та інші.

На форумі було заслухано 16 пленарних та 70 секційних доповідей, які присвячено прогресивним видам техніки, технологіям, інженерній практиці у гідромеханіці, теоретичним та практичним проблемам в обробці матеріалів тиском.

Були заслухані наступні пленарні доповіді:

Реалізація Державної цільової програми розвитку авіаційної промисловості України на ДП «Антонов» (Гаврилов Є.П.), Тенденції інженерії складних технічних систем (Кривов Г.О.), Інтеграція ДП «Івченко-Прогрес» у світовий розвиток авіаційної техніки (Кравченко І.Ф.), Прогресивні технології електрофізичної обробки для регулювання напружено-деформованих станів елементів зварних конструкцій (Лобанов Л.М., Устименко П.Р., Сидоренко Ю., Пашин М.О.), Створення дистанційно керованого наземного комплексу на базі серійного бронетранспортера (Мормило Я.М., Стрімівський С.В.), Впровадження оптимального варіанту проточних частин ЦВТ та ЦСТ в теплову схему турбоагрегату К-540-23,5 (Шерфедінов Р.Б.), Розрахунково-експериментальне забезпечення міцності і жорсткості космічних апаратів розробки ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля (Москальов С.І., Білоусов К.Г., Кушніренко С.І.), Розширений

формалізм Стро для розв'язування плоских задач теорії термопружності квазікристалічних середовищ (Кушнір Р.М.), Сучасні підходи до розрахункового обґрунтування міцності критичних елементів обладнання реакторних установок АЕС ВВЕР (Чирков О.Ю.), Надтверді матеріали і різальні інструменти: створення та використання (Клименко С.А.), Сертифікатні програми авіаційного спрямування від компанії Прогрестех-Україна (Гладський М.М., Барандич К.С.), Концепція авіакосмічної системи у контексті підготовки фахівців з забезпечення комплексу її задач управління і застосування інформаційних технологій (Лабуткіна Т.В.), Пацієнт-специфічні імпланти для реконструкції кісток обличчя: біомеханічні та технологічні аспекти (Копчак А.В.), Магістерська освітня програма «Смартпромисловість» Херсонського національного технічного університету як перспектива повоєнного відновлення промислового комплексу південного регіону України (Дмитрієв Д.О., Поливода О.В., Селіверстов І.А.), Перспективи розвитку наукоємного машинобудівного комплексу (Любодраг Т.), Континуальна механіка пошкоджуваності в задачах прогнозування несучої здатності елементів конструкцій (Бобир М.І.).

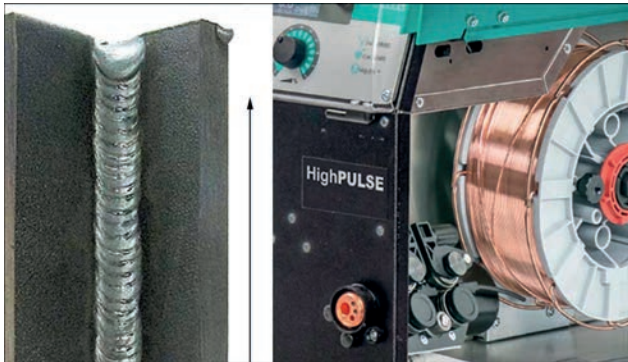
Відзначимо, що в доповіді М.О. Пашина, представленого від ІЕЗ ім. Є.О. Патона і «КПІ ім. Ігоря Сікорського», були відзначені тенденції із заміни клепаних конструкцій зварними стосовно авіаційної техніки. Заміна клепаних з'єднань зварними дозволяє знизити вагу авіаційних конструкцій до 10 %. Так, розроблено технології лазерного зварювання та зварювання тертям для виготовлення елементів стрінгерного набору фюзеляжів літаків, які проходять апробацію на фірмах «Ейрбас» та «Ембраєр». Але характерною особливістю зварних елементів конструкцій авіаційної техніки є наявність залишкових зварювальних напружень (ЗЗН). ЗЗН негативно впливають на довговічність та точність корпусних авіаційних конструкцій. Це потребує розробки новітніх підходів до зниження рівня ЗЗН розтягування в авіаційних конструкціях. Показано, що застосування різних методів електрофізичної обробки зварних з'єднань дозволяє ефективно регулювати напружено-деформований стан авіаційних конструкцій. Також застосування електрофізичної обробки спеціальних сталей бар'єрним розрядом забезпечує підвищення їх твердості, що є актуальним для металевих конструкцій, які працюють в спеціальних умовах.

Паралельно з пленарними засіданнями працювало чотири секції. Їх тематика включала: сучасні проблеми механіки деформованого твердого тіла, прогресивна техніка та технологія машинобудування, авіаційна та ракетно-космічна техніка, проблеми вищої інженерної освіти.

М.О. Пашин

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ HighUP У ЗВАРЮВАННІ МЕТАЛІВ

Сучасні технології при проведенні зварювальних робіт дозволяють спростити виконання складних зварювальних завдань, які раніше вимагали дуже високої майстерності зварювальника та отримати низку переваг.



Основні переваги:

- збільшення швидкості виконання зварювальних робіт;
- виконання зварювання в один прохід без застосування коливальних рухів пальника;
- зменшення короблення металевих виробів;
- зниження витрат на попередню підготовку матеріалу;
- економія на витратних матеріалах.

Інноваційні технології Merkle HighUP дозволяють організувати в одному зварювальному процесі практично будь-яку кількість імпульсів, що чергуються, з різними характеристиками: тривалістю, силою струму, напругою, технологією (DeepARC, ColdMIG, HLC, Mig/Mag, Pulse, Interpulse), довжиною дуги, індуктивністю, формою імпульсу, частотою і т.д. В результаті досягається відмінна якість зварювального шва з необхідною глибиною проплавлення там, де це потрібно, контролюється величина зворотного валика, заповнюється обробка, формується облицювальний валик бажаного розміру за один прохід.

Процес HighUP дозволяє використовувати будь-які поєднання імпульсів:

- ColdMIG + Mig/Mag,
- ColdMIG + PULSE,
- Mig/Mag + PULSE,
- DeepARC + Pulse,
- DeepARC + Mig/Mag + Pulse і т.д.

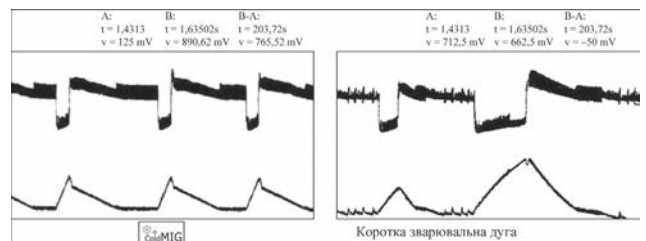
Розглянемо низку технологій на прикладі зварювального апарату виробництва компанії Merkle серії HighPULSE.

Режим ColdMIG

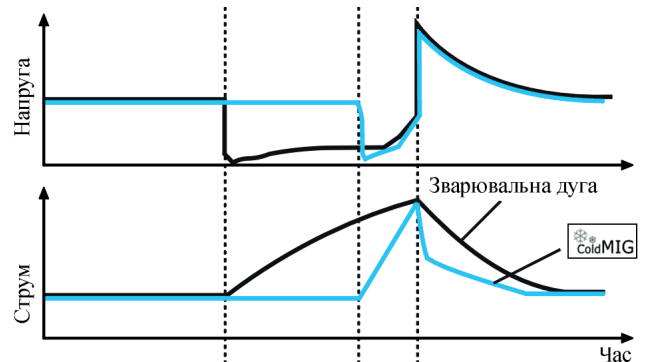
Використовується при зварюванні тонколистових металів (від 0,6 до 2,0 мм) та з'єднань з великим зазором. Цей режим характеризується віддачею тепла на 30 % менше, ніж звичайним MIG зварю-

ванням. Досягається це за рахунок автоматичного керування зварювальною дугою. А саме завдяки більш крутому підйому струму зварювальної дуги та майже вертикальному спаду після відриву краплі.

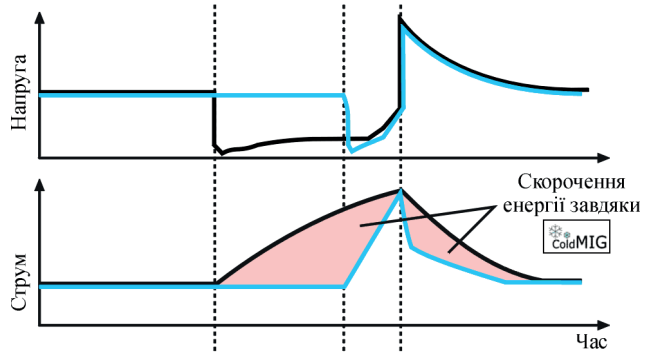
Нижче представлена діаграма струмів режимів зварювання ColdMIG (ліворуч) та короткою зварювальною дугою MIG (праворуч).



Таким чином енергія витрачається в основному на розплавлення зварювального дроту і відбувається менше нагрівання зварювальної ванни.



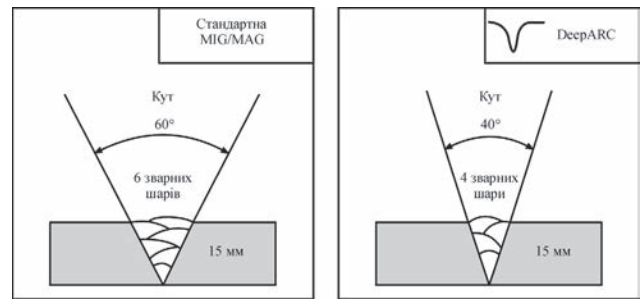
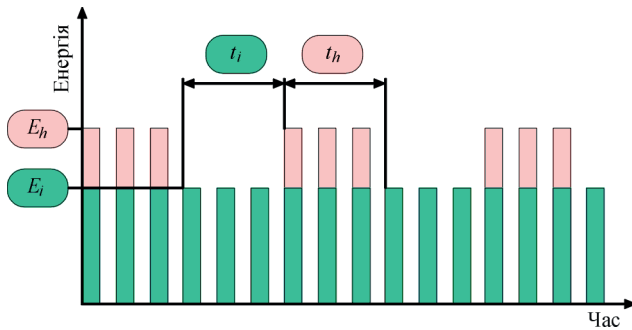
У порівнянні із звичайною зварювальною дугою зниження втрат енергії на прогрів становить 20–30 %



Переваги цього режиму дозволяють зварювати метали оцинковані, оскільки покриття при температурах ColdMIG вигоряє в мінімальній зоні.

Режим InterPULSE

Цей режим імпульсно-дугового зварювання (pulse-arc welding), при якому до основного ім-



пульсу струму додано ще один. Завдяки цьому створюється вищий стартовий струм, що дозволяє проводити зварювання при швидкості, як при MIG. При цьому створюється рівний лускатий шов, як при TIG. Розбризкування металу мінімальне, тому скорочується час на обробку зварювального шва та легке налаштування лише однією рукояткою (всі параметри імпульсу адаптуються автоматично).

Функція DeepArc

Цей процес полягає в утворенні вузької стрілоподібної дуги (подібної до плазми) в результаті високодинамічного регулювання напруги. Процес забезпечує глибокий провар та високу швидкість зварювання. Ефективний для всіх видів сталі та алюмінію.

При багатошаровому зварюванні обробку кромок можна робити під кутом 40°.

Таким чином зменшується обсяг металу, що наплавляється, і зменшуються зварювальні деформації. Крім цього, заповнення ванни здійснюється за меншу кількість проходів. В результаті, збільшується швидкість роботи і зменшуються зварю-

вальні повідці, оскільки нагрівається менший обсяг металу в зоні зварювання.

Дана технологія дозволяє уникнути непровару у корені шва та несплавлення між валиками.

До переваг DeepArc процесу можна віднести також меншу витрату зварювального дроту та аргону.

Ми розглянули три спеціалізовані функції, які є на цьому устаткуванні. Усього існує 144 зварювальні програми, записані в пам'ять за умовчанням. Ці програми необхідні для роботи з різними металами. Наприклад, є програма для зварювання алюмінієвих профілів марки АДЗ1. Ця програма не буде оптимальною для зварювання листового алюмінію марки АМГ2М, оскільки для цього матеріалу є своя. Зварювання металу при використанні потрібної програми полегшує роботу та збільшує швидкість.

Таким чином, застосування сучасних технологій HighUP у зварювальних роботах під час виготовлення виробів з металу дозволяють заощадити, прискорити та полегшити процес виробництва.

<https://remsvar.dp.ua>

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

LET'S JOIN THE WORLD!

11. – 15. September, 2023

SCHWEISSEN & SCHNEIDEN
No. 1 IN THE WORLD

Visit Paton Welding Institute in Hall 8 at Stand 8B29.1 and check out our new and proven solutions for welding and allied technologies.

Пресове зварювання труб магнітокерованою дугою

Пресове зварювання труб, трубопроводів, трубчастих автомобільних деталей виконуються на повітрі без використання зварювальних матеріалів і захисного газу.

Зварювальна дуга під дією зовнішнього магнітного поля переміщається в вузькому зазорі між торцями труб. Висока швидкість руху дуги, до 300 м/с, дозволяє отримувати рівномірний нагрів торців по всій зварюваній поверхні труб. Зварне з'єднання формується в результаті осадки і спільної пластичної деформації торців труб.

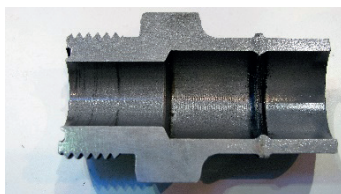
Основні переваги:

- невеликий час зварювання
- герметичність зварних з'єднань
- міцність зварного з'єднання на рівні міцності основного металу
- відсутність пор, включень та ін.
- контроль і реєстрація основних параметрів в процесі зварювання
- автоматизація зварювального процесу (без спеціальної підготовки оператора)

З'єднання труби з фітингом Ø 27,2 мм



З'єднання автомобільного валу, Ø 51x1,5 мм



З'єднання труби Ø 212 мм



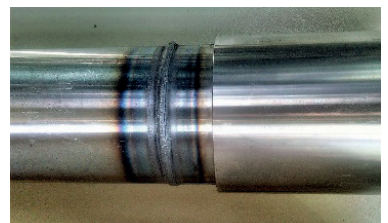
З'єднання труб з фітингами Ø 27,2 мм та Ø 42,7 мм



З'єднання автомобільного амортизатора Ø 40x2,1 мм



З'єднання деталі гідроциліндру Ø 120x7,5 мм



Розроблено в ІЕЗ

Мобільна машина МД1



Стационарна машина МД205



Процес зварювання



Технічні характеристики машин

| Тип машини | Діаметр труб, мм | Товщина стінки, мм | Продуктивність, стиків/год | Час зварювання, с | Споживана потужність, кВА | Вага, кг |
|------------|------------------|--------------------|----------------------------|-------------------|---------------------------|----------|
| МД-1 | 20 ... 57 | 1 ... 4 | до 120 | 4–20 | 70 | 100 |
| МД-215 | 30 ... 150 | 3 ... 10 | до 60 | 10–50 | 120 | 900 |
| МД-205 | 40 ... 220 | 3 ... 10 | до 60 | 10–70 | 150 | 1500 |