

З А В Т О М А Т И Ч Н Е 11 С В А Р Ю В А Н Н Я 2020

Автоматическая сварка

Automatic Welding

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

Позняков В.Д., Гайворонський О.А., Клапатюк А.В., Денисенко А.М., Шмигельський С.В. Вплив складу наплавленого металу та термодформацийного циклу наплавлення на стійкість з'єднань колісних сталей з дисперсійним нітридним та твердорозчинним зміцненням до утворення холодних тріщин	3
Головко В.В. Характер розподілу неметалевих включень в структурних складових металу зварних швів при дугових методах зварювання	9
Ковальчук М.О., Юрченко М.В., Демченко В.Л., Кораб М.Г., Колісник Р.В. Якість та експлуатаційні характеристики зварних з'єднань труб із різномісних поліетиленів	14
Rogante M. Метал швів: удосконалення методу оцінки остаточних напружень за допомогою нейтронної дифракції	20

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

Ющенко К.А., Яровицин О.В., Наконечний О.О., Волосатов І.Р., Фомакін О.О., Хрущов Г.Д. Розробка технології відновлення ущільнювача елемента сектору соплових лопаток з важкозварюваного нікелевого жароміцного сплаву типу ЖС6 мікроплазмовим порошковим наплавленням	27
Галинич В.І., Тагановський В.М., Кузьменко Г.В. Автоматичне дугове наплавлення робочих шляхів підйомно-опускних воріт Канівського судноплавного шлюзу	32
Максимов С.Ю., Гаврилюк А.А., Кражановський Д.М. Розробка технології напівавтоматичного дугового зварювання для умов капітального ремонту та реконструкції лінійної частини магістральних газопроводів України	36
Попіль Ю.С., Корж В.М., Черняк В.Я., Захаров Є.А. Діагностика воднево-кисневого плазмового струменя для застосування в газотермічному напиленні	41

ХРОНІКА

Онлайн-лекція «Патонівський маневр в історії розвитку НАН України»	46
Ярмарки дротяної та трубної промисловості	48
XV міжнародна конференція «Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів» (Корозія-2020)	49

ІНФОРМАЦІЯ

Наймасштабніший зварювальний проект в історії	52
Як це було (зі спогадів ветеранів-зварювальників)	55
Наплавлення стало простим як ніколи завдяки системі Fronius Compact Cladding Cell	57
Welding in the World № 12, 2020	59

CONTENTS

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Poznyakov V.D., Gaivoronsky O.A., Klapatyuk A.V., Denysenko A.M., Shmygelsky S.V. Influence of composition of deposited metal and thermodeformation cycle of surfacing on stability of joints of wheel steels with dispersion nitride and solid-soluble hardening to cold cracks formation	3
Holovko V.V. Nature of distribution of non-metallic inclusions in structural components of weld metal while using arc welding methods	9
Kovalchuk M.O., Iurzhenko M.V., Demchenko V.L., Korab M.G., Kolisnyk R.V. The quality and operational characteristics of welded joints of pipes from different types of polyethylene	14
Rogante M. Inside welds: advanced characterization of residual stresses by neutron diffraction	20

INDUSTRIAL

Yushchenko K.A., Yarovitsin O.V., Nakonechniy O.O., Volosatov I.R., Fomakin O.O., Khrushchov G.D. Development of the technology of reconditioning the sealing element of nozzle blades from difficult-to-weld high-temperature nickel alloy of ZhS6 type by microplasma powder surfacing	27
Galinich V.I., Taganovskiy V.M., Kuzmenko G.V. Automatic arc surfacing of working paths of lift gates of Kaniv navigation lock	32
Maksymov S.Yu., Gavriluk A.A., Krazhanovskiy D.M. Development of the technology of semi-automatic arc welding for the conditions of overhaul and reconstruction of the linear part of the main gas pipelines of Ukraine	36
Yu.S. Popil, Korzh V.M., Chernyak V.Ya., Zakharov Ye.A. Diagnostics of hydrogen-oxygen plasma jet for application in gas thermal spraying	41

NEWS

Online lecture «Paton's maneuver in the history of development of the NAS of Ukraine»	46
Fairs of the Wire and Tube industry	48
XV International conference «Problems of corrosion and corrosion protection of structural materials»	49

INFORMATION

One of the largest welding projects in history	52
How it was (from the memories of veteran welders)	55
Surfacing has become easier than ever thanks to the Fronius Compact Cladding Cell system	57
Welding in the World № 12, 2020	59



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



Автоматичне зварювання Автоматическая сварка Automatic Welding

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

Засновники

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

Адреса

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ
03150, Україна, Київ-150,
вул. Казимира Малевича, 11
Тел.: (38044) 200 6302, 200 8277
Факс: (38044) 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/ukr/journal/as

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

Рекомендовано до друку
редакційною колегією журналу

Свідоцтво про державну
реєстрацію KB 4788 від 09.01.2001

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

Передплата 2021

Передплатний індекс 70031.
12 випусків на рік (видається щомісячно).
Друкована версія: 2880 грн. за річний комплект
з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.
Електронна версія: 2880 грн. за річний комплект
(випуски журналу надсилаються електронною поштою
у форматі .pdf або для IP-адреси комп'ютера
передплатника надається доступ до архіву журналу).
Журнал «Автоматичне зварювання» перевидається
англійською мовою під назвою
«The Paton Welding Journal»:
www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

За зміст рекламних матеріалів
редакція журналу відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

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

Founders

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

Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU
03150, Ukraine, Kyiv-150,
11 Kasymyr Malevych Str.
Tel.: (38044) 200 6302, 200 8277
Fax: (38044) 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/as

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

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for printing editorial board of the Journal

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

Subscription 2021

Subscription index 70031.
12 issues per year (issued monthly), back issues available.
\$216, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.
\$144, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).
«Avtomatychne Zvaryuvannya» (Automatic Welding)
journal is republished in English under
the title «The Paton Welding Journal»:
www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

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

ВПЛИВ СКЛАДУ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ ТА ТЕРМОДЕФОРМАЦІЙНОГО ЦИКЛУ НАПЛАВЛЕННЯ НА СТІЙКІСТЬ З'ЄДНАНЬ КОЛІСНИХ СТАЛЕЙ З ДИСПЕРСІЙНИМ НІТРИДНИМ ТА ТВЕРДОРОЗЧИННИМ ЗМІЦНЕННЯМ ДО УТВОРЕННЯ ХОЛОДНИХ ТРІЩИН

В.Д. Позняков, О.А. Гайворонський, А.В. Клапатюк, А.М. Денисенко, С.В. Шмигельський

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

Сучасні тенденції розвитку залізничного транспорту збільшують навантаження на вісь та швидкості руху вантажних потягів. Актуальне завдання – створення технологій виробництва і відновлення залізничних коліс, що забезпечують подовження їх ресурсу в різних умовах експлуатації. Для рішення поставленої задачі необхідно вивчити вплив різних факторів на технологічну та експлуатаційну міцність зварних з'єднань колісних сталей з дисперсійним нітридним і твердорозчинним зміцненням та розробити технологію відновлення плавленням профілю кочення цільнокатаних коліс вантажних вагонів, що забезпечить подовження їх ресурсу в різних умовах експлуатації. Встановлено, що на зміну опірності уповільненому руйнуванню металу ЗТВ колісних сталей з дисперсійним нітридним та твердорозчинним зміцненням суттєво впливає вміст вуглецю в сталі та швидкість охолодження в процесі зварювання. Дифузійний водень, який знаходиться в наплавленому металі, потрапляючи в ЗТВ, суттєво знижує його опірність уповільненому руйнуванню. В новій колісній сталі вміст вуглецю не повинен перевищувати 0,55 %. За інших умов забезпечити при наплавленні нових залізничних коліс належний рівень опірності з'єднань утворенню холодних тріщин буде неможливо. Бібліогр. 11, табл. 3, рис. 4.

Ключові слова: дугове наплавлення, колісна сталь з дисперсійним нітридним та твердорозчинним зміцненням, зона термічного впливу, структура, швидкість охолодження, дифузійний водень, холодні тріщини

Для виготовлення коліс вантажних вагонів в Україні сьогодні використовується колісна сталь марки 2 з вмістом вуглецю 0,55...0,65 % [1, 2]. Колеса, вироблені з такої сталі, при відносно невеликій вартості, мають достатньо високу надійність при експлуатації. Рівень навантаження на вісь колісної пари вантажних вагонів при експлуатації на залізничних коліях України та країн СНД становить до 23,5 т.

Сучасні тенденції розвитку магістрального залізничного транспорту в Україні направлені на збільшення навантаження на вісь до 27,5 т та швидкості руху вантажних потягів до 150 км/г, що обумовлює застосування коліс підвищеної міцності та зносостійкості. В зв'язку з цим сьогодні розглядаються декілька напрямів створення нових колісних сталей. По-перше, пропонується збільшення вмісту вуглецю в сталі до 0,75 %, як і при виготовленні коліс в ЄС, США та Японії. Це найбільш простий шлях, який не потребує додаткових витрат та зміни технологічного процесу виготовлення залізничних коліс. Але при експлуатації таких коліс на магістральних коліях України це може призвести до різкого збільшення дефектів на поверхні кочення.

Другий напрямок ґрунтується на мікролегуванні існуючої колісної сталі карбідо- та нітридоутво-

рюючими елементами, за рахунок чого можливо забезпечити диспергування структури металу. Це буде сприяти зростанню пластичних властивостей металу колеса при більшому рівні його міцності [3–5]. При цьому, для зниження вірогідності утворення «вищербин» на поверхні кочення колеса, вміст вуглецю в сталі необхідно обмежувати.

Всі напрями створення нових колісних сталей сьогодні активно відпрацьовуються. Але для підвищення міцності залізничних коліс найбільш перспективним напрямком розвитку є мікролегування колісної сталі карбідо- та нітридоутворюючими елементами. Разом з цим при створенні нових залізничних коліс підвищеної міцності необхідно також передбачати, чи можливо буде їх відновлювати після зносу наплавленням в умовах вітчизняного виробництва.

Методики досліджень.

Дослідження впливу швидкості охолодження при наплавленні на опірність уповільненому руйнуванню металу ЗТВ. Дослідження проводили з використанням методу Імплант [6, 7] на спеціалізованій установці, розробленій в ІЕЗ ім. Є.О. Патона. Випробуванням піддавали циліндричні зразки–вставки, виготовлені з дослідної сталі. Вони не мали концентратору напружень

Позняков В.Д. – <https://orcid.org/0000-0001-8581-3526>, Гайворонський О.А. – <https://orcid.org/0000-0002-8146-7790>

Шмигельський С.В. – <https://orcid.org/0000-0003-2058-3269>

© В.Д. Позняков, О.А. Гайворонський, А.В. Клапатюк, А.М. Денисенко, С.В. Шмигельський, 2020

у вигляді надрізу. Зразки вирізали вздовж прокату. З цієї ж сталі були підготовлені пластини розміром 300×250 мм, в отвір яких на плинній посадці поміщали зразки–вставки, які в процесі випробувань приварювались до пластини.

В якості об'єкту досліджень використовували дослідні колісні сталі з дисперсійним нітридним та твердорозчинним зміцненням (умовне скорочення КС-ДнТРЗ) наступного складу з різним вмістом вуглецю, мас. %:

№ 1–0,52С; 0,70Si; 0,81Mn; 0,37Cr; 0,17V; 0,0173N; 0,030S; 0,025P.

№ 2–0,64С; 0,70Si; 1,30Mn; 0,42Cr; 0,15V; 0,0174N; 0,030S; 0,025P.

Для порівняння використовували колісну сталь марки 2 з вмістом вуглецю 0,54 % та сталь 65Г (0,65 % С).

Зварювання зразків виконували дротом суцільного перерізу марки Св-08Г2С діаметром 1,2 мм та порошковим дротом марки ПП-АН180МН/98 (система легування 12ГСХ1НФТ). При зварюванні дротом Св-08Г2С режим був наступний: $I_{зв} = 180...200$ А; $U = 28...30$ В; $v_{зв} = 13...15$ м/год, дротом ПП-АН180МН/98 – $I_{зв} = 250...280$ А; $U = 28...30$ В; $v_{зв} = 15...18$ м/год. При цьому погонна енергія наплавлення в обох випадках була приблизно на одному рівні і становила 8,6...10,0 кДж/см.

Швидкість охолодження металу ЗТВ змінювали за рахунок попереднього підігріву пластин, який в залежності від технологічного варіанту зварювання змінювався від 20 до 250 °С. Такий підхід дозволив змінювати швидкість охолодження зварних з'єднань $w_{6/5}$ в діапазоні від 25 до 10 °С/с.

Статичне навантаження зразків починали після їх охолодження до температури 50 °С. Швидкість навантаження до його сталого значення становила приблизно 10 МПа/с. За показник опору металу ЗТВ зварних з'єднань уповільненому руйнуванню приймали критичні напруження ($\sigma_{кр}$), при яких зразок не руйнувався протягом 24 год.

Дослідження впливу дифузійного водню на опірність уповільненому руйнуванню металу ЗТВ. Кількісну оцінку впливу вмісту дифузійного водню в наплавленому металі ($[H]_{диф}$) на опірність уповільненому руйнуванню металу ЗТВ виконували, як і в попередніх дослідженнях, методом Імплант. В якості об'єкту досліджень використовували дослідну колісну сталь КС-ДнТРЗ № 1 з вмістом вуглецю 0,52 %. При випробуваннях застосовували механізований спосіб наплавлення в середовищі суміші газів 82 % Ar + 18 % CO₂ порошковим дротом ПП-АН180МН/98. Наплавлення зразків виконували при попередньому підігріві до температури 100 °С. За таких умов наплавлення швидкість охолодження $w_{6/5}$ становила 12...15 °С/с, а в металі ЗТВ формувалася мартен-

ситно-бейнітна структура, об'ємна частка мартенситу в якій становила приблизно 85 %, твердість загартованого металу знаходилась в діапазоні 4440...4640 МПа.

Вміст водню в наплавленому металі регулювали за рахунок зміни температури та часу прожарювання порошкового дроту. Для визначення кількості $[H]_{диф}$ застосовували метод «олівцевої» проби, який був наступним. В мідну водоохолоджувальну форму наплавляли зразок металу шва розміром орієнтовно 60×14×14 мм, який безпосередньо після наплавлення виймали з форми та додатково охолоджували в потоці води до кімнатної температури (час охолодження до 10 с) та поміщали до евідіометра, де в якості запираючого середовища використовували водневий розчин гліцерину, попередньо підігрітий до температури 40...45 °С. Процес виділення дифузійного водню із зразків наплавленого металу тривав впродовж 72 год. до повного його припинення. Кількість дифузійного водню розраховувалася по формулі

$$[H]_{диф} = \frac{ah}{P} \cdot 100 \text{ мл/г},$$

де α – коефіцієнт евідіометра; h – висота стовпа в евідіометрі, мм; P – вага зразка наплавленого металу, г.

Дослідження стійкості з'єднань до утворення холодних тріщин. Дослідження стійкості з'єднань колісних сталей з дисперсійним нітридним та твердорозчинним зміцненням до утворення холодних тріщин виконували при зварюванні технологічних проб «жорстка обварка» [6, 8].

Жорстка проба являє собою масивну плиту розміром 300×400 мм і товщиною 45 мм, до якої по всьому периметру катетом 10...12 мм приварюють пластини стикового з'єднання з V-подібним розкриттям (кут 60°) з досліджуваної сталі товщиною 20 мм, довжиною 300 мм і шириною 100 мм. Загальна ширина з'єднання 200 мм відповідає максимальному рівню жорсткості проби – рівень залишкових розтягуючих напружень в металі ЗТВ складає приблизно 400 МПа [9]. В подальшому виконується зварювання стикового з'єднання з конструктивним непроваром (зазор 1,5...2,0 мм, притуплення $h = 4$ мм), що є концентратором напружень для утворення холодних тріщин. Зварювання зразків при випробуванні зварних з'єднань дослідних колісних сталей на стійкість до утворення холодних тріщин виконували механізованим способом в середовищі захисних газів (82 % Ar + 18 % CO₂) порошковим дротом ПП-АН180МН/98 діаметром 2,0 мм на режимі: зварювальний струм 250...300 А, напруга на дузі 28...30 В, швидкість зварювання 15...18 м/год.

Багатошарове зварювання виконували в умовах, коли після кожного шару наплавленого ме-

талу з'єднання охолоджувалося до температури 20...30 °С, після чого продовжували заповнення розробки. Для фіксації моменту утворення і процесу розвитку холодних тріщин при охолодженні стику після зварювання застосовували метод акустичної емісії [10]. Після зварювання проби витримували протягом 3 діб. Надалі контрольне стикове з'єднання відокремлювали від плити і механічно розрізали на темплети, з яких потім виготовляли макрошліфи для візуального контролю на наявність холодних тріщин. Темплети вирізали в місцях зварних з'єднань, де були зафіксовані найбільш інтенсивні акустичні сигнали.

Результати експериментів та їх аналіз. Узагальнені результати випробувань зразків за методом Імплант із визначення впливу температури попереднього підігріву (швидкості охолодження в ЗТВ) на опірність уповільненому руйнуванню наплавлень дослідної колісної сталі з вмістом вуглецю 0,52 та 0,64 % представлено відповідно на рис. 1 та 2.

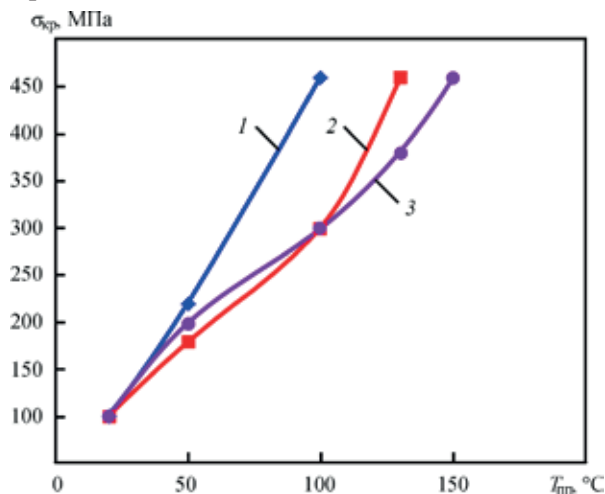


Рис. 1. Опірність уповільненому руйнуванню металу ЗТВ колісних сталей марки 2 (1) [11] та КС-ДнТРЗ № 1 (2, 3): 1, 2 – Св-08Г2С; 3 – ПП-АН180МН/98

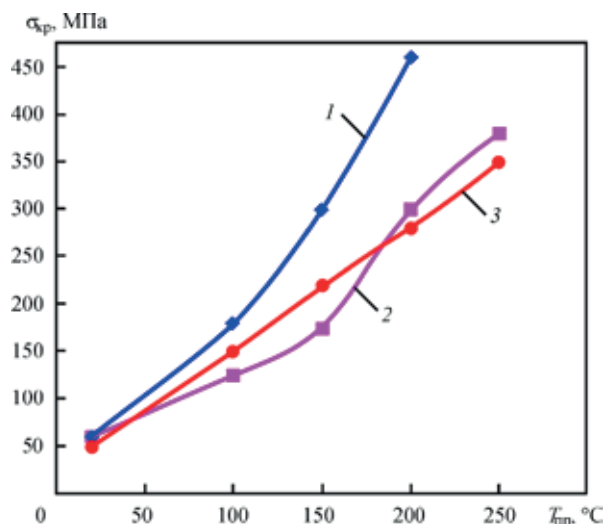


Рис. 2. Опірність уповільненому руйнуванню металу ЗТВ сталі марки 65Г (1) [11] та колісної сталі КС-ДнТРЗ № 2 (2, 3): 1, 2 – Св-08Г2С; 3 – ПП-АН180МН/98

При наплавленні з попереднім підігрівом металу до 100 °С швидкість охолодження в ЗТВ знижується до 12...15 °С/с (табл. 1). При таких умовах охолодження формування структури металу в порівняльних колісних сталях вже суттєво відрізняється. Так, в металі ЗТВ колісної сталі марки 2 формується бейнітно-мартенситна структура, в якій частка мартенситу не перевищує 30 %, а в дослідній колісній сталі КС-ДнТРЗ № 1 – мартенситно-бейнітна структура, в якій об'ємна частка мартенситу вже є переважною і становить до 80 %. Відповідно до структурних відмінностей змінюється і опірність сталей уповільненому руйнуванню. При попередньому підігріві з температурою 100 °С критичні напруження руйнування для КС-ДнТРЗ № 1 приблизно в 1,5 рази нижчі. Для колісної сталі марки 2 (0,58 % С) ця температура попереднього підігріву вже є оптимальною для запобігання розвитку процесів уповільненого руйнування в металі ЗТВ при наплавленні, а для колісної сталі дисперсійним нітридним та твердорозчинним зміцненням (0,52 % С) – ще є недостатньою.

Підвищити критичні напруження руйнування для металу ЗТВ дослідної колісної сталі КС-ДнТРЗ № 1 до рівня колісної сталі марки 2 ($\sigma_{кр} = 460$ МПа) можливо при збільшенні температури підігріву до 130 °С. При таких умовах швидкість охолодження знижується до 8 °С/с і в металі ЗТВ дослідної сталі формується гартівна структура, в якій частка мартенситу не перевищує 50 %. Як свідчать попередні дані, така частка мартенситу в структурі є критичною для суттєво можливого підвищення опірності уповільненому руйнуванню загартованого металу ЗТВ високовуглецевих сталей [11].

Слід відзначити, що при наплавленні порошковим дротом ПП-АН180МН/98 були отримані аналогічні результати. На відміну від варіанта зварювання дротом Св-08Г2С, суттєво загальмувати розвиток процесів уповільненого руйнування ($\sigma_{кр} = 460$ МПа) в металі ЗТВ колісної сталі КС-ДнТРЗ з вмістом вуглецю 0,52 % (дослідна

Таблиця 1. Параметри термічного циклу в металі ЗТВ при дуговому наплавленні зразків по методу Імплант

Погонна енергія $Q_{напл}$, кДж/см	Попередній підігрів $T_{під}$, °С	Параметри термічного циклу		
		$w_{6/5}$, °С/с	$\tau_{8/5}$, с	$\tau_{8/1}$, с
8,6...10,0	-	25...30	8	170
	50	20...25	10	230
	70	15...20	11	250
	100	12...15	12	450
	150	8...10	14	760
	200	5...7	18	890
	250	3...4	25	1050

сталь № 1) стало можливим при температурі попереднього підігріву 150 °С.

Показники критичних напружень руйнувань при випробуваннях зразків дослідної колісної сталі КС-ДнТРЗ № 2 з вмістом вуглецю 0,64 %, в порівнянні зі сталлю 65Г (0,65 % С), відрізняються більш суттєво (рис. 2), ніж в попередньому випадку при порівнянні колісних сталей марки 2 та КС-ДнТРЗ № 1 (0,52 % С).

Критична швидкість охолодження, при якій утворюється до 50 % мартенситу в структурі металу ЗТВ сталі 65Г, становить 6...7 °С/с, що можливо досягнути при наплавленні з погонною енергією 8,6...10,0 кДж/см, застосовуючи попередній підігрів до температури 200 °С. А при такій швидкості охолодження в металі ЗТВ дослідної колісної сталі КС-ДнТРЗ № 2 частка мартенситу є переважною і складає приблизно 99 %. Тому критичні напруження руйнування металу ЗТВ дослідної колісної сталі більш ніж в 1,5 рази нижчі. Навіть при збільшенні температури попереднього підігріву до 250 °С рівень опірності уповільненому руйнуванню металу ЗТВ сталі КС-ДнТРЗ № 2 підвищується до 350...380 МПа, але все ж таки не досягає того рівня ($\sigma_{кр} = 460$ МПа), коли розвиток процесів уповільненого руйнування унеможлиблюється.

Дані про вміст дифузійного водню в наплавленому металі в залежності від умов підготовки порошкового дроту ПП-АН180МН/98 перед наплавленням наведено в табл. 2.

Узагальнені результати досліджень впливу вмісту дифузійного водню в наплавленому металі на показники опірності уповільненому руйнуванню

Таблиця 2. Вміст дифузійного водню в наплавленому металі (дріт ПП-АН180МН/98)

Умови підготовки порошкового дроту перед наплавленням	$[H]_{\text{диф}}$, мл/100 г
Прожарювання при $T = 230$ °С на протязі 2,5 год	0,3
Прожарювання при $T = 200$ °С на протязі 2,5 год	1,5
Без прожарювання	2,2

Таблиця 3. Холодні тріщини в зварних з'єднаннях дослідних колісних сталей КС-ДнТРЗ № 1 (0,52 % С) та КС-ДнТРЗ № 2 (0,64 % С) (метод дугового зварювання жорстких проб)

Сталь	Зварювальний дріт, режими зварювання	$T_{\text{ш.}}$, °С	Наявність і характер утворення холодних тріщин (ХТ)
КС-ДнТРЗ № 1, $\delta = 20$ мм	ПП-АН180МН/98 діаметром 2,0 мм, $I_{\text{зв}} = 250...300$ А, $U_{\text{д}} = 28...30$ В, $v_{\text{зв}} = 15...18$ м/год	Без попереднього підігріву	ХТ від концентратора по ЗТВ та шву уздовж лінії сплавлення на всю товщину з'єднання
		100	ХТ не виявлено
		150	
КС-ДнТРЗ № 2, $\delta = 20$ мм		Без попереднього підігріву	ХТ від концентратора по ЗТВ на глибину до 5 мм, далі по шву на всю товщину та довжину з'єднання
		150	
		200	
		250	

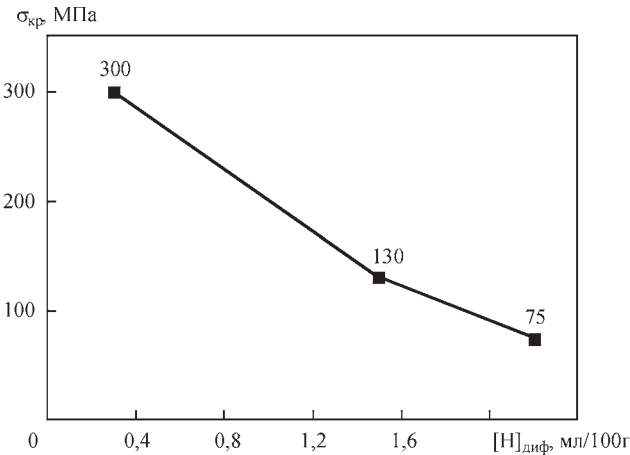


Рис. 3. Вплив вмісту дифузійного водню на опірність уповільненому руйнуванню металу ЗТВ колісної сталі КС-ДнТРЗ № 1 (0,52 % С)

ну металу ЗТВ дослідної колісної сталі КС-ДнТРЗ № 1 наведено на рис. 3.

Як видно з наведених даних, при належній термічній обробці порошкового дроту перед наплавленням, як це рекомендовано при його застосуванні (прожарювання при $T = 230$ °С на протязі 2,5 год), коли вміст дифузійного водню в наплавленому металі мінімальний ($[H]_{\text{диф}} = 0,3$ мл/100 г), критичні напруження руйнування найвищі і становлять $\sigma_{кр} = 300$ МПа. Збільшення кількості дифузійного водню в наплавленому металі до 1,5 мл/100 г призводить до різкого зниження опірності металу ЗТВ уповільненому руйнуванню. Критичні напруження руйнування зменшуються майже в 2,5 рази (до 125 МПа). При подальшому збільшенні дифузійного водню в наплавленому металі до 2,2 мл/100 г процеси уповільненого руйнування протікають ще більш прискорено і критичні напруження становлять всього 75 МПа. В порівнянні з початковим станом, коли порошковий дріт прожарювали при 230 °С на протязі 2,5 год, загальне зниження опірності металу ЗТВ уповільненому руйнування склало 4,5 рази.

Таким чином, при виконанні досліджень встановлено, що при механізованому наплавленні колісної сталі з дисперсійним нітридом та твердорозчинним зміцненням дифузійний водень, який знаходиться в наплавленому металі, по

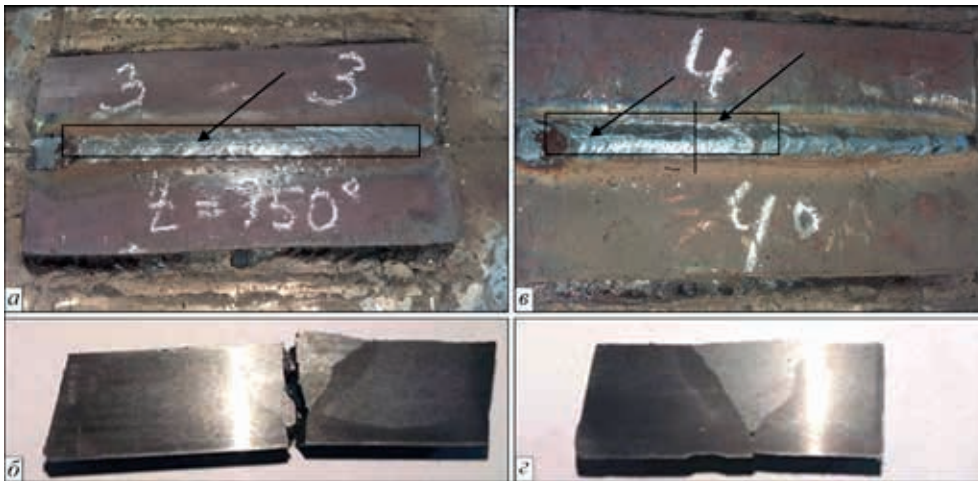


Рис. 4. Приклади утворення холодних тріщин в зварних з'єднаннях дослідних колісних сталей з дисперсійним нітридним та твердорозчинним зміцненням при зварюванні порошковим дротом ПП-АН180МН/98: а – КС-ДнТРЗ № 2, $T_{\text{зм}} = 150$ °С, наскрізна ХТ (ЗТВ, шов); б – КС-ДнТРЗ № 2, $T_{\text{зм}} = 200$ °С, наскрізна ХТ (ЗТВ, шов); в – КС-ДнТРЗ № 1, зварювання без попереднього підігріву, ХТ від концентратора по ЗТВ уздовж лінії сплавлення на всю товщину з'єднання; г – КС-ДнТРЗ № 1, $T_{\text{зм}} = 100$ °С, ХТ відсутні

трапляючи в ЗТВ, суттєво знижує її опірність уповільненому руйнуванню. Процес зародження та розвитку мікротріщин прискорюється, а критичні напруження руйнування при збільшенні вмісту дифузійного водню від 0,3 до 2,2 мл/100 г знижуються до 4,5 разів.

Узагальнені результати випробувань технологічних проб на опірність утворенню холодних тріщин зварних з'єднань дослідних колісних сталей представлено в табл. 3, а характерні приклади утворення холодних тріщин – на рис. 4.

При виконанні випробувань встановлено, що при зварюванні без попереднього підігріву в зварних з'єднаннях дослідних колісних сталей з дисперсійним нітридним та твердорозчинним зміцненням вірогідність наявності холодних тріщин становить 100 %. Але, в залежності від вмісту вуглецю в колісній сталі, є відмінності в характері утворення та розвитку холодних тріщин. В зварних з'єднаннях колісної сталі КС-ДнТРЗ № 1 (0,52 % С) холодна тріщина утворюється від концентратора і має розвиток в двох напрямках. Як видно з рис. 4, в холодна тріщина розвивається як по металу шву (ділянка від кратера довжиною до 100 мм), переходячи далі в ЗТВ уздовж лінії сплавлення (ділянка довжиною до 50 мм) і виходить на поверхню з'єднання. В обох випадках розвитку тріщина має початок в металі ЗТВ. При цьому загальна довжина тріщини становить приблизно 50 % від довжини зварного з'єднання.

В зварних з'єднаннях колісної сталі КС-ДнТРЗ № 2 (0,64 % С) холодна тріщина утворюється від концентратора, має початок в ЗТВ, як і в попередньому випадку, розвивається на глибину до 5 мм, а далі – виключно по шву на всю товщину з'єднання, виходячи також на поверхню. При цьому руйнування відбувається по всій довжині зварного з'єднання.

Запобігти утворенню холодних тріщин в зварних з'єднаннях колісної сталі КС-ДнТРЗ № 1 (0,52 % С) можливо, застосувавши попередній підігрів металу до температури 100 °С. При зварюванні колісної сталі КС-ДнТРЗ № 2 (0,64 % С) холодні тріщини утворюються навіть при попередньому підігріві до температури 250 °С. Зварювання технологічної проби даної сталі при більш високій температурі попереднього підігріву не виконували.

Висновки

1. На зміну опірності уповільненому руйнуванню металу ЗТВ колісних сталей з дисперсійним нітридним та твердорозчинним зміцненням суттєво впливає вміст вуглецю в сталі та швидкість охолодження в процесі зварювання. При наплавленні дротом суцільного перерізу марки Св-08Г2С або порошковим дротом марки ПП-АН-180МН/98 (12ГСХ1НФТ) на погонній енергії 8,6...10,0 кДж/см підвищена опірність уповільненому руйнуванню забезпечується за умов, коли вміст вуглецю в колісній сталі не перевищує 0,55 %. При цьому температура попереднього підігріву повинна бути до 150 °С. При більшому вмісті вуглецю температуру попереднього підігріву необхідно підвищувати не менше як до 250 °С.

2. При механізованому наплавленні колісної сталі з дисперсійним нітридним та твердорозчинним зміцненням дифузійний водень, який знаходиться в наплавленому металі, потрапляючи в ЗТВ, суттєво знижує його опірність уповільненому руйнуванню. Тому вміст дифузійного водню в наплавленому металі необхідно обмежувати на рівні не більше 0,3 мл/100 г, що можливо при попередньому прожарюванні порошкового дроту ПП-АН-180МН/98 (12ГСХ1НФТ) перед його застосуванням при температурі 230 °С на протязі 2,5 год. При

більшому вмісті дифузійного водню в наплавленому металі процес зародження та розвитку мікротріщин в металі ЗТВ прискорюється, а критичні напруження руйнування знижуються до 4,5 разів.

3. При зварюванні дослідних колісних сталей з дисперсійним нітридним та твердорозчинним зміцненням на утворення та розвиток тріщин в наплавленнях суттєво впливає структурний стан металу ЗТВ, який залежить від вмісту вуглецю в сталі та швидкості охолодження. Уникнути утворення холодних тріщин можливо за умов, коли вміст вуглецю в сталі не перебільшує 0,55 %, застосувавши попередній підігрів металу до 100...150 °С.

Список літератури

1. Узлов И.Г. Прогрессивные процессы производства и качество железнодорожных колес. *Сталь*, **5**, 69–72.
2. Железнодорожные колеса и бандажи KLV (Интерпайп НТЗ Украина). www.interpipe.biz.
3. Узлов И.Г., Бабаченко А.И., Дементьева Ж.А. (2005) Влияние микрелегирования стали на вязкость разрушения железнодорожных колес. *Металлургия и горнорудная промышленность*, **5**, 46–47.
4. Бабаченко А.И., Литвиненко П.Л., Кныш А.В. и др. (2011) Совершенствование химического состава стали для железнодорожных колес, обеспечивающего повышение их стойкости к образованию дефектов на поверхности катания. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. науч. тр. ИЧМ НАН Украины*, **23**, сс. 226–233.
5. Иванов Б.С., Филипов Г.А., К.Ю. Демин и др. (2007) Модифицирование колесной стали азотом. *Сталь*, **9**, 22–25.
6. Макаров Э.Л. (1981) Холодные трещины при сварке легированных сталей. Москва, Машиностроение.
7. Гриньяк И. (1984) *Свариваемость сталей*. Москва, Машиностроение.
8. Гайворонский А.А. (2013) Образование холодных трещин при сварке высокопрочной углеродистой стали. *Сварка и диагностика*, **5**, 27–32.

9. Позняков В.Д. (2008) Повышение сопротивляемости замедленному разрушению сварных соединений литых закаливающихся сталей. *Автоматическая сварка*, **5**, 11–17.
10. Мусияченко В.Ф., Жданов С.Л. (1981) *Исследование механизма развития холодных трещин методом акустической эмиссии. Трещины в сварных соединениях*. Братислава, сс. 130–136.
11. Гайворонский А.А. (2014) Сопротивляемость образованию холодных трещин металла ЗТВ сварного соединения высокопрочных углеродистых сталей. *Автоматическая сварка*, **2**, 3–12.

References

1. Uzlov, I.G. (2019) Advanced processes of manufacturing and quality of railway wheels. *Stal*, **5**, 69–72 [in Russian].
2. *Railway wheels and treads KLV. Ukraine, Interpipe NTRP* [in Russian] www.interpipe.biz.
3. Uzlov, I.G., Babachenko, A.I., Dementieva, Zh.A. (2005) Influence of microalloying of steel on fracture toughness of railway wheels. *Metallurgiya i Gornorudnaya Promyshlennost*, **5**, 46–47 [in Russian].
4. Babachenko, A.I., Litvinenko, P.L., Knysh, A.V. et al. (2011) Improvement of chemical composition of steel for railway wheels providing their increased resistance to defect formation on roll surface. In: *Fundamentals and applied problems of ferrous metallurgy*. Ukraine, IFM, 23. 226–233 [in Russian].
5. Ivanov, B.S., Filipov, G.A., Demin, K.Yu. et al. (2007) Modification of wheel pair by nitrogen. *Stal*, **9**, 22–25 [in Russian].
6. Makarov, E.L. (1981) *Cold cracks in welding of alloy steels*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
7. Hrivnak, I. (1984) *Weldability of steels*. Moscow, Mashinostroenie
8. Gaivoronsky, A.A. (2013) Cold crack formation in welding of high-strength carbon steel. *Svarka i Diagnostika*, **5**, 27–32 [in Russian].
9. Poznyakov, V.D. (2008) Improvement of delayed cracking resistance of welded joints of cast hardenable steels. *The Paton Welding J.*, **5**, 7–12.
10. Musiyachenko, V.F., Zhdanov, S.L. (1981) *Study of mechanism of cold crack development by acoustic emission method*. In: *Cracks in welded joints*. Bratislava, 130–136.
11. Gajvoronsky, A.A. (2014) Resistance to cold crack formation of HAZ metal of welded joint on high-strength carbon steels. *The Paton Welding J.*, **2**, 2–11.

INFLUENCE OF COMPOSITION OF DEPOSITED METAL AND THERMODEFORMATION CYCLE OF SURFACING ON STABILITY OF JOINTS OF WHEEL STEELS WITH DISPERSION NITRIDE AND SOLID-SOLUBLE HARDENING TO COLD CRACKS FORMATION

V.D. Poznyakov, O.A. Gaivoronsky, A.V. Klapatyuk, A.M. Denysenko, S.V. Shmygelsky

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Current trends in the development of railway transport increase the load on the axle and the speed of freight trains. The relevant task is to create technologies for the production and restoration of railway wheels, which provide the extension of their service life in different operating conditions. To solve this problem, it is necessary to study the influence of different factors on the technological and operational strength of welded joints of wheel steels with dispersion nitride and solid-soluble hardening and develop technology for restoring the rolling profile of all-rolled wheels of freight cars. It was established that the change in resistance to delayed fracture of the HAZ metal of wheel steels with dispersion nitride and solid-soluble hardening is significantly influenced by the carbon content in steel and the cooling rate during welding. Diffusion hydrogen, contained in the deposited metal, getting into HAZ, significantly reduces its resistance to delayed fracture. In the new wheel steel, the carbon content should not exceed 0.55%. Under other conditions, it will be impossible to provide the proper level of resistance of joints to the formation of cold cracks during surfacing of new railway wheels. 11 Ref., 3 Tabl., 4 Fig.

Keywords: arc surfacing, wheel steel with dispersion nitride and solid-soluble hardening, heat-affected-zone, structure, cooling rate, diffusion hydrogen, cold cracks

Надійшла до редакції 02.11.2020

ХАРАКТЕР РОЗПОДІЛУ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ В СТРУКТУРНИХ СКЛАДОВИХ МЕТАЛУ ЗВАРНИХ ШВІВ ПРИ ДУГОВИХ МЕТОДАХ ЗВАРЮВАННЯ

В. В. Головка

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

З метою експертної оцінки службових властивостей зварних з'єднань на сьогодні розроблена велика кількість комп'ютеризованих програм для прогнозування структурного складу металу зварних швів та їх механічних властивостей. Зазвичай такі програми побудовані на базі багатофакторного аналізу процесів, які відбуваються в зварювальній дузі, термодинаміки та кінетики процесів в зварювальній ванні. Слід відзначити, що при аналізі реакцій кристалізації та перекристалізації в металі швів в таких програмах не враховують, як правило, характер розподілу неметалевих включень в структурних складових. Існує багато досліджень, які показують помітний вплив включень в залежності від того будуть вони присутні на границях чи в тілі зерен. Показана необхідність враховувати при формуванні числових моделей вірогідність знаходження неметалевих включень в тілі структурних зерен або на їх границях, що дозволить підвищити відповідність прогнозованих даних експериментальним результатам визначення механічних характеристик металу зварних швів. Бібліогр. 5, рис. 5.

Ключові слова: металознавство, низьколеговані сталі, зварні шви, мікроструктура, числове моделювання, неметалеві включення

Впливу неметалевих включень на структуру та властивості зварних швів сплавів заліза приділяється велика увага вже впродовж біля півтора століття. Слід відзначити, що з часом ця проблема залишається актуальною, і це пов'язано зі зміною уявлень про особливості впливу. Якщо перші роботи наводили переконливі докази щодо негативної ролі підвищеної об'ємної частки включень в швах на формування механічних властивостей металу, то в подальшому дослідники встановили, що треба брати до уваги розподіл за розмірами та хімічним складом включень. Наприкінці ХХ-го століття з'явилися дослідження, які показували позитивну роль певних включень в процесах вторинної кристалізації зварних швів низьколегованих сталей. В роботах останніх років приділено увагу впливу нанорозмірних включень в підвищення рівня механічних властивостей швів високоміцних низьколегованих сталей. Виходячи з результатів наукових досліджень, лабораторних випробувань і промислової практики можливо дійти висновку, що при аналізі впливу неметалевих включень на структуру і властивості зварних швів потрібно використовувати комплексний підхід, який дозволяє враховувати не тільки топологічні показники, але також і фізико-хімічні характеристики як самих включень, так і характер їх взаємодії з металевим розчином та кристалітною фазою. При цьому неодноразово відзначено, що дія включень залежить від того де саме вони розташовані – в центрі великих зерен чи на міжзеренних або внутрізеренних границях. Але якщо

питанням розподілу включень в швах за розміром та хімічним складом, їх впливу на формування структури та механічні властивості металу швів було присвячено великий обсяг досліджень, то проблемі розподілу включень в складових мікроструктури приділено значно менше уваги.

Проблема моделювання процесів, які впливають на формування мікроструктури зварного шва з метою прогнозування рівня його службових показників потребує виконання багатофакторного аналізу. Сучасні можливості комп'ютерної обробки великого обсягу баз даних, числового аналізу термодинаміки та кінетики нерівноважних процесів надають можливість для вирішення таких завдань. В останнє десятиріччя з'явилися публікації, в яких автори показують можливості такого підходу для вирішення комплексної проблеми з оптимізацією технології виготовлення зварних металоконструкцій, наприклад [1–5]. Роль неметалевих включень в цих роботах враховується з точки зору розподілу їх за розміром та хімічним складом, проте характер розподілу включень в самих структурних складових залишається поза увагою. На наш погляд, моделювання впливу неметалевих включень без врахування характеру їх розподілу в структурних складових не зможе достатньо надійно прогнозувати механічні властивості металу зварних швів.

В роботі представлено уявлення щодо процесів, які визначають характер розподілу неметалевих включень в мікроструктурі металу зварних швів низьколегованих сталей.

Формування включень. Більшість процесів зварювання супроводжуються плавленням ос-

новного і присадкового металу спільно з шлакоутворюючим матеріалом у вигляді покриття електродів, осердя порошкового дроту або зварювального флюсу. Висока концентрація енергії між електродом, що плавиться, і зварювальною ванною сприяє утворенню плазмового розряду з температурою до 20000 К, в якому зварювальний дріт і флюс плавляться, випаровуються і розкладаються на складові елементи. Ці елементи переносяться від електрода в зварювальну ванну трьома основними способами (рис. 1):

- у вигляді іонів в стовпі плазми;
- у вигляді дрібних крапель на периферії плазми;
- у вигляді великих крапель, які відриваються з кінця електрода і переносяться впродовж короткого інтервалу часу через плазму.

Крім цього, відбувається втрата деяких елементів на випаровування в атмосфері зварювальної дуги.

Параметри процесу зварювання справляють сильний вплив на стабільність горіння дуги, ефективність і спосіб перенесення елементів в зварювальну ванну. Тому, незважаючи, наприклад, на те, що флюс складається практично повністю з оксидів і фторидів, вони взагалі не передаються через дугу у вигляді вихідних з'єднань, а скоріше як складові елементи. Тільки досить великі частки електродного покриття, які здатні залишитися незмінними при проходженні через зварювальну дугу, можуть потрапити в зварювальну ванну і значно погіршити механічні властивості металу шва. Литий метал зварювальної ванни ($T > 2600\text{ }^{\circ}\text{C}$) містить легуючі елементи (Ti, Al, Si, Mn і т.д.), які перейшли із зварювального матеріалу та основного металу, і велику кількість кисню, тому що його розчинність в рідких сплавах заліза з вуглецем висока (0,22...0,29 % в точці плавлення заліза) і підвищується (до 0,33 %) при 1700 $^{\circ}\text{C}$.

Кисень надходить з навколишньої атмосфери або з захисного газу, до складу якого часто входить CO_2 . Цей процес повинен бути під кон-

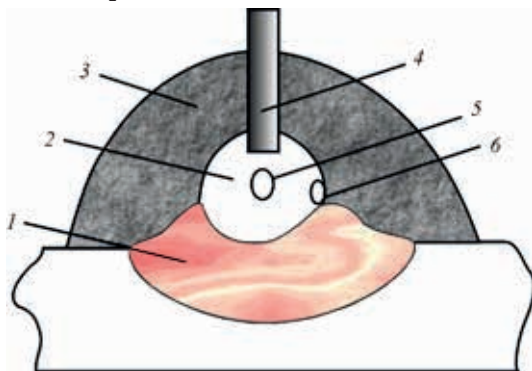


Рис. 1. Основні способи переносу хімічних елементів в зварювальній дузі: 1 – зварювальна ванна; 2 – плазма; 3 – флюс; 4 – електрод; 5 – крупні краплі в стовпі дуги; 6 – краплі на периферії

тролем, тому що вміст кисню в краплях металу на кінці електрода може досягати рівня 5000 ppm, а це вимагає великої кількості розкислювачів для видалення його зі зварювальної ванни при її охолодженні. Крім того, присутність у флюсі оксидів, які легко розкладаються (типу SiO_2), призводить до зростання вмісту кисню в металі шва, який надходить туди зі шлаку. Збільшення у флюсі вмісту сполук з підвищеною основністю (типу CaO , MgO та CaF_2) сприяє зниженню кількості кисню в зварному шві, хоча потенціал кисню і основність не обов'язково пов'язані. При зварюванні під високоосновними флюсами можливо знизити вміст кисню до рівня нижче 200 ppm, але для цього потрібне використання таких сильних розкислювачів, як алюміній. Оксиди, в залежності від їх здатності до розкладання, можливо розташувати в певній послідовності, а кисневий потенціал визначати на основі парціального тиску кисню, який знаходять, виходячи з енергії розкладання чистих оксидів. Оксиди були розташовані у напрямку зниження своєї здатності до розкладання в наступній послідовності: $\text{SiO}_2 > \text{TiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{ZrO}_2$.

При дугових методах зварювання за участю шлакової фази перехід кисню визначається умовами формування в шлаку FeO в результаті розкладання оксидів флюсу. Кількість FeO , яке переходить в зварювальну ванну, збільшується зі зменшенням вільної енергії утворення оксидів флюсу, тому MnO , SiO_2 та Cr_2O_3 суттєво впливають на окислення металу шва. Однак в більшості випадків до 90 % FeO видаляється з металу зварювальної ванни в шлак.

Розчинність кисню в залізі різко зменшується зі зниженням температури (при 1345 $^{\circ}\text{C}$ розчинність кисню в γ -залізі становить 0,003...0,007 мас.%), при цьому рушійна сила утворення оксидів збільшується. В результаті цього перед фронтом кристалізації формуються переважно оксидні частки з більш високою температурою утворення, тобто можна вважати, що тугоплавкі оксиди на базі Al, Si та Ti утворюються в розплаві металу гомогенно. Такі умови формування включень можуть бути спрогнозовані виходячи з діаграми Ellingham (рис. 2).

Процеси, що визначають розподіл включень в структурі металу швів. Найсильніші оксиди розташовані в нижній частині діаграми і формування їх відбувається при більш низькій активності кисню, якщо допустити, що його активність постійна у всьому обсязі металу. Силікати формуються при набагато нижчих температурах, ніж оксиди. Цілковито реально припустити, що вони утворюються в процесі затвердіння металу в міждендритних областях, які збагачені домішковими

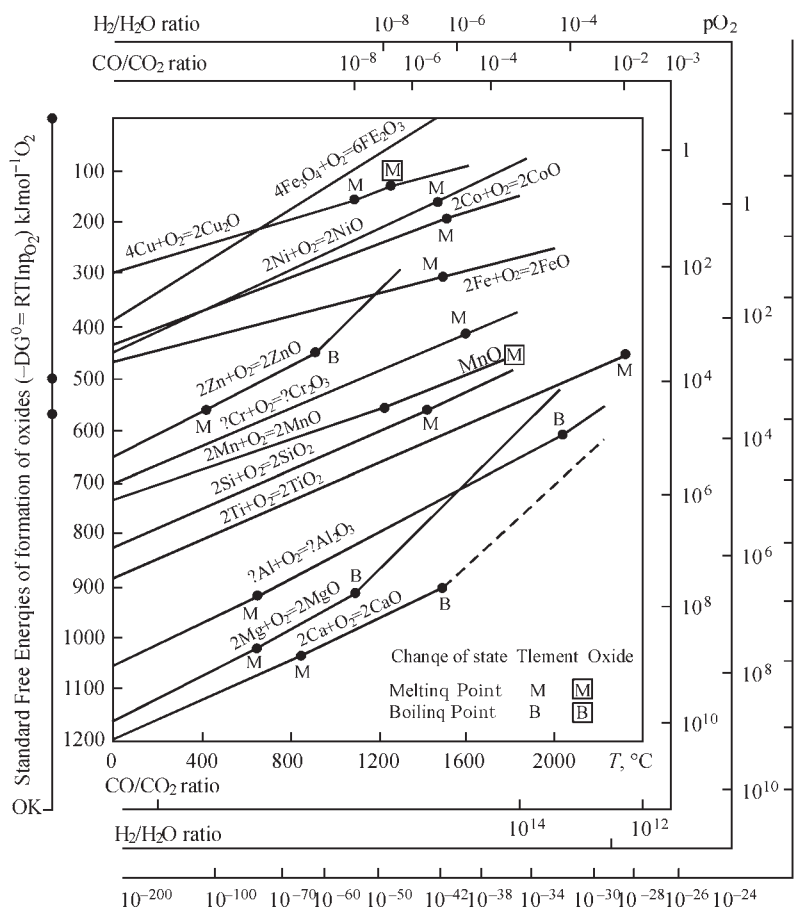
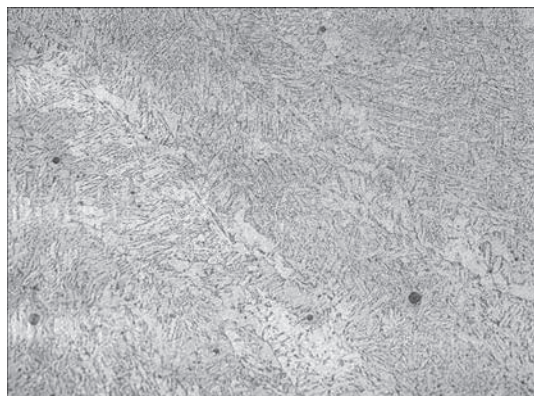


Рис. 2. Діаграма (Ellingham) зміни вільної енергії утворення оксидів

і легуючими елементами. Цьому процесу може сприяти наявність первинних високотемпературних оксидів. Такий висновок підтверджується характером розташування включень в міждендритних областях (рис. 3).

Сформований в результаті комплекс включень визначається часом дії сегрегації і зростання включень, тому оксиди в загальному випадку повинні бути більшими (> 1 мкм) ніж силікати, оскільки вони мають можливість для зростання протягом більш тривалого часу. Однак, оскільки оксиди формуються в розплаві з високими швидкостями потоків і турбулентністю, певна їх частина видаляється в шлак, інші можуть бути ви-


 Рис. 3. Виділення крупних неметалевих включень в тілі зерен ($\times 200$)

несені в високотемпературну зону розплаву, де відбувається їх дисоціація. Процес сепарації неметалевих включень зі зварювальної ванни не досягає завершення, тому що деякі частинки захоплюються фронтом твердіючого металу і формують в ньому популяцію включень.

Закон Стокса, тобто флоатція і сепарація в результаті дії підйомної сили, не поширюється на включення в металі зварювальної ванни, через недостатній час дії цієї сили, а також тому, що потоки металу мають набагато більш сильну дію. За інтенсивністю цих потоків в зварювальній ванні можна виділити дві області (рис. 4). «Гаряча» область з дуже бурхливим потоком, з якого частинки швидко виносяться, і «холодна», розташована ближче до країв ванни, швидкість руху потоків в якій набагато менше, що призводить до захоплення більшої кількості частинок рухомим фронтом кристалізації. Це дозволяє пояснити, чому вміст кисню в наплавленому

металі зазвичай більше, ніж можна передбачити, виходячи з умов термодинамічної рівноваги, апроксимованої до області температур нижче температури затвердіння. Крім того, діаграма Ellingham відноситься тільки до сферичних оксидів і показує стандартну енергію їх формування, віднесену до одного молю кисню при даній температурі, хоча високотемпературні включення можуть мати в своєму складі такі карбіди і нітриди з високою температурою плавлення, як, наприклад, TiN.

Взаємодія фронту кристалізації з включеннями викликає сегрегацію твердих продуктів розкислення, пов'язану з сегрегацією легуючих елементів. Просування фронту кристаліза-

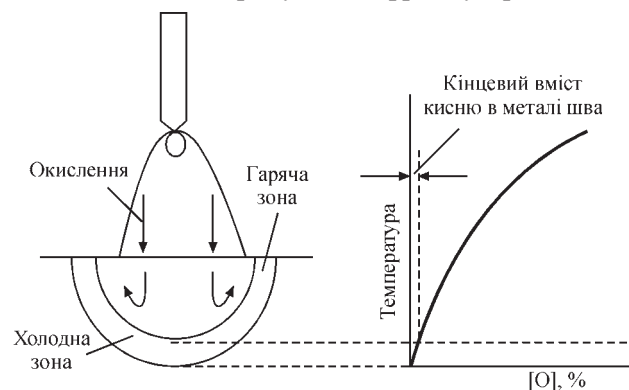


Рис. 4. «Гаряча» і «холодна» зони зварювальної ванни

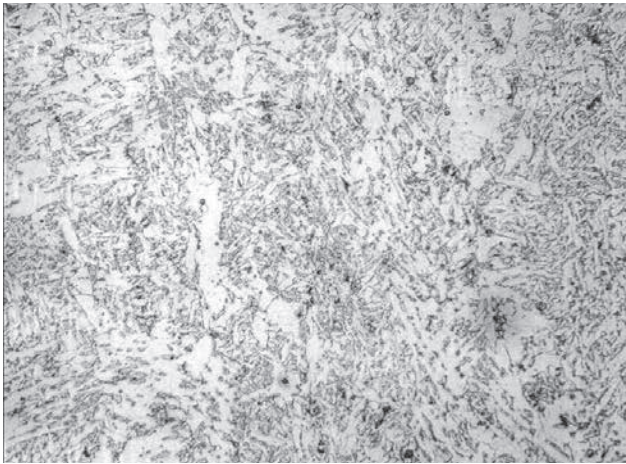


Рис. 5. Виділення силікатних включень у вигляді ланцюжків на границях зерен ($\times 500$)

ції може справляти таку дію на включення, яка змушує його рухатися вперед перед фронтом кристалізації. Можуть мати місце і інші механізми впливу, типу ефекту Marangoni, який є результатом зміни міжфазного натягу. Вплив останнього типу суттєво залежить від складу розплаву, тому що сегрегація, яка відбувається на фронті кристалізації в процесі росту твердої фази, викликається градієнтами концентрації і міжфазного натягу, які призводять до конвекції, спрямованої до межі затвердіння. Крім того, поверхневий натяг може викликати неоднорідний розподіл оксидних частинок. Великі включення характеризуються слабкою рухливістю і тому захоплюються розчином, що кристалізується, а більш дрібні включення накопичуються на міжфазному фронті і розподіляються уздовж границь зерен.

Вплив будь-яких сил, що виникають в результаті процесів, які мають місце в потоках розплаву, пропорційний області його контакту з включенням, (r^2 для сферичних включень), тоді як інерція частки пропорційна обсягу (r^3 для сферичної частинки). Тому тенденція до сегрегації повинна зменшуватися зі збільшенням радіуса сферичної частинки. Така залежність може бути порушена ефектом спливання частинок, проте, такого впливу до цих пір не виявлено. Силікати, які утворюються пізніше, мають тенденцію формувати ланцюжок включень уздовж міждендритних кордонів (рис. 5).

Експериментальна перевірка такого характеру сегрегації утруднена, тому що структура металу зазнає перетворення в процесі охолодження зварного шва, які порушують первинну структуру кристалізації. При використанні спеціальних методів травлення, що дозволяють виявляти границі первинної структури, можна встановити відповідність між ними і розподілом включень. У процесі

охолодження металу шва відбувається подальше зростання включень часто у вигляді сульфідів, які виділяються на вже існуючих включеннях. Багато дослідників відзначали наявність плівки Cu_xS , яка покриває оксидні частки в металі швів низьколегованих сталей. Збільшення вмісту сірки в металі шва призводить до заміни в поверхневому шарі включень з'єднань, багатих оксидом титану, плівкою типу $(\text{Cu}, \text{Mn}) \text{S}$.

Висновок

Надійне прогнозування структурного складу металу зварних швів та їх механічних властивостей на базі багатофакторного аналізу неможливо без використання числового моделювання. З цією метою дослідниками розроблено комп'ютерні програми, які дозволяють враховувати як хімічний склад основного металу та зварювальних матеріалів, так і параметри технології зварювання. Використання таких програм засвідчило можливість значно підвищити ефективність дослідницьких розробок в галузі виготовлення зварних металоконструкцій з одного боку, але також показало присутність в певних ситуаціях помітної розбіжності між розрахунковими даними і експериментальними результатами, яка може бути пов'язана з недостатньо повним описом особливостей формування структури металу швів. В роботі представлено уявлення щодо процесів, які визначають характер розподілу неметалевих включень в мікροструктурі металу зварних швів низьколегованих сталей.

Список літератури/References

1. Sarma, D.S., Karasev, A.V., Jönsson, P.G. (2009) On the Role of Non-metallic Inclusions in the Nucleation of Acicular Ferrite in Steels. *ISIJ International*, 49, 7, 1063–1074.
2. Cortés, V.H.V., Guerrero, G.A., Granados, I.M. et al. (2019) Effect of Retained Austenite and Non-Metallic Inclusions on the Mechanical Properties of Resistance Spot Welding Nuggets of Low-Alloy TRIP Steels. *Metals*, 9, 9, 1064; DOI:10.3390/met9101064.
3. Ignatova, A., Ignatov, M. (2015) The Measurement of Hardness and Elastic Modulus of non-Metallic Inclusions in Steely Welding Joints. *TEM J.*, 4, 3, 314–318.
4. Пименов А. В. (2015) О влиянии неметаллических включений на вязкость низколегированного металла шва при низких температурах. *Вопросы материаловедения*, 1, 81, 108–110.
5. Pimenov, A.V. (2015) On influence of nonmetallic inclusions on toughness of low-alloy metal at low temperatures. *Voprosy Materialovedeniya*, 1, 81, 108–110 [in Russian].
6. Карташов М. Ф., Игнатова А. М., Федосеева Е. М., Игнатов М. Н. (2014) Характеристика неметаллических включений в сварных соединениях нефтегазовых трубопроводов. *Нефтегазовое дело: электронный научный журнал*, 2, 80–94.
7. Kartashov, M.F., Ignatova, A.M., Fedoseeva, E.M., Ignatov, M.N. (2014) Characteristic of nonmetallic inclusions in welded joints of gas-and-oil pipelines. *Neftegazovoe Delo: Electron. J.*, 2, 80–94 [in Russian].

NATURE OF DISTRIBUTION OF NON-METALLIC INCLUSIONS IN STRUCTURAL COMPONENTS OF WELD METAL WHILE USING ARC WELDING METHODS

V. V. Holovko

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

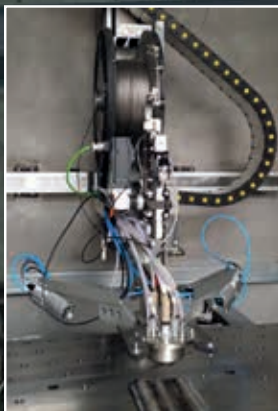
E-mail: office@paton.kiev.ua

In order to give an expert evaluation of properties of welded joints, for today, a large number of computerized programs were developed to predict the structural composition of weld metal and their mechanical properties. Usually, such programs are based on multifactor analysis of the processes occurring in the welding arc, thermodynamics and kinetics of processes in the welding pool. It should be noted that during the analysis of crystallization and recrystallization reactions in the weld metal in such programs, as a rule, the nature of the distribution of non-metallic inclusions in the structural components is not taken into account. There are many studies that show a noticeable effect of inclusions depending on whether they are present at the boundaries or in the body of the grains. The need to take into account the probability of finding non-metallic inclusions in the body of structural grains or at their boundaries during the formation of numerical models, which will increase the compliance of the predicted data with experimental results of determining the mechanical properties of weld metal. 5 Ref., 5 Fig.

Key words: metallurgical science, low-alloy steels, welds, microstructure, numerical modeling, non-metallic inclusions

Надійшла до редакції 19.10.2020

Система xBeamGrand для 3D друку металів



ПрАТ «НВО «Червона Хвиля» розробило та виготовило одну з найбільших в світі систему xBeamGrand для 3D друку металів, яка дозволяє ефективно виготовляти високоякісні металеві вироби розмірами до 1000x1500x1500 мм із звичайного дроту із сплавів титану, ніобію, нікелю, нержавіючих та інструментальних сталей, тощо.



Запрошуємо до співробітництва
ПрАТ «НВО «Червона Хвиля»
 04114, Київ, вул. Дубровицька, 28
 Тел./факс: +38 (044) 200-89-46
 E-mail: info@xbeam3d.com



ЯКІСТЬ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТРУБ ІЗ РІЗНОТИПНИХ ПОЛІЕТИЛЕНІВ

М.О. Ковальчук, М.В. Юрженко, В.Л. Демченко, М.Г. Кораб, Р.В. Колісник

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

На початку будівництва трубопроводів із пластмас використовували так званий поліетилен низького тиску, нині відомий під маркою ПЕ-63. У подальшому було розроблено нові, більш досконалі види сировини, що являють собою кополімер поліетилену з гексеном. З цих поліетиленів типів ПЕ-80 та ПЕ-100, на сьогодні виготовляють майже усі напірні труби. Однак при ремонті та реконструкції трубопроводів з пластмас існує нагальна проблема з'єднання труб із ПЕ-63, які експлуатувалися довгий час, новими трубами, виготовленими з поліетиленів марок ПЕ-80 та ПЕ-100. В роботі проведено комплексні дослідження теплофізичних властивостей технічних поліетиленів та виявлено суттєві для процесу зварювання відмінності, які мають бути враховані при ремонті полімерних трубопроводів. Проведено експериментальні зварювання зразків труб як з однотипних, так і різнотипних поліетиленів. Проведено морфологічні та механічні дослідження зварних з'єднань поліетиленових труб марок ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100. За результатами досліджень визначено вплив їх теплофізичних властивостей та параметрів процесу зварювання на морфологічну структуру та якість зварних з'єднань різнотипних поліетиленів. Проведено математичне моделювання температурних полів при стиковому зварюванні. Розроблено та створено двозонний нагрівальний інструмент для зварювання нагрітим інструментом встик труб зовнішнім діаметром до 110 мм із різнотипних поліетиленів трубних марок ПЕ-63 та ПЕ-80, ПЕ-100. З метою випробування дослідного зразка двозонного нагрівального інструменту було проведено серію експериментальних робіт, які показали покращення міцнісних характеристик отриманих зварних з'єднань. Бібліогр. 8, табл. 4, рис. 10.

Ключові слова: поліетиленова сировина різних типів, поліетиленові труби, зварні з'єднання

Питання ремонту поліетиленових трубопроводів є важливим з точки зору їх безпеки та надійності експлуатації. Як відомо, старі трубопроводи будувалися з використанням поліетилену марки ПЕ-63, котра вже є технологічно неактуальною та більше не випускається, а повністю перекладати трубопровід замість заміни окремої ділянки не є доцільним. Тому, для забезпечення ремонту таких трубопроводів, виникає необхідність дослідження можливості зварювання поліетиленів різних марок. В роботі наведено результати комплексних теплофізичних та структурних досліджень поліетиленів ПЕ-60, ПЕ-80 та ПЕ-100. Встановлено основні відмінності матеріалів, котрі впливають на можливість отримання якісного зварного з'єднання. Розроблено технологічні підходи до зварювання різнотипних поліетиленів.

На початку будівництва пластмасових трубопроводів використовувалися труби з поліетилену марки ПЕ-63, однак з розвитком полімерної промисловості, у 2000-х роках, йому на зміну прийшли більш технологічні поліетилені марок ПЕ-80 та ПЕ-100. Це призвело до виникнення глобальної проблеми ремонту та реконструкції старих поліетиленових трубопроводів через необхідність зварювання матеріалів з різними теплофізичними властивостями та відсутність наявної інформації і досліджень якісних характеристик з'єднань різнотипних полі-

мерів навіть при короткотривалому використанні. Існуюча інформація про можливості зварювання труб та деталей з поліетиленових композитів різних типів, надійність та довговічність їх зварних з'єднань суттєво суперечлива та обмежена. Деякі нормативні документи дозволяють зварювати між собою різнотипні поліетилені, якщо вони мають близькі значення в'язкості розплаву, яка оцінюється за величиною ПТР. Однак задача оптимізації процесу зварювання гетерогенних поліетиленових труб є непростю та потребує проведення додаткових досліджень та відповідної адаптації зварювального обладнання [1]. При виборі параметрів процесу зварювання поліетиленових труб необхідно враховувати особливості теплофізичних властивостей основного матеріалу, а також наявність та кількість домішок. Зокрема, матеріал труб, котрі вже перебували в експлуатації, може мати сторонні домішки, що з'явилися в результаті адсорбції з навколишнього середовища [2].

Матеріали та методики досліджень. Для виконання зварювальних робіт використовували модельні об'єкти – полімерні труби із номінальним зовнішнім діаметром 63 мм та товщиною стінки 5,8 мм, виготовлені з трьох марок технічного HDPE з різною мінімальною тривалою міцністю MRS, а саме ПЕ-63 (густина 0,940 г/см³, MRS6,3 за ГОСТ 16338 [3], ГОСТ Р 50838 «Трубы из полиэтилена

Ковальчук М.О. – <https://orcid.org/0000-0003-2161-643X>, Юрженко М.В. – <https://orcid.org/0000-0002-5535-731X>, Демченко В.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-9146-8984>, Кораб М.Г. – <https://orcid.org/0000-0001-8030-1468>, Колісник Р.В. – <https://orcid.org/0000-0003-2161-643X>

© М.О. Ковальчук, М.В. Юрженко, В.Л. Демченко, М.Г. Кораб, Р.В. Колісник, 2020

для газопроводів» [4]), ПЕ-80 (густина 0,941 г/см³, MRS8 МПа) і ПЕ-100 (густина 0,954 г/см³, MRS10 МПа) [5, 6].

На першому етапі досліджували теплофізичні властивості полімерного матеріалу поліетиленових труб усіх трьох марок методами диференційної сканувальної калориметрії (ДСК) на калориметрі TA Instruments DSC Q2000 та термомеханічним аналізом (ТМА) на приладі TA Instruments TMA Q400 EM.

На другому етапі проводили дослідні зварювання полімерних труб, як однотипних, так і різних марок, нагрітим інструментом «встик» за традиційною технологічною картою (рис. 1.) Параметри режиму зварювання встановлювали згідно з вимогами нормативу [7] – температура нагрітого інструменту 210 °С, час прогріву 60 с, технологічна пауза 3 с, тиск осадження 0,2 МПа, час охолодження під тиском 6 хв.

На третьому етапі отримані зварні з'єднання однотипних та різнотипних полімерних труб у різних комбінаціях закладали у середовище, що імітує умови експлуатації – у ґрунт на глибину 10 см, та на поверхню, де вони знаходились під дією кліматичних факторів протягом 1 та 2 років.

На четвертому етапі проводили комплексні дослідження для вивчення тривалого впливу середовища на експериментальні зразки. Структурні особливості зразків досліджували за допомогою ширококутового розсіювання рентгенівських променів (ШКРРП на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-4–07) та оптичною мікроскопією на мікроскопі Versamet-2. Експлуатаційні характеристики

зварних швів полімерних труб оцінювали методами візуального контролю у відповідності до ДСТУ EN13100–1:2017 та механічних випробів на розтяг на розривній машині FP-10 у відповідності до ДСТУ EN12814–2:2018 та ДБН В.2.5–41.

Теплові процеси при зварюванні труб із різнотипних поліетиленів теоретично досліджували шляхом математичного моделювання з використанням методу скінченних елементів.

Результати теплофізичних досліджень. Термогравіметричний аналіз (ТГА) зразків технічних поліетиленів показав, що за характером ТГА кривих (рис. 2, а) поліетилені усіх трьох типів схожі, однак температура початку термоокислювальної деструкції поліетилену ПЕ-63 є меншою у порівнянні з ПЕ-80 та ПЕ-100 (табл. 1). Швидкість термоокислювальної деструкції поліетилену ПЕ-63 набагато вища (рис 2, б) з температурою максимуму інтенсивності $T_{\text{д макс.}} \approx 418$ °С в порівнянні з ПЕ-80 та ПЕ-100 з температурами максимумів інтенсивності $T_{\text{д макс.}} \approx 420$ та 450 °С, відповідно.

Методом ДСК отримували відповідні криві для зразків технічних поліетиленів ПЕ-60, ПЕ-80 та ПЕ-100 при першому (рис. 3, а) та другому (рис. 3, б) нагріві. При першому нагріві, на ділянці біля 250 °С на кривих видно екзотермічні процеси, які відсутні при другому нагріві, що може бути пов'язано з тепловою релаксацією напружень, які залишилися у полімері після формування труб, або з дополімеризацією поліетиленів. При другому нагріві спостерігається зміна характеру максимумів ендотермічних процесів в області температур 130...140 °С, отже плавлення поліетиленів, зсув їх

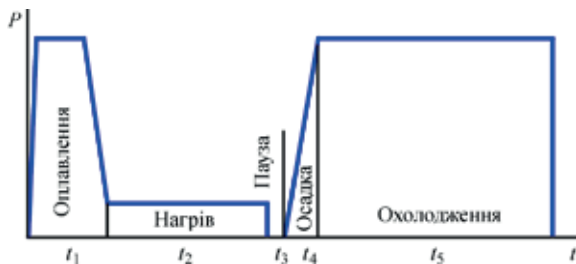


Рис. 1. Технологічна карта традиційного процесу зварювання нагрітим інструментом встик

Таблиця 1. Характеристичні температури термоокислювальної деструкції зразків технічних поліетиленів ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100

Зразок	$T_{\text{д}}^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{д макс.}}^{\circ}\text{C}$
ПЕ-63	252	418
ПЕ-80	264	420
ПЕ-100	274	450

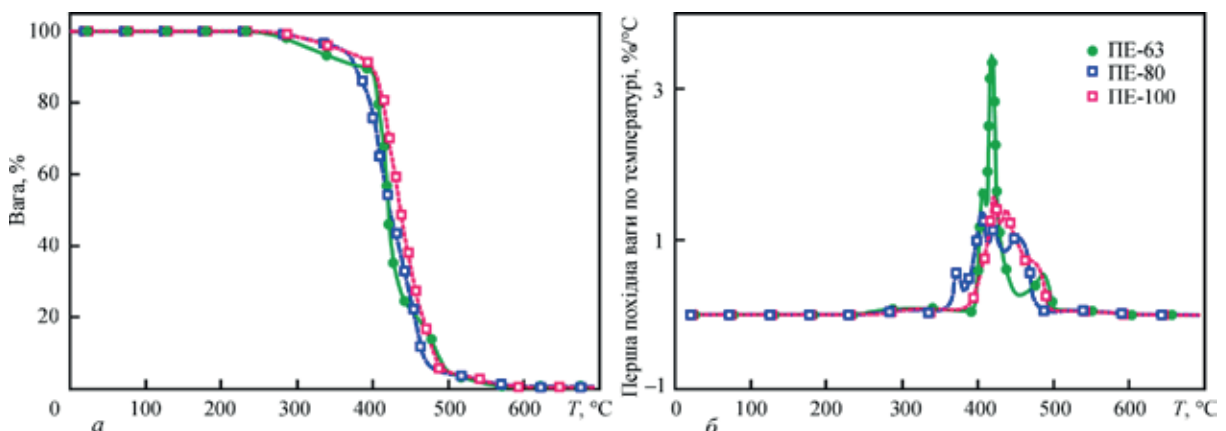


Рис. 2. ТГА криві зразків технічних поліетиленів ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100

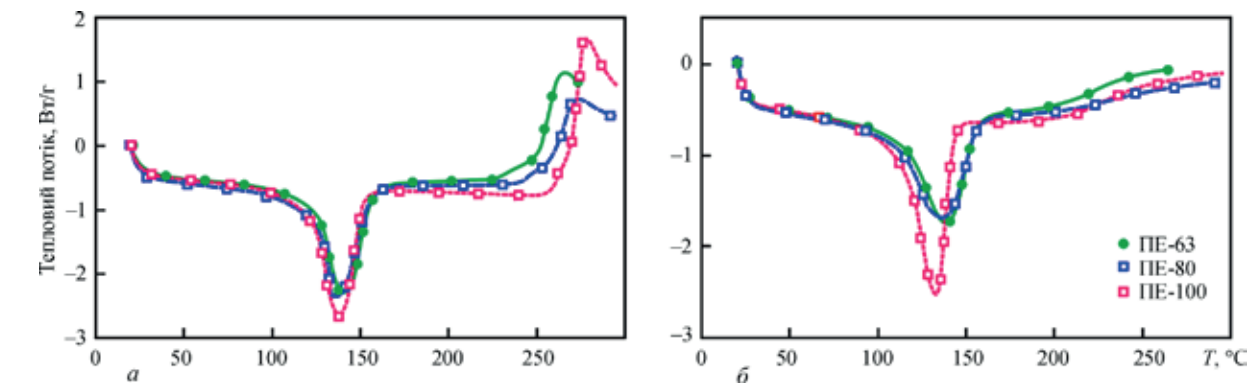


Рис. 3. ДСК криві зразків трубних марок поліетилену ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100 при першому (а) та другому (б) нагріві

температур та зменшення ентальпії відбувається при першому нагріві.

Порівняння кривих теплопровідності (рис. 4) показує, що цей параметр для усіх трьох марок поліетиленів як за ізотермічними значеннями, так і зі зміною температур можуть відрізнятися у декілька разів, що не може не впливати на процеси плавлення при їх зварюванні.

Порівнювали також криві повзучості та релаксації напруження зразків поліетиленів трьох марок при різних температурах (рис. 5). Якщо при температурах набагато нижчих за температуру плавлення індивідуальних поліетиленів ізотермічні криві деформації поліетиленів при повзучості та релаксації напруження схожі, то з наближенням до температури плавлення їх поведінка відрізняється суттєво. Для зразка поліетилену ПЕ-63 значення деформації є найменшими, що, вірогідно, пов'язано з його високою в'язкістю, а зразок ПЕ-100 деформується як вже низьков'язкий розплав.

Таблиця 2. Характеристичні теплофізичні параметри плавлення зразків трубних поліетиленів ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100

Зразок	$T_{пл}$, °C	ΔH , Дж/г
1-й нагрів		
ПЕ-63	141,3	112
ПЕ-80	136,9	116,1
ПЕ-100	137,6	120,9
2-й нагрів		
ПЕ-63	138,9	93,5
ПЕ-80	137,5	95,6
ПЕ-100	133	112,3

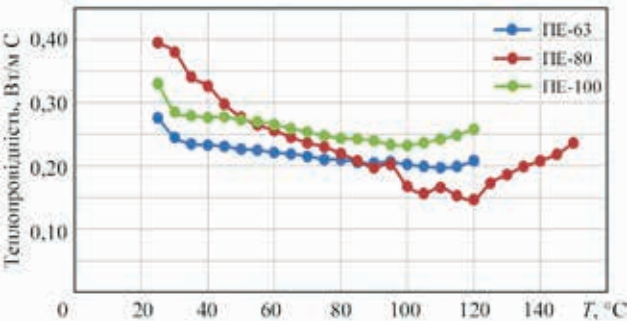


Рис. 4. Теплопровідність технічних поліетиленів ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100

Таким чином, проведені дослідження показали суттєві відмінності теплофізичних характеристик технічних поліетиленів, особливо між поліетиленом марки ПЕ-63 та поліетиленами марок ПЕ-80 та ПЕ-100. Ці відмінності, безумовно, потрібно враховувати при зварювання труб з різних марок поліетилену, однак технологічна карта традиційного способу зварювання полімерних труб нагрітим інструментом встик ці особливості не враховує.

Результати досліджень експериментальних зварних швів. Через 1 рік після закладання у експериментальне середовище проведено дослідження морфології та механічних характеристик експериментальних зварних з'єднань. Шліфи зварних швів труб з однотипних та різнотипних поліетиленів представлено на рис. 6.

Виявлено значну різницю у формі та об'ємі зварного грату у зварних з'єднаннях зі сторін різнотипних поліетиленів (рис. 6, в, г) у порівнянні зі зварними з'єднаннями однотипних поліетиленів (рис. 6, а, б). Важливо зазначити, що згідно діючих норм [7] грат подібної форми є характерним для неякісних зварних з'єднань, а саме зварне з'єднання вважається непридатним для використання. Згідно діючих норм у якісного зварного шва валики грату з обох сторін площини зварювання повинні мати однакову форму та об'єм, як це видно у зварних з'єднань труб з однотипних поліетиленів. Різниця форми та об'єму грату для різнотипних зварних

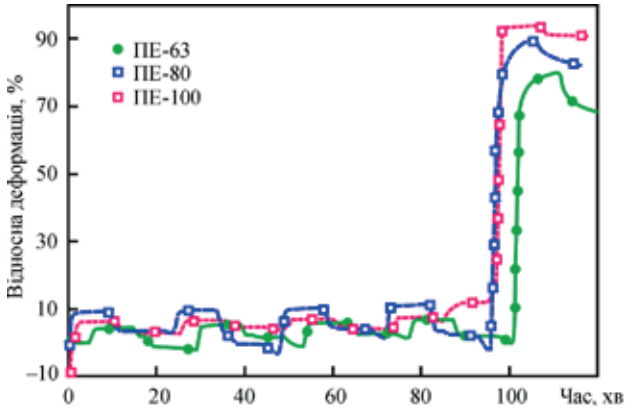


Рис. 5. Деформаційна поведінка технічних поліетиленів ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100

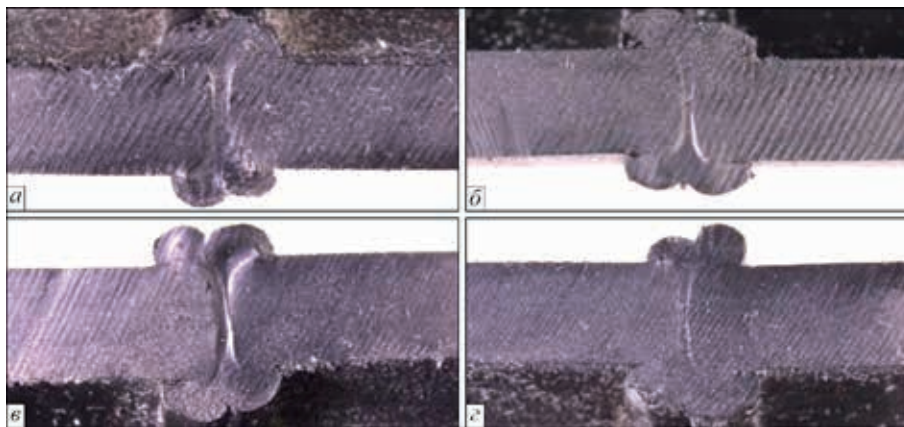


Рис. 6. Морфологія зварних з'єднань полімерних труб з різнотипних та однотипних поліетиленів: а – ПЕ-63/ПЕ-63; б – ПЕ-100/ПЕ-100; в – ПЕ-100/ПЕ-63; г – ПЕ-63/ПЕ-80

з'єднань обумовлена різницею їх теплофізичних характеристик, яка була показана вище.

Аналіз ширококутових рентгенівських дифрактограм зразків зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-100, показав, що всі вони мають аморфно-кристалічну структуру, на що вказує присутність дифракційних максимумів при $2\theta_{\max} = 21,2$ та $23,6$ на фоні уявного аморфного гало з вершиною при $2\theta_{\max} \approx 21,0^\circ$ (рис. 7).

Примітно, що для зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-100, які знаходились на повітрі під дією ультрафіолетового випромінювання має місце зміна інтенсивності дифракційних максимумів в площинах (110) та (200), що вказує на суттєві зміни структури матеріалу зварного з'єднання. При аналізі ширококутових рентгенівських дифрактограм зразків зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-63 та ПЕ-63/ПЕ-80, які знаходились на повітрі та у землі, суттєвих змін в їх структурній організації не виявлено.

На рис. 8 приведені криві модульованої зміни розміру зразків зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-100, відповідно, які перебували під дією факторів робочого середовища, від температури.

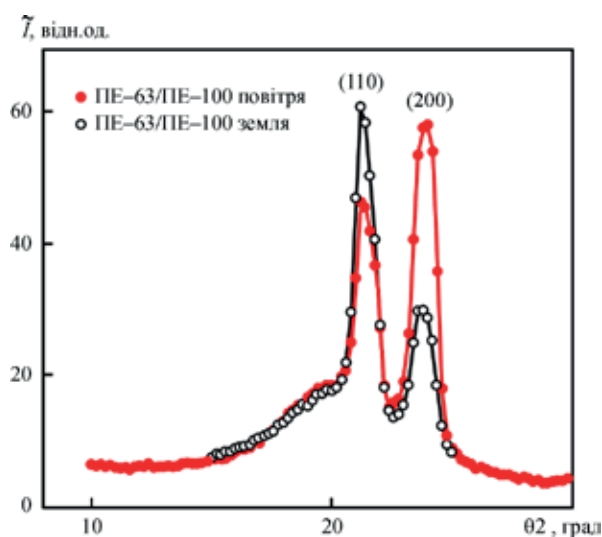


Рис. 7. Ширококутові рентгенівські дифрактограми зварних з'єднань поліетиленів ПЕ-63/ПЕ-100, які знаходились на повітрі та у землі

За виключенням зростання величини термічного розширення до плавлення кристалічної фази поліетиленів у зразка зварного з'єднання ПЕ-63/ПЕ-80, який перебував на поверхні, та дещо різкого процесу плавлення зразка зварного з'єднання ПЕ-63/ПЕ-80, який перебував у землі, суттєвої різниці між поведінкою термомеханічних кривих обох зразків не спостерігається. Найімовірніше це пояснюється відсутністю суттєвих змін у структурі обох зварних швів. Зовсім інша ситуація спостерігається для зразків зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-100. Криві модульованої зміни розміру зразків зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-100, від температури мають суттєву різницю в області плавлення кристалічної фази поліетиленів. Це безумовно може бути пояснено зміною у структурі кристалічної фази поліетиленів в зварному шві, що підтверджується результатами рентгеноструктурних досліджень, які приведені на рис. 9.

Експлуатаційні характеристики зварних з'єднань вивчали шляхом механічних випробувань у режимі одновісного розтягування (табл. 3). Видно, що найбільш суттєві погіршення механічних властивостей мають зварні з'єднання ПЕ-63/ПЕ-80 в незалежності від середовища перебування. Однак треба відмітити, що більших змін у механічній міцності

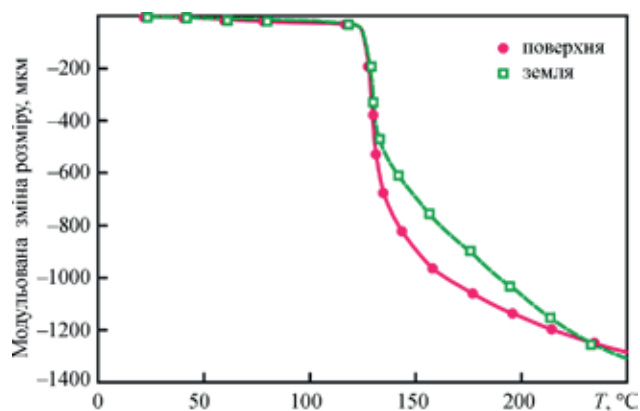


Рис. 8. Модульована зміна розміру зразків зварних з'єднань ПЕ-63/ПЕ-100, які перебували під дією факторів робочого середовища, від температури

заснали зразки, що перебували у ґрунті. Ймовірно це пов’язано з відсутністю дії ультрафіолетового випромінювання, яке, як відомо, в перший час приводить до зшивання поліетилену, що супроводжується збільшенням його міцності, на фоні його старіння, що в тій чи іншій мірі, як видно, з таблиці, характерне для усіх зразків.

Результати математичного моделювання температурних полів. З метою оцінки впливу різниці теплофізичних характеристик матеріалу на процес зварювання різнотипних поліетиленів було проведено математичне моделювання температурних полів в ході процесу зварювання.

На рис. 9 показані ізолінії температурного поля в три моменти процесу стикового зварювання: *а* – на початку технологічної паузи 75 с; *б* – в момент з’єднання торців та початку стискання труб при осадженні; *в* – приблизно в середині тривалості охолодження. Через відмінності у теплофізичних властивостях поліетиленів по різні боки стику труб формуються нерівномірні теплові поля. На рис. 10

видно поступове вирівнювання температури в серединній боковій поверхні труби.

Розробка та випробування двозонного нагрівального інструмента. Наведені вище дослідження різниці властивостей технічних поліетиленів ПЕ-63, ПЕ-80 та ПЕ-100 показали, що використання традиційної схеми зварювання однозонним нагрітим інструментом встик труб із різнотипних поліетиленів призводить до некоректного з технологічної точки зору формування зварного шва, який за характером процесу зварювання та зовнішнім виглядом зварного грату не відповідає діючим будівельним нормам, а тому виникла необхідність створення спеціального устаткування для забезпечення якісного зварного з’єднання при зварюванні нагрітим інструментом встик. Для вирішення задачі підвищення ефективності ремонту та подовження ресурсу трубопроводів з пластмас в ході роботи розроблено та створено двозонний нагрівальний інструмент для зварювання нагрітим інструментом встик труб зовнішнім діаметром до 110 мм із різнотипних поліетиленів трубних марок ПЕ-63 та ПЕ-80, ПЕ-100.

При регульованому прогріві з різною температурою на поверхнях двозонного нагрівача на торцях труб з обох боків утворюється однакова кількість розплаву, при осадженні формується симетричний шов з однаковими розмірами валиків грату по усій орбіті стику.

Висновок про механічну міцність зварного шва різнотипних поліетиленових труб, отриманого за допомогою двозонного нагрівного інструменту, дають руйнівні випробування зразків на розтяг згідно вимог введеного в дію в Україні нормативу ДСТУ EN12814-2:2018 [8].

Руйнування зразків мало однаковий пластичний характер. «Шийка» при пластичній деформації зразка утворювалась в області лінії сплавлення та розповсюджувалась у бік менш міцного полімерного матеріалу. Максимальне навантаження при розтягу для зразка ПЕ-80/ПЕ-63 (№ 1), звареного за традиційною технологією, становило 710 Н, а для зразка ПЕ-80/ПЕ-63 (№ 2), звареного за допомогою двозонного нагрітого інструменту, 880 Н. Після відповідних розрахунків було отримано значення межі

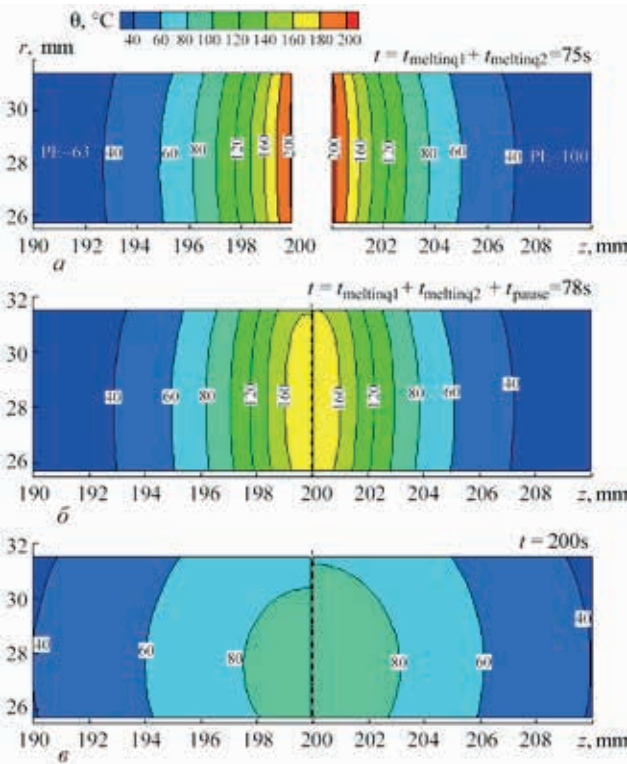


Рис. 9. Ізолінії температурного поля у різні часові моменти при стиковому зварюванні труб ПЕ-63/ПЕ-100 (опис *а–в* див. у тексті)

Таблиця 3. Зміна механічної міцності зразків зварних з’єднань з часом

Зразок	ПЕ-63 1 рік/2 роки	ПЕ-80 1 рік/2 роки	ПЕ-100 1 рік/2 роки
ґрунт			
ПЕ-63	19,38/19,68	18,76/18,03	19,69/18,79
Повітря			
ПЕ-63	19,23/19,48	17,84/16,5	19,53/19,55

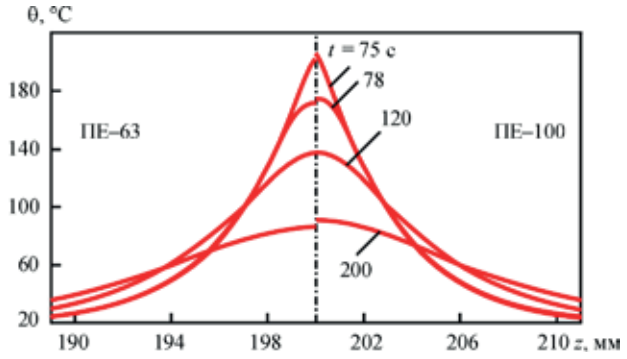


Рис. 10. Розподіл температури по вздовж серединній лінії для різних часових моментів при стиковому зварюванні труб ПЕ-63/ПЕ-100

Таблиця 4. Рекомендована температура робочих поверхонь двозонного нагрівача при зварюванні різнотипних поліетиленів

Температура навколишнього повітря °С	Тип поліетилену					
	ПЕ-63	ПЕ-80	ПЕ-63	ПЕ-100	ПЕ-80	ПЕ-100
–10...0	230	220	220	230	220	230
0...20	220	210	210	220	210	220
20...45	210	200	200	210	200	210

плинності полімерного матеріалу – 25, 8 МПа для зразка № 1 та 29,4 МПа для зразка № 2. Отже, міцність зварного з’єднання різнотипних поліетиленових труб, зварених за новою технологією, виявляється на 15 % більшою. Оскільки випробувались зразки зі звуженою робочою частиною, в цьому випадку визначалась міцність саме матеріалу зварного шва. За результатами експериментальних досліджень було визначено рекомендовані значення температури на поверхнях двозонного нагрівального інструменту в різних умовах навколишнього середовища (табл. 4).

Висновки

В роботі досліджено вплив різнорідності поліетиленів на процес формування їх зварного з’єднання. Приведено рішення проблеми зварювання труб із різнотипних поліетиленів за допомогою створеного в рамках даної роботи двозонного нагрівального інструменту для зварювання нагрітим інструментом встик. Розроблені технологічні підходи, що дають можливість отримати якісне зварне з’єднання різнотипних поліетиленів.

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

Список літератури

1. Кимельблат В. И., Волков И. В., Глухов В. В. (2010) Оптимизация технологии контактной сварки встык. Учет свойств полимеров. *Полимерные трубы*, 2, 28, 32–36.

2. Комаров Г. В. (2015) Состав и свойства полимерных материалов, влияющие на их свариваемость. *Полимерные материалы*, 9, 44–48.
3. ГОСТ 16338–85. *Полиэтилен низкого давления. Технические условия*.
4. ГОСТ Р 50838–95. *Трубы из полиэтилена для газопроводов. Технические условия*.
5. ДСТУ Б В.2.7–73–98. *Труби поліетиленові для подачі горючих газів. Технічні умови*.
6. ДСТУ Б В.2.7–151:2008. *Труби поліетиленові для подачі холодної води. Технічні умови*.
7. ДБН В.2.5–41:2009. *Газопроводи з поліетиленових труб. Проектування, будівництво*.
8. ДСТУ EN12814–2:2018 *Випробування зварних з’єднань напівфабрикатів з термопластів. Ч. 2. Випробування на розтяг*.

References

1. Kimelblat, V.I., Volkov, I.V., Glukhov, V.V. (2020) Optimization of resistance butt welding. Accounting for the properties of polymers. *Polimernye Truby*, 2, 28, 32–36 [in Russian].
2. Komarov, G.V. (2015) Composition and properties of polymer materials affecting their weldability. *Polimernye Materialy*, 9, 44–48 [in Russian].
3. GOST 16338–85: *Low-pressure polyethylene. Specifications* [in Russian].
4. GOST R 50838–95: *Polyethylene pipes for gas pipelines. Specifications* [in Russian].
5. DSTU B V. 2.7-73-98: *Polyethylene pipes for the supply of gaseous fuel. Specifications* [in Ukrainian].
6. DSTU B V.2.7-151:2008: *Polyethylene pipes for the supply of cold water. Specifications* [in Ukrainian].
7. DBN V. 2.5–41:2009: *Gas pipelines from polyethylene pipes. Design. Construction* [in Ukrainian].
8. DSTU EN12814–2:2018: *Testing of welded joints of thermoplastics semi-finished products. Pt 2: Tensile test* [in Ukrainian].

THE QUALITY AND OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF WELDED JOINTS OF PIPES FROM DIFFERENT TYPES OF POLYETHYLENE

M.O. Kovalchuk, M.V. Iurzhenko, V.L. Demchenko, M.G. Korab, R.V. Kolisnyk

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

At the beginning of construction of plastic pipelines, so-called «low pressure polyethylene», now known as PE-63 was used. Subsequently, new, more advanced types of raw materials, which are a copolymer of polyethylene with hexane, were developed. Today, almost all pressure pipes are made from PE-80 and PE-100 types of polyethylenes. However, during the repair and reconstruction of plastic pipelines, there is an urgent problem of joining pipes from PE-63, which have been used for a long time, with new pipes made of polyethylenes of PE-80 and PE-100 types. In this work, complex researches of thermophysical properties of technical polyethylenes were carried out and significant differences were revealed which must be taken into account when repairing polymer pipelines. Experimental welding of pipe samples from both the same and different types of polyethylenes was carried out. Morphological and mechanical studies of welded joints of polyethylene pipes of PE-63, PE-80, and PE-100 types, were performed. According to the research results, the influence of their thermophysical properties and parameters of the welding process on the morphological structure and quality of welded joints of different types of polyethylenes was determined. Mathematical modeling of temperature fields during butt welding was carried out. A two-zone heating tool was developed and created for heated tool butt welding of pipes with an outer diameter of up to 110 mm from different pipe polyethylenes of PE-63 and PE-80, PE-100 types. In order to test a prototype of a two-zone heating tool, a series of experiments were carried out, which showed an improvement in the strength characteristics of the obtained welded joints. 8 Ref., 4 Tabl., 10 Fig.

Keywords: *polyethylene raw materials of different types, polyethylene pipes, welded joints*

Надійшла до редакції 13.10.2020

INSIDE WELDS: ADVANCED CHARACTERIZATION OF RESIDUAL STRESSES BY NEUTRON DIFFRACTION

M. Rogante

Rogante Engineering Office, Contrada San Michele n. 61, 62012 Civitanova Marche, Italy. E-mail: main@roganteengineering.it

Welding processes involve often very high temperature gradients, which can induce elevated residual stresses (RS). It is essential, therefore, to know these RS, especially by determining them experimentally e.g. before and after thermal treatments. Neutron beam techniques contribute in general to the solution of important questions and problems related to the methodological restrictions of the analysis systems normally used: complementary to these investigation methods, they provide concrete and fundamental help to optimize the finished industrial product and increase its performance. Neutron diffraction, in particular, is a powerful tool to assess in a non destructive and non invasive way the RS status in materials and components of technological interest. In this paper, the basic theoretical aspects and some examples are reported, regarding the possible determination of RS by using neutron diffraction in different kinds of welded structures. 39 Ref., 7 Fig.

Key words: residual stress, neutron diffraction, welded joints, advanced characterization

1. Introduction

In diverse industrial sectors involving welded joints, the requirements to rise materials and products performances, correspond with market needs and protect more and more public safety and environment, make pressure for continuous innovation and technological adaptations.

During the welding process, steep temperature gradients occur, generating thermal stresses large enough to produce plastic deformation as shape misfits between dissimilar regions of the joint's material. Phase transformations at different times in different locations of the joint can be also induced. From these non-uniformities in temperature, very significant RS – usually, large tensile residual macrostresses (RMS), sometimes of the order of magnitude of yield strength of the materials being joined – can be developed in solidification. Since RS are the stresses occurring in the non-existence of any external load or force (excluding the gravity), they must balance to zero within a component, stresses of one sign being equalized by stresses of opposite sign elsewhere. Surface RS, in particular, can be either tensile or compressive, depending on size and sign of the volume change with transformation. As the welded material solidifies due to the involved temperature gradient, it cools and begins to contract. The fluid in unsolidified regions cannot support stresses and accommodates the contracting surrounding areas. When this material later solidifies, it will try to contract more than the cooler zones around it, leading to RS, as schematized in a general sense in Fig. 1.

RMS in welding also lead to problems of distortion and dimensional control in components [1]. Significant levels of RS are developed, in particular, in the production of thick-section steel welds [2]. Inter-

crystalline and intergranular stress corrosion cracks, e.g., can occur in tanks and pipeline narrow welded zones, and they are due to the RS produced by the construction technique, and to the presence of aggressive elements [3]. It is of primary importance, therefore, to be able to determine experimentally these stresses and their eventual relaxation following heat treatments, assumed that calculation techniques, such as those based on the finite element method (FEM), are not fully reliable in all cases.

Knowledge of the real performing conditions of welded joints and the effect on material behaviour due to RS and other nano(micro)structural factors should play a crucial role also in the planning phase of a welding process and in the debugging of new welding project methods [4].

Various techniques exist to determine RS but few of them offer the capability to assess completely the RS spatial distribution through the thickness. If the stress distribution does not change (constantly along the welded seam), RS must conform the equilibrium relation:

$$\int_A \sigma_{ij} dA = 0 \quad (1)$$

where A is the area over which the stresses will balance to zero. The smallest dimensions of this area define a

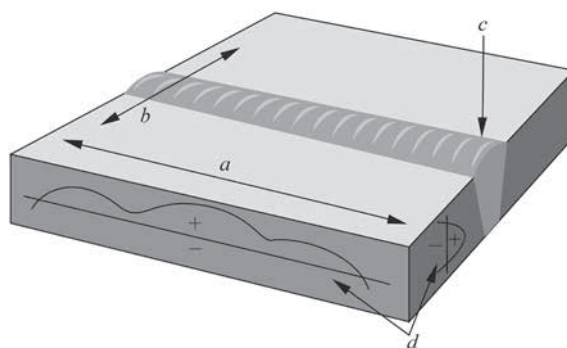


Fig. 1. RS induced by welding: a – longitudinal shrinkage; b – transverse shrinkage; c – weld seam; d – stresses

characteristic length which can be adopted to delineate different types of RS. Since RMS are those that balance to zero when integrated over a cross section of a component, the characteristic length for RMS is on the order of the component's dimensions [1].

Some analytical and experimental methods determining RS in welded joints can provide good knowledge and understanding of the effects of component geometry (e.g., concerning thin welded joints, see [5–7]), welding process, thermal and mechanical properties, phase changes and transformation plasticity on the magnitudes and distributions of these RS. This can help studying the RS role in failure mechanisms, improving the existing techniques for reducing RS in sensitive locations and preparing standardised RS profiles useful to calculate the acceptability of defects in welded structures [8, 9].

Refined numerical modelling techniques are generally adopted, particularly in nuclear applications [10], to reproduce the welding process and to model the RS rise during welding, after post weld heat treatment (PWHT), after proof testing and in service under normal and abnormal operating conditions. Despite numerical modelling is a powerful instrument for RS calculation, also in this field of application a validation with reference to experimental results is essential [11].

Neutron beam techniques (NBT) are gaining more and more interest in industrial research and component diagnostics. Among the principal advantages, we can mention their non-destructive and non-invasive character and the possibility to investigate relative massive samples and components, due to the high penetration power of neutrons (order of centimeters in various engineering materials), as compared to other kinds of radiation (e.g., X-rays). Concerning the maximum sample dimensions for measurement in laboratory conditions, they depend on the neutron instrumentation being employed: one of the largest industrial component already investigated by ND, e.g., is the NiCrMoV wheel of an axial compressor for a heavy-duty gas turbine, having a diameter of 482 mm and thickness of 86 mm [12].

NBT results, eventually combined with simulation models such as FEM, can help knowing when failure is likely to occur and whether use of different materials and welding processes would produce a part or a structure that will last longer. NBT can also contribute in completing the database of structural nano(micro) investigations of welded joints and base materials, developing the nanoscopic safety criterion to forecast and prevent possible fracture processes in joints [13, 14].

Neutron diffraction (ND) has been already adopted to study non-destructively the RS profile through welds and joints and in adjacent zones. Nano(micro)structure, texture [15] and RS analysis can be studied in general by ND, and dedicated diffractometers are continuously developed involving a careful selection and optimization

of the diverse mechanical and optical parts, based on intensive examination of the respective purposes.

2. Neutron Diffraction

Diffraction methods allow measuring both RMS and microstresses in crystalline materials, since each phase will have its own diffraction pattern supplying information on the stresses in that phase. Using ND to evaluate interplanar spacings in diverse directions, the complete strain tensor may be determined [16]. The main characteristics of ND measurements are:

- determination of the elastic strains only and of one component of the elastic strain tensor by each single measurement;
- strains can be converted to stresses using appropriate elastic moduli;
- selective determination only from grains which are suitably oriented with respect to the scattering vector;
- strain values are averaged over those grains.

In the typical scheme of a strain measurement, a collimated neutron beam with a wavelength λ is diffracted by a polycrystalline sample, then it passes through a second collimator and reaches the detector. Both collimators slits define the investigated volume (see Fig. 2), whose cross section, generally, can be as small till $1 \times 1 \text{ mm}^2$ or, in singular cases, smaller.

Neutron diffractometers (strain scanners) have in general two axes and include: a wavelength selection system (e.g., a bent perfect crystal focusing monochromator), a system of slits allowing sample volume to be estimated; an Euler's cradle, enabling different orientations of the sample and connected to an automated travelling table xyz allowing for sample positioning; a neutron multidetector or position sensitive detector, which isolates and localises neutron signals on a line or surface, allowing the full diffraction peak to be directly recorded at a certain angular interval; eventual auxiliary equipment to heat up and/or to stress the investigated sample. The resolution of these scanners derived from the full width at half maximum

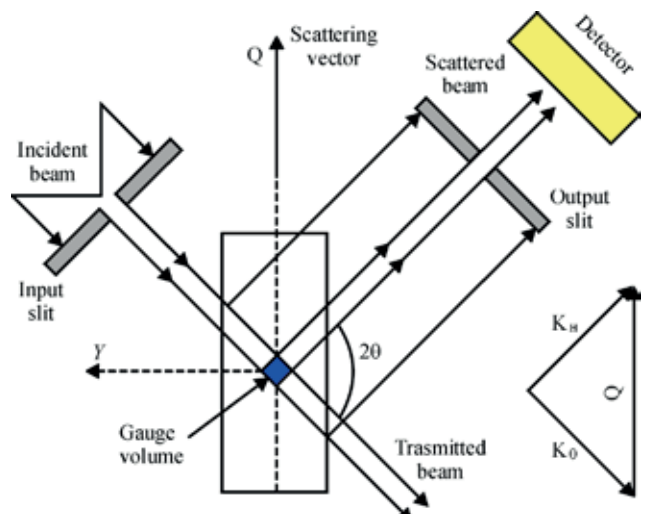


Fig. 2. General scheme of a strain measurement by neutron diffraction.

(FWHM) of the diffraction lines, nevertheless, is adequately high for small sample gauge volumes (when the width of the irradiated part of the sample is about 2 mm or less) but rarely better than $8 \cdot 10^{-3}$ for bulk samples, hence they are adopted to measure the elastic strain effects due to the variations of lattice constants and angular shifts of the diffraction lines. To analyse micro-strain effects resulting in a change of the FWHM and shape of broadened diffraction profiles, a significantly higher resolution is needed which can be achieved just by a 3-axis diffraction set-up recently proposed [17].

Concerning RS calculation, the Bragg law:

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin\theta \quad (2)$$

(where the integer n is the diffraction order, 2θ is the ample take-off angle related to the maximum of the Bragg diffracted intensity peak, hkl are the Miller indices of the investigated lattice planes) allows calculating the lattice spacing d_{hkl} . The corresponding lattice strain is given by the relation:

$$\varepsilon_{hkl} = \frac{d_{hkl} - d_{0,hkl}}{d_{0,hkl}} = \frac{\Delta d_{hkl}}{d_{0,hkl}} = -\cot\theta_{hkl} \Delta\theta_{hkl} \quad (3)$$

where θ_{hkl} is the diffraction angle and $d_{0,hkl}$ is the lattice spacing in a stress-free reference material. As the assessment of RS by ND is always related to the stress-free material state, a correct evaluation of the unstressed lattice parameters (e.g., the interplanar distance) is one of the key tasks, in order to avoid improper errors during the real material strain and stress evaluation. The accessibility of carefully measured zero-strain standards is also essential to confirm the absence of methodical instrumental effects determining the diffraction profile at a chosen scattering angle. The stress-free particular, Some efforts are under way, hence, to develop new methods allowing more and more precise and practical evaluations of the unstressed lattice parameters, hence of the residual strains and stresses [18, 19]. Furthermore, at welding structural steels, phase microstructural transformations undergo in the fusion zone and in the HAZ. Each phase possesses its own lattice spacing and it is not known in advance in what volume the phase transformations have occurred. In ND measurements, hence, the microstructural phase composition, distributed non uniformly in the volume of welded joint metal should be taken into account.

The RS values can be obtained, in general, by knowing the elastic constants of the considered material and using the relations:

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}(1-\nu)\varepsilon_{xx} + \nu(\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz})$$

$$\sigma_{yy} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}(1-\nu)\varepsilon_{yy} + \nu(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz})$$

$$\sigma_{zz} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}(1-\nu)\varepsilon_{zz} + \nu(\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{xx}) \quad (4)$$

where σ_{xx} , σ_{yy} and σ_{zz} are the principal stresses, E is the Young's modulus and ν is the Poisson's ratio in an elastically isotropic model.

Uniaxial or biaxial RS are usually determined by ND as standard, and by rotating the triaxial component (4) RS can be determined with nominal accuracies of about ± 30 MPa (e.g., in steel) and ± 10 MPa (e.g., in aluminium).

In a ND analysis to determine RS, finally, peak shifts not associated to strain changes – i.e., pseudo peak-shifts or pseudo strains – should be avoided or corrected, as well as errors and uncertainties for measurements near surfaces eventually created by beam optics. Many possible systematic effects, indeed, may affect the interpretation of of ND data. For a full treatment of the theoretical bases, see ref. [1, 12, 16, 18–21].

3. Some application in the welding sector

Among the examples of application of ND to determine the RS profile, the following cases can be mentioned [22]:

- double-V welds – see, e.g., the analysis of a 50D C-Mn steel sample having dimensions of $13.5 \times 240 \times 42$ mm (x, y, z), using the Bragg reflection (211), obtaining RS values along the y and z directions determined as function of coordinate z , in good agreement with conventional destructive method (strain gauge rosette);

- T weld – see, e.g., the analysis of a steel part from the offshore industry, in which deformation measurements in three directions were carried out for two series of point, confirming, as expected, the further away from the weld, the smaller the deformations;

- V welds – see, e.g., the analysis of an AISI 303 stainless steel part, with an investigated volume of $2.5 \times 2.5 \times 200$ mm, using the (111) reflection to draw a deformation map.

RS measurements by ND have been performed before and after relaxation heat treatment in a 2.25Cr-1Mo ferritic steel arc welded pipe adopted for heat exchangers, having the following dimensions (mm): outside diameter = 218; internal diameter = 178; total length = 355. The 2.25 Cr1Mo steel is one of the most extensively used and best characterised grade among the chrome-molybdenum steels: it is generally used in steam generators and it is often preferred to austenitic steels, since its reduced weldability problems. Exercise temperature and pressure ranges are respectively 350-540 °C and 100-200 bar. Points of the pipe have been investigated at the following depth (mm): 2.5; 5; 7.5; 10. Fig. 3 shows the considered welded pipe during the analysis.

Fig. 4 represents hoop RS before and after the relaxation heat treatment (5 mm depth).

The gap between the RS values self-explains the resulting deviation trend between heat treated and not heat treated material [23]. An asymmetric progression of RS appeared across the welding: values shifted in high passing from one hand to the other of the weld zone, following the passes direction. Such trend can be ascribed to the asymmetry of the welding process, scheduling in the fibre the latest to cool a greater tensional level in comparison with the adjacent regions. RS after the heat treatment appear nothing along the radial direction, while along the axial one they are lower than before the heat treatment, exhibiting a mono-dimensional status [24].

Two 2.25Cr1Mo butt welded steel plates (A and B) have been investigated by ND before and after welding by shielding metal arc. Strain measurements have been performed in the plate A (before welding) along the three main directions x , y and z , in 11 aligned points inside the material, at the following depths (mm): 6.25, 12.5 and 18.75. Low tensile RS (<100 MPa) resulted in each direction. From strain measurements carried out in two points of Plate B near the calking, low tensile (40 MPa) and very low compressive (-10 MPa) RS have been found, perpendicular and parallel to the calking respectively, uniform through the thickness. Post welding RS resulted to change their trend

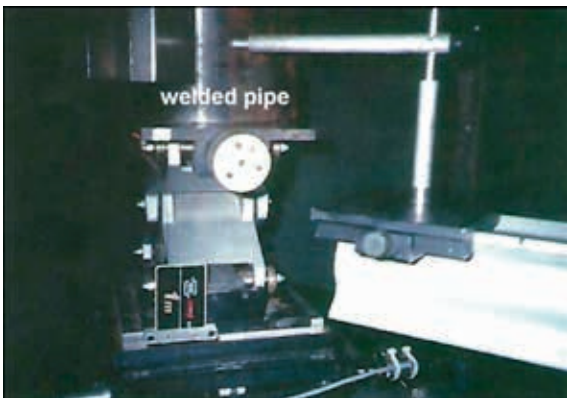


Fig. 3. 2.25Cr1Mo ferritic steel arc welded pipe positioned at the neutron diffractometer during the ND investigation (Image credit: Rogante Engineering Office)

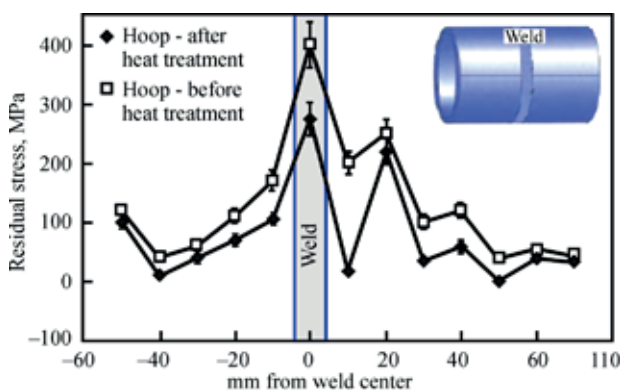


Fig. 4. Hoop RS (5 mm depth) determined by ND in a 2.25Cr1Mo ferritic arc welded pipe before and after relaxation heat treatment

close to the weld bead, and a symmetrical behaviour has been observed in x and y RS components at the depths of 6.25 mm and 18.75 mm. In correspondence of the middle thickness (12.5 mm), the effect of welding on the RS field appeared lower, as compared with other depths. Analogous trends have been found for the z RS component. Results obtained by ND have shown a good agreement for two measured points in comparison with data from ultrasonic testing (UT) averaged through the whole thickness (see Fig. 5) [25].

Fig. 6 is referred to the determination of residual micro-strains by ND in a pipe-flange welded joint made of steel.

A $2 \times 2 \times 5$ mm³ gauge volume was adopted, and the dimensions of the joint were the following (mm): thickness of the pipe wall = 8; diameter of the pipe = 100; thickness of the base = 12 [12].

In the Oil & Gas sector, the consistency of the several welded joints involved in a pipeline and the eventual occurrence of micro-cracks due to the welding processes can favour a yielding of the whole pipeline structure. A correct method to assess RS, in this case, is essential in achieving the desired safety and reliability levels. Some components of the combined total stress may exceed a particular design stress limit for the constitutive material of these pipelines, involving, thus, the risk of an early structural failure.

RS, consequently, represents a peculiar problem in pipelines, where their evaluation is usually performed through typical methods such as ultrasonic measurements, magnetic flux leakage or in-situ direct measurement of absolute levels of biaxial stress in ferromagnetic pipelines, based on magnetic anisotropy and permeability. This evaluation results difficult and incomplete, due to the lack of essential information related to the real state of the involved bulk material, which favours pessimistic estimates and risks of failures.

The correct assessment of RS levels performed by ND allows revealing the hidden cause-effect connections between the current condition of a given pipeline material under study and its potential failure modes under operating conditions. Knowledge of such relationships consents forecasting which types of failure modes

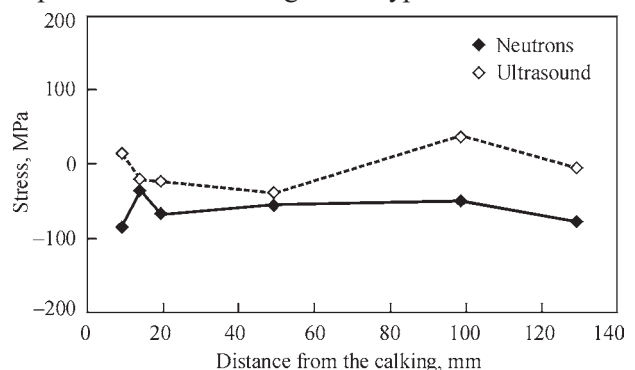


Fig. 5. Through-the-thickness averaged σ_x - σ_y RS components determined in a 2.25Cr1Mo butt welded steel plate by ND, compared with data obtained by UT

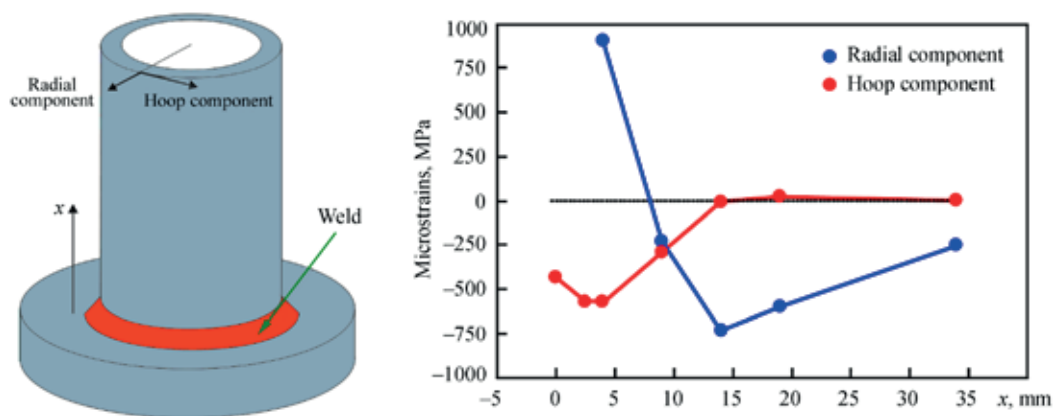


Fig. 6. Determination of residual strains by ND in a pipe-flange welded joint [12]

are likely to occur and the pipeline material resistance to crack propagation under operating conditions.

A feasibility study has been carried out by the Rogante Engineering Office (REO) on the determination of RS in pipelines. A failure predictive model has been proposed, in such work, based on nano(micro) scale level investigations and able to penetrate into the design and development procedure of pipelines. This model involves ND, to identify the cost-effective materials minimizing the production of RS, reducing stress-related failures and improving the pipelines reliability. It includes also the planning of a relational database formed by a collection of catalogued material parameters obtained also from ND for fresh samples which represent, statistically, the population of pipelines on which the forecasting tool is intended to be employed [23, 26]. Concerning the criteria of collecting samples for ND investigation, e.g., suggested dimensions concerning samples from pipe of large external diameter (> 500 mm) are reported in Fig. 7.

By cutting the original pipe to obtain the sample, a change occurs of the RS due to manufacture (not due to the welding process); before cutting the sample, consequently, it is necessary to apply extensometers at both the inner and the external surface of the pipe, to check the signal before and after cutting and record the RS alteration. Since thermal cutting of such samples adds heat-affected zone (HAZ) effects, the most adequate and less contaminating cutting procedure is grinding, also involving a cooling medium, to avoid temperatures ≥ 300 °C. Samples should be very precisely cut, to possess identical geometry with not more than 2 mm error in the sizes: the time necessary for sample alignment at the neutron instrumentation, consequently, would be reduced.

Another example of possible applications of ND concerns the railway sector, i.e. the determination of inner and sub-surface RS arising in the welds of structural connections of the frame of wagons [27].

A further possible application concerns the welding of steels as constitutive materials of moulds, for their repair. The welding processes usually adopted in this case are manual metal arc welding (MMA), tungsten

inert gas welding (TIG), laser beam welding (LBW) and electro-spark deposition (ESD). In planning these processes, it must be taken into account that they generally implicate high temperature gradients from which both undesirable metallurgical modifications in the portions affected by the heat contribution and RS are created. The thermal gradients originating during the shrinkage, in particular, would lead contiguous areas of material to simultaneously assume different lengths, but this is impossible. These zones, to maintain the same length at all times, must therefore be subjected to tensions – compression or traction, depending on the temperature gradient. Critical situations can arise, therefore, with the appearance of fixed deformations and even cracks. The latter can occur in correspondence with both the HAZ and outside that zone. An advanced characterization of such welds by NBT, therefore, can be beneficial since it contemplates the various parameters responsible for performance and quality, including inner and sub-surface RS stresses [28]. Similarly happens for the welding of cast irons [29].

The following other examples can be reported of ND investigation for RS determination: AISI 304 butt welded 28" pipe (two TIG passes, and lastly twenty-six SMA passes distributed on ten layers) [30]; X welded sample (50 D C-Mn steel), a fillet weld of a steel component for offshore applications [31]; Al-2219 welded plate (62×48×6.5 mm) for spacecraft industry [32]; determination of RS longitudinal to electron beam weld in a Ni-based superalloy

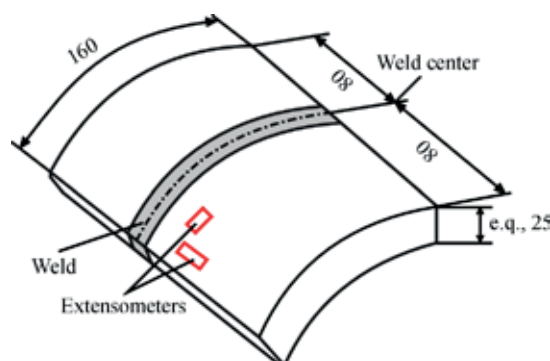


Fig. 7. Suggested dimensions (mm) of the sample for ND investigation. External diameter of the pipe > 500 mm

[33]; electron beam welded Ti-834 plate [34]; an Alloy 600 plate filled with three Alloy 82 weld beads, simulating a repair weld, in the frame of an international measurement round robin on an Alloy 600/82 multi-pass weldment [35]; near surface and inner RS around the weld toe of Weldox 1300 plates with a thickness of 15 mm, joined by robotic gas metal arc welding (GMAW) with Ar + 18% CO₂ as shielding gas [36]; fillet welds in 8 mm 900 MPa steel, with RS mapping perpendicular and parallel to the weld line and through the thickness in the vicinity of weld toe position [37]; bead-on-plate weldment, showing the significance of the weld start and end sites on the residual strain/stress distribution [38]; a rolled joint of a pressure tube made of three axial symmetric parts, modified SUS403 stainless steel as an inner extension, Zr-2.5Nb as the pressure tube and an Inconel 718 outer sleeve, to study the RS relaxation after a short-time aging treatment at 350 °C carried out to simulate thermal aging over the lifetime of an advanced thermal reactor at operating temperature [39].

Further applications concerning RS determination by ND in manual metal arc repair, alumino-thermic and friction-based welds are reported in [20].

Conclusion

A huge amount of work has been performed on the field of welded joints and materials weldability, to solve standard issues present in welding manufacturing [4]. The increase of the investigation in welds is fundamental to develop a correct design and weldment performance, with the main aim to improve strategies for prolonging component and plant lifetime.

The ND method is of great interest to specialists in welding, since it allows determining the distribution of RS over the thickness of different types of structural elements. There are high potentials that the ND method will make it possible to determine the complex RS state, which is formed during multipass welding of thick-walled elements made of steels with structural phase transformations. ND, indeed, has shown to be a valuable tool both to advance new joining processes and to enhance more traditional techniques. This method is also capable to validate FEM adopted for weld process optimization, to study in-situ post-weld heat treatments and to analyse the result of phase transformations during welding.

Since the thermal treatment due to the welding process influences also the nano(micro)structure, moreover producing the growth of some inclusions (e.g., precipitates), another NBT, i.e. small angle neutron scattering (SANS), is indicated to complete the analysis of welded joints: by knowing their chemical nature, it allows obtaining key characteristics of these defects (e.g., number and size distribution).

For industrial applications of NBT, the REO has long been developing dedicated methodological ap-

proaches with appropriate processing and treatment procedures of data from neutron measurements, including those for RS assessment in welding.

Acknowledgements

Dr. O. Makhnenko and Dr. A. Zavdoveev are acknowledged for useful discussions.

References

1. Winholtz, R.A., Rogante, M. (2016) Residual Stresses: Macro- and Microstresses. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier, Oxford, 1–5. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.03038-1>
2. Smith, D.J., Bouchard, P.J., George, D. Measurement and prediction of residual stresses in thick-section steel welds. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 35, 4, 287–305. <https://doi.org/10.1243/0309324001514422>
3. Rogante, M., Battistella, P., Cesari, F. (2006) Hydrogen interaction and stress-corrosion in hydrocarbon storage vessels and pipelines weldings. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31/5, 597–601. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.05.011>
4. Rogante, M., Lebedev, V.T., Kralj, S. et al. (2006) Neutron techniques for welding project methods development in nuclear/traditional industrial application. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2, 4, 419–433. <https://doi.org/10.1163/157361106778554824>
5. Rogante, M., Cesari, F.G., Ferrari, G. (2009) Analytical method for residual stresses determination in thin welded joints. *Ibid*, 5, 3, 269–276. <https://doi.org/10.1163/157361109789016998>
6. Rogante, M., Cesari, F.G., Ferrari, G., Battistella, P. (2006) A simplified solution for the evaluation of residual weld stress. *Welding International*, 20, 9, 713–716. <https://doi.org/10.1533/wint.2006.3635>
7. Cesari, F.G., Ferrari, G., Molinari, V. et al. (2001) A simplified evaluation model of Residual Stresses distribution in weldings. *Proc. 4th Eur. Conf. on welding, joining and cutting «EUROJOIN 4»*, Cavtat, Dubrovnik, Croatia, 24–26/05/01. S. Kralj and Z. Kožuh, Eds., Zagreb, Croatia, ISBN/ISSN 953-96454-0-9, pp. 251–256.
8. Stacey, A., Barthelemy, J.Y., Leggatt, R.H., Ainsworth, R.A. (2000) Incorporation of residual stresses into the SINTAP defect assessment procedure. *Engineering Fracture Mechanics*, 67, 6, 573–611. [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(00\)00075-8](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(00)00075-8)
9. (2019) *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*, Report BS 7910:2019, British Standards Institution. ISBN 9780580520860, p. 535. <https://shop.bsigroup.com/en/ProductDetail/?pid=000000000030369478&ga=2.128792330.701546373.1576593016-1872050251.1562055730>
10. Smith, S.D. (1991) A review of numerical modelling of fusion welding for the prediction of residual stresses and distortion. *TWI Members Report 437/1991*. <https://www.twi-global.com/pdfs/industrial-member-reports/437-december.pdf>
11. Rogante, M. (2011) Neutron techniques for developing engineering welding methods. *Welding International*, 25, 10, 754–761. <https://doi.org/10.1080/09507116.2011.581347>
12. Rogante, M. (2008) Applicazioni Industriali delle Tecniche Neutroniche. *Proc. 1st Italian Workshop for Industry «Industrial Applications of Neutron Techniques»*. Civitanova Marche, Italy, 12–14/06/2008, Rogante Engineering, Ed., pp. 40–120.
13. Lebedev, V.T., Kralj, S., Rogante, M. et al. (2005) Industrial applications of welding project methods: state of the art and development perspectives. *Proc. Int. Conf. «Welding and Joining-2005: Frontiers of Materials Joining»*, 25–28/01/2005, Tel-Aviv, Israel, A. Stern, Ed., Vol. ICRA-2005-ISR-23, pp. 163–177.
14. Lebedev, V.T., Kralj, S., Rogante, M., Rosta, L. (2004) Welded joints project methods for nuclear/traditional industrial applications: the international state-of-the-art. *Proc. 3rd Int. Conf. «Welding in Maritime Engineering»*, Hvar, Croatia, 02–05/06/2004. Z. Kožuh, Ed., Croatian Welding Society, Zagreb, Croatia, pp. 87–98.

15. Rogante, M. (2001) Tessitura e proprietà dei materiali. *Progettare, VNU, Ed.*, Cinisello B., Milano, Vol. 247, pp. 72–76. In Italian.
16. Noyan, I.C., Cohen, J.B. (1987) *Residual Stress: Measurement by Diffraction and Interpretation*, Springer-Verlag, New York, p. 276. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9570-6>
17. Mikula, P., Ryukhtin, V., Rogante, M. (2019) On a possible use of neutron three axix diffractometer for studies of elastic and plastic deformation of polycrystalline materials. *Proc. 57th Conference on Experimental Stress Analysis EAN 2019, Luhačovice, Czech Republic, 3–6 June 2019*. J. Petruška, T. Návrát, L. Houfek, F. Šebek, Eds., Czech Society for Mechanics, pp. 286–290. Book of Extended Abstracts, ISBN 978-80-214-5753-9, pp. 101–102.
18. Rogante, M. (2000) The stress-free reference sample: the problem of the determination of the interplanar distance d_0 . *Physica B: Condensed Matter*, Vols. 276–278, pp. 202–203. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(99\)01281-8](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(99)01281-8)
19. Rogante, M., Mikula, P., Vrána, M. (2014) Assessment of the unstressed lattice parameters for residual stresses determination by neutron diffraction in engineering materials. *Key Engineering Materials*, 592–593, pp. 465–468. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.592-593.465>
20. Hutchings, M.T., Withers, P.J., Holden, T.M., Lorentzen, T. (2005) Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction. 1st Edition, *CRC Press, Boca Raton*, p. 420. <https://doi.org/10.1201/9780203402818>
21. Rogante, M. (1999) Caratterizzazione, mediante scattering neutronico, di materiali e componenti per l'impiantistica nucleare ed industrial. Nuclear Engineering Ph.D., *University of Bologna*, Italy, p. 223. In Italian. <https://opac.bncf.firenze.sbn.it/bncf-prod/resource?uri=TSI9902210&v=l&dcnr=4>
22. Albertini, G., Bruno, G., Calbucci, P. et al. (1998) Non-destructive determination of residual stresses in welded components using neutron diffraction. *Welding International*, 12, 9, 698–703. <http://dx.doi.org/10.1080/09507119809452037>
23. Rogante, M. (2005) Neutron examination techniques applied to pipelines. *Oil & Gas Journal*, Sept. 26, 59–64. <https://www.ogj.com/drilling-production/production-operations/article/17235734/neutron-examination-techniques-applied-to-pipelines>
24. Rogante, M., Rosta, L. (2005) Nanoscale characterisation by SANS and residual stresses determination by neutron diffraction related to materials and components of technological interest. *Proc. of SPIE*, Vol. 5824, pp. 294–305. <https://doi.org/10.1117/12.606090>
25. Albertini, G., Bruno, G., Fiori, F. et al. (1997) Studies of residual stresses, microstructural evolution and texture in steels and alloys by neutron techniques. *Proc. ECSC Workshop «Modelling of steel microstructural evolution during thermomechanical treatment»*. Brussels, Belgium, pp. 185–195; ISBN 92-827-9891-7; CG-NA-17585-EN-C.
26. Genta P., Rogante M. (2009) Failure predictive models for pipelines through Neutron Diffraction-based stress assessment tools. *The Open Petroleum Engineering Journal*, 2, 12–16. <http://dx.doi.org/10.2174/1874834101002010012>
27. Rogante, M. (2017) I vantaggi delle tecniche neutroniche: possibili applicazioni nel settore ferroviario. *Tecnologie Meccaniche, DBInformation Editore, Milano*, 11, pp. 153–158. In Italian.
28. Rogante, M. (2019) *Saldatura degli acciai per stampi. Stampi, Tecniche Nuove, Ed.*, Milano, Vol. 1, pp. 36–41. In Italian.
29. Rogante, M. (2017) Saldatura delle ghise: tecnologia e applicazioni, Fonderia Pressofusione. *Tecniche Nuove, Ed.*, Milano, Vol. 3, pp. 54–58.
30. Albertini, G., Bruno, G., Carsughi, F. et al. (1996) Neutron large and small angle diffraction techniques in industrial and automotive applications. *Proc. 1st Int. Conf. on Control and Diagnostics in Automotive Applications, Genova, 03–04/10/1996*. SGE-Servizi Grafici Editoriali, Ed., Padova, ISBN 88-8281-16-1, pp. 155–166. <https://epubs.stfc.ac.uk/work/7544>
31. Albertini, G., Bruno, G., Fiori, F. et al. (1996) Non-destructive determination of residual stresses in materials and weldings by neutron diffraction technique. *Proc. 1st Int. Conf. «MATEH 1996 – Development, Testing and Application of Materials»*. Opatija, Croatia, 02–05/10/1996, Croatian Society for Materials and Tribology, Ed., Zagreb, pp. 187–194. <https://epubs.stfc.ac.uk/work/7540>
32. Albertini, G., Bruno, G., Carradò, A. et al. (1999) Determination of residual stresses in materials and industrial components by neutron diffraction. *Measurement Science and Technology*, 10, 3, 56–73. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/10/3/006>
33. Withers, P.J., Bhadeshia, H.K.D.H. (2001) Residual stress Part 2 – Nature and origins. *Materials Science and Technology*, 17, 366–375. <https://doi.org/10.1179/026708301101510087>
34. Conlon, K.T., Dye, D., Roggie, R.B., Root, H. (2003) Application of neutron diffraction in materials science and engineering. *Neutron News*, 14, 2, 14–19. <https://doi.org/10.1080/10448630308218713>
35. Akrivos, V., Wimpory, R.C., Hofmann, M. et al. (2020) Neutron diffraction measurements of weld residual stresses in three-pass slot weld (Alloy 600/82) and assessment of the measurement uncertainty. *Journal of Applied Crystallography*, 53, 1181–1194. <https://doi.org/10.1107/S1600576720009140>
36. Harati, E., Karlsson, L., Svensson, L.E. et al. (2017) Neutron Diffraction Evaluation of Near Surface Residual Stresses at Welds in 1300 MPa Yield Strength Steel. *Materials*, 10, 6, 593. <https://doi.org/10.3390/ma10060593>
37. Mraz, L., Karlsson, L., Vrána M., Mikula, P. (2014) Residual Stress Distributions at High Strength Steel Welds Prepared by Low Transformation Temperature (LTT) and Conventional Welding Consumables. *Material Science Forum*, 777, 40–45. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.777.40>
38. Paradowska, A.M., Price, J.W.H., Finlayson, T.R. et al. (2010) Comparison of Neutron Diffraction Measurements of Residual Stress of Steel Butt Welds With Current Fitness-for-Purpose Assessments. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 132, 051503. <https://doi.org/10.1115/1.4000344>
39. Hayashi, M., Root, J.H., Rogge, R.B., Xu, P. (2018) Evaluation of Residual Stress Relaxation in a Rolled Joint by Neutron Diffraction. *Quantum Beam Science*, 2, 4, 21. <https://doi.org/10.3390/qubs2040021>

МЕТАЛ ШВІВ: УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ОЦІНКИ ОСТАТОЧНИХ НАПРУЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙТРОННОЇ ДИФРАКЦІЇ

M. Rogante

Rogante Engineering Office, Contrada San Michele n. 61, 62012 Civitanova Marche, Italy. E-mail: main@roganteengineering.it

Процеси зварювання часто включають дуже високі градієнти температури, які можуть спричинити підвищені залишкові напруження (ЗН). Тому важливо оцінювати величину ЗН, особливо шляхом їх експериментального визначення, наприклад до і після теплових обробок. Методи нейтронного пучка в цілому сприяють вирішенню важливих питань та проблем, пов'язаних із методологічними обмеженнями систем аналізу, які зазвичай використовуються. Вони забезпечують конкретну та фундаментальну допомогу для оптимізації промислового процесу та підвищення його продуктивності. Зокрема, нейтронна дифракція є потужним інструментом для неруйнівної та неінвазивної оцінки ЗН у матеріалах та компонентах, що представляють технологічний інтерес. У цій роботі наводяться основні теоретичні аспекти та деякі приклади щодо можливого визначення ЗН за допомогою нейтронної дифракції в різних видах зварних конструкцій. Бібліогр. 39, рис. 7.

Ключові слова: залишкові напруження, дифракція нейтронів, зварні з'єднання, передові методи досліджень

Надійшла до редакції 05.11.2020

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВІДНОВЛЕННЯ УЩІЛЬНЮЮЧОГО ЕЛЕМЕНТУ СЕКТОРУ СОПЛОВИХ ЛОПАТОК З ВАЖКОЗВАРЮВАНОГО НІКЕЛЕВОГО ЖАРОМІЦНОГО СПЛАВУ ТИПУ ЖС6 МІКРОПЛАЗМОВИМ ПОРОШКОВИМ НАПЛАВЛЕННЯМ

К.А. Ющенко, О.В. Яровицин, О.О. Наконечний, І.Р. Волосатов, О.О. Фомакін, Г.Д. Хрущов

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

Для забезпечення технологічної міцності при відновленні бокового ущільнюючого елементу сектору соплових лопаток зі сплаву ЖС6К з необхідним об'ємом наплавлення $7...13 \text{ см}^3$ обрано менш жароміцний матеріал з достатньою деформаційною здатністю. При мікроплазмовому порошковому наплавленні він характеризується наступним рівнем показників короткочасної міцності відносно наплавленого металу ЖС6К: при $20^\circ\text{C} - 0,7...0,8$; при $1000^\circ\text{C} - 0,5...0,55$. Порівняно з відомими технологічними рішеннями на основі присадних матеріалів типу IN625 це дозволило підвищити рівень жароміцності наплавленого металу при 1000°C практично у 2 рази при ефективному обмеженні високотемпературної пластичності $\varepsilon_{1000^\circ\text{C}} \leq 1,0...1,5 \%$. На основі наведених матеріалознавчих досліджень в ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблена нова ремонтна технологія мікроплазмового порошкового наплавлення, що успішно пройшла дослідно-практичну перевірку на ДП «Луцький ремонтний завод «Мотор». Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: нікелевий жароміцний сплав ЖС6К, мікроплазмове порошкове наплавлення об'ємом $7...13 \text{ см}^3$, деформаційна здатність, технологічна міцність, показники короткочасної міцності, ремонтна технологія

Відомо [1], що при напрацюванні більше 700 год. на одному з сучасних газотурбінних двухконтурних авіаційних двигунів з форсажною камерою згоряння значно зростає відносна кількість пошкоджених деталей. Типовим представником таких деталей є сектор соплових лопаток (ССЛ) турбіни високого тиску (ТВТ) з нікелевого жароміцного сплаву (НЖС) ЖС6К, (рис. 1, а та табл. 1), що належить до групи статорних деталей. Одними з основних видів експлуатаційних пошкоджень даного ССЛ, що роблять неможливим застосування існуючих технологій відновлення з використанням способів на основі зв'язування плавленням та паяння, є тріщини термічної втоми (рис. 1, б) та втрата або пошкодження конструктивно заданої форми значної кількості секцій бокового ущільнюючого елементу внаслідок корозійно-ерозійних пошкоджень при високих температурах (рис. 1, в). Розробка таких дефектів вимагає практично повного видалення матеріалу бокового ущільнюючого елементу ССЛ ТВТ (рис. 1, г).

Конструктивно-технологічний аналіз типової ремонтної розробки бокового ущільнюючого елементу ССЛ ТВТ (рис. 2, а, б) показав необхідність на-

плавлення значних об'ємів НЖС $v_n = 7...13 \text{ см}^3$ в залежності від кількості його пошкоджених секцій. Використання у якості наплавленого металу для бокового ущільнюючого елементу сплавів типу IN625 без дисперсного зміцнення γ' -фазою (див. табл. 1) для даного ССЛ визнано недоцільним через небезпеку втрати просторової стійкості відновленого конструктивного елементу внаслідок низької жароміцності і підвищеної пластичності такого матеріалу при експлуатації за $T \geq 1000^\circ\text{C}$. Слід відзначити, що попередніх прикладів застосування ремонтних технологій деталей авіаційних ГТД з подібним збільшеним об'ємом наплавлення ЖНС з високим вмістом зміцнюючої γ' -фази авторам даної роботи невідомо. Аналіз опублікованих робіт на пострадянському просторі показав, що для відновлення експлуатаційних пошкоджень робочих лопаток з ЖНС типу ЖС32 практично використовувались технології мікроплазмового порошкового (МПН) та лазерно-порошкового наплавлення з v_n до 2 см^3 (наприклад, [2–5]).

Першочерговою задачею при розробці технології відновлення бокового ущільнюючого елементу

Таблиця 1. Вміст основних легуючих елементів у нікелевих сплавах ЖС6К та IN625, мас. %

Сплав	C	Cr	Ni	Co	Al	Ti	Mo	W	Nb	Ta	Re	Fe	B
ЖС6К	0,13...0,2	9,5...12,0	Основа	4,0...5,5	5,0...6,0	2,5...3,2	3,5...4,8	4,5...5,5	1,4...1,8	<2,0	<0,4	<0,4	<0,02
IN625	0,10 max	20,0...23,0	-	1,0 max	0,4 max	0,4 max	8,0...10,0	—	3,15...4,15	—	—	5,0 max	—

Ющенко К.А. – <https://orcid.org/0000-0002-6276-7843>, Яровицин О.В. – <https://orcid.org/0000-0001-9922-3877>, Наконечний О.О. – <https://orcid.org/0000-0002-6098-0413>, Волосатов І.Р. – <https://orcid.org/0000-0003-2593-9869>, Фомакін О.О. – <https://orcid.org/0000-0001-8903-3340>, Хрущов Г.Д. – <https://orcid.org/0000-0002-4045-3587>
 © К.А. Ющенко, О.В. Яровицин, О.О. Наконечний, І.Р. Волосатов, О.О. Фомакін, Г.Д. Хрущов, 2020

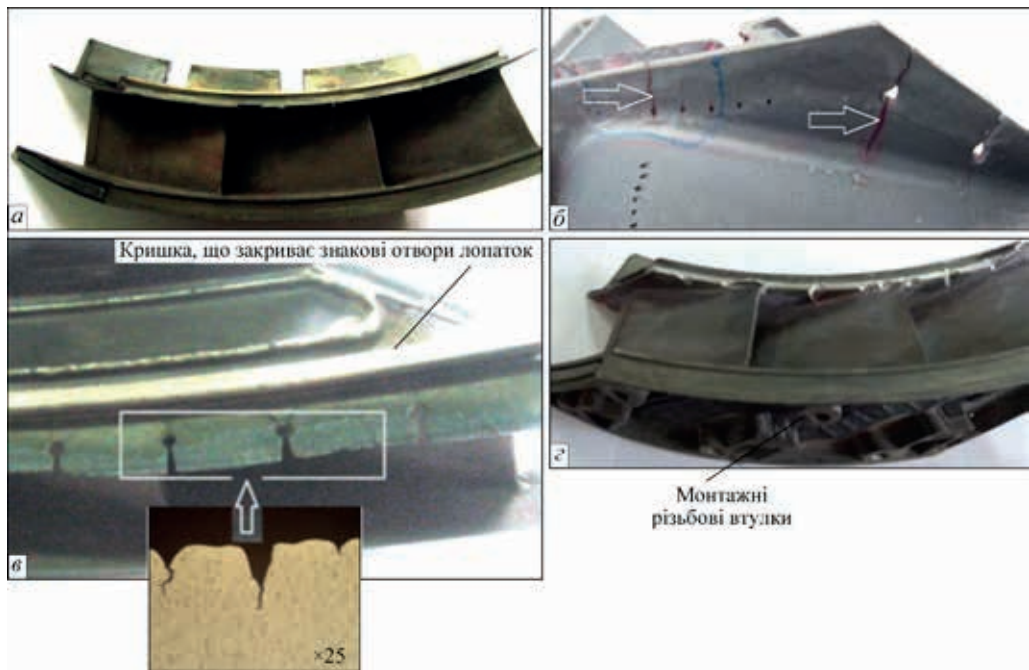


Рис. 1. Зовнішній вигляд ССЛ ТВТ зі сплаву ЖС6К (а), його експлуатаційних пошкоджень (б, в) та розробки дефектів на боковому ущільнюючому елементі (з)

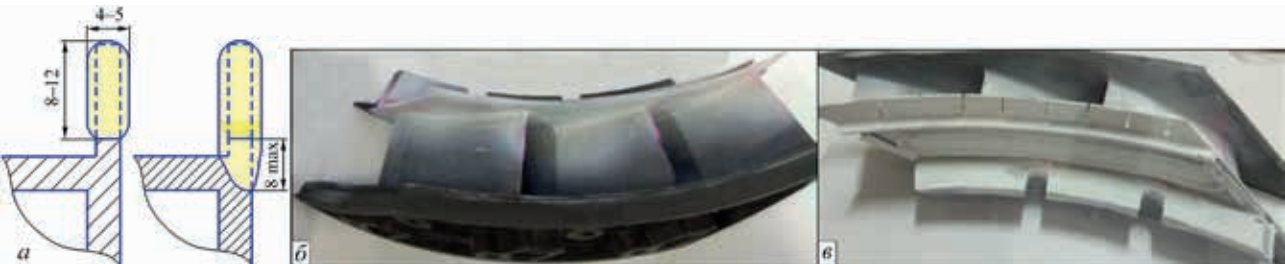


Рис. 2. Характеристики необхідного поперечного перерізу наплавленого валика при відновленні бокового ущільнюючого елемента ССЛ ТВТ зі сплаву ЖС6К (а) та зовнішній вигляд його відновленої поверхні багатошаровим МПН після капілярної дефектоскопії (б, в)

зазначеного ССЛ ТВТ була оцінка схильності до утворення тріщин для типової структури наплавленого способом МПН сплаву ЖС6К (рис. 3) при послідовному збільшенні його об'єму у напрямку відповідного зростання висоти H та довжини L наплавленого валика з метою забезпечення технологічної міцності такого зварного з'єднання (див. рис. 2, б) у стані безпосередньо після наплавлення. Аналогічно попередній роботі [6], присвяченій оцінці схильності до утворення тріщин при МПН сплаву ЖС32, відповідні оцінки з позицій визначення основних показників загальних тепловкладень у виріб проведено і для наплавленого металу ЖС6К (рис. 4). Встановлено, що в умовах типових задач МПН з відновлення бандажних полиць робочих лопаток ($L \approx 35 \dots 40$ мм; $H \leq 5$ мм; $v_n \leq 2,0$ см³) у зварному з'єднанні «основний-наплавлений метал» сплаву типу ЖС6 тріщини не утворюються. Але вже при збільшенні довжини валика понад $L = 100$ мм в процесі багатошарового наплавлення висотою більше 5...7 мм ($v_n > 4 \dots 6$ см³) в наплавленому металі ЖС6К у більшості випадків починає проявлятися схильність до утворення тріщин

повторного нагріву. Їх поява обумовлена сукупною дією двох факторів: формуванням значних залишкових поздовжніх напружень [7] та встановленою низькою деформаційною здатністю сформованого наплавленого металу ЖС6К (табл. 2). Таким чином, для умов відновлення бокового ущільнюючого елемента ССЛ ТВТ багатошаровим МПН встановлено неможливість забезпечення технологічної міцності при використанні у якості наплавленого металу сплаву ЖС6К через його низьку деформаційну здатність в процесі наплавлення.

Періодичне підвищення деформаційної здатності наплавленого металу ЖС6К (до рівня $\epsilon_{1000^\circ\text{C}} = 5,8 \dots 7,2$ % [7]) шляхом проведення вакуумної термічної обробки при температурі го-

Таблиця 2. Результати випробувань наплавленого металу ЖС6К на статичний розтяг у стані безпосередньо після наплавлення (без термічної обробки)

Номер, тип	$T_{\text{випр}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$\epsilon, \%$
1	20	1004	1004	0,5
2	900	639	641	0,8
3	1000	377	386,5	0,65
4	1100	—	256	0,1

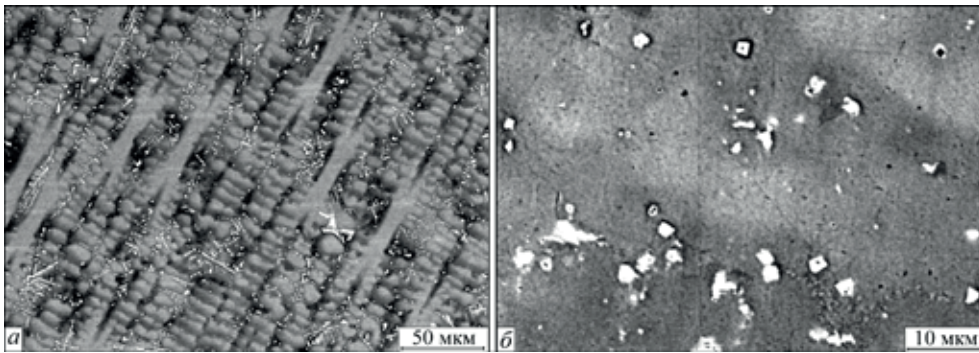


Рис. 3. Особливості мікроструктури наплавленого металу ЖС6К у стані безпосередньо після наплавлення, растрова електро-нна мікроскопія

могенізації на даному ССЛ ТВТ не могло бути реалізовано через конструктивно-технологічні обмеження за температурою термічної обробки. Вони обумовлені присутністю на ньому паяних з'єднань (кришка знакового отвору, монтажні різьбові втулки) за участю припою Впр11-40Н. Температура формування такого паяного з'єднання значно менше температури гомогенізації сплаву ЖС6К [8].

З огляду на неможливість забезпечення технологічної міцності при відновленні бокового ущільнюючого елементу ССЛ ТВТ при використанні у якості наплавленого металу сплаву ЖС6К прийнято рішення застосувати наплавлений метал меншої жароміцності. Випробування на статичний розтяг зразків-свідків такого наплавленого металу (рис. 5), проведені на сервогидравлічній машині MTS-810 за методикою роботи [9], показали, що досягається наступний рівень показників короточасної міцності відносно наплавленого металу ЖС6К: при 20 °С – 0,7...0,8 при 1000 °С – 0,5...0,55.

Порівняно з існуючими/відомими технологічними рішеннями, що передбачають використання присадних матеріалів типу IN625 з жароміцністю $\sigma_{B,1000\text{ }^{\circ}\text{C}} \approx 110 \text{ МПа}$, новий технологічний підхід, крім стабільного забезпечення технологічної міцності багатшарового МПН об'ємом $V_n = 7...13 \text{ см}^3$, дозволив підвищити рівень жароміцності наплавленого металу при 1000 °С практично у 2 рази та додатково ефективно обмежив його високотемпературну пластичність $\epsilon_{1000\text{ }^{\circ}\text{C}} \leq 1,0...1,5 \text{ \%}$. З огляду на відомий рівень експлуатаційних навантажень даного ССЛ ТВТ ($\approx 20 \text{ МПа}$ [1]), оцінені показники жароміцності наплавленого металу дозволяють прогнозувати для його відновленого бокового ущільнюючого елементу наявність необхідного комплексу функціональних властивостей, зокрема, просторової стійкості, необхідний для забезпечення надійної роботи на сучасних авіаційних ГТД типу РД-33.

За матеріалами проведених досліджень для Луцького ремонтного заводу «Мотор» за розро-

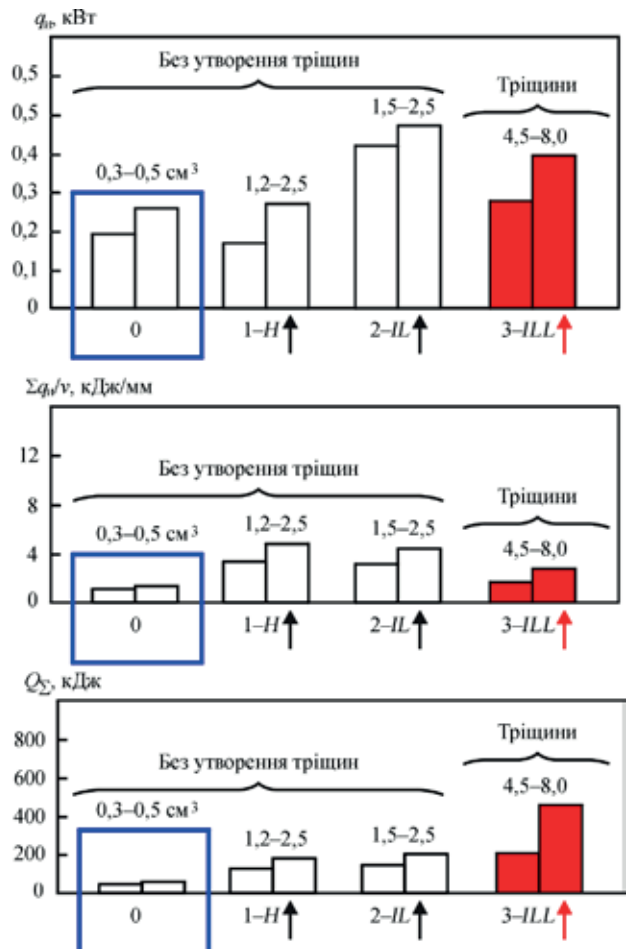


Рис. 4. Аналіз закономірностей забезпечення технологічної міцності в наплавленому металі сплаву ЖС6К в залежності від ряду показників кількості тепловкладень у виріб ($q_{\text{н}}$ – ефективна потужність мікроплазмової дуги; $\Sigma q_{\text{н}}/V$ – сума погонних енергій усіх шарів наплавлення; Q_{Σ} – загальні тепловкладення у виріб) та його об'єму. Технологічний варіант «0» відповідає описанам в тексті умовам МПН бандажних полиць робочих лопаток ТВТ. H – 10...15 мм; I – 15...30 А; L – 50 мм; LL – 100...200 мм

бленою в ІЕЗ ім. Є.О. Патона технологією виконано ремонт дослідної партії зазначених ССЛ ТВТ зі сплаву ЖС6К (див. рис. 2, в) та розроблено відповідну технологічну інструкцію.

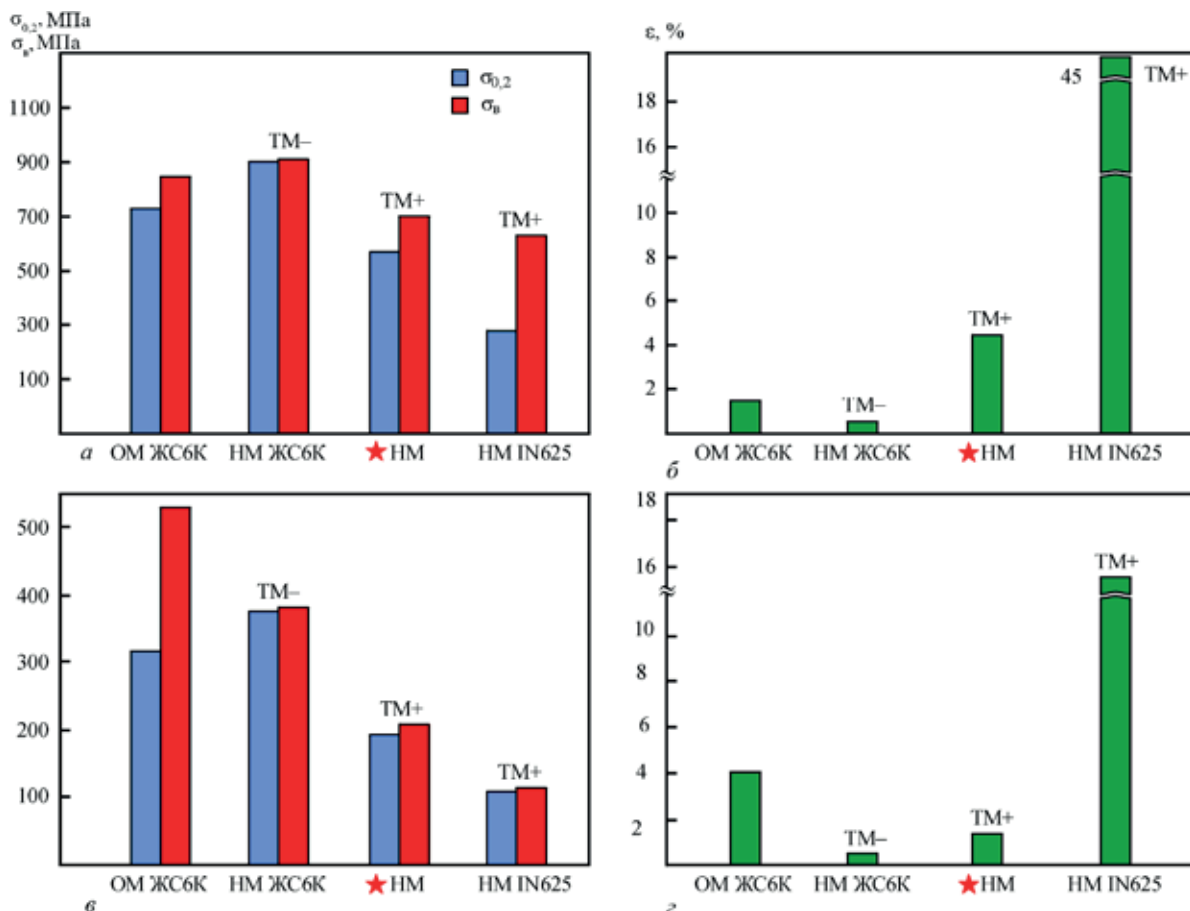


Рис. 5. Аналіз короткочасних механічних властивостей різних варіантів наплавляного металу та закономірностей забезпечення його технологічної міцності при відновленні бокового ущільнюючого елемента ССЛ ТВТ (ОМ – основний метал; НМ наплавляний метал; ★НМ – обрана система наплавляного металу; TM+ і TM– — технологічна міцність відповідно забезпечується або не забезпечується). Короткочасні механічні властивості основного металу ЖС6К наведено за даними роботи [10]: а, б – 20 °С; в, г – 1000; (г – $\times 25$)

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

Список літератури

- Карпинос Б.С., Коровин А.В., Лобунько А.П., Ведищева М.Ю. (2014) Эксплуатационные повреждения турбореактивных двухконтурных двигателей с форсажной камерой сгорания. *Вестник двигателестроения*, 1, 18–24.
- Ющенко К.А., Яровицын А.В. (2012) Совершенствование технологии восстановления верхней бандажной полки рабочих лопаток авиационного ГТД. *Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд та машин»*. Збірник наукових статей. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона, сс. 506–509.
- Жеманюк П.Д., Петрик І.А., Чигилейчик С.Л. (2015) Опыт внедрения восстановительной микроплазменной порошковой наплавки при ремонте лопаток турбин высокого давления в условиях серийного производства. *Автоматическая сварка*, 8, 43–46.
- Ющенко К.А., Яровицын А.В., Фомакин А.А. и др. (2016) Разработка технологии микроплазменной порошковой наплавки сплава ЖС32 для восстановления газоохлаждаемых рабочих лопаток авиационной турбины высокого давления. *Цільова комплексна програма НАН України «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій споруд та машин»*. Збірник наукових статей. Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, сс. 696–701.
- Неруш С.В., Ермолаев А.С., Роголев А.М., Василенко С.А. (2016) Исследование технологии восстановления торца пера рабочей лопатки первой ступени турбины высокого давления (ТВД) из сплава ЖС32-ВИ методом лазерно-порошковой наплавки с применением металлического порошка сплава ЖС32-ВИ, изготовленного методом атомиза-

- ции. *Электронный научный журнал «Труды ВИАМ»*, 8, 44, 24–34. DOI: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-8-4-4>
- Ющенко К.А., Яровицын А.В., Червяков Н.О. (2017) Влияние энергетических показателей режимов на склонность к образованию трещин при микроплазменной порошковой наплавке никелевого сплава ЖС32. *Автоматическая сварка*, 2, 3–7. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.02.01>
- Ющенко К. А., Звягинцева Г. В., Яровицын О. В. та ін. (2019) Нові підходи в оцінці механічних характеристик та мікроструктури відновлених деталей ГТД із нікелевих жаропрочних сплавів. *Металофізика та новітні технології*, 10, 41, 1345–1364. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1345>
- Ермолаев Г.В., Квасницький В.В., Квасницький В.Ф. та ін. (2015) *Паяння матеріалів*. Підручник. Хорунгов В.Ф. і Квасницький В.Ф. (редактори). Миколаїв. НУК.
- Ющенко К.А., Яровицын А.В., Червяков Н.О. и др. (2019) Оценка кратковременных механических свойств соединений трудносвариваемых никелевых жаропрочных сплавов типа ЖС6. *Автоматическая сварка*, 7, 38–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.07.07>
- Кишкин С.Т. (2006) *Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов*. Избранные труды. Москва, Наука.

References

- Karpinos, B.S., Korovin, A.V., Lobunko, A.P., Vedishcheva, M.Yu. (2014) Operational damage of turboreactive bypass engines with afterburner. *Vestnik Dvigatelistroyeniya*, 2, 18–24 [in Russian].
- Yushchenko, K.A., Yarovitsyn, A.V. (2012) Improvement of technology for restoration of upper shroud of blades of aircraft GTE. In: *Problems of residual life and safe operation of structures, constructions and machines, NASU*. Kyiv, PWI, 506–509 [in Russian].
- Zhemanyuk, P.D., Petrik, I.A., Chigilejchik, S.L. (2015) Experience of introduction of the technology of reconditioning microplasma powder surfacing at repair of high-pressure turbine blades in batch production *The Paton Welding J.*, 8, 39–42.

4. Yushchenko, K.A., Yarovitsyn, A.V., Fomakin, A.A. et al. (2016) Development of technology of microplasma surfacing of ZhS32 alloy for reconditioning of gas-cooled blades of aircraft high-pressure turbine. In: *Problems of residual life and safe operation of structures, constructions and machines, NASU*. Kyiv, PWI, 696-701 [in Russian].
5. Nerush, S.V., Ermolaev, A.S., Rogalev, A.M., Vasilenko, S.A. (2016) Investigation of the technology of restoration of blade airfoil edge of first stage high-pressure turbine from ZhS32-VI alloy by laser-powder surfacing method using the metal powder of ZhS32-VI alloy manufactured with atomization method. *Electron. J.: Trudy VIAM*, **8**, 44, 24-34. DOI: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-8-4-4>
6. Yushchenko, K.A., Yarovitsyn, A.V., Chervyakov, N.O. (2017) Effect of energy parameters of microplasma powder surfacing modes on susceptibility of nickel alloy ZhS32 to crack formation. *The Paton Welding J.*, **2**, 2-6. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.02.01>
7. Yushchenko, K.A., Zvyagintseva, G.V., Yarovitsyn, A.V. et al. (2019) New approaches in evaluation of mechanical characteristics and microstructure of repaired GTE parts from nickel high-temperature alloys. *Metallfizyka ta Novitni Tekhnologii*, **10**, 41, 1345-1364 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.41.10.1345>.
8. Ermolaev, G.V., Kvasnytskyi, V.V., Kvasnytskyi, V.F. (2015) *Soldering of materials: Manual*. Ed. by V.F. Khorunov et al. Mykolaiv, NUK [in Ukrainian].
9. Yushchenko, K.A., Yarovitsyn, A.V., Chervyakov, N.O. et al. (2019) Evaluation of short-term mechanical properties of a joint of difficult-to-weld nickel high-temperature alloys of ZhS6 type. *The Paton Welding J.*, **7**, 29-35. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.07.07>.
10. Kishkin, S.T. (2006) *Development, investigation and application of high-temperature alloys*. In: Selected works. Moscow, Nauka [in Russian].

DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF RECONDITIONING THE SEALING ELEMENT OF NOZZLE BLADES FROM DIFFICULT-TO-WELD HIGH-TEMPERATURE NICKEL ALLOY OF ZHS6 TYPE BY MICROPLASMA POWDER SURFACING

K.A. Yushchenko, O.V. Yarovitsin, O.O. Nakonechniy, I.R. Volosatov, O.O. Fomakin, G.D. Khrushchov

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 ensure the technological strength at reconditioning of the side sealing element of a sector of nozzle blades from ZhS6K alloy with the required deposition volume of 7...13 cm³, a less heat-resistant material with sufficient deformability was selected. At microplasma powder surfacing it is characterized by the following level of values of short-time strength relative to the deposited metal ZhS6K: at 20 °C – 0.7...0.8; at 1000 °C – 0.5...0.55. Compared to the known technological solutions based on filler materials of IN625 type, it allowed increasing the level of deposited metal high-temperature strength by practically 2 times at 1000 °C at effective limitation of high-temperature ductility $\epsilon_{1000}^{\circ\text{C}} \leq 1.0...1.5\%$. Proceeding from the described materials science studies, PWI developed a new repair technology of microplasma powder surfacing that has successfully passed experimental-practical trials at SE «Lutsk Repair Plant «Motor». 10 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Keywords: high-temperature nickel alloy ZhS6K, microplasma powder spraying of 7...13 cm³ volume, deformability, technological strength, short-time strength values, repair technology

Надійшла до редакції 07.10.2020

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

LET'S JOIN THE WORLD!

13. – 17. September, 2021

REGISTER NOW!

www.schweissen-schneiden.com

DVS GERMAN WELDING SOCIETY

MESSE ESSEN

SCHWEISSEN & SCHNEIDEN No. 1

АВТОМАТИЧНЕ ДУГОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ РОБОЧИХ ШЛЯХІВ ПІДЙОМНО-ОПУСКНИХ ВОРІТ КАНІВСЬКОГО СУДНОПЛАВНОГО ШЛЮЗУ

В.І. Галинич, В.М. Тагановський, Г.В. Кузьменко

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

Наведено результати розробки та впровадження технології автоматичного дугового наплавлення вертикальних закладних частин судноплавних шлюзів без їх демонтажу на прикладі ремонту рейок робочих шляхів підйомно-опускних воріт Канівського судноплавного шлюзу. Бібліогр. 2, рис. 8.

Ключові слова: судноплавні шлюзи, підйомно-опускні ворота, рейки робочих шляхів, автоматичне дугове наплавлення

Географічне положення України сприяє розвитку її транспортного потенціалу, інтеграції в європейську транспортну систему, насамперед як країни, яка займає особливе місце при забезпеченні транзитних перевезень вантажів найбільш раціональним варіантом реалізації транспортних потоків Захід–Схід.

Через територію України проходять чотири з дев'яти європейських транспортних коридорів. Найважливішим для внутрішнього водного транспорту є коридор № 9, що пов'язує порти Білого та Балтійського морів з портами Чорноморсько-Середземноморського басейну.

Внутрішні судноплавні річкові шляхи України проходять, в основному, акваторіями Дніпра та Дунаю і, відповідно до Європейської угоди про найважливіші внутрішні водні шляхи міжнародного значення, віднесені до судноплавних річкових трас вищої категорії Е [1].

На Дніпровському каскаді діють шість судноплавних шлюзів: Київський, Канівський, Кременчуцький, Дніпродзержинський, ЗРГС (Запорізький район гідротехнічних споруд) та Каховський.

Судноплавний шлюз – гідротехнічна споруда на судноплавних і водних шляхах для забезпечення переходу суден з одного водного басейну (б'єфа) на другий з різними рівнями води в них. Він з двох сторін обмежений затворами, між якими розташовується суміжна камера, що дозволяє змінювати рівень води в її межах. Переведення суден за допомогою судноплавного шлюзу здійснюється послідовним переведенням у суміжну камеру після вирівнювання в них рівня води. Використання шлюзів головним чином спрямоване на те, щоб зробити водні простори з різними рівнями води в них придатнішими для судноплавства.

Кожен шлюз має три головні елементи:

- герметичну камеру, що з'єднує верхню і нижню головні частини каналу і має об'єм, достатній
- Кузьменко Г.В. – <https://orcid.org/0000-0001-6764-5389>
© В.І. Галинич, В.М. Тагановський, Г.В. Кузьменко, 2020

для включення одного чи кількох суден. Положення камери фіксоване, але рівень води в ній може змінюватися;

- ворота – металеві щити, розташовані на обох кінцях камери, що служать для впускання і випускання судна з камери перед початком шлюзування і герметизують камеру під час шлюзування.

- водопровідний пристрій, призначений для наповнення або спустошення камери. Як правило, в якості такого пристрою використовується плоский щитовий затвор. У великих шлюзах можуть використовуватися перекачувальні насоси.

Канівський судноплавний шлюз (рис. 1) розташований на 727-у річковому кілометрі р. Дніпро. Проект шлюзу розроблений Українським відділом Інституту ім. С.Я. Жука за участю СКБ «Запоріжгідропроєкт», СКБ «Ленгідропроєкт» та інституту «Укргідрорічтранс». Будівництво шлюзу великими трестами та об'єднаннями: «Дніпробуд», «Гідромонтаж», «Гідроспецбуд», «Гідроелектромонтаж», «Спецгідроенергомонтаж».

Шлюз було введено в експлуатацію 22.07.1972 р. шлюзуванням теплоходу «Т.Г. Шевченко». Довжина судноплавної камери – 270 м, ширина – 18 м, розрахунковий напір 12,75 м. Верхня голова шлюзу забезпечена аварійними плоскими та робочими підйомно-опускними воротами. На нижній голові встановлені робочі двостулкові ворота, ре-



Рис. 1. Канівський судноплавний шлюз

монтні ворота і затвори. Все технологічне обладнання робочих воріт і затворів шлюзу приводиться в дію гідравлічними приводами з об'ємним регулюванням.

З початку введення в експлуатацію шлюзом проведено 200470 шлюзувань, при цьому прошлюзовано 477545 суден, в т.ч. середньомісячна кількість прошлюзованих суден за останній рік складає 97 одиниць, проектна – 34 (дані станом на 2017 р.) [2].

У листопаді 2017 р. Канівський судноплавний шлюз було закрито на міжнавігаційний ремонт для проведення унікальних робіт по заміні робочих підйомно-опускних воріт шлюзу. Нові ворота виготовлені спеціалізованим заводом «Укргідромех» (м. Нова Каховка), а демонтажно-монтажні роботи повинна була виконати спеціалізована підприємна організація «Київгідромонтаж». Завершити роботи планувалося до травня 2018 р., але за браком фінансування вони були перенесені на міжнавігаційний період 2019–2020 рр.

Робочі підйомно-опускні ворота (рис. 2) сприймають на себе тиск води та передають його через



Рис. 2. Підйомно-опускні ворота Канівського судноплавного шлюзу



Рис. 3. Опорний візок підйомно-опускних воріт Канівського судноплавного шлюзу

колеса опорних візків на закладні частини робочих шляхів (рис. 3), виконані у вигляді литих рейок зі сталі 45Л за ГОСТ 977, що забетоновані при їх монтажі у стінки направляючих пазів підйомно-опускних воріт (рис. 4). Навантаження на рейки від кожного колеса воріт у робочій зоні складає 980 кН.

В результаті багаторічної експлуатації на поверхнях кочення рейок робочих шляхів накопились пошкодження у вигляді нерівномірного механічного зносу та корозійних язв (рис. 5), глибина яких сягала 3...5 мм. Тріщин в основному метали закладних частин та деформацій елементів, що не передбачені проектом, виявлено не було.

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ в рамках проекту 8.8 «Розробка технології ремонту та відновлення вертикальних направляючих робочих шляхів підйомно-опускних воріт судноплавних шлюзів водоймищ Дніпровського басейну» Цільової комплексної програми наукових досліджень «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» було розроблено спеціалізоване дослідне обладнання (рис. 6) для автоматичного дугового наплавлення, за допомогою якого у лабораторних умовах було відпрацьовано техніку та технологію наплавлення вертикальних поверхонь у захисних газах (CO_2 , суміш

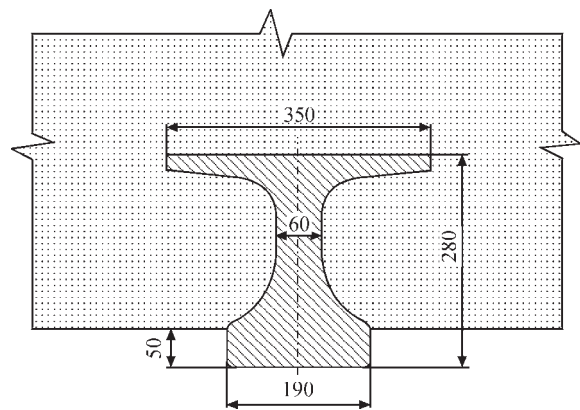


Рис. 4. Поперечний переріз забетонованої рейки робочого шляху підйомно-опускних воріт Канівського судноплавного шлюзу (схематичне зображення)



Рис. 5. Характерні пошкодження рейок робочих шляхів підйомно-опускних воріт Канівського судноплавного шлюзу

Ag + 21% CO₂) суцільним дротом марки Св-08Г2С діаметром 1 мм. Вказане обладнання дозволяє виконувати безперервне наплавлення вертикальних ділянок розмірами до 220 мм по ширині та до 600 мм по висоті, забезпечуючи товщину наплавленого шару у межах 2,5...4,0 мм за один прохід (рис. 7). Твердість металу, наплавленого на зразок із сталі 45, забезпечується в межах *HB* 180...220, що знаходиться на рівні твердості основного металу. Дану розробку було використано при ремонті робочих шляхів підйомно-опускних воріт Канівського судноплавного шлюзу.

Після обмірів робочих шляхів та їх дефектації було виконано розмітку та зачистку ділянок рейок, що підлягають наплавленню. Зачистка виконувалась електричними шліфувальними машинками з використанням сталевих щіток. Апарат закріплювався на відповідній ділянці рейки та виконувалось її наплавлення (рис. 8) по всій ширині (190 мм) на режимі, що гарантує необхідні геометричні параметри наплавленого шару. Оскільки в

процесі безперервного наплавлення забезпечується автопідігрів основного металу, попередній підігрів рейки не застосовувався. Після завершення наплавлення апарат переставлявся на наступну ділянку рейки.

Таким чином, загалом було відремонтовано більше одинадцяти погонних метрів правої та лівої рейок робочих шляхів, які після шліфування та заміни воріт у червні 2020 р. було введено в експлуатацію.

Розроблені технологія та обладнання у подальшому можуть застосовуватись при виконанні ремонтних робіт на судноплавних шлюзах та інших об'єктах, де є необхідність наплавлення робочих поверхонь вузлів та деталей технологічного обладнання без демонтажу, що дозволить відновити їх працездатність, подовжити терміни їх експлуатації.

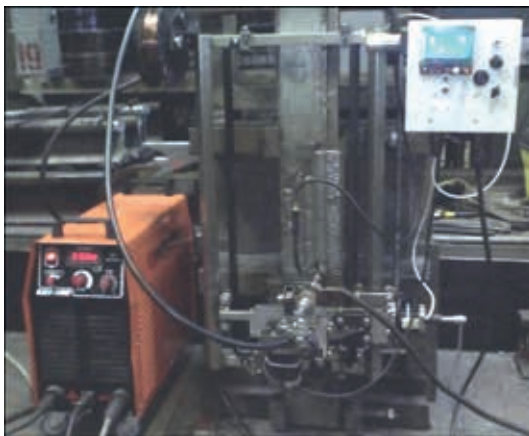


Рис. 6. Спеціалізоване дослідне обладнання для автоматичного дугового наплавлення вертикальних поверхонь

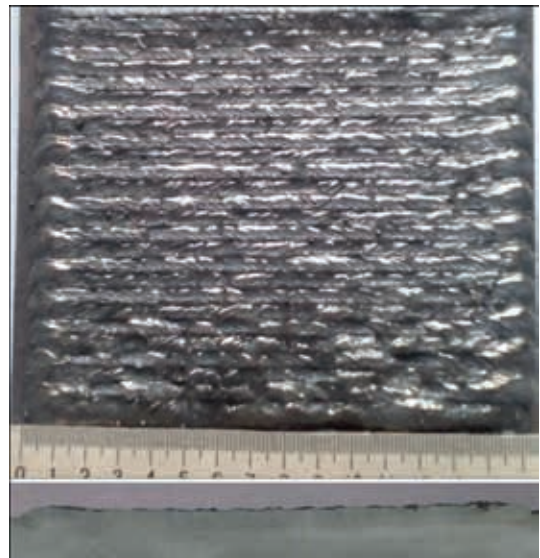


Рис. 7. Зразок з наплавленням шириною 150 мм та його переріз

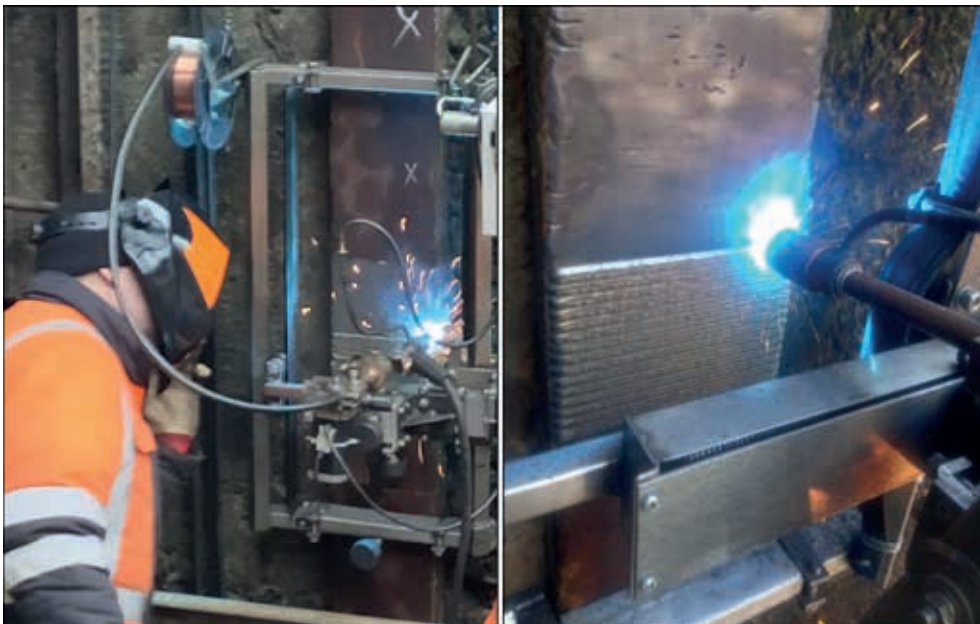


Рис. 8. Автоматичне наплавлення рейок робочих шляхів підйомно-опускних воріт Канівського судноплавного шлюзу

Список літератури

1. Бурмака І.О. (2014) Організаційні аспекти нормування судноплавства на внутрішніх водних шляхах України. *Митна справа*, 1, 87–93. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ms_2014_1_15.
2. <http://ukrvodshliah.org.ua/index.php/kanivskyj-shluz/>

References

1. Burmaka, I.O. (2014) Organization aspects of regulating navigation in internal waterways of Ukraine. *Mytna Sprava*, 1, 87–93 [in Ukrainian]. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ms_2014_1_15.
2. <http://ukrvodshliah.org.ua/index.php/kanivskyj-shluz/>

AUTOMATIC ARC SURFACING OF WORKING PATHS OF LIFT GATES OF KANIV NAVIGATION LOCK

V.I. Galinich, V.M. Taganovskiy, G.V. Kuzmenko

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper gives the results of development and introduction of the technology of automatic arc surfacing of vertical embedded parts of navigation locks without dismantling them in the case of repair of rails of working paths of lift gates in the Kaniv navigation lock. 2 Ref., 8 Fig.

Keywords: navigation lock, lift gates, guide path rails, automatic arc surfacing

Надійшла до редакції 13.10.2020

ЗВАРЮВАЛЬНА ВИСТАКА SCHWEISSEN & SCHNEIDEN 2021 ПОВЕРНУЛАСЬ ДО ЕССЕНУ!

Експоненти з нетерпінням чекають відкриття виставки в модернізованому виставковому комплексі Messe Essen

20-я міжнародна виставка SCHWEISSEN & SCHNEIDEN відбудеться з 13 по 16 вересня 2021 р. в Messe Essen. Впевнені в одному: ювілейне проведення провідної міжнародної події буде дуже особливим. Тому що це відбувається вперше в модернізованому Messe Essen. Олівер П. Курт, керуючий директор Messe Essen каже: «Експоненти та відвідувачі SCHWEISSEN & SCHNEIDEN отримують задоволення від відкритої, функціональної архітектури, невеликих відстаней, восьми просторих одноповерхових залів та великої кількості денного світла». З цією модернізацією пов'язана тематична реорганізація виставкових площ, що полегшує учасникам шлях та орієнтацію. Кілька залів зарезервовано для інженерії поверхні, термообробки, експлуатації та допоміжних матеріалів, а також обладнання для безпеки та охорони здоров'я. Зварювальні та споріднені компанії найдуть своє місце в *Galeria*, а також у залах 2, 4, 5 та 6. Інтерес експонентів до зварювального сектору був настільки великий, що ця презентаційна площа вже була розширена до частини залу 2, де представлені відповідні рішення щодо всіх аспектів допоміжних матеріалів та управління якістю. Інша частина залу 6 та вся зала 7 призначена для експонентів у сферах різання та сепарації.

DVS – Німецька асоціація зварювання та суміжних процесів, як багаторічний партнер Messe Essen з нетерпінням чекає SCHWEISSEN & SCHNEIDEN у сучасних виставкових залах. «З часу прем'єри виставки SCHWEISSEN & SCHNEIDEN в 1952 р. Messe Essen та DVS підтримували цю успішну співпрацю. Ми раді допомогти у формуванні 20-ї провідної виставки у нових залах», – сказав керуючий директор DVS доктор-інж. Роланд Бокінг.

Експоненти з нетерпінням чекають виставку у 2021 р. «Звичайно, як і скрізь, ми виявляємо невелике

небажання через пандемію корони. У той же час ми також відчуваємо безумовне бажання нарешті знову зустрітись і разом рухатись уперед», – сказав директор виставки Олівер П. Курт. Його команда розробила комплексну концепцію захисту та гігієни і нещодавно продемонструвала свою життєздатність на міжнародних виставках. Деякі компанії навіть представляють себе значно більшими у 2021 р. Компанія *MicroStep* знаходиться на першому плані. Керуючий директор компанії Йоганнес Рід каже: «Провідна виставка SCHWEISSEN & SCHNEIDEN це абсолютна подія, яку цінують як експоненти, так і відвідувачі. З огляду на це, ми вирішили значно розширити свою присутність тут; на найбільшому виставковому стенді в історії нашої компанії, ми в реальному часі в 2021 р. представим те, що ми можемо запропонувати у сферах обробки матеріалів плазмою, випромінюванням лазера, кисневим та водним струменями, а також у сферах автоматизації та оцифрування».

Програма підтримки завершує відвідування виставки. Завдяки конференціям, конкурсам та тематичним спільним стендам SCHWEISSEN & SCHNEIDEN запропонує своїм відвідувачам та експонентам отримати компактну інформацію про те, що пропонується на спільних стендах з Кореї, Тайваню, Японії, США, Франції та Китаю. Також заплановано водолазний контейнер для підводних зварників з демонстрацією роботи. На даний момент DVS також готує конкурси «Змагання молодих зварювальників» та «Міжнародний конкурс зварювальників». Десять країн вже зареєструвались у міжнародному конкурсі і виставка вперше буде приймати команду з Камеруну. Конгрес DVS також доповнить тематично виставку своєю великою програмою лекцій.

www.schweissen-schenken.com

За матеріалами прес-релізу Messe Essen

www.schweissen-schenken.com

Дюссельдорф/Ессен, 15 жовтня 2020 р.

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ НАПІВАВТОМАТИЧНОГО ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ДЛЯ УМОВ КАПІТАЛЬНОГО РЕМОНТУ ТА РЕКОНСТРУКЦІ ЛІНІЙНОЇ ЧАСТИНИ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ УКРАЇНИ

С.Ю. Максимов, А.А. Гаврилюк, Д.М. Кражановський

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

Через територію України прокладено біля 37 тис. км газопроводів. Їх безаварійна робота ґрунтується на належній технічній експлуатації та своєчасному проведенні ремонту або реконструкції. На сьогоднішній день основним способом зварювання, який використовується при виконанні ремонту, є ручне дугове. Через його низьку продуктивність існує необхідність в скороченні тривалості зварювальних робіт з одночасним підвищенням їх якості. Метою роботи була розробка основних положень і технології напівавтоматичного дугового зварювання неповоротних кільцевих стиків труб діаметром до 1420 мм включно, що дасть можливість скоротити час виконання зварювальних робіт із відповідним пришвидшенням прокладання відновлених ділянок магістральних газопроводів з одночасним підвищенням якості зварних з'єднань. Зварювання виконувалося з використанням порошкового газозахисного дроту ОК Tubrod 15.19 діаметром 1,2 мм в середовищі $Ar+CO_2$ і самозахисного порошкового дроту Coreshield 8 діаметром 1,6 мм. Аналіз отриманих результатів показує, що місце руйнування зразків у всіх випадках розташоване в основному металі. Такі результати засвідчують, що міцність зварного з'єднання перевищує міцність основного металу для цих комбінацій зварювальних матеріалів та захисного газу. При належній техніці зварювання і строгому дотримуванні режиму зварювання стикові з'єднання трубних сталей відповідають нормативним документам, порошковий дріт ОК Tubrod 15.19 можна рекомендувати для зварювання трубних сталей з класом міцності К-60, а самозахисний порошковий дріт Coreshield 8 – для зварювання трубних сталей з класом міцності К-52. Бібліогр. 15, табл. 6.

Ключові слова: магістральний газопровід, напівавтоматичне дугове зварювання, кільцевий стик, порошковий дріт

Мережа газопроводів України характеризується значною протяжністю (до 37 тис. км), великими діаметрами труб (до 1420 мм включно), високим робочим тиском (до 7,4 МПа) та значними строками експлуатації (25 років та більше). Остання обставина ставить жорсткі вимоги до лінійної частини магістральних газопроводів з позиції забезпечення експлуатаційної надійності та промислової безпеки [1, 2]. Безаварійна робота газових магістралей ґрунтується на належній технічній експлуатації та своєчасному проведенні ремонту або реконструкції [3, 4]. Виконання ремонту передбачає проведення комплексу технологічних заходів, які спрямовані на відновлення основних параметрів та характеристик лінійної частини магістральних газопроводів (ЛЧМГ) до проектних значень [5–7].

Досвід ремонтних робіт на магістральних трубопроводах свідчить, що основним способом виконання зварювання є ручне дугове [8]. Практика показує, що для зварювання тільки одного неповоротного кільцевого стику на трубопроводі діаметром 1420 мм при товщині стінки 16 мм бригада зварників із двох чоловік витрачає не менше 5 год. Тому існує необхідність в скороченні тривалості зварювальних робіт з одночасним підвищенням їх якості.

Для економічних умов України вирішення зазначеної задачі вбачається в застосуванні механізованого дугового зварювання як досить простого і прогресивного способу з одного боку, та порівняно недорогого з іншого. Застосування дротів суцільного перерізу дає можливість збільшити продуктивність зварювальних робіт не менше ніж у 1,5...2,0 рази в залежності від діаметру дроту. Зрозуміло, що збільшення діаметру вимагає підвищувати режими зварювання для стабільного протікання процесу переносу металу в зварювальну ванну. Проте, при зварюванні на режимах, які забезпечують перенос рідкого металу в ванну через коротке замкнення, збільшуються в 1,5...3,0 рази витрати зварювального матеріалу внаслідок розбризкування крапель рідкого металу [9]. Наслідком цього стає витрачання часу через необхідність додаткового зачищення від бризок зони зварювання [10]. Тому для дотримання балансу між продуктивністю зварювання та якістю зварних з'єднань прийнятним є застосування при механізованому зварюванні в захисних газах дротів суцільного перерізу діаметром 1,2 мм [11].

Порошкові дроти рутилового типу для механізованого зварювання в захисних газах мають досить суттєві переваги перед дротами суцільного

Максимов С.Ю. – <https://orcid.org/0000-0002-5788-0753>, Гаврилюк А.А. – <https://orcid.org/0000-0001-5443-6553>

Кражановський Д.М. – <https://orcid.org/0000-0001-7292-7188>

С.Ю. Максимов, А.А. Гаврилюк, Д.М. Кражановський, 2020

перерізу через зменшення розбризкування та часу на зачищення наплавленого металу, підвищення на 30...50 % продуктивності процесу зварювання, можливість підвищити пластичність металу шва за рахунок спеціального легування матеріалу [12]. Основною перевагою самозахисних дротів вважається відсутність необхідності застосування захисного газу при виконанні зварювання. Ця особливість додає мобільності, полегшує ведення робіт в польових умовах, виключає необхідність застосування захисних палаток від вітру. На жаль, підприємства ДК «Укратрансгаз» на даний час не мають досвіду застосування цих сучасних зварювальних матеріалів.

Метою роботи в цілому була розробка основних положень і технології напівавтоматичного дугового зварювання неповоротних кільцевих стиків труб діаметром до 1420 мм включно, що дасть можливість скоротити час виконання зварювальних робіт із відповідним пришвидшенням прокладання відновлених ділянок магістральних газопроводів з одночасним підвищенням якості зварних з'єднань.

Для дослідження механічних властивостей та ударної в'язкості стикових швів були заварені зразки в різних просторових положеннях з роз-

робленням крайки 30° на кожну сторону. Зварювання проводили із використанням напівавтомату Evomig 500 в нижньому положенні порошковим газозахисним дротом ОК Tubrod 15.19 діаметром 1,2 мм в середовищі Ar+CO₂ та самозахисним дротом Coreshield 8 діаметром 1,6 мм. Для зварювання кореневого шару в обох випадках використовували дріт Св08Г2С діаметром 1,2 із захистом Ar+CO₂.

У першому випадку в якості основного металу слугували пластини товщиною $t = 16$ мм зі сталі Х70. Зварювання виконували в чотири шари: кореневий, два заповнювальних, облицювальний. У другому випадку матеріалом для зварювання було вибрано сталь 09Г2С товщиною 12 мм. Зварювання виконували в п'ять шарів: кореневий, три заповнювальних та облицювальний. Всі шари виконували за один прохід з поперечними коливаннями електроду (крім кореневого шару). Режим зварювання та хімічний склад матеріалів наведено в табл. 1, 2.

Після зварювання поперек шва вирізали та виготовляли зразки Ми-18, які були випробувані на статичний розтяг. Результати випробувань наведено в табл. 3.

Таблиця 1. Режими механізованого зварювання у різних просторових положеннях

Шар	Зварюваний матеріал	$V_{др}$, м/хв	$I_{зв}$, А	U , В
Нижнє положення, 1G				
Кореневий	Св-08Г2С	4,0	135	19,2
Заповнювальний	ОК 15.19	9,4	207	28,4
	Coreshield 8	2,5	188	21
Облицювальний	ОК 15.19	9,4	210	28,2
	Coreshield 8	2,5	191	22
Вертикальне положення, 3G				
Кореневий	Св-08Г2С	2,8	103	18,8
Заповнювальний	ОК 15.19	7,5	192	22,6
	Coreshield 8	2,5	202	23
Облицювальний	ОК 15.19	7,5	198	22,4
	Coreshield 8	2,5	214	24,2
Стельове положення, 4G				
Кореневий	Св-08Г2С	2,9	115	16
Заповнювальний	ОК 15.19	8,0	185	26,3
	Coreshield 8	2,3	200	23,5
Облицювальний	ОК 15.19	7,5	180	26,0
	Coreshield 8	2,3	210	23

Таблиця 2. Хімічний склад матеріалів, мас. %

Матеріал	С	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	Ti	Al	Mo	V	Cu	S	P
Св08Г2С	0,09	0,065	1,65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ОК 15.19	0,05	0,4	1,3	—	1,0	—	—	—	—	—	—	—	—
Coreshield 8	0,19	0,14	0,5	0,1	0,25	0,01	—	0,43	0,03	0,02	0,1	0,02	0,02
Х70	0,08	0,26	1,60	0,03	0,03	0,062	0,002	—	—	—	—	0,006	0,022
09Г2С	0,09	0,63	1,51	0,06	—	—	—	—	—	—	—	0,035	—

Таблиця 3. Випробування зразків Ми-18 на розтяг

Зварювальний матеріал	Просторове положення	Межа міцності σ_b , МПа	Місце руйнування зразка
OK 15.19	Нижнє 1G	575,3	Основний метал
Coreshield 8		504,1	-"
OK 15.19	Вертикальне 3G	579,1	-"
Coreshield 8		505,2	-"
OK 15.19	Стельове 4G	570,9	-"
Coreshield 8		503,3	-"

Аналіз отриманих результатів показує, що місце руйнування зразків у всіх випадках розташоване в основному металі. Такі результати засвідчують, що міцність зварного з'єднання перевищує міцність основного металу для цих комбінацій зварювальних матеріалів та захисного газу. Тому подальші лабораторні дослідження були спрямовані на визначення механічних характеристик та ударної в'язкості металу шва. В процесі здійснення експерименту виконання кожного наступного проходу починали в той момент, коли при охолодженні основний метал у визначених точках мав температуру 120...150 °С. Результати випробувань металу шва наведено в табл. 4 та 5.

Співставлення отриманих результатів випробувань показує, що межі плинності та міцності металу швів, виконаних газозахисним дротом ОК1519 в різних просторових положеннях, знаходяться на рівні нормативних значень основного металу труб класу міцності К60. Характеристика пластичності металу шва (δ_5) також перевищує мінімально необхідну – $\delta_5 \geq 24$ %. Видно, що значення механічних характеристик при зварюванні в нижньому, вертикальному і стельовому положеннях практично однакові. При використанні самозахисного дроту Coreshield 8 межі плинності та міцності металу шва знаходяться на рівні нормативних значень основного металу труб класу міцності К50 – К52. Пластичність перевищує

мінімально необхідну – $\delta_5 \geq 20$ %. Результати по ударній в'язкові високі навіть при температурі випробування –40 °С зразків по Шарпі.

Для оцінки граничної пластичності металу швів були проведені випробування стандартних зразків на статичний вигин. Ці випробування дозволяють оцінити здатність зварних з'єднань витримувати задану пластичну деформацію, величина якої визначається кутом вигину. Для кільцевих стикових з'єднань трубопроводів цей кут повинен бути не менший за 120°. У всіх варіантах комбінацій просторового положення зварювальних швів і електродних дротів кут вигину склав 180°.

Аналіз отриманих результатів показує, що при належній техніці зварювання і вибраних режимів зварювання стикові з'єднання відповідають нормативним вимогам.

Відомо, що при зварюванні в захисних газах маловуглецевих та низьколегованих сталей такі супутні елементи, як азот та кисень є шкідливими домішками [13, 14]. В певних умовах вони можуть впливати на зниження пластичності зварних з'єднань. Тому були проведені дослідження із визначення впливу захисних газів на вміст цих елементів в металі швів. Результати дослідження наведено в табл. 6.

З отриманих даних видно, що при зварюванні самозахисним дротом Coreshield 8 в наплавленому металі фіксується підвищений вміст азоту. Причин цьому може бути декілька: підвищена

Таблиця 4. Механічні характеристики металу шва

Зварювальний матеріал	σ_T , МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %	ψ , %
Нижнє положення, 1G				
OK 15.19	<u>467...491</u> 479	<u>598...603</u> 600,5	28,0	73,0
Coreshield 8	<u>382,2...374</u> 378,1	<u>532,1...533</u> 532,0	27,0	70,0
Вертикальне положення, 3G				
OK 15.19	<u>567...571</u> 569	<u>669...679</u> 674	24,0	69,0
Coreshield 8	<u>327,8...389,7</u> 358,7	<u>503,0...518,5</u> 510,7	31,0	69,8
Стельове положення, 4G				
OK 15.19	<u>534...541</u> 537,5	<u>648...653</u> 650,5	25,0	68,0
Coreshield 8	<u>354,0...384,0</u> 369	<u>514,0...517,0</u> 515,5	26,4	70,4

Таблиця 5. Ударна в'язкість (KCV) металу шва

Зварювальний матеріал	Ударна в'язкість a_u , Дж/см ² при температурі, °C		
	+20	-20	-40
Нижнє положення, 1G			
OK 15.19	$\frac{137...173}{164}$	$\frac{126...160}{139}$	$\frac{98...101}{98}$
Coreshield 8	$\frac{122,3...151,5}{137,3}$	$\frac{70,2...135}{124,6}$	$\frac{64,2...84,3}{73,5}$
Вертикальне положення, 3G			
OK 15.19	$\frac{109...154}{134}$	$\frac{99...111}{104}$	$\frac{82...99}{88}$
Coreshield 8	$\frac{127...152}{139}$	$\frac{90,3...115}{99,6}$	$\frac{54,2...58,4}{56,1}$
Стельове положення, 4G			
OK 15.19	$\frac{109...152}{136}$	$\frac{116...143}{132}$	$\frac{67...99}{79}$
Coreshield 8	$\frac{124...143}{134,3}$	$\frac{87,1...89,2}{87,4}$	$\frac{48,4...52,0}{50,6}$

Таблиця 6. Вміст азоту [N] та кисню [O] в наплавленому металі, %

Зварювальний матеріал	[N], %	[O], %
OK 15.19	0,0079	0,0428
Coreshield 8	0,0433	0,063

напруга; поганий газовий захист наплавленого металу від повітря. В самозахисних дротах карбонатно-флюоритного типу газовий захист метала відбувається за рахунок розкладання карбонатів. Кількість азоту в металі шва залежить від режиму зварювання. З підвищенням напруги на дузі кількість азоту в металі шва росте. При підвищенні довжини дугового проміжку в процесі плавлення дроту газу, який виділяється, може бути недостатньо для відтиснення повітря від поверхні розплавленого металу, парціальний тиск азоту в зоні дуги зростає і його кількість в металі збільшується [15]. Підвищення сили зварювального струму буде підсилювати розкладання карбонатів, але тим самим буде підвищувати вміст азоту в наплавленому металі [11]. Більш детальну відповідь можна буде дати при досконалишому і направленому проведенні подальших експериментів.

Висновки

1. Проведені дослідження показали, що зварні з'єднання, отримані з використанням газозахисного дроту OK Tubrod 15.19 в суміші $Ag+CO_2$ на сталі X70, дають механічні характеристики міцності зварного з'єднання на рівні $\sigma_b = 574...580$ МПа, а механічні характеристики металу швів в різних просторових положеннях становлять $\sigma_b = 600...670$ МПа.

Ударна в'язкість металу швів по Шарпі для температури -40 °C становить $79...98$ Дж/см². Плас-

тичні характеристики металу швів становлять $\delta_5 = 28$ %, що перевищує регламентовані для сталі X70 ($\delta_5 \geq 23$ %). Отже, підсумовуючи результати технологічних показників, а також одержані механічні властивості при зварюванні сталі X70 газозахисним дротом OK Tubrod 15.19 в суміші $Ag+CO_2$, можна сказати, що допустимо зварювання трубних сталей з класом міцності K-60 ($\sigma_b = 588$ МПа).

2. Отримані результати випробувань зразків, зварених самозахисним дротом Coreshield 8, показують, що міцність ($\sigma_b = 515$ МПа) та плинність ($\sigma_t = 369$ МПа) металу шва знаходиться на рівні нормативних значень основного металу труб класу міцності K-50–K-52. Ударна в'язкість металу шва по Шарпі при температурі випробувань -40 °C становить $56...73$ Дж/см².

3. Аналіз отриманих результатів свідчить, що при належній техніці зварювання і строгого дотримання режиму зварювання стикові з'єднання трубних сталей відповідають нормативним документам.

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

Список літератури

- Хрутьба В.О., Вайганг Г.О., Стегній О.М. (2017) Аналіз екологічних небезпек під час експлуатації та ремонту магістральних трубопроводів. *Екологічна безпека*, 2, 24, 75–82.
- Побережний Л.Я., Яворський А.В., Цих В.С. та ін. (2017) Підвищення рівня екологічної безпеки трубопроводних мереж нафтогазового комплексу України. *Техногенно-екологічна безпека*, 1, 24–31.
- Федорович І.В. (2013) Надійність експлуатації лінійної частини магістральних газопроводів та дослідження причин аварійності. *Агросвіт*, 5, 42–44.
- Бунько Т.В., Сафонов В.В., Стрежекуров Е.Є., Мацук З.М. (2018) Безпека дальнього транспорту газу. *Геотехнічна механіка*, 139, 106–115.
- Аскаров Р.М., Тагіров М.Б., Кукушкин А.Н., Аскаров Р.Г. (2020) Ремонт магистральных трубопроводов. *Neftegaz. RU*, 4, 140–145.
- Шлапак Л.С., Присяжнюк П.М., Луцак Л.Д., Луцак Д.Л. (2017) Ремонт корозійно-механічних дефектів магістральних трубопроводів методом наплавлення порошковими електродами. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 1, 254–257.
- Исламов И.М., Чучкалов М.В., Аскаров Р.М. (2018) Оценка ресурса магистрального газопровода в условиях поперечного коррозионного растрескивания под напряжением. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*, 2, 35–38.
- Горшкова О.О. (2020) Сварка магистральных нефте- и газопроводов. *Современные наукоемкие технологии*, 2, 7–11.
- Лобанова М.А., Климович В.С., Фесенко Н.В. и др. (2019) Исследование производительности процесса при дуговой сварке в защитных газах (CO_2 и его смеси с аргонном) плавящимся электродом низкоуглеродистых и низколегированных сталей. Новые материалы и технологии их обработки. *Сборник научных работ XX Республиканской студенческой научно-технической конференции, Минск, 17–18 апреля 2019 г.* Минск, БНТУ, сс. 90–92.
- Потапьевский А.Г. (2007) *Сварка в защитных газах плавящимся электродом*. Ч. 1. Сварка в активных газах. Киев, Екотехнологія.
- (1989) *Строительство магистральных и промысловых трубопроводов. Сварка: ВСН 006-89* [Введен в действие 1989-07-01]. Миннефтегазстрой СССР. (Ведомственные строительные нормы).

12. (1994) *Проволока порошковая для дуговой сварки углеродистых и низколегированных сталей. Общие технические условия: ГОСТ 26271-84* [Введен в действие 1987-01-01]. Москва, Госстандарт СССР.
13. Підгасцький В.В. (1970) *Пори, включення і тріщини в зварних швах*. Київ, Техніка.
14. Григоренко Г.М., Лакомский В.И. (1968) Макрокинетика поглощения азота электродным металлом из атмосферы дуги. *Автоматическая сварка*, **1**, 10–14.
15. Суптель А.М. (1976) *Механизированная сварка порошковой проволокой*. Киев, Наукова думка.

References

1. Khrutba, V.O., Vaigang, G.O., Stegnii, O.M. (2017) Analysis of environmental hazards during operation and repair of main pipelines. *Ekologichna Bezpeka*, **2**, 24, 75–82 [in Ukrainian].
2. Poberezhnyi, L.Ya., Yavorskyi, A.V., Tsykh, V.S. et al. (2017) Increase of level of environmental safety of pipeline systems of gas-and-oil complex of Ukraine. *Tekhnogenno-Ekologichna Bezpeka*, **1**, 24–31 [in Ukrainian].
3. Fedorovych, I.V. (2013) Reliable operation of linear part of main gas-and-oil pipelines and examination of accident causes. *Agrosvit*, **5**, 42–44 [in Ukrainian].
4. Bunko, T.V., Safonov, V.V., Strezhekurov, E.Ie., Matsuk, Z.M. (2018) Safety of long-distance gas transmission. *Geotekhnichna Mekhanika*, **139**, 106–115 [in Ukrainian].
5. Askarov, R.M., Tagirov, M.B., Kukushkin, A.N., Askarov, R.G. (2020) Repair of main pipelines. *Neftegaz RU*, **4**, 140–145 [in Russian].
6. Shlapak, L.S., Prisyazhnyuk, P.M., Lutsak, L.D., Lutsak, D.L. (2017) Repair of corrosion-mechanical defects of main pipelines by method of flux-cored electrode surfacing. *Visti Donetskogo Girnychogo Instytutu*, **1**, 254–257 [in Ukrainian].
7. Islamov, I.M., Chuchkalov, M.V., Askarov, R.M. (2018) Estimation of service life of main gas pipeline under conditions of transverse corrosion stress cracking. *Transport i Khranenie Nefteproduktov i Uglevodorodnogo Syria*, **2**, 35–38 [in Russian].
8. Gorshkova, O.O. (2020) Welding of main gas-and-oil pipelines. *Sovremennye Naukoyomkie Tekhnologii*, **2**, 7–11 [in Russian].
9. Lobanova, M.A., Klimovich, V.S., Fesenko, N.V. et al. (2019) Investigation of process productivity in consumable electrode gas-shielded arc welding (CO₂ and its mixture with argon) of low-carbon and low-alloy steels. In: *Proc. of 20th Republ. Student Sci.-Tekhn. Conf. on New Materials and Technologies of their Treatment*. (Minsk, 17-18 April 2019), Minsk, BNTU, 90-92 [in Russian].
10. Potapievsky, A.G. (2007) *Consumable electrode gas-shielded welding*. Pt 1: Active gas-shielded welding. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
11. (1989) *Construction of main and industrial pipelines. Welding: DBN 006-89*. Introd. 1989-07-01. Minnftgazstroj SSSR [in Russian].
12. (1994) *General specifications: GOST 1987-01-01. Flux-cored wire for arc welding of carbon and low-alloy steels*. Introd. 1987-01-01. Moscow, Gosstandart SSSR [in Russian].
13. Pidgaetsky, V.V. (1970) *Pores, inclusions and cracks in welds*. Kyiv, Tekhnika [in Ukrainian].
14. Grigorenko, G.M., Lakomsky, V.I. (1968) Macrokinetics of nitrogen absorption by electrode metal from arc atmosphere. *Avtomatich. Svarka*, **1**, 10–14 [in Russian].
15. Suptel, A.M. (1976) *Mechanized flux-cored wire*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].

DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF SEMI-AUTOMATIC ARC WELDING FOR THE CONDITIONS OF OVERHAUL AND RECONSTRUCTION OF THE LINEAR PART OF THE MAIN GAS PIPELINES OF UKRAINE

S.Yu. Maksymov, A.A. Gavriluk, D.M. Krazhanovskiy

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

More than 37 thous. km of gas pipelines were laid through the territory of Ukraine. Their safe operation is based on proper technical maintenance and timely repair or reconstruction. At present manual welding is the main welding method used during performance of repair. Its low productivity necessitates shortening the duration of welding operations with simultaneous improvement of their quality. The objective of the work was development of the main principles and technology of semi-automatic arc welding of position circumferential butt joints of pipes of up to 1420 mm diameter inclusive that will enable shortening the time of welding operations performance, with the corresponding acceleration of laying of the restored sections of the main pipelines and simultaneous improvement of welded joint quality. Welding was performed by gas-shielded flux-cored wire OK Tubrod 15.19 of 1.2 mm diameter in Ar+CO₂ atmosphere and self-shielded flux-cored wire Coreshield 8 of 1.6 mm diameter. Analysis of the obtained results shows that the site of sample destruction is located in the base metal in all the cases. Such results show that the welded joint strength is higher than that of the base metal for these combinations of welding consumable and shielding gas. With the proper welding practices and strict adherence to the welding mode, butt joints of pipe steels comply with the normative documents, and flux-cored wire OK Tubrod 15.19 can be recommended for welding pipe steels of strength class K-60, while self-shielded flux-cored wire Coreshield 8 can be used for welding pipe steels of strength class K-52. 15 Ref., 6 Tabl.

Keywords: main gas pipeline, semi-automatic arc welding, circumferential butt joint, flux-cored wire

Надійшла до редакції 28.09.2020

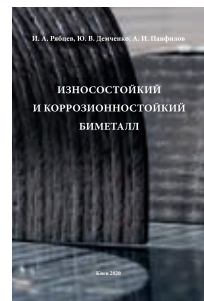
НОВА КНИГА

Рябцев И.А., Демченко Ю.В., Панфилов А.И. Износостойкий и коррозионностойкий биметалл. – Киев: Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, 2020. – 224 с.

Наведено класифікацію багатшарових металів, описано основні способи їх виробництва, охарактеризовано структуру і властивості матеріалів, які застосовуються в якості основного і плакуючого шарів. Висвітлено питання теорії і практики отримання багатшарових матеріалів, наведено методики оцінки якості і властивостей багатшарових матеріалів, отриманих різними способами. Велику увагу приділено особливостям їх зварювання і застосування в різних галузях промисловості.

Книга розрахована на інженерно-технічних працівників, зайнятих в області наплавного і ремонтного виробництва. Може бути корисною викладачам, аспірантам і студентам технічних університетів.

Замовлення на книгу прохання надсилати в редакцію журналу «Автоматичне зварювання».



ДІАГНОСТИКА ВОДНЕВО-КИСНЕВО ПЛАЗМОВОГО СТРУМЕНЯ ДЛЯ ЗАСТОСУВАННЯ В ГАЗОТЕРМІЧНОМУ НАПИЛЕННІ

Ю.С. Попіль¹, В.М. Корж¹, В.Я. Черняк², Є.А. Захаров¹

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37. E-mail: Popill_kpi@ukr.net

²Київський національний університет ім. Т. Шевченка. 03187, м. Київ, просп. Академіка Глушкова, 4, г.

Розглянуто питання отримання низькотемпературного плазмового струменя, де плазмоутворюючим газом виступає воднево-киснева суміш, вироблена електролізно-водяними генераторами. Ціль роботи в визначенні розмірів активної зони струменя, по довжині якого відбувається плавлення та нагрівання частки, та керування нею шляхом зміни характеру течії. Шляхом діагностування струменю плазми було визначено розподіл температури, швидкості, ефективної теплової потужності залежно від характеру витоку струменя. Визначено, що розміри активної зони плазмового струменя в 1,4 рази можуть бути більшими при ламінарному характеру течії, ніж при турбулентному. Максимальна температура знаходиться в дуговій частині плазмотрона і становить 8400 ± 1000 К, в струмені воднево-кисневої плазми середньомасова температура 5000 ± 500 К. Враховуючи результати діагностування, можна вибрати матеріал для плазмового напилення та дистанцію. Бібліогр. 19, табл. 1, рис. 2.

Ключові слова: воднево-кисневий плазмовий струмінь, ламінарний, турбулентний характер витікання, розміри активної зони струменя, плазмове напилення

Застосування високоентальпійних газів і сумішей як плазмоутворюючого середовища в технологіях газотермічного нанесення покриття, є одним з сучасних наукових напрямків. Відомо, що для отримання покриттів з високими якісними показниками, які отримуються газотермічними способами нанесення, перевага надається струменям з високими кінетичними та тепловими параметрами, оскільки збільшення цих параметрів приводить до більш інтенсивного теплообміну між плазмовим струменем та напилюваними частинками.

Можливість управління потужністю і питомими енергетичними характеристики плазмотрона за рахунок зміни складу плазмоутворюючого газу дають можливість прогнозувати характеристики і порівняльні розміри струменів плазми, отриманих з різних плазмоутворюючих середовищ. В якості визначального фактора ефективності застосування такого струменя можуть бути обрані розміри активної зони плазмового струменя, в якій можливий нагрів, плавлення та прискорення частинок матеріалу при газотермічному нанесенні покриття.

Таким джерелом може бути плазмовий струмінь з використанням в якості плазмоутворюючого середовища воднево-кисневої суміші (ВКС), виробленої електролізно-водяними генераторами. Отримання плазмоутворюючого газу безпосередньо на робочому місці робить мобільним технологічний процес газотермічної обробки ма-

теріалів, відсутність балонного і транспортно-го господарства, приміщень для зберігання, знижує собівартість. Крім того, в екологічному плані, для здоров'я людини, така суміш при факельному спалюванні і генерації плазми зменшує кількість шкідливих речовин.

Одним з компонентів ВКС є водень, який при іонізації має високі теплофізичні властивості і є високоефективним перетворювачем електричної енергії в теплову.

Аналіз технічної літератури показав, що використання воднево-кисневої плазми в процесах газотермічної обробки матеріалів практично відсутнє, а застосування водню, від 10 до 30 % як плазмоутворюючої добавки в плазмоутворюючих газах є застарілою інформацією, більш сучасною є використання паро-водяної плазми [1–4].

Дисоціація водню починається при температурі 2000 К, 90 % відбувається при температурі 4700 К і повністю завершується при температурі 6000 К. У цьому температурному інтервалі водень має надзвичайно високу теплопровідність [5].

Температура і ентальпія водневої плазми при стандартних умовах представлено в таблиці, в залежності від зміни фізичних умов ці показники можуть істотно зростати. Під час електродугового нагрівання воднево-кисневої суміші як плазмоутворюючий газ може розкладатися на 23 нейтральних і заряджених компонент [6], для спрощення визначення теплофізичних властивостей можна скористатися такими дисоційованими продуктами: H_2 ,

Попіль Ю.С. – <https://orcid.org/0000-0003-4974-146X>

© Ю.С. Попіль, В.М. Корж, В.Я. Черняк, Є.А. Захаров, 2020

H , O_2 , O , OH , H_2O , $+H$. Теоретично залежність ентальпії від температури плазми різних газів можна визначити, використовуючи довідкову літературу [7, 8]. На практиці ці фізичні характеристики та інші, можуть істотно відрізнятися, враховуючи зміни тиску, витрат, складу газової суміші.

Застосування двоатомних газів приводить до більш різкого збільшення напруги дуги (таблиця). У цьому випадку енергія дуги витрачається також для дисоціації молекул газу на атоми. Значно підвищується напруга дуги при використанні газу, який має велику теплоємність, теплопровідність.

Особливістю ВКС є те, що співвідношення між об'ємом кисню VO_2 і водню VH_2 в суміші, отриманої електролітичним розкладанням води $2H_2O = 2H_2 + O_2$, постійне і рівнове $\beta = VO_2/VH_2 = 0,5$. При такому співвідношенні компонентів в суміші плазмовий струмінь має окислювальний потенціал.

Позитивним фактором може бути те, що присутність у водні 2:1 об'єму кисню підвищує кінетичні характеристики струменя за рахунок збільшення щільності плазмоутворюючої суміші.

Разом з тим кисень як плазмоутворюючий газ має менший потенціал іонізації ніж азот, тому за рахунок нестачі електронів кисневий атом буде прагнути компенсувати його електронною парою зв'язку з воднем. Як наслідок, ВКС може мати менший потенціал іонізації і підвищену ступінь дисоціації, ніж водень, відповідно і напруга дуги буде менших значень, вказаних в таблиці.

Вибір суміші в якості плазмоутворюючого газового середовища визначається можливістю її використання в існуючому плазмотроні та надійною роботою анодного і катодного вузлів даного плазмотрона, а також технологією процесу.

Ефективність використання залежить від конструкції плазмотрона, що генерує плазму з плазмоутворюючої суміші. Основні напрямки удосконалення типових конструкцій плазмотронів спрямовані на модифікацію їх окремих вузлів і елементів для підвищення їх коефіцієнта корисної дії [11].

З огляду на те, що ВКС є вибухонебезпечною, високі вимоги з безпеки повинні забезпечуватись при розробці обладнання і технологічних процесів. Недостатність інформації та досліджень про теплофізичні характеристики низькотемпературної воднево-кисневої плазми і оцінки їх впливу на

газотермічні процеси стримує розвиток і впровадження ВКС у виробництво.

Метою роботи було генерування низькотемпературної воднево-кисневої плазми атмосферного тиску, отриманої електродуговим нагріванням та діагностування теплофізичних властивостей струменю, стосовно застосування в плазмовому способі нанесення покриття.

Використовувалося таке обладнання: електролізно-водяний генератор монополярного типу А1803УХЛЧ з максимальною продуктивністю по виробленню ВКС – $1,6 \text{ м}^3/\text{г}$; джерело живлення інверторного типу для плазмового різання CUT – 40, з напругою холостого ходу 300 В і максимальним струмом 40 А [12]. За основу конструкції плазмотрона був узятий катодний вузол мікроплазмового пальника ОБ-1160А, який використовується для мікроплазмового зварювання, установка МПУ-4 [13]. Подача газу в сопло плазмотрона здійснювалась аксіально.

Термохімічний катод являє собою водоохолоджуванний мідний електрод, в якому знаходиться гафнієва вставка. Геометрія сопла плазмотрона мала звужуючу форму, вихідний діаметр становив 3 мм. Безпечна робота, ініціювання та отримання воднево-кисневої плазми здійснювалося за допомогою пускових газових сумішей, таких, як повітря. Пуск і отримання плазмового струменя відбувалося на повітряній суміші, в яку вводилася ВКС, поступово повітряна суміш перекривалася і утворювався воднево-кисневий струмінь. При припиненні роботи дії відбуваються в зворотному порядку. При стабільній роботі плазмотрона на ВКС робоча напруга становила 100 В.

Методика досліджень і результати. Геометричні розміри плазмового струменю фіксувалися, при цьому перехідні межі від ламінарного до турбулентного характеру течії визначалися максимальною і мінімальною довжиною плазмового струменя, з контролем витрат суміші. Витрати газової суміші становили при ламінарному характері течії $0,4 \text{ м}^3/\text{г}$ і турбулентному більше $0,6 \text{ м}^3/\text{г}$, при тиску $0,08 \dots 0,1 \text{ МПа}$. Як показали дослідження геометрії воднево-кисневого плазмового струменя з ламінарним характером течії, при витоку в оточуючу атмосферу струмінь поводить як воднево-кисневе полум'я, кут розкриття струменя невеликий і може становити $2 \dots 5^\circ$, а довжина більше 200 мм (рис. 1, б). При збільшенні витрат

Дані про плазмоутворення в різних газах [9, 10]

Газ	Енергія, що підводиться до плазмотрону, кВт	Температура плазми, $^\circ\text{C}$	Теплоємність плазми, ккал/кг	Напруга на дузі, В	Коефіцієнт використання енергії на нагрів газів, %
Ar	48	14 000	4 670	40	40
He	50	20 000	51 100	47	48
N_2	60	7 300	9 950	65	60
H_2	62	5 093	76 600	120	80

суміші і переходу струменя в турбулентний характер течії, кут розкриття збільшується і факел плазми скорочується до 70 мм. Як видно з рис. 1, *a* (через червоний світлофільтр), будова плазмове-го факела нагадує газове полум'я, де видно ядро і приядерну зону.

Для визначення ефективної теплової потужності плазмових струменів різних характерів течії використовувалася експериментальна установка з водяним калориметром. Кількість теплоти, яке виділяє плазмовий струмінь, фіксували при нагріванні мідної пластини. При цьому визначались час нагрівання, температура рідини в калориметрі, вимірювання здійснювалось спеціальним термометром Бекмана, розрахунки проводилися за стандартною методикою [14].

Як показали дослідження, ефективна теплова потужність при витратах ВКС $0,4 \text{ м}^3/\text{г}$, що відповідає ламінарному характеру течії, становила 30 МДж, при прикладеній електричній потужності до плазмотрону 4 кВт. При збуренні потоку і переході в турбулентний стан витоку, з витратами суміші $0,6 \dots 1,0 \text{ м}^3/\text{г}$, ефективна теплова потужність складала $54 \dots 60 \text{ МДж}$.

Гідродинамічним методом визначали розподіл швидкості по довжині струменя з використанням зонда на основі трубки Піто-Прандтля, діаметром 1,5 мм і внутрішніми отворами 0,5 мм. Для розрахунку швидкості використовували відоме з технічної термодинаміки рівняння, основане на рівнянні Бернуллі, яке враховує напірний тиск і температуру плазми на ділянці струменя [15].

Для дослідження розподілу температур по довжині плазмового струменя, струмінь поділявся на три інтервали ефективних температур. Використовувалися три способи вимірювання: в інтервалі температур $8000 \dots 4000 \text{ К}$ – спектральний, $3300 \dots 2200 \text{ К}$ – пірометричний, $2000 \dots 500 \text{ К}$ – термопарний. Для визначення температури в першому інтервалі за складовими компонентами плазмового струменя було застосовано безконтактний метод емісійної спектроскопії. Для дослі-

дження другого інтервалу температур застосовувався оптичний пірометр ЛОП-78, по температурі нагрітого тіла, де в якості тіла використовувався вольфрамовий стрижень діаметром 3 мм, абсолютна температура розраховувалася за стандартною методикою [16]. В третьому інтервалі застосовували вольфрамо-ренієву термопару ВР-5/20 діаметром 0,5 мм, для запобігання окислення і вигорання, термопара розміщувалася в захисній оболонці з кварцевого скла. Термопара тарувалась, похибка термопар становила 1 % від вимірювання електрорушійної сили, а допустима похибка вимірювального приладу 0,2 %. Для визначення температури компонентів плазмового струменя був застосований безконтактний метод емісійної спектроскопії. Досліджувалися температури і концентрації компонентів плазмового струменя по її довжині (z), при відхиленні від центральної осі (h), з урахуванням того, що факел є осесиметричний.

Емісійні спектри плазмового факела реєструвалися за допомогою спектрометра на базі CCD-лінійки Solar TII (S-150-2-3648 USB), яка працює в діапазоні довжин хвиль $200 \dots 1080 \text{ нм}$ і має трикутну апаратну функцію, з напівшириною $0,2 \text{ нм}$, в діапазоні довжин хвиль $200 \dots 650$ та $0,3 \text{ нм}$ в діапазоні $650 \dots 1080 \text{ нм}$. Випромінювання реєструвалося по променям зору, перпендикулярним осі плазмового факела [17, 18]. На рис. 2 наведено типові спектри випромінювання плазми в разі використання ВКС, при $z = 15 \text{ мм}$, $h = 5 \text{ мм}$. Спектри є багатокомпонентними, містять компоненти матеріалу електродів, а саме, атомарні лінії міді, компоненти атмосфери, в яку витікає струмінь, і робочого газу, мультиплет кисню і молекулярні смуги OH , NO , O_2 та N_2 .

Значення температур населеності збудженості електронних T_e^* рівнів визначалися з використанням програмного коду Spec Air [19].

Розрахунки і експерименти показали, що температури визначені по міді $T_e^*(\text{Cu}) = 6700 \pm \pm 1000 \text{ К}$. Температура атомарного кисню на осі плазмового факела вдвічі більше в порівнян-

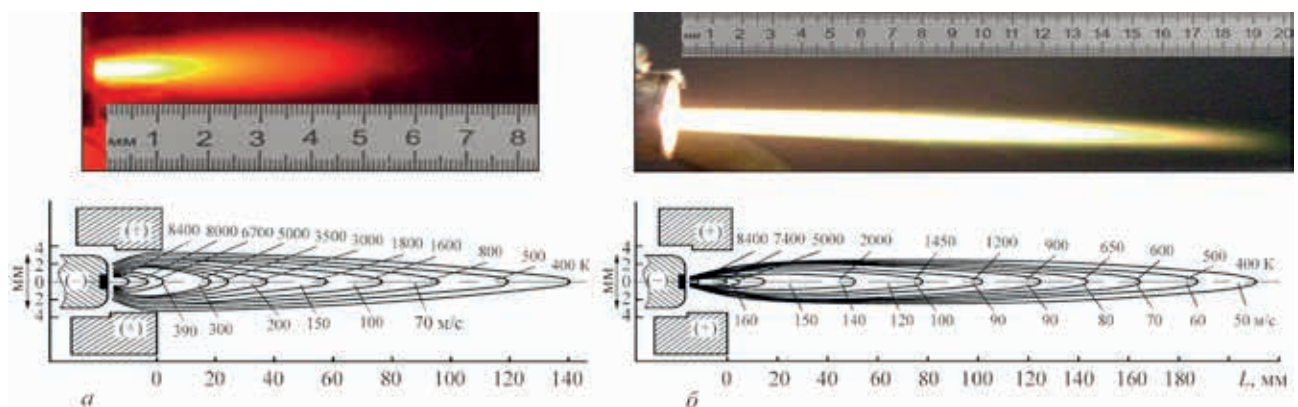


Рис. 1. Розподіл температури і швидкості по довжині плазмового струменя з різними характерами течії: *a* – турбулентний $V = 1 \text{ м}^3/\text{г}$; *б* – ламінарний $V = 0,4 \text{ м}^3/\text{г}$

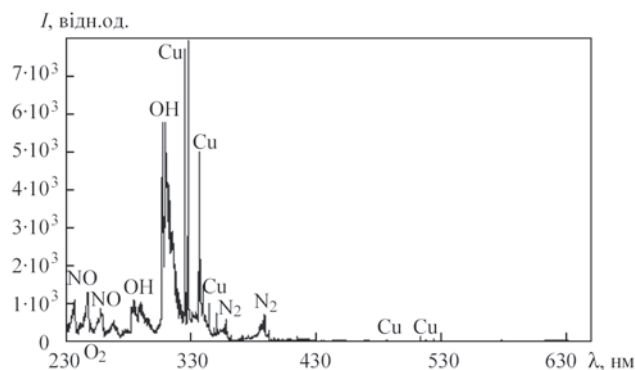


Рис. 2. Спектри випромінювання плазмового факела при $z = 15$ мм, $h = 5$ мм в діапазонах довжин хвиль 200...650 нм

ні з випадковим відхиленням від осі, тобто при $h = 0$ мм $T^*_{\text{e}}(\text{O}) = 8400 \pm 1000$ К, а при $h = 5$ мм $T^*_{\text{e}}(\text{O}) = 4100 \pm 1000$ К. Температура заселеності збуджених коливальних і обертальних рівнів гідроксиду в межах похибки однакова і дорівнює $T^*_{\text{r}}(\text{OH}) = T^*_{\text{v}}(\text{OH}) = 5000 \pm 500$ К. Температури заселеності збудженості електронних T^*_{e} рівнів кисню, визначені методом діаграм Больцмана, мають більш низьке значення в порівнянні з використанням програмного коду Spec Air, проте ці відмінності не перевищують значення похибки. Температури, які були визначені по молекулі (OH) і по атомарним компонентам (O та Cu) відрізняються, це свідчить, що плазма неізотермічна. Причиною різниці температур може служити нерівномірність просторового розподілу випромінюючих частинок і екзотермічних процесів в факелі. Як показало оцінювання температур заселеності збуджених електронних рівнів по довжині воднево-кисневого плазмового струменя, за середньомасову температуру струменя можна взяти значення молекули OH, яка представляє 5000 ± 500 К, а за максимальну атомарного O = 8400 ± 1000 К, які збігаються з літературними даними.

Дослідження в температурному інтервалі 3300...900 К показало, що розподіл багато в чому залежить від характеру течії, і при ламінарному характері витікання (рис. 1, б) ця область може бути більшої протяжності в 1,4 рази по відношенню до турбулентного (рис. 1, а). При турбулізації потоку тенденція змінюється, більш високотемпературний інтервал 8000...4000 К більший при турбулентному характері витікання струменя.

Максимальні значення швидкості плазмового струменя підвищуються в разі збільшених витрат суміші при постійному діаметрі сопла, що характерно для турбулентного характеру витікання, але при зменшенні довжини факела скорочується і інтервал ефективних швидкостей. При зниженні витрат суміші і переході в ламінарний характер течії максимальні значення швидкостей нижче, але протяжність інтервалу ефективних швидкостей більше.

З огляду на ефективні температурні і швидкісні інтервали плазмового струменя з використанням в якості плазмоутворюючого газу ВКС, можна встановити розміри активної зони струменя, в якій можливе плавлення і достатня швидкість частинок, для визначення одного з важливих технологічних параметрів процесу газотермічного нанесення покриття, дистанції напилення, для отримання якісного покриття. Такою дистанцією, для даних параметрів процесу, може бути 80 мм для турбулентного і 140 мм для ламінарного характеру витікання струменя.

Відповідно швидкісні показники струменю можна істотно підвищувати за рахунок збільшення витрат плазмоутворюючої суміші, вихідних діаметрів та профілювання геометричних розмірів соплової частини плазмотронів, при цьому можуть змінюватися і довжини як плазмового струменя, так і розміри активної зони, але закономірність розподілення температури в струмені воднево-кисневої плазми може відповідати результатам наших досліджень.

Для застосування плазмового способу напилення функціональних покриттів за допомогою ВКС як плазмоутворюючого газу, можна визначити наступний підхід. При ламінарному характері течії є можливість наносити покриття з металів та сплавів. При турбулентному більш ефективно напилювати жаростійкі, теплозахисні та інші покриття на основі оксидів, боридів та ін., з високою температурою плавлення.

Висновки

1. Дистанція напилення при використанні ВКС в 1,4 рази може бути більше при ламінарному характері витікання струменя ніж при турбулентному. Кут розкриття струменя становить $2...5^\circ$, що дозволяє концентрувати щільність теплового потоку на виробі, яке обробляється, за рахунок зменшення плями нагріву.

2. Ефективна теплова потужність плазмового струменя при витратах ВКС $0,4 \text{ м}^3/\text{г}$, що відповідає ламінарному характеру витікання струменя, становила 30 мДж, при поданій електричній потужності до плазмотрону 4 кВт. При турбулентному характеру течії плазмового потоку, з витратами суміші $0,6...1,0 \text{ м}^3/\text{г}$ становила 54...60 мДж.

3. Максимальна температура воднево-кисневої плазми має місце в дуговій частині плазмотрону та на зрізі сопла-анода $9...12$ мм і становить 8400 ± 1000 К, середньомасова температура воднево-кисневого плазмового струменя становить 5000 ± 500 К.

4. Представлені результати можна використовувати при розробці технологічних процесів плаз-

мового способу нанесення покриття з використанням в якості плазмоутворюючого газу ВКС.

Список літератури

1. Николаев Г.А., Ольшанский Н.А. (1975) *Специальные методы сварки*. Москва, Машиностроение.
2. Борисов Ю.С. (1987) *Газотермические покрытия из порошковых материалов*. Справочник. Киев, Наукова думка.
3. Корж В.М., Попиль Ю.С. (2010) *Обработка металлов водородно-кислородным пламенем*. Киев, Екотехнологія.
4. По данным компаний ООО «Мультиплаз» <http://www.multiplaz.ru/> ОАО «Элион», «Горыныч» (<https://as-pp.ru/gorynych>; <http://asprompt.ru/mppk-gorynych>)
5. Фролов В.В. (1954) *Физико-химические процессы в сварочной дуге*. Москва, Машгиз.
6. Дудко Д.Я., Емец Ю.П., Репа И.И. (1981) Состав и электрофизические параметры водородно-кислородной плазмы. *Теплофизика высоких температур*, 19, 4, 697–701.
7. Даутов Г.Ю., Урюков Б.А. и др. (2004) *Генерация низкотемпературной плазмы и плазменные технологии. Проблемы и перспективы*. Новосибирск, Наука, сс. 105–145.
8. Варгафтик Н.Б. (1963) *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей*. Москва, Физматгиз.
9. (1959) Browning. Plasma – a substitute for the oxy – fuel flame. *Welding J.*, 9, 38.
10. Васильев К.В., Исаченко А.А. (1962) Об использовании плазменного нагрева в сварочных процессах. *Труды ВНИИАВТОГЕНА*, Вып. VIII.
11. Жуков М.Ф., Смоляков В.Я., Урюков Б.А. (1973) *Электродуговые нагреватели газа (плазмотроны)*. Москва, Наука.
12. Корж В.М., Попиль Ю.С., Попиль Н.Ю., Москаленко Д.В. (2015) *Способ отримання воднево-кисневого плазмового струменя*; власник Нац. тех. ун-т України «КПІ». №U201513126; заявл .31.12.2015; опубл. 10.06.2016. Україна Пат. 107568 МПК Н05Н 1/26, В23К 10/02, В23К 101/00.
13. Патон Б.Е., Гвоздецкий В.С., Дудко Д.А. и др. (1979) *Микроплазменная сварка*. Киев, Наукова думка.
14. Рыкалин Н.Н. (1985) *Высокотемпературные технологические процессы*. Москва, Наука.
15. Абрамович Г.Н. (1969) *Прикладная газовая динамика*. Москва, Гл. ред. физ.-мат. литературы.
16. (1977) *Пирометер оптический ЛОП-72. Паспорт*. Харьков, Облграфиздат.
17. Laux, C.O., Spence, T.G., Kruger, C.H., Zare, R.N. (2003) Optical diagnostics of atmospheric pressure air plasma. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 12, 2, 125–138.
18. (1985) *Электронно-возбужденные молекулы в неравновесной плазме*. Труды ФИАН. Москва, Наука.

19. Pearse, R.W.B, Gaydon, A.G. (1976) *The identification of molecular spectra*. John Wiley & Sons, Inc., NewYor.

References

1. Nikolaev, G.A., Olshansky, N.A. (1975) *Special methods of welding*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Borisov, Yu.S. (1987) *Thermal coatings from powder materials: Refer. book*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
3. Korzh, V.M., Popil, Yu.S. (2010) *Oxyhydrogen treatment of metals*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
4. *By data of Companies LLC Multiplaz* <http://www.multiplaz.ru/> OJSC Elion, Gorynych <https://as-pp.ru/gorynych>; <http://asprompt.ru/mppk-gorynych> [in Russian].
5. Frolov, V.V. (1954) *Physicochemical processes in welding arc*. Moscow, Mashgiz [in Russian].
6. Dudko, D.Ya., Emets, Yu.P., Repa, I.I. (1981) Composition and electrophysical parameters of oxyhydrogen plasma. *Teplofizika Vysokikh Temperatur*, 19, 4, 697–701 [in Russian].
7. Dautov, G.Yu., Uryukov, B.A. et al. (2004) *Generation of low-temperature plasma and plasma technologies. In: Problems and Prospects*. Novosibirsk, Nauka, 105–145 [in Russian].
8. Vargaftik, N.B. (1963) *Reference book on thermophysical properties of gases and fluids*. Moscow, Fizmatgiz [in Russian].
9. (1959) Browning. Plasma – a substitute for the oxy-fuel flame. *Welding J.*, 9, 38.
10. Vasiliev, K.V., Isachenko, A.A. (1961) On application of plasma heating in welding processes. *Trudy VNIIVTOGEN*, Issue 8 [in Russian].
11. Zhukov, M.F., Smolyakov, V.Ya., Uryukov, B.A. (1973) *Electric arc heaters of gas (plasmotrons)*. Moscow, Nauka [in Russian].
12. Korzh, V.M., Popil, Yu.S., Popil, N.Yu., Moskalenko, D.B. (2015) *Method of producing of oxyhydrogen plasma jet*. Ukraine Pat. 107568, fill. 31.12.2015; publ. 10.06.2016; Int. Cl. B23K 10/02, B23K 101/00 [in Ukrainian].
13. Paton, B.E., Gvozdetzky, V.S., Dudko, D.A. et al. (1979) *Microplasma welding*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
14. Rykalin, N.N. (1985) *High-temperature technological processes*. Moscow, Nauka [in Russian].
15. Abramovich, G.N. (1969) *Applied gas dynamics*. Moscow, Fiz-Mat. Literatura [in Russian].
16. (1977) *Optical pyrometer LOP-72: Certificate*. Kharkov, Oblgrafizdat [in Russian].
17. Laux, C.O., Spence, T.G., Kruger, C.H., Zare, R.N. (2003) Optical diagnostics of atmospheric pressure air plasma. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 12, 2, 125–138.
18. (1985) *Electron-excited molecules in nonequilibrium plasma*. *Trudy FIAN*. Moscow, Nauka [in Russian].
19. Pearse, R.W.B, Gaydon, A.G. (1976) *The identification of molecular spectra*. John Wiley & Sons, Inc., NewYor.

DIAGNOSTICS OF HYDROGEN-OXYGEN PLASMA JET FOR APPLICATION IN GAS THERMAL SPRAYING

Yu.S. Popil¹, V.M. Korzh¹, V.Ya. Chernyak², Ye.A. Zakharov¹

¹NTU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». 37 Peremohy Ave., 03056, Kyiv, Ukraine. E-mail: Popil_kpi@ukr.net

²Taras Shevchenko National University of Kyiv. 64/13, Volodymyrska Str., 01601, Kyiv, Ukraine,

The issue of obtaining a low-temperature plasma jet, where the plasma-forming gas is a hydrogen-oxygen mixture produced by electrolysis-water generators, is considered. The aim of the work is to determine the size of the active zone of the jet, along the length of which the melting and heating of the particle takes place, and to control it by changing the nature of the flow. By diagnosing the plasma jet, the distribution of temperature, velocity, and effective thermal power depending on the nature of the jet leakage was determined. It was determined that the size of the active zone of the plasma jet is 1.4 times larger in the laminar nature of the flow than in the turbulent one. The maximum temperature is in the arc part of the plasmatron and is 8400 ± 1000 K, in the jet of hydrogen-oxygen plasma the average temperature is 5000 ± 500 K. Taking into account the results of the diagnostics, the material for plasma spraying and distance can be chosen. 19 Ref., 1 Tabl., 2 Fig.

Keywords: hydrogen-oxygen plasma jet, laminar, turbulent nature of flow, sizes of active zone of the jet, plasma spraying

Надійшла до редакції
12.10.2020

ОНЛАЙН-ЛЕКЦІЯ «ПАТОНІВСЬКИЙ МАНЕВР В ІСТОРІЇ РОЗВИТКУ НАН УКРАЇНИ»

14 листопада 2020 р. на лекторії «Наукові зустрічі» відбулася лекція «Патонівський маневр в історії розвитку НАН України». Через карантинні обмеження захід проводився в онлайн режимі у середовищі Zoom. Ініціатором зустрічі виступив Інститут досліджень науково-технічного потенціалу науки ім. Г.М. Доброва НАН України. Лектором наукової зустрічі став головний науковий співробітник Інституту досліджень науково-технічного потенціалу науки ім. Г.М. Доброва НАН України доктор економічних наук Олександр Сергійович Попович.

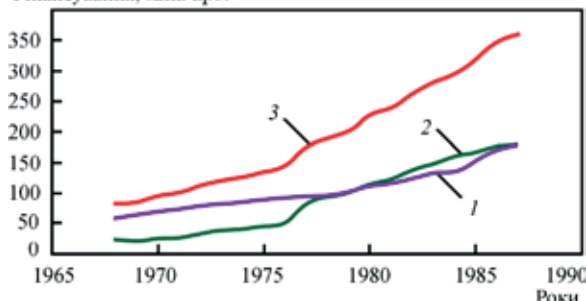
Розпочали з того, що Бориса Євгеновича Патона було обрано президентом АН УРСР у лютому 1962 р. О.С. Попович охарактеризував специфіку тих часів. Зауважив, що то був початок десятиліття, яке називали «відносною стабілізацією» країни. Б.Є. Патон, як новий президент, зіштовхнувся з першими серйозними викликами. Ключовим стало прийняття М.С. Хрущовим рішення про реорганізацію Академії наук і науки взагалі. В квітні 1963 р. вийшла постанова ЦК КПРС і РМ СРСР «Про заходи щодо поліпшення діяльності Академії наук СРСР і академій союз-

них республік», що передбачала втрату 92 інститутів і третини співробітників. У квітні 1963 р. вийшла відповідна постанова ЦК КПУ і РМ УРСР «Про реорганізацію наукових установ Академії наук УРСР». Завдячуючи боротьбі Б.Є. Патона за збереження якомога більшої кількості інститутів АН УРСР, Академія втратила лише півдесятка інститутів, бібліотек, музеїв, ряд філій та відділів. Лектор здійснив порівняння темпів зростання чисельності науковців СРСР та УРСР за 1961–1985 рр. в три етапи. А також проаналізував як змінювалася частка ВВП, що витрачалася в той час на розвиток науки в СРСР, чому відбулося зниження показника із 6,9 % ВВП до 5,8 % ВВП в 1965 р. та 1985 р. відповідно. Динаміка зростання показників діяльності АН УРСР свідчила про обрання Б.Є. Патонам правильного курсу для української науки. Було акцентовано, що Б.Є. Патон проголосив важливість зв'язків науки з виробництвом, для практичної реалізації яких потрібно будувати свою дослідно-виробничу базу. Було проілюстровано рівень фінансування АН УРСР з 1960-х по 1980-ті рр. з розподілом фінансування із держбюджету та за госпдогово-



27 лютого 1962 р. відбулися Загальні збори АН УРСР, на яких обрано новий склад її Президії. Президентом став представник молодшого покоління українських вчених, 43-річний академік АН УРСР Б.Є. Патон.

Фінансування, млн. грн.



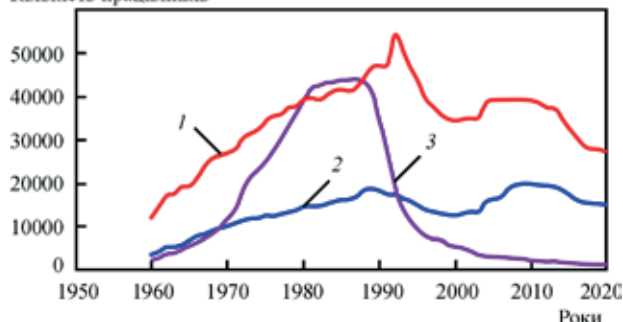
Фінансування АН УРСР у 1960–1980-ті рр.: 1 – з держбюджету, 2 – за госпдоговорами, 3 – загальне

рами. Відображена позитивна динаміка кадрового потенціалу того періоду: чисельність науковців в академічних інститутах зросла в 4,3 рази, а кількість працівників підприємств дослідно-виробничої бази – в 196 разів. За його словами, Академія завжди перевищувала план.

Зазначалося, що Б.Є. Патон ініціював прийняття постанови РМ УРСР в червні 1981 р. До відома взяли пропозицію про створення на базі науково-дослідних інститутів, конструкторсько-технологічних організацій, дослідних заводів і експериментальних виробництв таких науково-технічних комплексів, як «Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона», «Інститут проблем матеріалознавства», «Інститут надтвердих матеріалів», «Інститут кібернетики» та «Фізико-технічний інститут низьких температур». Лектор розкрив організаційні питання створення таких комплексів, проблему «застою кадрів». Він зауважив, що Б.Є. Патон особисто об'їздив всі регіони України задля укладення договорів про співробітництво Академії з місцевим керівництвом. Рациональною також вважається політика Б.Є. Патона із залучення закладів освіти МОН в наукові центри, які охоплювали всю територію України. Попович О.С. сказав: «Ці центри проявили себе як форма зв'язку з регіонами, як спосіб зорієнтувати науковців на проблеми економіки цього регіону. Навіть використати можливості всієї Академії в інтересах цього регіону». Але багато уваги приділялося і фундаментальній науці. Як доказ того – створення найбільшого радіотелескопу у світі УТР-2, ізохронного циклотрону У-240, побудова судна науки «Михаїл Ломоносов», будівництво великої кількості лабораторій та нових корпусів наукових інститутів. Лектор підкреслив, що значною мірою за це слід завдячувати стратегічному курсу Бориса Євгеновича Патона, його ініціативі і наполегливості.

Наприкінці лекції Попович О.С. продемонстрував обсяги загального фінансування науки в Україні в поточних цінах за 1995–2019 рр. та зафіксував зменшення показника вдвічі, врахувавши інфляцію. А також показав зміни структури науки України згідно розподілу фахівців,

Кількість працівників



Динаміка кадрової структури Академії: 1 – працівники науково-дослідних установ, 2 – науковці, 3 – працівники підприємств дослідно-виробничої бази

зайнятих дослідженнями в 2015 р. в порівнянні з 1991 р. Лектор виділяє академічний, галузевий, вузівський та заводський сектор. В основному відбулося збільшення академічного сектору із 17 % у 1991 р. до 44 % у 2015 р. за рахунок зменшення галузевого сектору з 65 % до 41 % відповідно. Вузівський сектор залишився незмінним, а заводський дещо зменшився з 9 % до 6 % за ці роки. Простий аналіз дозволяє зробити позитивні висновки про те, як вплинула ініціатива Б.Є. Патона і послідовна реалізація його політики на розвиток української науки. «Патонівський маневр» виявився не просто правильним, а певною мірою рятівним для неї.

На закінчення Попович О.С. зачитав оптимістичну цитату Бориса Євгеновича Патона із його останнього інтерв'ю журналу «Наука і наукознавство»: «Україні після багатьох років економічної стагнації та соціального занепаду знов буде потрібна сильна власна наука, свої талановиті вчені, інженери, висококваліфіковані фахівці, які неодноразово доводили свою здатність продукувати і впроваджувати у всі сфери життя нові знання, технології, виробничі та управлінські новації. В сучасному світі ці джерела економічного зростання і соціального поступу за своєю ефективністю, як відомо, набагато випереджають будь-які інші. Вони визначають і могутність країни, і благополуччя її народу, і світову повагу».

На останок, лектор відповів на поставлені йому запитання, що стосувалися капіталізації наукових досліджень, конкурентність української науки на світовому ринку, створення Міжнародної асоціації академій наук та інші.

Повний запис лекції на ютуб: <https://www.youtube.com/embed/BGbbE2fzXMq>.

С.В. Іваненко

* Наука в змозі істотно вплинути на інноваційне відродження країни. Інтерв'ю президента НАН України академіка Б.Є. Патона журналу «Наука та наукознавство». Наука та наукознавство. 2020. № 3 (109). С. 03–15. <https://doi.org/10.15407/sofs2020.03.003>



WIRE CHINA & TUBE CHINA 2020: успішні виставки після швидкого відновлення промисловості в Китаї

Як найбільші виставки Китаю для дрютяної, кабельно-трубної та трубної промисловості, Wire China та Tube China були спільно проведені в Шанхайському новому міжнародному виставковому центрі (SNIEC) з 23 по 26 вересня 2020 р.

Виставковий бізнес у Китаї знову набирає темпи після подолання COVID-19. Ярмарки проходили безпечно та на відстані, з дотриманням усіх чинних гігієнічних норм – у залах була помітна справжня атмосфера оптимізму.

Загалом 725 учасників, у тому числі 640 китайських компаній, приїхали до Китаю та представили на Wire China свої інновації в галузі дрютяної та кабельної промисловості на загальній площі

54000 м². Два національні павільйони з Німеччини та Франції доповнили виставки.

У Tube China 221 компанія представила свої інновації у галузі труб та обробки труб та торгівлі трубами на загальній площі 18000 м².

Вперше Tube China доповнили Thermprocess China та Saw Expo China. У спеціальних тематичних павільйонах 20 компаній представили свої інновації із галузей технологій теплових процесів та технологій різання.

Загалом за чотири дні на чотири виставки у Шанхаї прийшло більше 36000 відвідувачів. Наступна дата ярмарку Wire China та Tube China з THERMPROCESS China та Saw EXPO China запланована на 26–29 вересня 2022 р. у Шанхаї.



WIRE AND TUBE: нові терміни проведення у 2022 р.

Після скасування провідних міжнародних торгових ярмарків дрютяної, кабельної та трубної промисловості Wire and Tube 2020 через поточну ситуацію із зараженням COVID-19, наступні ярмарки відбудуться з 9 по 13 травня 2022 р. «Ми з нетерпінням чекаємо на те, щоб знову зустріти експонентів та відвідувачів в Дюссельдорфі», – говорить Даніель Рифіш, директор проекту Wire/Tube. «Корона показала, що цифровізація приносить багато переваг. Але вона не може замінити особисті зустрічі, розмови та контакти». Wire and Tube, які спочатку планувались з 30 березня по 3 квітня 2020 р., проходили рекордний курс до відстрочки, пов'язаної з COVID-19. Кількість реєстрацій від експонентів та відвідувачів навесні перевер-

шила всі очікування. «Для нас це було ще одним сигналом і новим підтвердженням того, що у нас тут, у Дюссельдорфі, є виставки №1 для дрютяної, кабельної та трубної промисловості», – пояснює Даніель Рифіш. «Тут об'єднуються міжнародні керівні органи, що приймають рішення у секторах експонентів та відвідувачів». Як завжди, Wire буде розташовуватися в залах з 9 по 17, а Tube в залах з 1 по 7. Компанії, які бажають брати участь у виставках Wire and Tube 2022, вже можуть зареєструватися, починаючи з кінця березня 2021 р. Офіційний термін реєстрації – літо 2021 р., а точні дати буде повідомлено Messe Düsseldorf пізніше.

Дюссельдорф, 02 листопада 2020 р.

Düsseldorf, Germany

join the best: 09 - 13 May 2022



XV МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ «ПРОБЛЕМИ КОРОЗІЇ ТА ПРОТИКОРОЗІЙНОГО ЗАХИСТУ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ» (КОРОЗІЯ-2020)

15-16 жовтня у м. Львові відбулася XV міжнародна конференція «Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів» (КОРОЗІЯ-2020), присвячена 110-річчю від дня народження академіка Г.В. Карпенка. Конференції традиційно проводяться вже понад 20 років (починаючи з 1998 р.). В цьому році вперше проведено у змішаному форматі: поряд з усними прозвучали доповіді *online* та *offline*.

Урочисте засідання конференції відкрив директор фізико-механічного Інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, академік З.Т. Назарчук. З привітанням виступив Президент Української асоціації корозіоністів, чл.-кор. НАН України В.І. Похмурський.

У доповіді, присвяченій 110-річчю з дня народження академіка В.Г. Карпенка, В.І. Похмурський відмітив, що започаткований В.Г. Карпенком напрямок наукових досліджень в галузі фізико-хімічної механіки матеріалів, зокрема корозії та корозійно-механічного руйнування металів, понад півсторіччя залишається актуальним. Цей напрямок успішно розвивають його послідовники (М.С. Хома, Г.М. Никифорчин, І.М. Дмитрах, О.Є. Андрейків та інші).

У роботі конференції взяли участь понад 120 науковців та представників промислових підприємств з 9 країн світу (Україна, Китай, Німеччина, Мексика, Польща, Словаччина, Білорусь, Казахстан, Швейцарія). На конференції заслухано 38 усних доповідей (з них 24 – у режимі *online*; 14 – у режимі *offline*); 80 доповідей представлено як стендові та заочні за такими науковими напрямами: фундаментальні аспекти корозії та корозійно-

но-механічного руйнування; воднева та газова корозія; нові корозійнотривкі матеріали та покриття; інгібіторний та біоцидний захист; електрохімічний захист; методи досліджень і корозійний контроль; протикорозійний захист обладнання нафтогазової, хімічної та енергетичної промисловостей.

Фахівцями Інституту електрозварювання було представлено 7 доповідей, що транслювалися у *online* режимі. Звичайно, в короткому повідомленні неможливо дати огляд всіх розглянутих питань, тому торкнемося більшою мірою тих, які стосуються напрямків наукових досліджень Інституту електрозварювання.

Корозія металів є однією із найпоширеніших причин передчасного, часто аварійного виходу з ладу металевих конструкцій і спричиняє величезні матеріальні збитки в різних галузях промисловості. Зокрема, низка доповідей була присвячена питанням надійної експлуатації трубопроводного транспорту. Так, вплив сірководню в нафтопродуктах, який може спричинити сірководневе корозійне розтріскування під напруженням труб зі сталі 17Г1СУ, висвітлено у доповіді М. Хоми. Відмічено, що в останні роки зростає кількість відмов промислових трубопроводів. За результатами вивчення дії сірководню та тривалості його контакту зі сталлю на корозійну стійкість трубної сталі 17Mn1Si зроблено висновок, що ця сталь при концентрації сірководню 1500 мг/л має низьку корозійну стійкість, що призводить до зростання ризику руйнування труб.

У доповіді Г. Никифорчина повідомлялося, що під час експлуатації у трубопроводах можуть утворюватися розшарування, як на лінійних ді-



Відкриття конференції КОРОЗІЯ-2020 (зліва направо: Похмурський В.І., Хома М.С., Назарчук З.Т.)



Учасники конференції КОРОЗИЯ-2020

лянках, так і на згинах труб. Підкреслено, що розшарування розташовуються на ділянках з відносно слабшою текстурою, паралельно напрямку прокату, який має анізотропію мікроструктури. Розшаровування зазвичай поширюється в окружному напрямку, що може викликати руйнування трубопроводу. Наводнювання металу зсередини труби призводить до накопичення молекулярного водню в певних місцях, наприклад, в міжзеренних включеннях і створює високий тиск, що сприяє формуванню та накопиченню мікрodefektів у трубі, погіршенню її механічних властивостей, зокрема пластичності та опору крихкому руйнуванню, що, при тривалій експлуатації, може призводити до порушення цілісності протяжних ділянок.

Обговорено вплив гідратоутворення на швидкість та локалізацію корозійних процесів на промислових трубопроводах (сталі 17ГС) у хлоридних середовищах (доповідач д.т.н. Л. Побережний). У доповіді представлено механізм впливу газогідрату на корозію матеріалу трубопроводів та зроблено висновок про те, що газгидрат корозії не викликає, а лише інтенсифікує і локалізує вплив корозивних компонентів. На основі закономірності спільної дії механічних напружень, утворення хлоридів та гідратів на швидкість та локалізацію корозійного процесу, аналізі коефіцієнтів гідратоутворення для загальної та місцевої корозії, які складають відповідно 1,13 та 1,32, підтверджена гіпотеза про інтенсифікацію локальної корозії завдяки утворенню гідратів.

Проаналізовано нормативні документи у сфері захисту від корозії щодо нормованих значень показників захисних потенціалів (доповідач С. Осадчук). Показано, що у стандартах країн СНД значення мінімального захисного поляризаційного потенціалу нормуються в діапазоні від $-0,85$ В до

$-1,05$ В, у європейських – від $-0,65$ В до $-0,95$ В. Натомість у європейських стандартах відсутні вимоги до верхньої границі захисного потенціалу без омичної складової, що обумовлено диференційованим підходом до його вибору з урахуванням корозійної активності оточуючих ґрунтів. Проінформовано про надання чинності зміні № 1 до ДСТУ 4219, в якій встановлено, що для сталевих трубопроводів з рівнем міцності вище 580 МПа, поляризаційні потенціали не повинні перевищувати $-1,10$ В. При цьому захисний потенціал повинен забезпечувати технічно достатній захисний ефект, при якому швидкість залишкової корозії металу трубопроводу менше $0,01$ мм/рік.

Доповідалося, що за результатами прискорених корозійних випробувань корозійно-механічна тривкість зварних з'єднань, отриманих високочастотним та дуговим зварюванням, практично не відрізняється (доповідач аспірант С. Прокопчук).

Для прогнозування залежності швидкості корозії сталі від температури у повідомленні д.т.н. Р. Джали запропоновано нову математичну модель, яка описує корозійне розтріскування сталевих труб біля нафтоперекачувальної станції. Модель базується на вдосконаленому співвідношенні типу Кеше для густини анодного струму, новому критерію міцності металу, методі оцінювання граничного стану сталевих трубопроводів, що знаходиться під тиском, та застосуванні оптимізації з використанням нейронної мережі. Для контролю корозійного стану підземних трубопроводів описано обладнання, однією з переваг якого є більша ефективність та інформативність при менших витратах праці.

Продемонстрована ефективність високочастотної механічної проковки (ВМП) для підвищення опору втомному руйнуванню таврових зварних

з'єднань з низьколегованої сталі 15ХСНД, що експлуатуються у помірному та морському кліматі (доповідач к.т.н. С. Соловей). Показано та ґрунтовно доведено, що використання технології ВМП є ефективним методом підвищення втомної довговічності зварних з'єднань на всіх стадіях експлуатації металевих конструкцій, у тому числі, тривало експлуатованих.

Командою мексиканських та українських науковців зроблено повідомлення щодо ефективності використання магнітного поля під час аргонодугового зварювання дуплексної нержавіючої сталі 2205 для підвищення тривкості проти локальної корозії та утворення корозійно-втомних тріщин (доповідач к.т.н. О. Білий).

Дослідження абсорбції водню зразками зі сталі 09Г2С, латуні, мельхіору та міді показало, що мідь в 17 разів менше наводнюється, ніж мельхіор та в 4,5 рази – ніж латунь, а швидкість контактної та щільної корозії сталі з цими металами практично однакова, без ознак локальної корозії. Враховуючи домінуючий вплив наводнювання на зародження тріщин в теплопередавальних трубках в процесі їх тривалої експлуатації, для промисловості рекомендовано виготовляти газоохолоджувачі турбогенератора з мідними теплопередавальними трубками (доповідач д.т.н. О. Нарівський). Для виготовлення газоохолоджувачів та холодильників масла, яке передбачає підвищення їх надійності та довговічності внаслідок зниження небезпеки розгерметизації з'єднань трубна решітка – теплопередавальні трубки, запропоновано нове технічне рішення, яке полягає у наплавленні на трубні решітки шару міді та наступному зварюванні його з мідними теплопередавальними трубками та розвальцьовуванням.

Досліджено складний антикорозійний пігмент на основі кальційвмісного цеоліту з осаждением цинком фосфат на його нанопористій поверхні (доповідач д.т.н. І. Зінь). Встановлено, що це ефективно уповільнює корозію алюмінієвого сплаву в розчині синтетичних кислотних дощів. Пігмент пригнічує підплівкову корозію металу біля дефектів алкідної фарби, що може бути перспективним інгібуючим компонентом фарби покривів для захисту конструкцій з алюмінієвих сплавів в промисловій атмосфері. Побічний продукт синтезу біодизеля – технічний гліцерин у концентрації 2,5 г/л ефективно інгібує корозію алюмінієвого сплаву в 0,1% розчині NaCl, а при підвищенні температури середовища до 353 К його захисний ефект все ще високий. Механізм пригнічення корозії обумовлений адсорбцією через функціональні гліцеринові функціональні групи на поверхні металу і утворює захисну бар'єрну плівку.

Результатами досліджень впливу термооброблення (гартування та штучне старіння) на корозійно-механічну тривкість зварного з'єднання тонколистового алюмінієвого сплаву системи Al-Mg-Si-Cu, отриманого неплавким електродом, показано, що експлуатаційні характеристики виробу в корозивному середовищі будуть визначатися тривкістю проти міжкристалітної корозії (доповідач к.х.н. Л. Ниркова).

Для ремонту корозійних зварних швів трубопроводів, що експлуатуються під водою, розроблено технологію для вологого підводного зварювання із використанням аустенітного наплавленого шару (доповідач д.т.н. С. Максимов). За результатами досліджень таких зварних з'єднань встановлено, що після корозійних випробувань у рухомому потоці та при періодичному зануренні з наступним згинанням на кут 180°, на зварних з'єднаннях з наплавленими феритним та аустенітним шарами пошкоджень у вигляді тріщини вздовж лінії сплавлення зварного шва з наплавленим шаром не утворилося, що підтверджує ефективність такої технології.

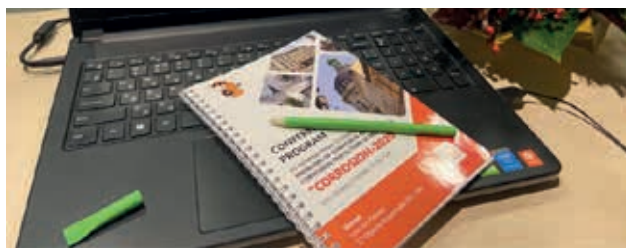
Німецькими вченими (доповідач Dr M. Wiegand) висвітлено питання щодо внутрішньої корозії трубопроводів холодного та гарячого водопостачання, опалення, у тому числі, у відносно нових будівлях, які не введені в експлуатацію. Як чинники виходу з ладу таких систем відмічені неоднорідність поверхні труб, що сприяє розвитку локальної корозії, якість води, окислювально-відновлювальний потенціал, рН, розчинений кисень, електропровідність, температура. Слід зазначити, що з аналогічними проблемами до фахівців Інституту звертаються представники різних експлуатуючих організацій, і проблема внутрішньої корозії трубопроводів є також актуальною для України.

Конференція «CORROSION-2020» сприяла конкретизації нових пріоритетних напрямків досліджень у галузі корозії та протикорозійного захисту матеріалів, а також встановленню ділових контактів між науковцями та виробничниками. Додаткова інформація про конференцію та збірка рефератів доповідей за посиланнями:

URL: <http://www.ipm.lviv.ua/corrosion2020>;

URL: http://www.ipm.lviv.ua/corrosion2020/en/Book_abstract_Corrosion2020.pdf.

Л.І. Ниркова, С.О. Осадчук



НАЙМАСШТАБНІШИЙ ЗВАРЮВАЛЬНИЙ ПРОЕКТ В ІСТОРІЇ

Трансаяскінський трубопровід довжиною 12288 км є одним з наймасштабніших зварювальних і будівельних проектів в історії. Протягом трьох років десятки тисяч зварювальників, незважаючи на суворий клімат і рельєф дикої місцевості Аляски, робили все щоб змонтувати і зварити разом всі частини 1220 мм трубопроводу. З тих пір було викачано більше 2,7 млрд м³ нафти з нафтового родовища Прадхо-Бей, яке знаходиться на півночі Аляски. Закінчується нафтопровід в місті Валдиз на узбережжі Тихого океану.

Будівництво такого величезного по обсягах роботи трубопроводу почалося в 1975 р. Для проекту довелося залучати робітників з усієї країни. Люди, які залучалися до зварювання трубопроводу в своїй більшості були від профспілкової організації Pipeliners Local 798. Ця організація спеціалізується на наданні зварників для реалізації великомасштабних трубопровідних проектів.

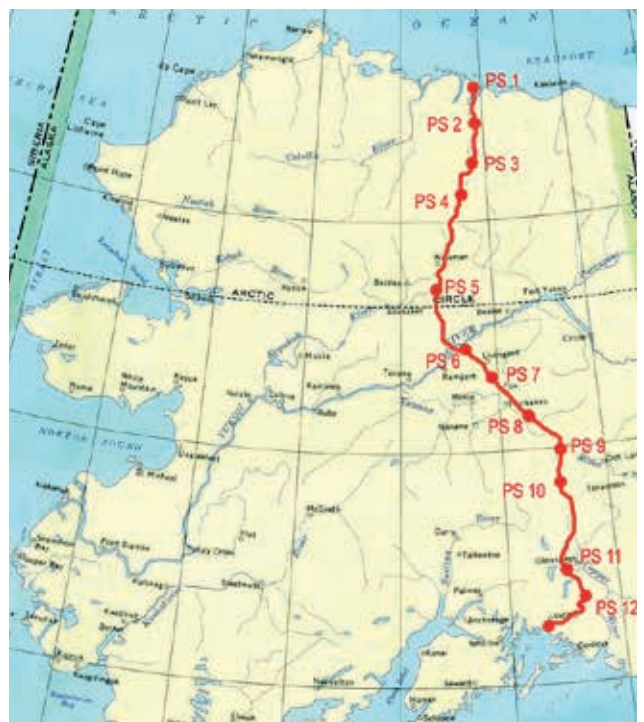
Зварювальники вперше приймалися на роботу за допомогою сертифікації, для якої потрібно було виконати декілька тестових зварних швів. Якщо зварнику не вдавалося зробити необхідні зварні шви, він уже ніяк не міг бути прийнятий на роботу за цим проектом. Причиною такого суворого процесу найму на роботу, ймовірно, було те, що зварювальники повинні були виконувати зварювання нової сталеві труби, яка була товща і більша ніж в повсякденній роботі. Раніше лише невелика кількість фахівців стикалося з такою товщиною металу з урахуванням всіх вимог щодо якості зварного шву і умов, в яких доводилося працювати.

Перший крок до будівництва газопроводу передбачав проектування і очищення ділянки довжиною в 800 миль. До роботи залучалися лише висококваліфіковані геодезисти. Робочим в свою чергу доводилося досить складно. Трансаяскінський трубопровід прокладали через ліс, після того, як шлях був очищений, взяли за буріння отворів у землі для опор з компенсаторами. Останні служили в якості основи для підтримки секцій трубопроводу з використанням напівкруглих опор. За допомогою крана опори опускалися в отвори, а потім приварювалися один до одного.

Якість зварних швів інженери управління перевіряли за допомогою радіографічного методу. Інспектори з контролю за якістю зварювання вказували дату перевірки прямо на опорному елементі. Прокладка траси нафтопроводу в цілому проводилася зигзагоподібною лінією. Таким чином стало можливим компенсувати напруги, що виникають

при зміщенні ґрунту під час сильних поздовжніх сейсмічних коливань. Крім того, така конструкція дуже ефективна при температурному розширенні металу.

Зварювальні роботи. Спочатку шви на трубопроводі повинні були мати середню ударну в'язкість 20 фут-фунт. Нижній поріг для цього параметра вимагав щонайменше 15 фут-фунт. Шви були зроблені з використанням зануреної зварювальної дуги і дроту, який містив 3 % нікелю. У загальній сукупності для трубопроводу було використано близько 80000 фунтів цього дроту. При цьому застосовувалися труби з стінкою завтовшки 11,7 мм на рівнинах і 14,3 мм в гірських районах, де потрібно підвищувати робочий тиск в трубопроводі. Межа плинності металу 422...492 МПа. В середині процесу будівництва, Департамент внутрішніх справ США та координаційна група по трубопроводу, що представляє штат Аляска, ввели більш жорсткі вимоги до ударної в'язкості зварного шву. Замість звичайного електроду, який спочатку використовувався для більшості монтажних швів, нові вимоги передбачали використання електроду E8010-G вищої якості. Ці електроди поставлялися на Аляску з Німеччини і були малознайомі для абсолютної більшості зварників. Протягом всього проекту, зварювальники працювали в переносних алюмінієвих кабінках, які захищали їх від вітру і інших несприятливих погодних явищ. Такі хитрощі забезпечували робочим





освітлення, давали можливість працювати в нічний час. Після зварювання обов'язково слідувала перевірка якості швів за допомогою рентгенівського випромінювання. Інспектори подорожували разом з бригадами зварників в фургонках, де рентгенівська плівка автоматично оброблялася і перевірялася.

31 травня 1977 р. Трансаяськинський трубопровід був готовий до експлуатації. Три місяці по тому танкер ARCO Juneau відплив з порту Вальдез з першим вантажем нафти, перекачаною по Трансаяськинському трубопроводу.

Труби виготовлені зі сталі, в незначній мірі легуюваною ванадієм, причому були використані три типи труб з товщиною стінок 12 і 14 мм. Мінімальна межа плинності сталі труб становить 4218, 4570 і 4920 кгс/см². Труби з поздовжнім швом були поставлені з Японії. Трубопровід діаметром 1220 мм виготовлявся з труб методом стикового зварювання, як звичайні трубопроводи. Зварювання проводилося на трасі відповідно до федеральних стандартів на забезпечення безпечної експлуатації. Стики на трубах з товщиною стінки 14,3 мм виконувалися методом дугового зварювання під флюсом за сім проходів, з яких 1–3 виконувалися всередині труби, а 4–6 – зовні. В основному застосовувалося ручне і напівавтоматичне зварювання. Зварювання труб довжиною 12 м в двотрубні секції здійснювалося на спеціалізованих трубоукладальних базах.



Випробування матеріалів для зварювання і розробка методів зварювання здійснювалися задовго до початку будівництва. Були вивчені майже всі існуючі види зварювальних матеріалів обладнання та технології. У процесі кожного випробування проводилося зварювання труб, які передбачалося використовувати для Трансаяськинського нафтопроводу, їх візуальний огляд і контроль якості зварних швів радіографічним методом. Потім труби розрізали на частини, з яких шляхом механічної обробки виготовлялися невеликі зразки для випробування в металургійних лабораторіях з руйнуванням зразка. Зразки проходили ударне випробування за методом Шарпі (метод з V-подібною розробкою), перевірку мікротвердості, випробування на зрушення з розкриттям тріщин, на розрив, на згин, а також випробування з руйнуванням зварного зразка з двома надрізами, передбачене стандартами нафтової промисловості США. Проводилися також випробування зварювальних машин і електродів з метою визначення меж сили струму, напруги та рекомендованих швидкостей зварювання. В процесі будівництва з трубопроводу періодично вирізалися зразки швів і спрямовувалися в лабораторію на дослідження. Якість зварного шву оцінювалося візуально, а потім проводилася рентгенодефектоскопія всіх швів із заповненням відповідного сертифіката. Зварні шви двотрубних секцій після зварювання на трубозастівельних базах також піддавалися радіографічному контролю і огляду з метою виявлення внутрішніх дефектів. Контроль якості зварювання після закінчення зварювальних робіт показав, що близько 4000 швів мали ті чи інші дефекти. На пе-



реварювання швів потрібні були додаткові витрати, які оцінюються в 30–40 млн. дол. Всього на трубопроводі було зварено близько 106 тис. стиків.

Детектування коливань ґрунту. Для детектування коливань ґрунту на Трансаяскінським нафтопроводі передбачалася спеціальна система, що складається з ряду акселерографів, встановлених на 10 перекачувальних станціях і в диспетчерському центрі в м. Валдез. Чутливість акселерографів становить мінімум 0,001 прискорення сили тяжіння. Зміни коливань ґрунту безперервно реєструються в цифровій формі.

Детектування тепловиділення. Унікальна система, що включає вертоліт «Jet Ranger», телевізійну апаратуру та обладнання для детектування інфрачервоного теплового випромінювання, забезпечувала вимір, реєстрацію та аналіз кількості тепла, що виділяється теплими трубами на наземних ділянках трубопроводу. Вертоліт, пролітаючи над трасою трубопроводу на висоті 30,5 м зі швидкістю 64 км/год, виконував роль повітряного термометра, що вимірює температуру майже 120 тис. труб. Система забезпечувала контроль теплового режиму трубопроводу і теплорегулюючих пристроїв. Комплект з 20 детекторів інфрачервоного випромінювання сканував поле зору об'єктива. Чутливість контрольно-вимірювальної апаратури становила $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Заповнення нафтопроводу почалося 20 червня 1977 р. Перша нафта поступила в резервуари терміналу Вальдес 1 серпня 1977 р. 3 листопада

2002 р. цей трубопровід витримав випробування при землетрусі магнітудою 7,9 балів в зоні регіонального розлому Деналі. Епіцентр землетрусу розташовувався в 80 км на захід від трубопроводу, але горизонтальні зміщення трубопроводу в зоні розлому досягали 2,5 м, а вертикальні – 1,5 м. Було зруйновано кілька демпферних конструкцій, але сам трубопровід не пошкоджено. При таких зсувах на ділянках довжиною близько 600 м труби розташовуються на рейкових і демпферних 133 конструкціях, що компенсують можливі переміщення ґрунтів землі в горизонтальних (до 6 м) і вертикальних (до 3 м) напрямках.

Одним з основних розробників Трансаяскінського проекту був уродженець Києва Ігорь Павлович Попов (він також брав участь в проектуванні мосту між Сан-Франциско і Оклендом), головним інженером будівництва нафтопроводу був Франк П. Молін.

У 2002 р. Американське товариство по зварюванню оголосило Трансаяскінський трубопровід видатним проектом в зварювальному виробництві. Alyeska Pipeline Service Company була вручена нагорода за реалізацію такої складної конструкції, яка до сих пір є символом інженерної думки. У 2006 р. відбулася перша за 29 років аварія, трубопровід на час ремонтних робіт був закритий. Незважаючи на це, завдяки модернізації та зниження швидкості потоку, передбачається, що нафта зможе текти через трубопровід до 2075 року.

За матеріалами закордонних публікацій.

КАК ЭТО БЫЛО (из воспоминаний ветеранов-сварщиков)

Обоим авторам этого материала посчастливилось участвовать в решении двух капитальных проблем, руководимых в ИЭС Борисом Евгеньевичем Патонем. Мы смогли ощутить ту доброжелательность, которую он проявлял к участникам работы, помощь в решении трудных научных вопросов и в контактах с руководителями ведомственных организаций, участвующих в производственном внедрении новой разработки.

Первая из этих работ – разработка и широкое внедрение в отечественную практику строительства индустриальным способом резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов. Остроту решению этой задачи придавало широко развернувшееся освоение новых месторождений нефти в стране: в Татарии, Башкирии, Астраханской области, в северных широтах Сибири. В основу разработки легло предложение научного сотрудника ИЭС Георгия Владимировича Раевского. Результаты работы позволяли расширить применение высококачественной механизированной электросварки в производственных условиях для сварки листовых рулонных заготовок днищ и стенок резервуарных хранилищ. В области резервуаростроения была достигнута возможность перенести на заводы выполнение сборки сотен отдельных стальных листов и механизированную сварку почти всех протяженных сварных стыков в полотнищах днищ и цилиндрических стенок резервуаров. После экспериментального строительства опытных резервуаров небольшой емкости были спроектированы специальные станды для изготовления рулонированных элементов резервуаров, на которых из стальных листов толщиной 5–10 мм собирали полотнища днищ резервуаров диаметром 25 м (из двух половин) и цилиндрических стенок резервуаров размером 12×72 м. Сварка выполнялась автоматами конструкции ИЭС под флюсом с обеспечением 100 % контроля качества швов. Следующим процессом, ранее не применявшимся нигде в мире, было сворачивание стальных полотнищ в многослойные рулонированные заготовки. Сворачивание происходило в специальных устройствах при каждом из этих станов. Крайняя кромка рулонов закреплялась приваркой временных планок. Одновременно разрабатывались процессы по установке рулонов стенки в вертикальное положение и их разворачивание по проектной окружности резервуара с одновременной установкой щитов крыши, завершавших сборку всей конструкции, включая сварку монтажных швов на стенке и на днище резервуара. Испытание резервуаров наливом воды подтверждало прочность и плотность всех швов нефтехранилища.

Размеры и вес рулонов – диаметр около 3 м, длина 12 м, масса до 45 т позволяли транспортировать их к месту монтажа на железнодорожных платформах. В первые годы этим методом были построены в различных местах страны тысячи резервуаров объемом по 5000 м³.

Эффективная технология индустриального изготовления применялась не только для нефтерезервуаров, но и для других крупных листовых конструкций с использованием автоматической сварки. Она получила распространение при изготовлении многослойных газгольдеров объемом 30000 м³, многих типов цилиндрических аппаратов в металлургической и химической промышленности; для силосов хранения сыпучих материалов и даже в судостроении при изготовлении оболочек обшивки каркасов небольших судов.

К концу 1960-х гг. на десятке заводов Главнефтемонтажа были построены мощные станы, на которых осуществлялась сборка полотнищ с листами из высокопрочной стали толщиной до 16 мм, их автоматическая сварка и сворачивание в рулоны. Конструкция станов была запатентована.

Для обеспечения нефтехранилищами расширяющейся нефтедобывающей промышленности размеры резервуаров были увеличены до 50000 м³. Соответственно, были разработаны новые марки высокопрочной стали для этих целей и методы ее автоматической сварки. Резервуары с высотой стенок 18 м поставлялись в виде пяти рулонированных полотнищ. Такие рулоны для перевозки грузились уже на сцепы из двух 12-метровых железнодорожных платформ.

Одновременно совершенствовались методы монтажа и сварки таких конструкций. По этой технологии было сооружено много резервуаров для хранения нефти не только в СССР, но и в других странах. Эта технология применялась и при сооружении изо-термических резервуаров для хранения сжиженных газов. Результаты успешной работы советских специалистов были представлены на нескольких конференциях в стране и за рубежом. Технологию строи-





тельства резервуаров из рулонов освоили в Польше, Болгарии, Югославии. За разработку и внедрение индустриального метода строительства резервуаров из рулонированных конструкций членам авторского коллектива было присвоено в 1958 г. звание Лауреатов Ленинской премии в области науки и техники. В том числе О.М. Иванцову и Б.В. Поповскому.

Другим примером осуществления большой научно-исследовательской работы коллективом ИЭС и других организаций под руководством Бориса Евгеньевича Патона стала разработка метода изготовления из большеразмерных труб путем автоматической контактной сварки многокилометровых газопроводов.

В 1970-е гг. в Советском Союзе шел активный поиск оптимальных решений для транспорта природного газа на дальние расстояния из районов добычи месторождений газа до самых разных отечественных потребителей, а также для поставки за рубеж. Газ транспортировался по трубопроводам на огромные расстояния (например, длина трубопровода из Западной Сибири до Франции более 5 тыс. км.).

В решении проблемы принимали участие научные и проектные институты, владельцы газотранспортных систем и организации внешней торговли. В те годы многих увлекала идея транспорта газа по трубопроводам большого диаметра. В Институте

строительства трубопроводов ВНИИСТ с участием д.т.н. О.М. Иванцова были разработаны оптимальные решения по эффективному транспорту природного газа на дальние расстояния. Это позволило повысить производительность трубопровода в три раза. Институты ЦНИИчермет и УралНИИчермет предложили марки сталей, пригодных для этих условий.

Самой яркой страницей трубопроводного строительства тех лет явилось сооружение трансконтинентального газопровода Уренгой – Помары – Ужгород. И темпы, и качество работ во многом предопределило применение последних научно-технических новшеств. Использованная здесь контактная сварка явилась настоящей технической революцией в трубопроводном деле. Контактносварочный внутритрубный комплекс «Север» – наибольшее достижение этого вида работ. Создатель «Севера» – Институт электросварки им. Е.О. Патона. Руководили этой работой Б.Е. Патон и С.И. Кучук-Яценко. Работа была отмечена Государственной премией в области науки и техники.

Отец и сын Патоны являются выдающимся примером успешной научной и инженерной деятельности в мировой науке.

О.М. Иванцов, Б.В. Поповский

Наплавлення стало простим як ніколи завдяки системі Fronius Compact Cladding Cell

Корозія, абразивне зношування та вплив агресивних хімічних речовин становлять неабияку загрозу для металевих деталей. Наплавлення дає змогу захистити такі деталі від шкідливого впливу зовнішніх факторів і збільшити їх довговічність. Це досить складний технологічний процес, але виробники можуть досягти високої якості нанесення захисного покриття за допомогою сучасних систем, таких як Fronius Compact Cladding Cell. Наплавлення (плакування) – це метод ремонту металевих деталей або підвищення їх корозійної й абразивної стійкості, що передбачає нанесення шару присадного матеріалу. Деталі з дешевих марок сталі зазвичай плакують особливими сплавами, такими як Alloy 50, CrMo 910 або Inconel 625. Використання деталей із недорогого основного матеріалу з високоякісним захисним покриттям дає змогу суттєво заощадити кошти. Плаковані вироби широко застосовують у аерокосмічній, енергетичній і нафтохімічній промисловості.

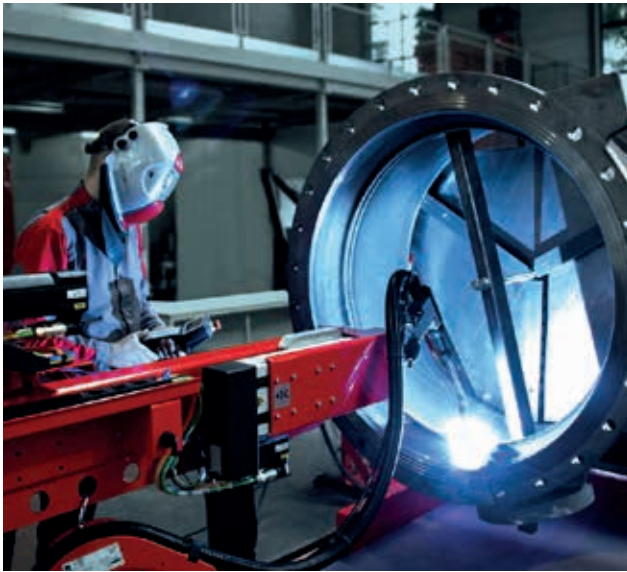
Компактна платформа для обробки деталей різної геометрії. Компанія Fronius взяла за основу просту та компактну систему плакування невеликих деталей і пристосувала її до виконання масштабніших робіт. Платформа Compact Cladding Cell дає змогу обробляти деталі діаметром до 1 м і вагою до 2500 кг. Максимальна довжина оброблюваних деталей становить 1,4 м, однак за потреби систему можна адаптувати для роботи з деталями довжиною до 1,9 м. Крім того, платформа забезпечує нанесення покриттів на внутрішню поверхню труб різного профілю (циліндричних, конічних, змінного діаметру тощо) із внутрішнім діаметром від 25 мм. За допомогою цієї системи можна обробляти деталі, які використовують у різноманітних галузях, зокрема напорні труби, клапани та вентилі для підводних складових об'єктів нафтогазової

промисловості (наприклад, противикидових систем), деталі насосів, ролики, ливарні форми й інші вироби, що мають витримувати значні навантаження під час експлуатації. Система Compact Cladding Cell вирізняється компактністю й економічністю. Площа, яку займає платформа, становить усього 6 м² (разом із завісою – 10 м²). Ми монтуємо всі компоненти, перш ніж відвантажити систему користувачам, тому її можна швидко зібрати та ввести в експлуатацію. Встановлення системи полегшує й те, що вона потребує лише одного джерела живлення. Проектуючи систему, фахівці компанії Fronius подбали про те, щоб користувачам було якомога зручніше працювати з нею, наприклад під час заміни котушок із дротом.

Найдосконаліші зварювальні технології. Компанія Fronius розробила досконалу технологію

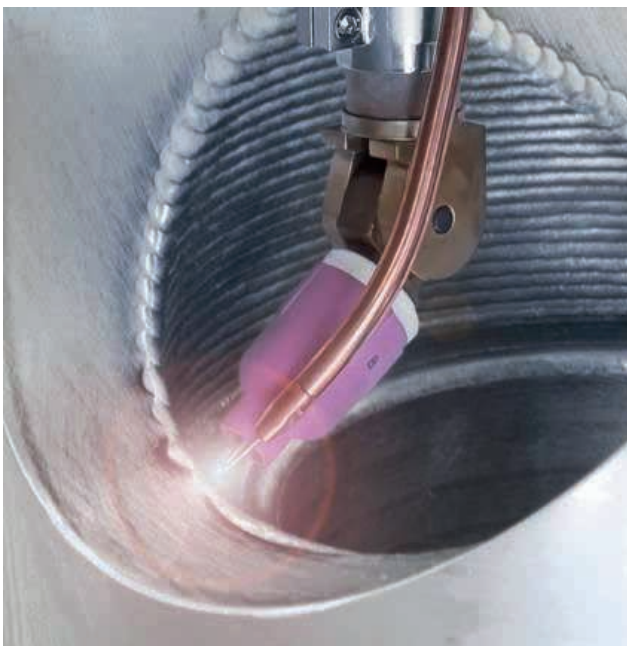


Compact Cladding Cell забезпечує розміщення деталей діаметром до 1 м і висотою до 1,4 м (можливе розміщення деталей висотою до 1,9 м), що важать до 2500 кг; органи керування системою HMI T21 забезпечують моніторинг фактичних значень і тривимірну візуалізацію в режимі реального часу

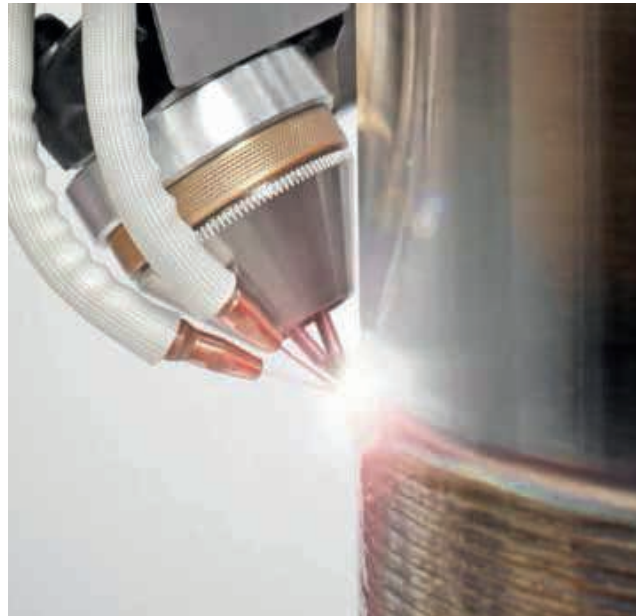


Наплавка внутрішньої поверхні труби

зварювання та налагодила безперебійний цифровий зв'язок між органами керування системою та джерелом живлення, тому робочі процеси вирізняються надзвичайною надійністю. Користувачі можуть вибрати один із двох процесів зварювання: TIG із «гарячим» дротом або SpeedClad Twin. Процес SpeedClad Twin засновано на тих самих принципах, що й TIG із «гарячим» дротом, однак він передбачає використання одразу двох вольфрамових електродів і дротів. Таке рішення дало змогу збільшити швидкість зварювання втричі порівняно зі звичайним процесом TIG із «гарячим» дротом від компанії Fronius. Усі модулі системи ідеально пристосовано для роботи один із одним, тому вона забезпечує надзвичайно високу якість зварювання. Горизонтальний поворотний стіл дає



Процеси SpeedClad Twin або TIG із «гарячим» дротом дають змогу нанести присадний матеріал на деталь таким чином, щоб він утворив захисний шар



Процес SpeedClad Twin забезпечує втричі більшу швидкість зварювання порівняно з процесом TIG із «гарячим» дротом завдяки використанню двох електродів і двох зварювальних дротів

змогу точно розмістити деталь, а стріла на стійці може виконувати маятникові рухи в горизонтальній площині. Стрілу можна обладнати найрізноманітнішими зварювальними пальниками, наприклад пальниками для плакування внутрішніх поверхонь, пальником для зварювання з обробкою крайок або пальником SpeedClad Twin. Синхронізація роботи механізму подачі дроту з можливістю використання одразу двох дротів і 4-роликового приводу дала змогу досягти абсолютної надійності в разі застосування джерела живлення Fronius TransTig 5000 або TransTig 2200. Останнє забезпечує не тільки роботу системи, а й попередній підігрів зварювального дроту. Варто зазначити, що для роботи за процесом SpeedClad Twin систему потрібно устаткувати двома такими пристроями.

Нові органи керування системою, що гарантують зручність у експлуатації. Нові органи керування системою HMI T21 дають змогу працювати не тільки ефективно, а й комфортно. Мобільна панель керування із 21-дюймовим сенсорним екраном забезпечує зручний доступ до всіх функцій і параметрів, а ПЗ – інтуїтивне керування та програмування всіх системних компонентів. За допомогою графічних засобів можна легко скласти потрібну програму зварювання. Завдяки функціям моніторингу фактичних значень і тривимірної візуалізації в режимі реального часу користувачі зможуть швидко налагодити спостереження за процесами, а також усіма параметрами зварювання. Органи керування системою також забезпечують створення різних облікових записів користувачів й індивідуальне надання дозволів. Зрештою, HMI T21 дає змогу обслуговувати систему дистанційно.

Welding in the World № 12, 2020

Volume 64, issue 12, December 2020

<https://link.springer.com/journal/40194/volumes-and-issues/64-12>

Багатоциклова втома тонкостінних з'єднань алюмінієво-літєвих сплавів при навантаженні з постійною та змінною амплітудою. *С. Мотруніч, І. Клочков, А. Покляцький*

Чисельне дослідження розподілу та розвитку напружень в різномірному зварному роторі 9Cr / 2.25Cr після зварювання та термічної обробки. *Mengjia Hu, Kejian Li, Jiluan Pan*

Водородне розтріскування при дуговому зварюванні високоміцних конструкційних сталей із модифікованим дуговим напильником. *T. Schaurp, M. Rhode, T. Kannengiesser*

Тривимірний чисельний модель короткого замикання при дуговому зварюванні GMAW. *K. Hashimoto, Y. Hirata, Y. Ogino*

Чисельне дослідження впливу параметрів зварювання тертям з перемішуванням на тепло- і масообмін в з'єднаннях аустенітних нержавіючих сталей. *Yuri C. da Silva, Francisco J. V. Oliveira Júnior, Cleiton Silva*

Вплив параметрів зварювання на структуру мікроз'єднання та поведінку руйнування зварних з'єднань при точковому зварюванні тертям з перемішуванням алюмінієвих сплавів 2060. *Yue Wang, Peng Chai*

Визначення факторів надрізу для зварних стикових з'єднань на основі чисельного аналізу та метамоделювання. *M. Oswald, J. Neuhäusler, K. Rother*

Чисельне дослідження сили руйнування лазерних та дугових зварних швів. *Chendong Shao, Haichao Cui, Fenggui Lu*

Локальні механічні властивості шаруватого матеріалу AA2519-AA1050-Ti6Al4V, що зварюється вибухом. *Dariusz Boroński*

Експериментальне та чисельне моделювання механічної поведінки паяного з'єднання мікромаштабу SAC305 на основі висоти з'єднання. *Limeng Yin, Cunguo Zuo, Zhongwen Zhang, Gang Wang, Zongxiang Yao, Zilong Su & Naiwen Fang*

Аналіз металопереносу та геометрії зварного шва при дуговому зварюванні з підігрівом дроту непрямым резистивним нагріванням. *T. Ungethüm, E. Spaniol, U. Füssel*

Покращення властивостей зварних точкових з'єднань сплаву AA7075 за допомогою хімічного видалення оксиду та термообробки після зварювання. *M. Gáspár, Á. Dobosy, K. Zheng*

Вплив тиску на характеристики мікроструктури, механічні властивості дифузійних з'єднань сплавів Ti-6Al-4V та TiAlNb. *J. Kundu, A. Chakraborty, S. Kundu*

Чисельне дослідження тепла, потоку та траєкторії частинок у зварювальній ванні при А-TIG зварюванні сталі 304L-SS. *S. Pourmand, Amin Ramiani Jafari, A. Ebrahimi*

Мікроструктурні та механічні властивості різномірних з'єднань дроту з нітинолу та нержавіючої сталі, отриманих методом мікроелектронно-променевого зварювання без присадки. *S. Hellberg, J. Hummel, P. Krooß, T. Niendorf & S. Böhm*

Премія за найкращу статтю в журналі «Welding in the World» за 2019 р.

«Аналіз потоків рідини та механізмів кристалізації під час зварювання вольфрамовим електродом в середовищі інертного газу за допомогою спостережень на місці». *A. Chiocci, C. Bordreuil, F. Soulie and F. Deschaux Beaume, 2019, 63, 2, 481–490.*

Премію за найкращу статтю в журналі «Welding in the World» щороку присуджує Міжнародний інститут зварювання (IIW). Нагорода базується на якості статті та її впливі. Основною метою наукової статті є ефективний та дієвий зв'язок з цільовою аудиторією. Якісна наукова стаття повинна інформувати читачів про прогрес у цій галузі, ставлячи прогрес у контекст існуючих знань. Мета премії – визнати досконалість у статтях, опублікованих у «Welding in the World», та заохотити інших авторів до публікації в журналі наукових робіт високого рівня.

ПЕРЕДПЛАТА 2021

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

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою бандероллю.

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

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

Передплата на електронну версію журналів.

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

Передплата через сайт видавництва:

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

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



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



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



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

РЕКЛАМА В ЖУРНАЛАХ

Реклама публікується на обкладинках і внутрішніх вклейках журналів.

Перша сторінка обкладинки – 200x200 мм.

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

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

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

Розміри журналів після обрізу 200x290 мм.

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

ВАРТІСТЬ РЕКЛАМИ

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

ВИДАВНИЦТВО

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