

З А В Т О М А Т И Ч Н Е 4 С В А Р Ю В А Н Н Я 2021

Автоматическая сварка

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Automatic Welding

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

Берднікова О.М. Фізико-механічні властивості зварних з'єднань високоміцних сталей з межею плинності 690...1300 МПа	3
Завдовеев А.В., Позняков В.Д., Гайворонський О.А., Денисенко А.М., Baudin T. Оптимізація за розрахунковим методом режимів імпульсно-дугового зварювання з використанням високолегованого зварювального матеріалу	10
Марченко А.Ю., Глот І.О., Скорина М.В. Вплив характеристик рідкого скла на якість формування покриття зварювальних електродів	16
Фальченко Ю.В., Петрушинець Л.В., Федорчук В.Є., Половецький Є.В. Дослідження впливу термічної обробки на міцність біметалевого Al-Ti стільникового заповнювача	23

ВИРОБНИЧИЙ РОЗДІЛ

Лабур Т.М., Яворська М.Р., Коваль В.А. Формування швів при зварюванні стиків з алюмінієвого сплаву АМг5М плавким електродом в монтажних умовах без застосування підкладного формуючого елемента та з ним	29
Недосєка С.А., Недосєка А.Я., Яременко М.А., Бойчук О.І., Овсієнко М.А. Метод акустичної емісії при оцінюванні стану зварних швів та їх службових властивостей. Частина 2. Практичне застосування	36
Пантелеймонов Є.О. Переносний модуль для термічної обробки зварних стиків залізничних рейок	49

ЗВАРЮВАННЯ ЗА КОРДОНОМ

Портальний стенд зі зварювальним роботом виробляє алюмінієві вагони для залізничного транспорту	53
Welding in the World № 3, 2021	55

ПРАКТИКУМ ЗІ ЗВАРЮВАННЯ

Як обрати зварювальний інвертор	56
---------------------------------------	----

ІНФОРМАЦІЯ

Нова дата проведення виставки SCHWEISSEN & SCHNEIDEN у вересні 2023 р.	58
Дисертації на здобуття наукового ступеня	59
Новий етап розвитку торгової марки Патон	60
Пам'яті С.І. Кучука-Яценка	62

CONTENT

SCIENTIFIC AND TECHNICAL

Berdnikova O.M. Physico-mechanical properties of welded joints of high-strength steel with the yield strength of 690...1300 MPa	3
Zavdoveev A.V., Poznyakov V.D., Gaivoronsky O.A., Denysenko A.M., Baudin T. Use of calculation method for optimization of pulse-arc welding modes using highly alloy welding material	10
Marchenko A.E., Glot I.O., Skoryna M.V. Influence of liquid glass characteristics on quality of coating formation of welding electrodes	16
Falchenko Yu.V., Petrushynets L.V., Fedorchuk V.Ye., Polovetskiy Ye.V. Investigation of heat treatment effect on the strength of Al-Ti bimetal honeycomb core	23

INDUSTRIAL

Labur T.M., Javorska M.R., Koval V.A. Weld formation in consumable electrode welding of butt joints of AMg5M aluminium alloy in site with a forming backing element and without it	29
Nedosieka S.A., Nedosieka A.Ya., Yaremenko M.A., Boichuk O.I., Ovsienko M.A. Method of acoustic emission at evaluation of the state of welds and their service properties. Part 2. Practical application	36
Panteleimonov E.O. Portable module for heat treatment of welded joints of railway rails	49

WELDING ABROAD

Portal stand with welding robot produces aluminium cars for railway transportation	53
Welding in the World № 3, 2021	55

WELDING WORKSHOP

How to choose a welding inverter	56
--	----

INFORMATIONS

SCHWEISSEN & SCHNEIDEN with new date in September 2023	58
Dissertation for a scientific degree	59
A new stage in the development of the Paton trademark	60
In memory of S.I. Kuchuk-Yatsenko	62



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



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. Пашчин,
В.Д. Позняков, І.О. Рябцев,
К.А. Юшенко;
В.В. Дмитрик, НТУ «ХПІ», Харків;
В.В. Квасницький, Є.П. Чвертко,
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ;
М.М. Студент, Фізико-механічний інститут
ім. Г.В. Карпенка НАНУ, Львів;
М. Зініград, Аріельський університет, Ізраїль;
У. Райсген, Інститут зварювання та з'єднань,
Аахен, Німеччина;
Я. Пілярчик, Інститут зварювання, Глівіце, Польща

Засновники

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

Адреса

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

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

Рекомендовано до друку
редакційною колегією журналу

Свідоцтво про державну
реєстрацію KB 4788 від 09.01.2001

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

Передплата 2021

Передплатний індекс 70031.

12 випусків на рік (видається щомісячно).

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

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

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

За зміст рекламних матеріалів
редакція журналу відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

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

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 Kazymyr Malevych Str.
Tel.: (38044) 200 2302, 200 8277
Fax: (38044) 200 8277
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/as

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

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for printing editorial board of the Journal

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

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

Subscription 2021

Subscription index 70031.

12 issues per year (issued monthly), back issues available.
\$216, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.

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

Subscription is possible for previous issues for any year.

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

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

ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ З МЕЖЕЮ ПЛИННОСТІ 690...1300 МПа

О.М. Берднікова

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

Робота присвячена встановленню закономірностей впливу особливостей структурно-фазового складу (зеренної, субзеренної, дислокаційної структур, тощо) металу зварних з'єднань високоміцних сталей різного класу міцності на їх механічні характеристики й тріщиностійкість шляхом визначення структурних критеріїв, що забезпечують необхідний комплекс цих властивостей. Досліджено структуру і властивості зварних з'єднань високоміцних сталей з межею плинності від 690 до 1300 МПа в залежності від швидкостей охолодження та зварювання, легування швів, умов термообробки та способів зварювання (дугове механізоване, лазерне, гібридне лазерно-дугове зварювання): конструкційних низьковуглецевих сталей бейнітно-феритного та бейнітно-мартенситного типу; високовуглецевих феритно-перлітного типу; легуваних середньовуглецевих сталей мартенситно-бейнітного типу спеціального призначення. Встановлено взаємозв'язок структурних параметрів з комплексом властивостей – міцністю, в'язкістю руйнування, рівнем локалізованої деформації та локальних внутрішніх напружень в металі зварних з'єднань. Показано, що при дотриманні певних співвідношень структурно-фазових складових, характеристики дислокаційної та субзеренної структури є визначальними для забезпечення міцності та тріщиностійкості металу зварних з'єднань високоміцних сталей. Отримано показники рівня локалізованої деформації в металі зварних з'єднань високоміцних сталей та встановлено як структурні складові впливають на тріщиностійкість металу. З метою забезпечення експлуатаційної надійності конструкцій при створенні наукоємних та перспективних технологій зварювання високоміцних сталей на основі матеріалознавчих експериментально-теоретичних досліджень встановлено структурні критерії, що гарантують необхідний комплекс механічних властивостей та тріщиностійкості цих з'єднань. Бібліогр. 12, рис. 4.

Ключові слова: високоміцні сталі, зварні з'єднання, структурно-фазовий склад, субструктура, щільність дислокацій, механічні властивості, локальні внутрішні напруження, локалізована деформація, тріщиностійкість

У різних галузях сучасної промисловості, у тому числі, будівельній, сільськогосподарській, транспортній, машинобудівній та оборонній, для виготовлення зварних металоконструкцій широко використовують низьковуглецеві, легувани середньо- та високовуглецеві високоміцні сталі. У теперішній час техніка та конструкції відповідального призначення потребують використання сталей високого класу міцності у досить великому діапазоні механічних властивостей та, відповідно, різного структурно-фазового складу. Так, в будівельній та транспортній промисловості сільськогосподарського призначення використовуються конструкційні низьковуглецеві сталі з межею плинності 350...740 МПа. Це сталі з феритно-перлітною, бейнітно-феритною та бейнітно-мартенситною структурою. Межа міцності таких сталей досягає до 490...940 МПа. Для високовуглецевих сталей феритно-перлітного типу, що застосовуються в залізничному транспорті, цей показник складає 910...1130 МПа. А для середньовуглецевих легуваних сталей мартенситно-бейнітного типу спеціального призначення межа міцності досягає 1500...1700 МПа. Застосування високоміцних сталей дозволяє не тільки зменшити масу конструкцій, але і підвищити їх технічні характеристики за рахунок забезпечення необхідного комплексу механічних властивостей – високих показників статичної та динамічної міцності, в'язкості руйнування та опору крихкому руйнуванню. Враховуючи той факт, Берднікова О.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9754-9478>
© О.М. Берднікова, 2021

що багато конструкцій, виготовлених з високоміцних сталей, є конструкціями тривалого використання, особливе значення набувають дослідження впливу структурних факторів на механічні властивості та тріщиностійкість з'єднань цих сталей. Найчастіше при виготовленні зазначених металоконструкцій використовують механізоване або автоматичне зварювання в середовищі захисних газів [1–3]. При цьому використовують такі режими зварювання, які б дозволили, з одного боку, забезпечити високу продуктивність, а з іншого – забезпечити необхідний комплекс механічних властивостей та тріщиностійкості зварних з'єднань. Останнім часом впроваджуються такі прогресивні технології, як лазерне та гібридне лазерно-дугове зварювання [4], що дає змогу отримувати зварні з'єднання зі значно меншими розмірами швів та зони термічного впливу, підвищити якість зварних з'єднань та продуктивність процесу у порівнянні з дуговим зварюванням.

Процеси структуроутворення в металі зварних з'єднань високоміцних сталей детально вивчаються в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України у відділі «Фізико-хімічних досліджень матеріалів», який на протязі багатьох років очолював д-р техн. наук, академік НАН України Г.М. Григоренко. Значний внесок у встановлення структурно-фазових змін, що відбуваються під впливом режимів зварювання внесла д-р техн. наук, професор Л.І. Маркашова. Її наукова діяльність присвячена комплексним дослідженням структурно-фазового стану мета-

лу зварних з'єднань сталей, сплавів, різнорідних металів та металів з неметалевими матеріалами, тощо (більш ніж 300 наукових робіт).

Основні технологічні роботи щодо отримання зварних з'єднань високоміцних сталей з межею пластичності від 690 до 1300 МПа було виконано у відділі «Зварювання легованих сталей» під керівництвом д-ра техн. наук, чл.-кор. НАН України В.Д. Познякава.

Експериментальні роботи по розробці нових технологій лазерного та гібридного лазерно-дугового зварювання конструкційних сталей було проведено у відділі «Спеціалізованої високовольтної техніки та лазерного зварювання» під керівництвом канд. техн. наук В.Д. Шелягіна.

Одержання надійних та якісних зварних з'єднань високоміцних сталей є актуальною проблемою, при вирішенні якої найбільш суттєве значення має детальне вивчення впливу структурно-фазового складу та конкретних параметрів структури, що формуються в металі швів та зони термічного впливу, на міцність та тріщиностійкість цих з'єднань [5–11]. Враховуючи, що окремі ділянки зони термічного впливу зварних з'єднань мають малі розміри, визначити їх механічні властивості традиційним шляхом (механічним випробовуванням зразків) не завжди представляється можливим, для цього можуть бути використані аналітичні методи оцінок, що базуються на результатах експериментальних досліджень структури.

Метою роботи було встановлення закономірностей впливу особливостей структурно-фазового складу металу зварних з'єднань високоміцних сталей різного класу міцності на їх механічні характеристики й тріщиностійкість шляхом визначення структурних критеріїв, що забезпечують необхідний комплекс цих властивостей [12].

Робота виконувалася на зварних з'єднаннях високоміцних сталей з використанням різних технологічних параметрів режимів зварювання (швидкостей охолодження та зварювання, умов термообробки, легування швів). Було обрано наступні три групи високоміцних сталей різного призначення та класу міцності:

1. Конструкційні сталі бейнітно-феритного та бейнітно-мартенситного типу (alform 620M; 17X2M; 14XГН2МДАФБ; N-A-XTRA-700) з $\sigma_{0,2} = 690 \dots 740$ МПа та $\sigma_B = 760 \dots 940$ МПа.

2. Високовуглецеві сталі феритно-перлітного типу (колісна сталь марки 2; 65Г) з $\sigma_{0,2} = 785 \dots 980$ МПа та $\sigma_B = 910 \dots 1110$ МПа. Дослідження колісних сталей були спрямовані на встановлення закономірностей впливу різних, притаманних процесу відновлення залізничних коліс наплавленням технологічних факторів (режими наплавлення, температура попереднього підігріву з'єднань, системи легування наплавленого металу, тощо), на фазово-структурний стан та параметри структури різних ділянок зварних з'єднань.

3. Леговані середньовуглецеві сталі спеціального призначення мартенситно-бейнітного типу (броньові – сталь типу 30X2H2MФ та Miilux Protection 500) з $\sigma_{0,2} = 1300 \dots 1500$ МПа та $\sigma_B = 1500 \dots 1700$ МПа. Основними проблемами при виготовленні відповідальних зварних вузлів і корпусів при зварюванні колісної броньової техніки спеціального призначення із термозміцнених високоміцних сталей є те, що внаслідок зварювання такі сталі можуть знеміцнюватися, а в зварних з'єднаннях утворюватися тріщини. В значній мірі властивості таких з'єднань залежать від того, які структури при зварюванні утворюються в металі ЗТВ. Суттєво на це впливають режими зварювання та умови охолодження металу. Саме питанням структуроутворення в металі зварних з'єднань таких сталей присвячено дослідження.

Дослідження проводили на модельних зразках-імітаторах обраних сталей, що отримані за термічними циклами зварювання в інтервалі температур охолодження $600 \dots 500$ °C зі швидкістю $w_{6/5} = 2,5 \dots 28$ °C/c та з'єднаннях, що отримано дуговим механізованим зварюванням в суміші захисних газів (82%Ar + 18%CO₂) при використанні зварювальних дротів марок: Св-10ХН2ГСМФТЮ, Св-08Г2С, Св-08Х20Н9Г7Т, DMO-1G (для конструкційних сталей); Св-08Г2С; ПП-АН180МН (10ХН2ГСМФТЮ); Св-08ХМ; Св-08ХМФ (для колісних сталей); Св-10ГСМТ, Св-08Х20Н9Г7Т (для сталей спеціального призначення). Зварні з'єднання сталей 14ХГН2МДАФБ (Св-10ХН2ГСМФТЮ) та N-A-XTRA-700 (Union NiMoCr) отримували способами дугового зварювання при швидкості охолодження $w_{6/5} = 10 \dots 38$ °C/c та швидкості зварювання $v_{зв} = 18 \dots 50$ м/год (14ХГН2МДАФБ); лазерного зварювання при $w_{6/5} = 28 \dots 103$ °C/c ($v_{зв} = 18 \dots 50$ м/год, без зварювального дроту); гібридного лазерно-дугового зварювання при $w_{6/5} = 58 \dots 63$ °C/c ($v_{зв} = 72 \dots 110$ м/год). Зазначені режими гібридного лазерно-дугового зварювання забезпечують охолодження металу ЗТВ в інтервалі температур $600 \dots 500$ °C в дуже вузькому діапазоні, але значно відрізняються по параметру $v_{зв}$.

Запропоновано підхід, що базується на комплексі методів фізичного матеріалознавства. Дослідження мікроструктури металу швів і ЗТВ проводили методами світлової мікроскопії за допомогою мікроскопів Versamet-2 та Neophot-32. Мікротвердість металу вимірювали мікротвердоміром М-400 фірми «Лесо» при навантаженні 0,1 кг. Для виявлення зеренної і дислокаційної структури використовувались хімічні, електролітичні методи травлення та методи локального потоншення зразків. При дослідженнях вивчалися структури: фериту, аустеніту, перліту, мартенситу, бейніту верхнього та нижнього, та їх параметри – розмір пакетів та зерен, а також відповідні значення мікротвердості. Характер розподілу хімічних елементів, а та-

кож фрактографічні дослідження поверхні зламів зварних з'єднань зроблені за допомогою аналітичної растрової електронної мікроскопії (РЕМ, скануючий електронний мікроскоп SEM-515 фірми Philips, Нідерланди). Дослідженнями РЕМ вивчали характер руйнування металу по зонам зламів в залежності від навантаження та температури випробувань, об'ємну частку типу руйнування, розмір мікроелементів поверхні руйнування – фасеток крихкого чи квазікрихкого відколу, в'язких ямок, вторинних мікротріщин. Особливості субструктури та розподілу дислокаційної щільності у зварних з'єднаннях вивчали дослідженнями тонких фольг методом трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) на мікроскопі JEM-200CX фірми JEOL (Японія) при прискорювальній напрузі 200 кВ.

На базі експериментальних досліджень на всіх структурних рівнях зварних з'єднань високоміцних сталей проведено аналітичні оцінки міцності, в'язкості руйнування, локальних внутрішніх напружень та локалізованої деформації для кожного класу сталей. Визначено структурні фактори, які гарантують необхідний рівень механічних властивостей та тріщиностійкості зварних з'єднань. Аналітична оцінка міцності була виконана з урахуванням вкладу кожного зі структурних параметрів: розмірів пакетів, субзерен, рейкової структури, щільності дислокацій, розмірів карбідних фаз та міжкарбідних відстаней, об'ємної частки структур, що формуються в металі досліджених зварних з'єднань високоміцних сталей. Методами математичної обробки з урахуванням комплексу всіх структурних складових та їх параметрів удосконалено експериментально-розрахунковий підхід аналітичної оцінки міцності, в'язкості руйнування, рівня локальних внутрішніх напружень та локалізованої деформації, що формуються в структурі зварних з'єднань високоміцних сталей під впливом термічних циклів зварювання. Було визначено диференційний внесок у міцність структурних складових різних видів структурного зміцнення: тертя решітки, твердорозчинного, зеренного, субзеренного, дислокаційного, дисперсійного зміцнення.

Дослідженнями зварних з'єднань конструкційних низьковуглецевих сталей показано, що під впливом термічних циклів дугового зварювання при збільшенні швидкості охолодження від $w_{6/5} = 2,5$ до 28 °C/с змінюється характер перетворення переохолодженого аустеніту в проміжній області, що призводить до зміни фазового складу металу зварних з'єднань, об'ємних часток структурних складових, збільшення мікротвердості, загального подрібнення зеренної та пакетної структури, субструктури, збільшення скалярної внутрізеренної щільності дислокацій. Встановлено, що за рівних умов співвідношень структурно-фазових складових та параметрів зеренної (або пакетної) структури, характеристики дислокаційної та субзеренної структур є визначальними для забезпечення міцності та тріщиностійкості ме-

талу зварних з'єднань високоміцних сталей з межею плинності від 600 до 1300 МПа [12].

В металі зони термічного впливу зварних з'єднань низько- та високовуглецевих сталей з феритно-бейнітною та феритно-перлітною структурою основного металу рівномірний розподіл щільності дислокацій ($(2...4) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \leq \rho \leq (7...8) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$) при формуванні дрібнозернистої бейнітно-феритної або бейнітно-мартенситної структур, диспергуванні субструктури (до $0,2...1,4$ мкм) та наявності 50...80 % нижнього бейніту забезпечує високий рівень властивостей міцності та тріщиностійкості цих з'єднань. При дуговому зварюванні це реалізується при швидкостях охолодження $w_{6/5} = 20...28$ °C/с (для конструкційних феритно-бейнітних та бейнітно-мартенситних сталей) та $w_{6/5} = 5...10$ °C/с (для колісних високовуглецевих феритно-перлітних сталей) [12].

При дослідженнях зварних з'єднань легованих середньовуглецевих сталей спеціального призначення встановлено, що безградієнтний розподіл щільності дислокацій ($(7...8) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \leq \rho \leq 10^{11} \text{ см}^{-2}$) при формуванні подрібненої структури мартенситу відпуску з субструктурою розміром $0,4...0,8$ мкм та невеликою часткою (5...20 %) складової нижнього бейніту, забезпечує високі службові властивості отриманих з'єднань [12]. Такий структурний стан забезпечується у випадках, коли при зварюванні метал зони термічного впливу охолоджується зі швидкостями $w_{6/5} = 3,8...5$ °C/с. Відповідність цьому гарантує максимальний рівень в'язкості руйнування та тріщиностійкості зварних з'єднань. Показано, що найбільший показник в'язкості руйнування $K_{1C} = 110 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ отримано при $w_{6/5} = 3,8...5$ °C/с за рахунок формування переважно структури відпущеного мартенситу з невеликою часткою бейніту нижнього (до 12 %). При збільшенні швидкості охолодження до $w_{6/5} = 12,5$ та 21 °C/с значення K_{1C} знижується до 85 та 70 $\text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, відповідно. Таке зменшення показника K_{1C} пов'язано зі зменшенням частки нижнього бейніту, збільшенням частки мартенситної складової при присутності гартівного мартенситу.

У зварних з'єднаннях середньовуглецевих легованих сталей спеціального призначення з різними системами легування швів, виключно мартенситна структура при наявності гартівного мартенситу ($M_{\text{гарт}}$) при неоднорідному розподілі щільності дислокацій та її максимальних показниках ($\rho = (1...1,6) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$), формується при зварюванні дротами феритно-перлітного типу (Св-10ГСМТ) (рис. 1, а–в). У разі аустенітного зварювального матеріалу (Св-08Х20Н9Г7Т) в металі швів та ЗТВ щільність дислокацій значно зменшується ($\rho = (8...9) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$) при її рівномірному розподілі. При використанні Св-08Х20Н9Г7Т метал навколошовної ділянки ЗТВ має переважно структуру відпущеного мартенситу ($M_{\text{відп}}$, рис. 1, з, д) з невеликою часткою бейніту нижньо-

го (B_n , рис. 1, e). В обох випадках зварних з'єднань низькотемпературний відпуск (НТВ) призводить до зниження HV , рівномірного перерозподілу дислокацій та зниженню їх щільності. Більш значною мірою такі структурні зміни характерні для з'єднань, що отримані з використанням Св-10ГСМТ.

В металі конструкційних низьковуглецевих сталей з межею плинності більше ніж 600 МПа (14ХГН2МДАФБ; NA-XTRA-70) при високих швидкостях охолодження на режимах лазерного та гібридного лазерно-дугового процесів зварювання, у нижньому бейніті та відпущеному мартенситі в

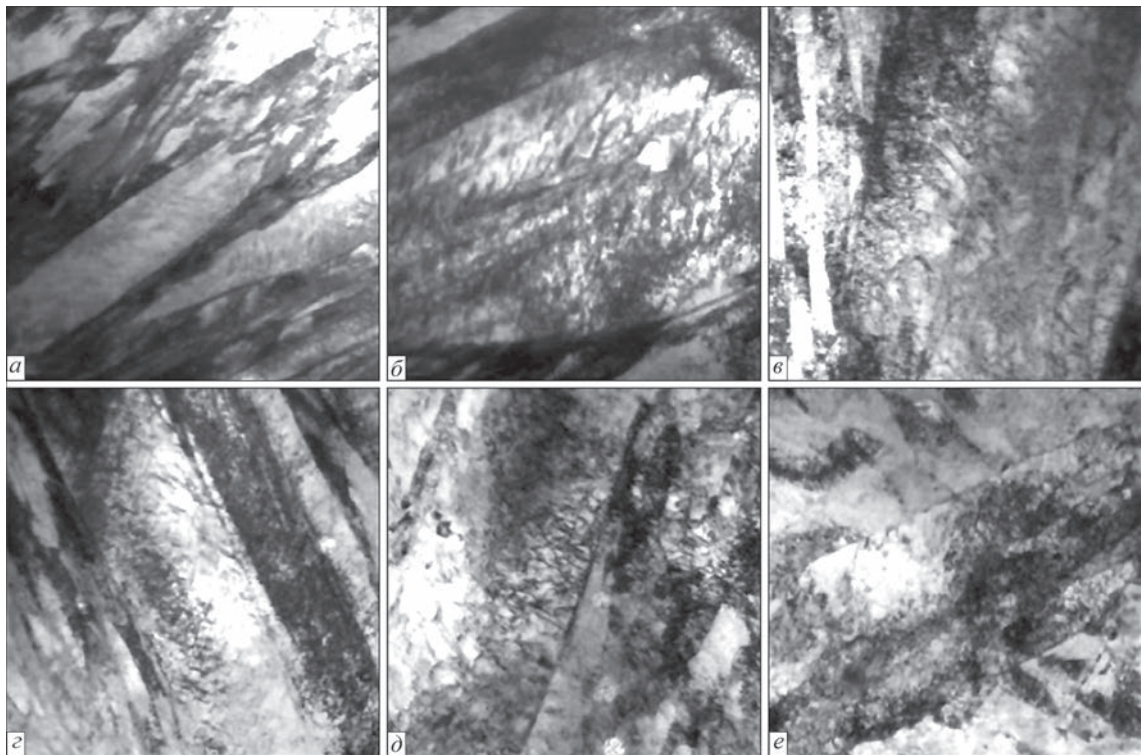


Рис. 1. Тонка структура $M_{гарт}$ ($a, б$), $M_{відп}$ ($в-д$) та B_n (e) в металі ЗТВ зварних з'єднань сталі типу 30Х2Н2МФ при використанні різних дров: Св-10ГСМТ ($a-в$); Св-08Х20Н9Г7Т ($г-е$) після зварювання ($a, \times 22000$, $б, г \times 35000$) та НТВ ($в \times 35000$, $д \times 52000$, $е \times 35000$)

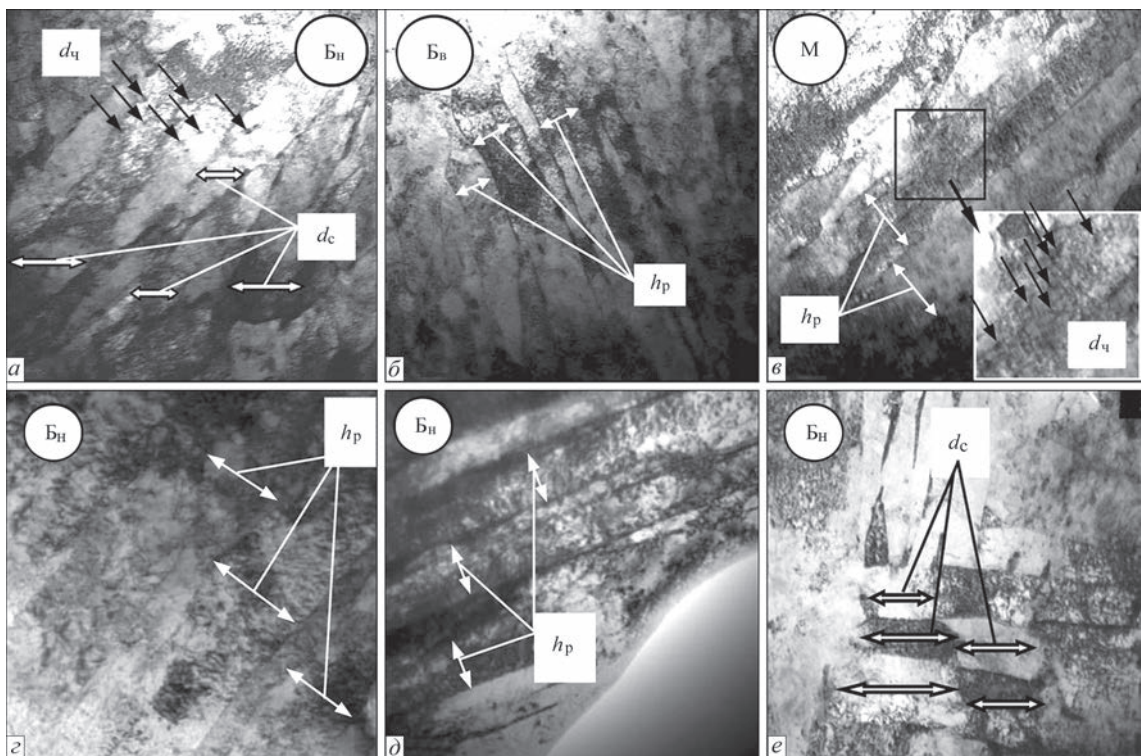


Рис. 2. Тонка структура металу ЗТВ зварних з'єднань сталей N-A-XTRA-70 ($a-г$) та 14ХГН2МДАФБ ($г-е$) при гібридному лазерно-дуговому зварюванні ($w_{6/5} = 58 \text{ } ^\circ\text{C/s}$; $v_{зв} = 72 \text{ м/год}$): $a, г, д, е - B_n$; $б - B_b$; $в - M_{відп}$, $\times 25000$

металі швів і ЗТВ утворюються наноструктури [9, 12]. Характерною особливістю структури, що формується при високошвидкісних режимах лазерного та гібридного зварювання високоміцних сталей при диспергуванні ширини рейок (h_p , рис. 2, а–д) B_n й верхнього бейніту (B_v) є наявність фрагментованої субструктури B_n розміром 80...300 нм та чіткими границями (рис. 2, а, е). При цьому як структура B_n , так і M_{vib} характеризуються наявністю наночастинок карбідних фаз. Розмір наночастинок карбідних фаз (d_c), рівномірно розподілених по всьому об'єму структури, становить 10...30 нм (рис. 2, а, в). Утворення наноструктурного стану у нижньому бейніті та відпущеному мартенситі буде підвищувати міцність, в'язкість руйнування та тріщиностійкість з'єднань конструкційних сталей.

При відповідній зміні режимів дугового, лазерного та гібридного лазерно-дугового зварюван-

ня конструкційних сталей змінюється співвідношення складових нижнього та верхнього бейніту, мартенситу, їх параметрів, об'ємної частки, а також щільності і розподілу дислокацій. При режимах з високою погонною енергією формуються переважно структури бейніту верхнього при загальному збільшенні розмірів зеренної, субзеренної структур з нерівномірним розподілом щільності дислокацій (від $\rho = (4...6) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ до $\rho = (1...2) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$). Зниження погонної енергії сприяє переважному формуванню структур бейніту нижнього при значному подрібненні зерна, субзерна з рівномірним розподілом щільності дислокацій ($\rho = (6...8) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$). Такі структурні зміни забезпечують комплекс властивостей міцності та в'язкості руйнування (рис. 3).

Оцінки рівня локальних внутрішніх напружень (τ_{in}), що наведені на діаграмах рис. 4, показують

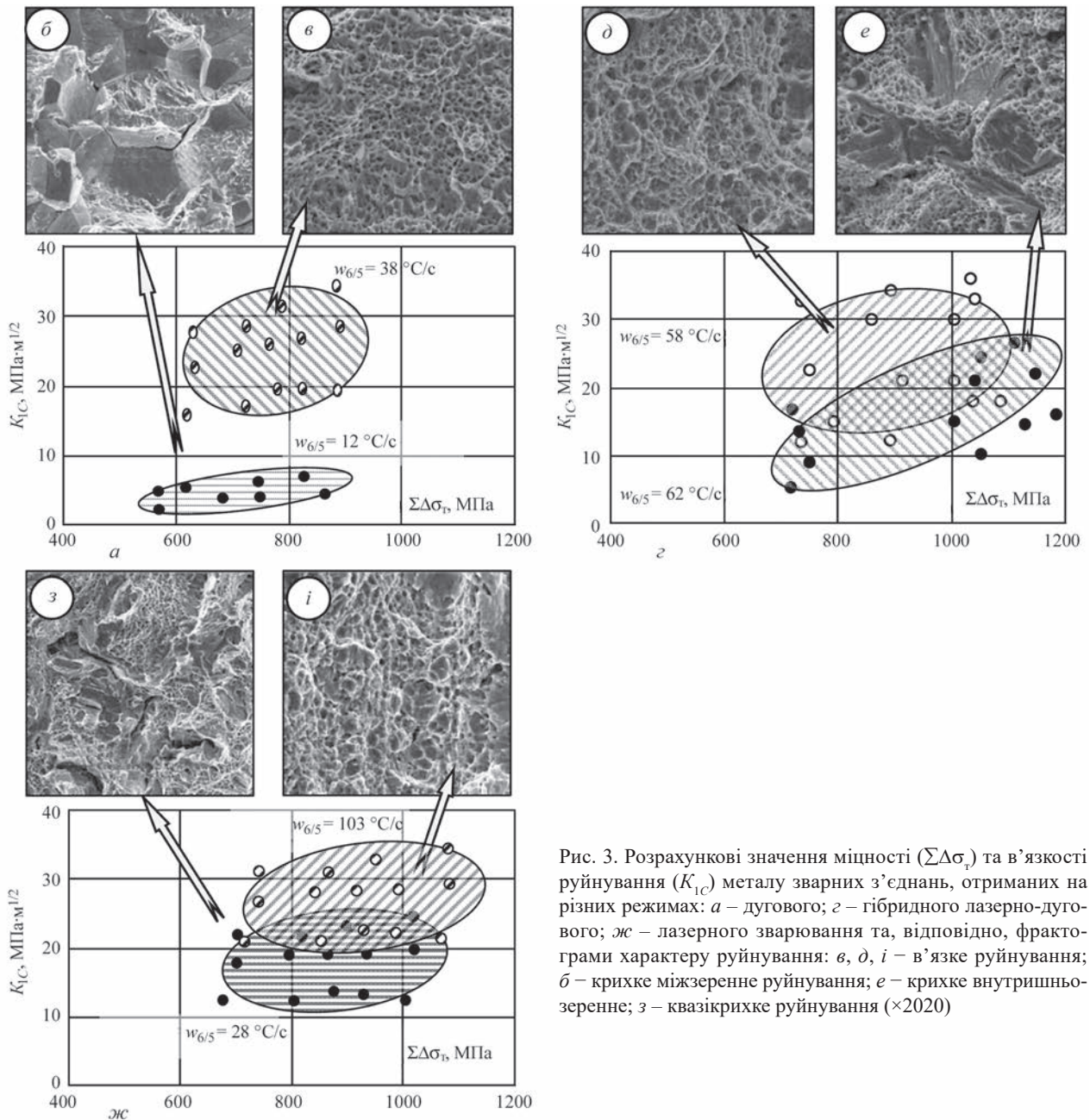


Рис. 3. Розрахункові значення міцності ($\Sigma\Delta\sigma_r$) та в'язкості руйнування (K_{1C}) металу зварних з'єднань, отриманих на різних режимах: а – дугового; з – гібридного лазерно-дугового; жс – лазерного зварювання та, відповідно, фрактограми характеру руйнування: в, д, і – в'язке руйнування; б – крихке міжзеренне руйнування; е – крихке внутрішньозеренне; з – квазікрихке руйнування ($\times 2020$)

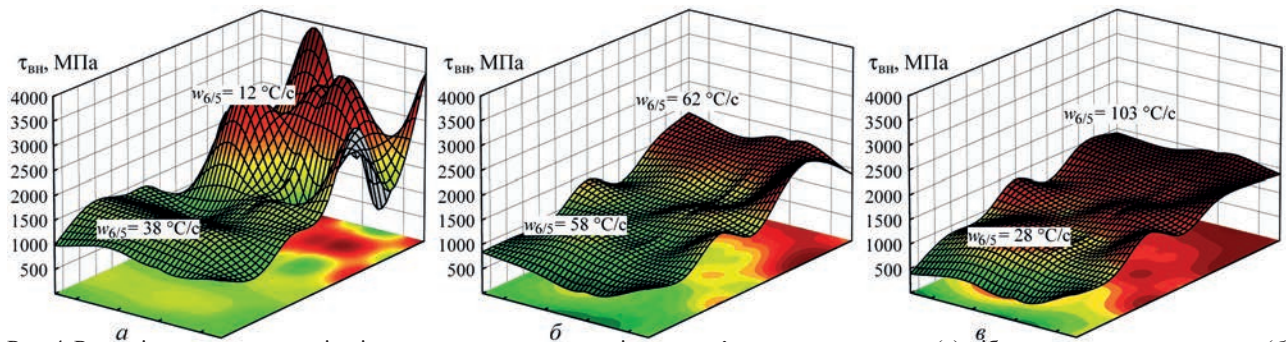


Рис. 4. Розподіл локальних внутрішніх напружень $\tau_{\text{вн}}$ в структурі зварних з'єднань при дуговому (а), гібридному лазерно-дуговому (б) і лазерному зварюванні (в): максимальні значення $\tau_{\text{вн}}$ при $w_{6/5} = 12; 62; 103$ °C/c; мінімальні $\tau_{\text{вн}}$ при $w_{6/5} = 38; 58; 28$ °C/c

наступне. Протяжні зони з максимальними значеннями $\tau_{\text{вн}}$ (1900...3700 МПа) формуються в умовах дугового зварювання при режимах з мінімальною швидкістю охолодження уздовж міжзеренних границь B_v в місцях протяжних дислокаційних скупчень ($\rho = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$), рис. 4, а. Це призводить до зародження мікротріщин в цих зонах і, відповідно, до зниження тріщиностійкості зварних з'єднань. Зменшення значень $\tau_{\text{вн}}$ характерно для зварних з'єднань, отриманих при гібридному зварюванні ($\tau_{\text{вн}} = 1470...1867$, рис. 4, б) і особливо – при лазерному зварюванні ($\tau_{\text{вн}} = 1470...1663$ МПа, рис. 4, в) чому сприяє формування в зоні зварювання дрібнозернистих структур B_v в поєднанні з рівномірним розподілом щільності дислокацій.

В результаті встановлено, що оптимальні властивості міцності, пластичності і тріщиностійкості зварних з'єднань високоміцних конструкційних сталей забезпечуються в умовах дугового зварювання при швидкості охолодження $w_{6/5} = 38$ °C/c, лазерного зварювання при $w_{6/5} = 103$ °C/c, і гібридного лазерно-дугового зварювання при $w_{6/5} = 58$ °C/c, що обумовлено формуванням найбільш дисперсних структур – бейніту нижнього, дрібнозернистого відпущеного мартенситу при відсутності протяжних дислокаційних скупчень – концентраторів локальних внутрішніх напружень.

Встановлення закономірностей впливу структурно-фазового складу металу зварних з'єднань високоміцних сталей з межею плинності від 600 до 1300 МПа, виконаних різними способами та з використанням різних режимів зварювання на їх фізико-механічні властивості, дозволило визначити умови, за яких в металі швів та ЗТВ будуть формуватися структури, що забезпечать їм необхідний комплекс механічних властивостей та високу тріщиностійкість. ТЕМ-дослідженнями встановлено взаємозв'язок параметрів субструктури, що формується, безпосередньо з дислокаційною структурою, а саме рівнем локалізованої деформації (ϵ_d) з полями $\tau_{\text{вн}}$, які зростають при підвищенні ρ [12]. Такі оцінки було проведено з урахуванням середньої відстані переміщення дислокацій (S , яка згідно з ТЕМ-дослідженнями відповідає параметрам субструктури) в процесі термодеомацій-

ного впливу для зварних з'єднань всіх досліджених високоміцних сталей.

Так, для бейніту нижнього $\epsilon_d \leq 20$ % при $\rho = (4...8) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ та розмірах його субструктури 0,1...0,8 мкм. В структурі бейніту верхнього характерне формування зон локалізованої деформації в діапазоні $10 \% \leq \epsilon_d \leq 70$ % при $\rho = (8 \cdot 10^{10} ... 1,4 \cdot 10^{11}) \cdot \text{см}^{-2}$. Значення рівня деформацій в мартенситних структурах також відрізняються. В відпущеному мартенситі $\epsilon_d \leq 50$ %, а в гартівному $40 \% \leq \epsilon_d \leq 140$ %. Виявлено, що суттєво знижує тріщиностійкість металу формування зон локалізованої деформації в діапазоні 50 %...140 % при $\rho = (1,1...2) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ в структурних складових бейніту верхнього та гартівного мартенситу.

Такі структури, як бейніт нижній та відпущений мартенсит забезпечують високий комплекс механічних властивостей металу зварних з'єднань високоміцних сталей. Для цих структур характерна відсутність протяжних концентраторів тріщиноутворення за рахунок відсутності дислокаційних скупчень – зон локалізації деформації, які значною мірою впливають на рівень локальних внутрішніх напружень.

Дослідження методом ТЕМ дозволили встановити взаємозв'язок параметрів субструктури, що формується, безпосередньо з дислокаційною структурою, а саме рівнем локалізованої деформації та полями внутрішніх напружень, які зростають при підвищенні щільності дислокацій. Показано, що одним з факторів впливу на рівень локалізованої деформації, окрім величини щільності дислокацій, є також субструктура металу, яка обумовлює перерозподіл дислокацій.

Висновки

Встановлено закономірності впливу технологічних параметрів (швидкості охолодження та зварювання, легування швів, умов термообробки) на структурно-фазовий склад, параметри зеренної, субзеренної, дислокаційної структур металу швів та зони термічного впливу зварних з'єднань низьковуглецевих (конструкційних), середньовуглецевих легованих (спеціального призначення) і високовуглецевих (колісних) сталей та взаємозв'язок структури з механічними властивостями цих з'єднань, рівнем локальних внутрішніх напружень та локалі-

зованої деформації, що формуються в різних структурних складових (бейніті нижньому та верхньому, гартівному та відпущеному мартенситі, тощо).

Проведено удосконалення експериментально-аналітичної методики оцінювання комплексу фізико-механічних властивостей по конкретним структурним параметрам всіх елементів структури, впроваджено математичну обробку даних. Встановлено кореляцію між структурними параметрами та показниками міцності, в'язкості руйнування, локальних внутрішніх напружень в металі зварних з'єднань високоміцних сталей, що дозволило класифікувати умови тріщиноутворення відносно комплексу структурних складових з урахуванням щільності дислокацій та особливостей субструктури.

Показано, як мікроструктура впливає на фізико-механічні властивості зварних з'єднань високоміцних сталей широкого діапазону міцності. Узагальнення структурних умов забезпечення високого рівня комплексу механічних властивостей та тріщиностійкості зварних з'єднань високоміцних сталей дало змогу запропонувати структурні критерії та вказати шляхи застосування їх до технологій та перспективних способів зварювання. На основі структурних критеріїв щодо фазового складу, диспергування зернової та субзернової структури при безградієнтному розподілі щільності дислокацій, розроблено науково обґрунтовані рекомендації для отримання якісних зварних з'єднань високоміцних сталей різного призначення та широкого діапазону міцності.

Список літератури/References

1. Патон Б.Е. (2008) *Избранные труды*. Киев, Ин-т электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины.
2. Paton, B.E. (2008) *Selected proceedings*. Kiev, PWI [in Russian].
3. Лобанов Л.М. (ред.). Київ, Академперіодика, Т. 2. (2018) *Science of materials, achievements, prospects*. Ed. by L.M. Lobanov. Kyiv, Akadempriodyka, Vol. 2 [in Ukrainian].
4. Poznyakov V.D. (2017) Welding technologies for production and repair of metal structures from high-strength steels. *Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 1, 65–73.
5. (2018) *Физические процессы при сварке и обработке материалов. Теоретическое исследование, математическое моделирование, вычислительный эксперимент*. Сб. статей и докладов. И.В. Кривцун (ред.). Киев, Международная Ассоциация «Сварка», 2018. ISBN 978-617-7015-74-0 (2018) *Physical processes in welding and processing of materials. Theoretical investigation, mathematical modeling, computational experiment*. In: Coll. of articles and reports. Ed. by I.V. Krivtsun. Kiev, IAW. ISBN 978-617-7015-74-0 [in Russian].
6. Madej, K., Swidergoł, S., Jakubiec, P. (2015) Analysis of Cracks in Welded Joints of Pipes with Eyes made of S890QL1 Steel. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 6, 11–22. DOI: <https://doi.org/10.17729/ebis.2015.6/2>
7. Laukhin, D., Pozniakov, V., Beketov, O. et al. (2020) Analysis of the effects of welding conditions on the formation of the structure of welded joints of low-carbon low-alloy steels. *Engineering Materials*, 844, 146–154.
8. Ostash, O.P., Kulyk, V.V., Poznyakov, V.D. et al. (2019) Influence of the Modes of Heat Treatment on the Strength and Cyclic Crack-Growth Resistance of 65G Steel. *Mater. Sci.*, 54(6), 776–782.
9. Kostin, V.A., Grigorenko, G.M., Poznyakov, V.D. et al. (2020) Structural Transformations of the Metal of Heat-Affected Zone of Welded Joints of High-Strength Armor Steels. *Ibid*, 55(6), 863–869. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00380-7>
10. Markashova, L., Berdnikova, O., Alekseenko, T. et al. (2019) *Nanostructures in Welded Joints and Their Interconnection with Operation Properties. Advances in Thin Films, Nanostructured Materials, and Coatings*. A.D. Pogrebnjak, V. Novosad (Eds.). Singapore, Springer, pp. 119–128. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-6133-3_12
11. Vimalraj C., Kah P., Layus P. et al. (2019) High-strength steel S960QC welded with rare earth nanoparticle coated filler wire. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102, 105–119.
12. Francois Njock Bayock, Kah, P., Layus, P., Karkhin, V. (2019) Numerical and Experimental Investigation of the Heat Input Effect on the Mechanical Properties and Microstructure of Dissimilar Weld Joints of 690-MPa QT and TMCP Steel. *Metals*, 9(3), 355, 1–19. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9030355>
13. Берднікова О.М. (2020) *Структурні критерії міцності та тріщиностійкості зварних з'єднань високоміцних сталей. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук*. Київ, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.
14. Berdnikova, O.M. (2020) *Structural criteria of strength and crack resistance of high-strength steel welded joints*. In: *Syn. of Thesis for Dr. of Tech. Sci. Degree*. Kyiv, PWI [in Ukrainian].

PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF HIGH-STRENGTH STEEL WITH THE YIELD STRENGTH OF 690...1300 MPa

O.M. Berdnikova

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 work is devoted to establishing regularities of influence of features of structural-phase composition (grain, subgrain, dislocation structures, etc.) of metal of welded joints of high-strength steels of different strength class on their mechanical characteristics and crack resistance by determining structural criteria providing the necessary set of these properties. The structure and properties of welded joints of high-strength steels with the yield strength from 690 to 1300 MPa was investigated depending on the rates of cooling and welding, alloying welds, heat treatment conditions and welding methods (mechanized arc, laser, hybrid laser-arc welding): bainite-ferrite and bainite-martensite type; high-carbon ferrite-pearlite type; alloyed medium-carbon steels of martensitic-bainite type of special purpose. The relationship of structural parameters with such set of properties as strength, fracture toughness, level of localized deformation and local inner stresses in the metal of welded joints was established. It was shown that in compliance with certain ratios of structural-phase components, the characteristics of dislocation and subgrain structure are decisive for providing strength and crack resistance of welded joints metal of high-strength steels. The indices of the level of localized deformation in the metal of welded joints of high-strength steels were obtained and it was established how structural components affect crack resistance of the metal. In order to provide the operational reliability of structures in the creation of science-intensive and promising technologies for welding of high-strength steels on the basis of material experimental and theoretical studies, structural criteria were established to provide the required set of mechanical properties and crack resistance of the mentioned joints. 12 Ref., 4 Fig.

Keywords: *high-strength steels, welded joints, structural-phase composition, substructure, dislocation density, mechanical properties, local inner stresses, localized deformation, crack resistance*

Надійшла до редакції 23.02.2021

ОПТИМІЗАЦІЯ ЗА РОЗРАХУНКОВИМ МЕТОДОМ РЕЖИМІВ ІМПУЛЬСНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИСОКОЛЕГОВАНОГО ЗВАРЮВАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ

А.В. Завдовєєв¹, В.Д. Позняков¹, О.А. Гайворонський¹, А.М. Денисенко¹, Т. Baudin²

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

²Université Paris-Saclay, CNRS, Institut de chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay, 91405 Orsay, France.

E-mail: thierry.baudin@u-psud.fr

Використання сучасних технологій імпульсно-дугового зварювання дозволяє суттєво підвищити якість зварних з'єднань. Разом з тим велика кількість можливих режимів зварювання стримують розвиток та впровадження імпульсних технологій у сучасному виробництві. Це пов'язано з тим, що при зварюванні пульсуючою дугою існують як мінімум чотири незалежно змінних параметри, що у сукупності потребує проведення великої кількості експериментів для з'ясування їх впливу. Для оптимізації кількості експериментів у даному дослідженні реалізовано експериментально-розрахунковий алгоритм Тагучі для процесу зварювання пульсуючою дугою з використанням високолегованого зварювального матеріалу. Показано кількісний вклад кожного змінного параметру зварювання у формуванні глибини проплавлення. Запропоновано оптимальні режими зварювання, що забезпечують задану глибину проплавлення. Бібліогр. 15, табл. 6, рис. 4.

Ключові слова: зварювання пульсуючою дугою, глибина проплавлення, алгоритм Тагучі, високолегований зварювальний матеріал

Імпульсно-дугове зварювання (ІДЗ) якісно відрізняється від традиційного зварювання в захисних газах [1–4]. Це зумовлено розширеними можливостями при ІДЗ впливати на процеси плавлення і переносу електродного металу, на структуроутворення в металі шва та ЗТВ зварного з'єднання, регулювати форму шва, глибину проплавлення тощо. На сьогодні цей спосіб зварювання знаходить все більш широке використання в світовій практиці при виготовленні відповідальних зварних конструкцій з високоміцних сталей [4–7].

На даний час провідними компаніями розроблено багато інверторних джерел зварювального струму, що побудовані на імпульсних технологіях для MIG/MAG зварювання. Так, шведська фірма «Esab» розробила джерело живлення «Aristo 500», американська фірма Hobart – «Ultra-Arc 350», німецька фірма EWM – Phoenix 501 pulse. Спектр завдань, які можуть вирішуватися при ІДЗ, роблять їх затребуваними у вітчизняному виробництві відповідальних металоконструкцій. Але слід зазначити, що ці джерела мають вбудовані програми з великим спектром

режимів, з яких вибрати оптимальний для конкретного варіанту зварювання досить важко.

При ІДЗ існує чотири змінних параметри режиму – базовий струм (I_b), струм імпульсу (I_P), частота (f) і шпаруватість (C). Тому при виборі режиму необхідно провести велику кількість експериментів. Відомо також, що існує експериментально-розрахунковий метод Тагучі [8], який дозволяє оцінити вплив кожного окремо з параметрів режиму на формування зварного з'єднання.

Метою даної роботи було провести вибір режимів ІДЗ із застосуванням методу Тагучі, що забезпечують задану глибину проплавлення V-подібної розробки без зазору стикового з'єднання високоміцної легованої сталі із зворотнім формуванням шва при застосуванні високолегованого зварювального матеріалу.

Методика експерименту. При виконанні досліджень було обрано параметри ІДЗ пульсуючою дугою, які наведено в табл. 1.

У зазначеному експерименті є чотири незалежно керованих параметра процесу і три експери-

Таблиця 1. Обрані параметри при ІДЗ

Параметр	Примітка	Рівень					
		Значення			Кодування		
		Мінімальне	Середнє	Максимальне	Мінімальне	Середнє	Максимальне
Струм імпульсу, А	A	160	200	240	1	2	3
Струм паузи, А	B	80	120	140	1	2	3
Частота, Гц	C	0,5	1	5	1	2	3
Шпаруватість, %	D	40	60	80	1	2	3

Завдовєєв А.В. – <https://orcid.org/0000-0003-2811-0765>, Позняков В.Д. – <https://orcid.org/0000-0001-8581-3526>,

Гайворонський О.А. – <https://orcid.org/0000-0002-5922-5541>, Baudin Т. – <https://orcid.org/0000-0002-6765-360X>

А.В. Завдовєєв, В.Д. Позняков, О.А. Гайворонський, А.М. Денисенко, Т. Baudin

ментальних рівня. Повною мірою для чотирьох факторів і трьох рівнів треба було б провести $3^4 = 81$ експеримент. Метод, запропонований Тагучі, використовує ортогональні масиви (OAs), щоб визначити в реальному часі мінімальну кількість експериментів для оцінки усіх факторів проектування. У такій експериментальній схемі кожен фактор оцінюється індивідуально і один не впливає на інший. Умови, що виникли в цьому дослідженні, тобто чотири параметра разом з їх трьома рівнями, підходять для вибору L9 матриці в якості експериментального проекту. У табл. 2 представлено дев'ять експериментальних випробувань в реальному часі, які складені за схемою L9 (3^4) відповідно до методу Тагучі [8, 9]. При цьому експерименти необхідно проводити в випадкових порядках з метою обходу джерел шуму.

Розрахунок співвідношення сигнал/шум. При проведенні експериментів використовуються різні параметри процесу, що дають різні значення «відгуку». У якості «відгуку» обрано глибину проплавлення (ГП). В ході експериментальних випробувань необхідно було оцінити вплив кожного обраного фактора за допомогою отриманих «відгуків», які можуть бути не унікальними і мати як бажані, так і небажані характеристики. За методом Тагучі співвідношення сигнал/шум (S/N) є відхиленням якісної характеристики від бажаного значення. Серед трьох доступних робочих значень – більш високе, більш низьке і номінальне (НВ, LB і NB) – слід обирати під час розрахунку співвідношення S/N .

Розрахунок співвідношення S/N виконували відповідно рівняння (1). Узагальнені розраховані співвідношення S/N для всіх експериментів представлено в табл. 3.

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{Y^2}}{n} \right). \quad (1)$$

Наступним кроком в аналізі є поділ впливу кожного окремого параметра на всі три розглянутих рівня і ранжування їх в порядку їх впливу до параметру відгуку. Це можливо тому, що обрана схема експерименту вкладається в ортогональну матрицю L9 [10].

Середня ефективність фактора розраховується шляхом ділення суми результатів випробувань, що включають фактор, на кількість випробувань, проведених на тому ж рівні (рівняння (2)):

$$\text{наприклад, } \langle S/N \rangle_{A1} = (S/N_1 + S/N_2 + S/N_3)/3. \quad (2)$$

Внесок окремих факторів на глибину проплавлення. Номінальний контроль остаточної відповіді вимагає знання ступеня вкладу окремих параметрів процесу, і їх можна оцінити за допомогою статистичного методу, а саме ANOVA [11]. У ме-

тодології ANOVA SS , SS' , D , V і P є типовими символами параметрів, що використовуються в наведеному вище аналізі для подання факторів, суми і скоригованої суми квадратів, ступеня свободи, дисперсії і процентного вкладу кожного фактора відповідно [12, 13]. Коротке пояснення перерахованих вище факторів представлено нижче.

Загальна сума квадратів SS_T може бути розрахована з відносини S/N з рівняння (3), в якому використовуються терміни «загальна кількість експериментів ($m = 9$)» та « i -е поточне співвідношення сигнал/шум η_i »:

$$SS_T = \sum_{i=1}^9 S / N_i^2 - \frac{1}{9} \left(\sum_{i=1}^9 S / N_i \right)^2. \quad (3)$$

Сума квадратів факторів, позначених як SS_p , розраховується за рівнянням (4), яке має наступні умови: фактор « p », номер його рівня як « j », повторення кожного рівня для перевіреного фактора p , як ' t ' ($=3$), підсумовування співвідношення сигнал/шум (S/N), що зв'яже цей коефіцієнт p і його рівень j як $S/N_{pj} = (S/N_1 + S/N_2 + S/N_3)$ для рівня $A_j = 1$, $(S/N_2 + S/N_3 + S/N_4)$ для рівня $A_j = 2$, $(S/N_7 + S/N_8 + S/N_9)$ для рівня $A_j = 3$

$$SS_p = \sum_{j=1}^3 \frac{(\sum S / N_{pj})^2}{3} - \frac{1}{9} \left(\sum_{i=1}^9 S / N_i \right)^2. \quad (4)$$

Ступінь свободи (DOF) є одним з елементів, який слід враховувати при розрахунку ANOVA [11]. D_p та V_p – позначення, що використовуються для представлення ступеня свободи і дисперсії фактора p . V_p визначається у відсотках з використанням SS_p по D_p відповідно до рівняння (5).

$$V_p(\%) = \frac{SS_p}{D_p} \cdot 100. \quad (5)$$

Підсумовування DOF, супроводжуване поруч випробувань і середнього значення, називається загальним DOF. Ступінь свободи для середнього значення завжди дорівнює 1. Отже, загальна ступінь свободи для цього експериментального дослідження дорівнює 8, що дорівнює кількості випробувань (9 випробувань) – 1, а ступінь свободи для параметрів дорівнює 2, що виходить шляхом вирахування 1 з числа рівнів параметрів (3 рівня).

Різниця між SS_p (сумою квадратів факторів) і твором дисперсії помилок та DOF кожного тестового фактора називається скоригованої сумою квадратів і позначається як SS'_p , який розраховується за рівнянням (6).

$$SS'_p = SS_p - D_p V_p. \quad (6)$$

Процентне співвідношення протестованих факторів між їх виправленою сумою та загальною сумою квадратів називається їх відсотковим внеском

і позначається як P_p . Рівняння (7) використовується для визначення P_p :

$$P_p(\%) = \frac{SS'_p}{SS_T} \cdot 100. \tag{7}$$

Результати та обговорення. Макрошліфи наплавлень, виконаних у відповідності до програми (табл. 2) наведені на рис. 1, де номер відповідає режиму наплавлення. Результати розрахунку глибини проплавлення для зазначених зразків наведено у табл. 3.

З використанням алгоритму Тагучі, враховуючі відповідні значення співвідношення сигнал/шум, розраховано середні значення для кожного рівня та параметру зварювання, які наведено у табл. 4.

Як видно з розрахунків, струм імпульсу для параметра глибини проплавлення ранжується за номером «1», що вказує його найбільший вплив на глибину проплавлення, ніж струм паузи, частота та шпаруватість.

Результати ANOVA дають інформацію про кількісний вклад кожного параметра.

Тест на відповідність для перевірки повторюваності. Після вибору оптимального рівня параметрів процесу проектування, це обов'язковий крок для визначення і перевірки поліпшення характеристик якості з використанням оптимального рівня параметрів проектування. Згідно [11–15], прогнозоване ставлення сигнал/шум для опти-

Таблиця 2. Виконання випробувань на основі проектного плану

Номер	Струм імпульсу, А		Струм паузи, А		Частота, Гц		Шпаруватість, %	
	Величина	Код	Величина	Код	Величина	Код	Величина	Код
1	160	1	80	1	0,5	1	40	1
2	160	1	120	2	1	2	60	2
3	160	1	140	3	5	3	80	3
4	200	2	80	1	1	2	80	3
5	200	2	120	2	5	3	40	1
6	200	2	140	3	0,5	1	60	2
7	240	3	80	1	5	3	60	2
8	240	3	120	2	0,5	1	80	3
9	240	3	140	3	1	2	40	1

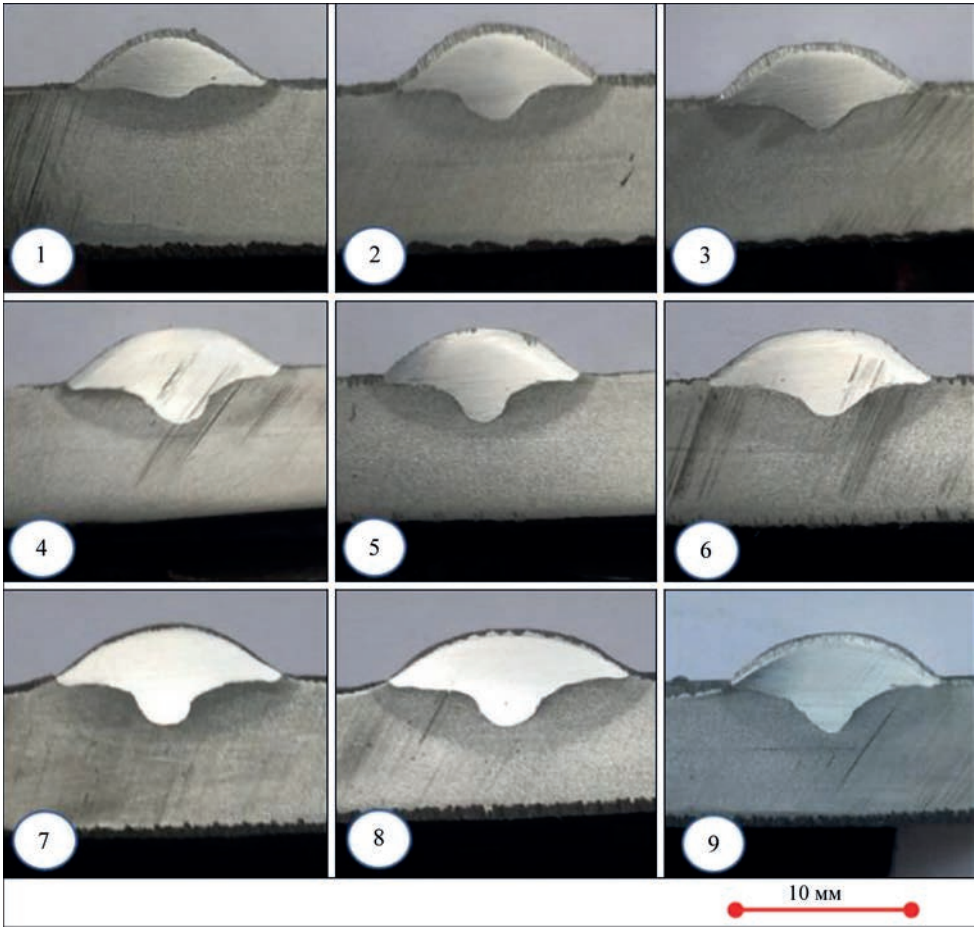


Рис. 1. Фото макрошліфів експериментальних наплавлень

Таблиця 3. Результати вимірювання глибини проплавлення та співвідношення сигнал/шум

Номер п/п	Параметри				Відгук		Q/V кДж/мм
	Струм імпульсу, А	Струм паузи, А	Частота, Гц	Шпаруватість, %	ГП	S/N	
1	160	80	0,5	40	0,88	-1,128	0,42
2	160	120	1	60	2,159	6,673	0,55
3	160	140	5	80	2,47	7,851	0,61
4	200	80	1	80	3,37	10,55	0,68
5	200	120	5	40	3,31	10,4	0,62
6	200	140	0,5	60	2,091	6,374	0,72
7	240	80	5	60	2,926	9,322	0,67
8	240	120	0,5	80	3,597	11,12	0,93
9	240	140	1	40	3,349	10,5	0,75

Таблиця 4. Розрахунок значень S/N за алгоритмом Тагучі

Параметр	Примітка	Рівень 1	Рівень 2	Рівень 3	Δ = max–min	Ранг
Струм імпульсу, А	A	4,465	9,107	10,31	5,85	1
Струм паузи, А	B	6,249	9,395	8,241	3,15	4
Частота, Гц	C	5,454	9,24	9,189	3,79	2
Шпаруватість, %	D	6,588	7,456	9,84	3,25	3

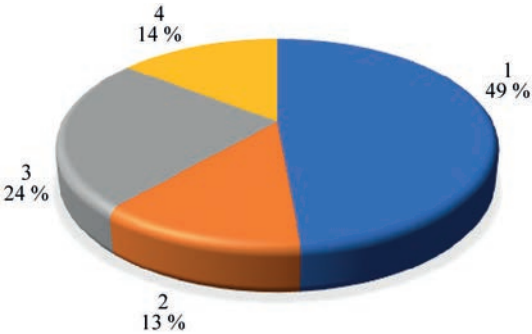


Рис. 2. Результати обчислень за методом ANOVA: 1 – струм імпульсу; 2 – струм паузи; 3 – частота; 4 – шпаруватість

Таблиця 5. Результати оцінки прогнозованого числа та підтвердження результатів для оптимального стану процесу PA-GMAW (ГП максимальна)

Параметри	A	B	C	D	S/N	
					Прогноз	Експеримент
Оптимальне кодоване значення	3	2	2	3	14,9	12,04
Оптимальне значення	240	120	1	80		
Відхилення = 19 %						

мального рівня параметрів процесу проектування може бути обчислене як

η̂ = η_m + ∑_{i=1}^n (η̄_i - η_m). (8)

У наведеному вище рівнянні η_m, η_i і n представляють середнє співвідношення S/N (табл. 4) і загальне число важливих проектів експериментальних параметрів, що впливають на якість. Прогнозоване співвідношення S/N може бути знайдено з використанням оптимальних параметрів процесу зварювання пульсуючою дугою (табл. 5, 6).

Результати перевірки прогнозованих режимів зварювання з метою отримання максимальної та

Таблиця 6. Результати оцінки прогнозованого числа та підтвердження результатів для оптимального стану процесу PA-GMAW (ГП мінімальна)

Параметри	A	B	C	D	S/N	
					Прогноз	Експеримент
Оптимальне кодоване значення	2	1	2	1	-1,13	-1,21
Оптимальне значення	200	80	1	40		
Відхилення = 7 %						

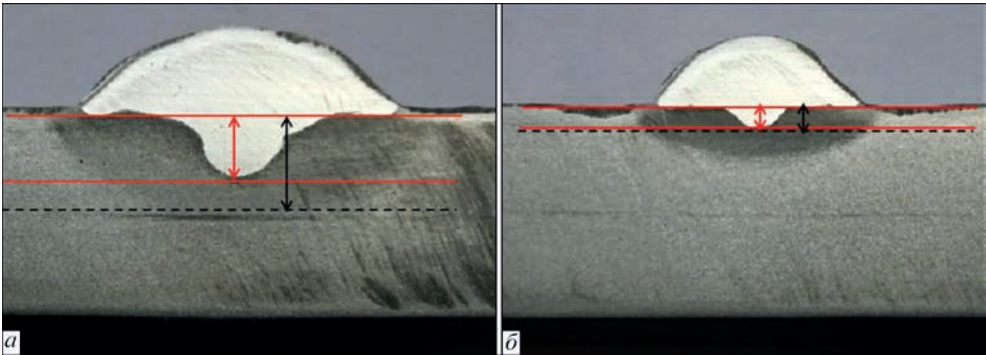


Рис. 3. Макрошліфи наплавлень, виконаних згідно розрахованим режимам, з максимальною (а) та мінімальною (б) ГП (пунктирна лінія – розрахункова величина проплавлення, суцільна – експериментальна)

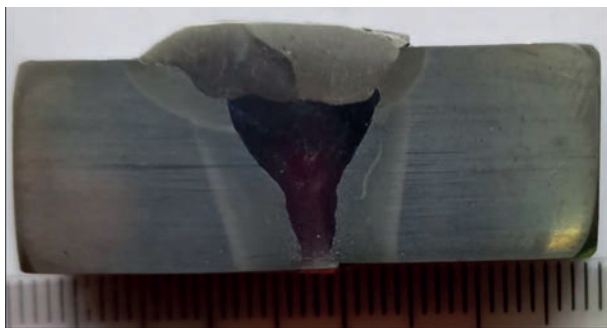


Рис. 4. Стикове з'єднання високоміцної сталі (V-подібне, без зазору, притуплення 4 мм)

мінімальної глибини проплавлення при зварюванні пульсуючою дугою наведено на рис. 3. Як видно, експериментально-розрахунковий алгоритм Тагучі дає можливість з високою точністю прогнозувати відгук досліджуваного параметра, а саме глибини проплавлення.

Результати досліджень були використані при виборі оптимального режиму ІДЗ кореневого шару V-подібного з'єднання високоміцної сталі, розробка якого була виконана без зазору і мала притуплення 4 мм (рис. 4). При цьому отримати належну якість зварного з'єднання, а саме забезпечити проплавлення кореня розробки із зворотним формуванням шва вдалося при виконанні вже першого експерименту.

Слід зазначити, що метод Тагучі може також використовуватися при виборі режимів ІДЗ багатопланових з'єднань з метою отримання оптимальних розмірів ЗТВ. Це є дуже важливим чинником, який суттєво впливає на технологічні та експлуатаційні властивості зварних з'єднань відповідальних металоконструкцій з високоміцних легованих термічно зміцнених сталей. Дослідження в цьому напрямку виконуються, результати будуть представлені в наступних публікаціях.

Висновки

1. Проведено дослідження впливу режимів імпульсно-дугового зварювання (струм зварювання, струм паузи, частота, шпаруватість) на глибину проплавлення при застосуванні високолегованого зварювального дроту при застосуванні експериментально-розрахункового методу Тагучі. Показана можливість керування параметрами зварювання пульсуючою дугою з метою отримання необхідної глибини проплавлення у широкому діапазоні.

2. Встановлено, що переважний вплив на глибину проплавлення має струм імпульсу. Далі за вагомістю впливу йдуть частота, шпаруватість та струм паузи. Кількісний аналіз дозволив встановити, що вплив перелічених параметрів розподіляється наступним чином: струм імпульсу – 49 %, струм паузи – 13 %, частота – 24 %, шпаруватість – 14 %.

3. Проведені дослідження дозволили запропонувати оптимальні режими імпульсно-дугово-

го зварювання, що забезпечують задані величини глибини проплавлення, а саме мінімальну та максимальну. Верифікаційний експеримент показав, що у рамках незначних відхилень прогнозовані значення глибини проплавлення корелюють з експериментальними.

4. Експериментально-розрахунковий метод Тагучі є потужним та перспективним інструментом, що може застосовуватися при виборі оптимальних режимів і розробці технологій імпульсно-дугового зварювання.

Список літератури/References

1. Poznyakov, V.D., Zavdoveev, A.V., Gajvoronsky, O.A. et al. (2018) Effect of pulsed-arc welding modes on the change of weld metal and haz parameters of welded joints produced with Sv-08kh20N9G7T wire. *The Paton Welding J.*, **9**, 7–12. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.09.02>
2. Palani, P.K., Murugan, N. (2006) Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding. *J. of Materials Processing Technology* 172, 1–10.
3. Tong, H., Ueyama, T. (2001) Quality and productivity improvement in aluminium alloy thin sheet welding using alternating current pulsed metal inert gas welding system. *Sci. Technol. Weld. Join.*, **6** (4), 203–208.
4. Rajasekaran, S. (1999) Weld bead characteristics in pulsed GMA welding of Al–Mg alloys. *Weld. J.*, **78**(12), 397–407.
5. Zavdoveev, A., Rogante, M., Poznyakov, V. et al. (2020) Development of the PC-GMAW welding technology for TMCP steel in accordance with welding thermal cycle, welding technique, structure and properties of welded joints. *Reports in Mechanical Engineering*, **1**, 1, 26–33.
6. Murray, P.E. (2002) Selecting parameters for GMAW using dimensional analysis. *Weld. J.*, **81**(7), 125–131.
7. Essers, W.G., Van Gompal. (1984) Arc control with pulsed GMA welding. *Ibid*, **64** (6), 26–32.
8. Ross, P.J. (1988) *Taguchi techniques for quality engineering: loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design*. New York, McGraw-Hill, 1988 Aug.
9. Phadke, M.S. (1995) *Quality engineering using robust design*. Prentice Hall PTR, 1995 Dec 1.
10. Ma, Y, Hu, H, Northwood, D, Nie, X. (2007) Optimization of the electrolytic plasma oxidation processes for corrosion protection of magnesium alloy AM50 using the Taguchi method. *J. Mater. Process. Technol.*, Feb 2, **182**, 58–64.
11. Wang, Y, Northwood, DO. (2008) Optimization of the polypyrrole-coating parameters for proton exchange membrane fuel cell bipolar plates using the Taguchi method. *J. Power Sources*, Oct 15, **185**(1), 226–32.
12. Magudeeswaran, G, Balasubramanian, V, Reddy, GM. (2008) Effect of welding processes and consumables on high cycle fatigue life of high strength, quenched and tempered steel joints. *Materials & Design.*, Oct 1, **29**(9), 1821–7.
13. Yousefieh, M, Shamanian, M, Saatchi, A. (2011) Optimization of the pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW) parameters for corrosion resistance of super duplex stainless steel (UNS S32760) welds using the Taguchi method. *J. Alloys Compd.*, Jan 21, **509**(3), 782–8.
14. Do Kim, K, Han, DN, Kim, HT. (2004) Optimization of experimental conditions based on the Taguchi robust design for the formation of nano-sized silver particles by chemical reduction method. *Chem Eng J.*, Nov 15, **104**, 55–61.
15. Yang WP, Tarng YS. (1998) Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method. *J. Mater. Process. Technol.*, Dec 1, **84**, 122–129.

USE OF CALCULATION METHOD FOR OPTIMIZATION OF PULSE-ARC WELDING MODES USING HIGHLY ALLOY WELDING MATERIAL

A.V. Zavdoveev¹, V.D. Poznyakov¹, O.A. Gaivoronsky¹, A.M. Denysenko¹, T. Baudin²

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

²Université Paris-Saclay, CNRS, Institut de chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay, 91405 Orsay, France.

E-mail: thierry.baudin@u-psud.fr

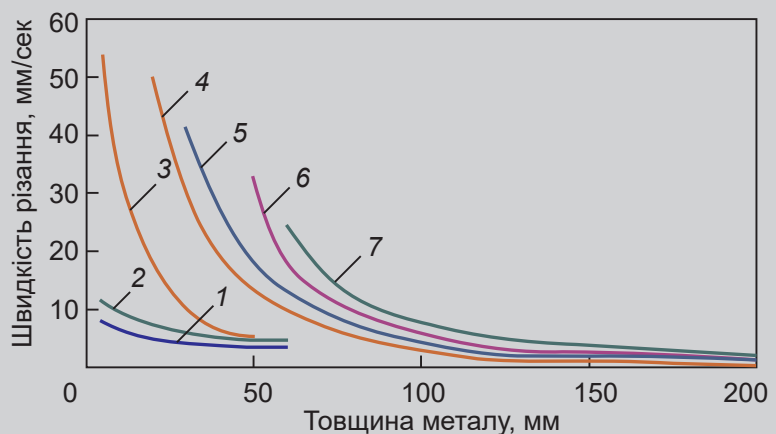
The use of modern pulse-arc welding technologies allows a significant improvement of the quality of welded joints. However, a large number of possible welding modes hinder the development and implementation of pulse technologies in modern production. This is associated with the fact that in pulsed arc welding at least four independently variable parameters exist, which in totality requires a large number of experiments to determine their impact. To optimize the number of experiments in this study, the experimental calculation Taguchi algorithm for the process of pulsating arc welding using a highly alloy welding material was implemented. The quantitative contribution of each variable welding parameter in the formation of the penetration depth is shown. The optimal welding modes were proposed, providing a set penetration depth. 15 Ref., 6 Tabl., 4 Fig.

Keywords: pulsating arc welding, penetration depth, Taguchi algorithm, highly alloy welding material

Надійшла до редакції 24.02.2021

РОЗРОБЛЕНО В ІЕЗ ім. Є.О. Патона

Нове обладнання і технологія різання металів підвищених товщин плазмовою дугою прямої та оберненої полярності



- 1 – ацетилен-кисневе безгратове різання;
- 2 – ацетилен-кисневе різання;
- 3 – плазмово-повітряне різання на прямій полярності;
- 4 – плазмово-повітряне різання на оберненій полярності (ППР ОП) 300 А;
- 5 – ППР ОП 400 А;
- 6 – ППР ОП 500 А;
- 7 – ППР ОП 600 А.

Розроблено і організовано серійний випуск в Україні п'яти марок обладнання потужністю 15–250 кВт для різання на прямій та оберненій полярності сталей і кольорових металів товщиною до 120–200 мм

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКОГО СТЕКЛА НА КАЧЕСТВО ФОРМИРОВАНИЯ ПОКРЫТИЯ СВАРОЧНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

А.Е. Марченко¹, И.О. Глот², Н.В. Скорина¹

¹ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН, РФ. 614018, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1

Исследована вязкость 6%-ых дисперсий Na-КМЦ в жидких Na- и K-стеклах в зависимости от температуры, а также вязкость чистых жидких Na-, K- и NaK-стекол от избыточного давления и температуры. Каждая из них представляет собой консистентную среду реальных электродных обмазочных масс. С использованием полученных результатов математическими методами проверено функционирование модели совместного влияния избыточного давления и диссипативного разогрева на вязкость, профиль скоростей и стабильность напорного потока электродных обмазок в ступенчатом канале в условиях формирования покрытия путем экструзионного нанесения на стальные прутки. Хотя имеется два разных по мощности конкурирующие источники изменения сдвиговой вязкости обмазки (температура и давление), проведенными расчетами не выявлены ситуации с неустойчивыми (пульсирующими) режимами течения через внезапно сужающийся канал, которые могли бы стать причиной нестабильности потока обмазки, а, следовательно, разнотолщинности электродных покрытий. По крайней мере, в изученном диапазоне размеров капилляров $L/R_k < 10$ и давлений, при которых реально прессуются электроды. Библиогр. 10, табл. 1, рис. 8.

Ключевые слова: дуговая сварка, покрытые электроды, технология производства, разнотолщинность покрытия, реология, вязкоупругость обмазок

Разнотолщинность покрытия – опаснейший дефект покрытых электродов для дуговой сварки плавлением. Он ухудшает технологические характеристики процесса сварки, качество швов и понижает эксплуатационную надежность изделий, изготавливаемых с применением сварки.

Разнотолщинность покрытия возникает при изготовлении электродов путем экструзионного нанесения пастообразной обмазки, трансформированной в высокоградиентный неизотермический напорный поток в формующей головке электродообмазочного пресса, на стальные прутки слоем кольцеобразного сечения. Скорость процесса до 800 электродов с диаметром стержня от 2-х до 6 мм в минуту, каждый длиной от 250 до 450 мм. Формующее давление на массу P – до 80 МПа. Поверхность оболочки покрытия на выходе из фильеры может в результате диссипативного разогрева достигать 90...100 °С.

В силу пока не выясненных до конца причин напорный поток обмазки неожиданно переходит в режим эластической турбулентности. Взаимодействуя в таком состоянии с расположенным внутри потока упругим металлическим сердечником, обмазка покрывает его неравномерным слоем. При этом канал между сердечником и калибрующей втулкой преодолевается заполняющей обмазкой тем с меньшими энергетическими затратами, чем значительно он отличается от симметричной

кольцевой конфигурации, хотя суммарная площадь сечения канала остается неизменной.

Реологические характеристики электродных обмазочных масс, как и других экструзионно формируемых пастообразных материалов, в состоянии напорного потока определяются градиентами скорости сдвиговой $\dot{\gamma}$, продольной $\dot{\epsilon}$, и циркуляционной (вращательной) деформации $\dot{\omega}$.

Естественная конвергентная зона, непосредственно примыкающая к плоскому входу калибрующего канала в головке электродообмазочного пресса или капиллярного вискозиметра, формируется путем взаимной конкуренции сдвиговой и продольной деформации [1]. Она приобретает суживающийся профиль, минимизирующий энергетические затраты на преодоление потоком сопротивления сдвиговому (с вязкостью η) и продольному течению (с вязкостью λ).

Значение эффективной сдвиговой вязкости в этом состоянии зависит, прежде всего, от степени разрушения ее коагуляционной структуры. Чем выше напряжение или скорость сдвига, тем больше разрушается структура и ниже вязкость обмазки. Влияние температуры и избыточного давления в канале учитывается поправкой на энергию активации вязкого течения a , и, соответственно, на пьезоэффекты, коэффициент β . Совместное влияние температуры T и избыточного давления P на эффективную сдвиговую вязкость

Марченко А.Е. – <https://orcid.org/0000-0003-2987-8928>, Глот И.О. – <https://orcid.org/0000-0002-2842-7511>,

Скорина Н.В. – <https://orcid.org/0000-0002-7339-7825>

© А.Е. Марченко, И.О. Глот, Н.В. Скорина, 2021

неньютоновских полимерных жидкостей оценивается по формуле [2]:

$$\eta = \eta_0 e^{-\alpha \Delta T} \eta_0 e^{\beta \Delta P}. \quad (1)$$

Из формулы (1) следует, что значение вязкости с увеличением температуры понижается, а с повышением давления возрастает.

По нашим данным, вязкость жидкостекляных суспензий КМЦ и жидких стекол, на основе которых они составлены, понижается с повышением и температуры, и давления, последнее – согласно нашим данным, по крайней мере, в пределах, не превышающих значений, при которых осуществляется опрессовка электродов. При более высоких давлениях вязкость жидких стекол, как многих других жидкостей, повышается [3].

Известно, что эффективная вязкость подавляющего большинства суспензий однозначно пропорциональна вязкости дисперсной среды, а их энергии активации и барические коэффициенты вязкости одинаковы, даже когда вязкость первых превышает вязкость вторых в сотни и тысячи раз [4]. В связи с этим мы использовали жидкие стекла и их 6%-ые дисперсии Na-КМЦ как реологические модели электродных обмазочных масс при оценке влияния на них нагрева и избыточного давления.

В настоящей статье изложены результаты проведенных нами исследований совместной роли эффективной, температурной и барической вязкостей в качестве возможного источника реологической нестабильности обмазок в условиях сдвиговой деформации.

Влияние температуры, напряжения и скорости деформации на сдвиговую вязкость жидкостекляных суспензий Na-КМЦ.

На рис. 1 сопоставляются политермы вязкости жидкостекляных суспензий Na-КМЦ, полученных с применением ротационного вискозиметра Реотест II.

Видно, что η жидкостекляных дисперсий КМЦ в диапазоне температур, до которых самопроизвольно разогревается обмазка в процессе нанесения на электродные прутки, является экспоненциальной функцией температуры $\eta(T) = \eta_0 e^{\alpha(\dot{\gamma}, \tau)/RT}$ и одновременно скоростью $\dot{\gamma}$ и напряжения сдвига τ . На рис. 1, а, б значения $\dot{\gamma}$ (кривые 1 и 2) составляют 1 и 100 с⁻¹, соответственно.

На позиции «в» они обозначены номинальными значениями $\dot{\gamma}$ в пределах от 0,8 до 175 с⁻¹, расположены вдоль политерм вязкости. Как видим, по мере повышения температуры вязкость суспензий действительно понижается, причем тем в большей степени, чем выше $\dot{\gamma}$ и τ , а также чувствительнее структура тестируемого материала к тепловому и механическому разрушению. В режимах течения $\dot{\gamma} = \text{const}$ и $\tau = \text{const}$ калиевые модификации стекол и суспензий из Na-КМЦ на их основе характеризуются большей энергией активации, чем натриевые, что, согласно с [5], можно представить как

$$\alpha_\tau > \dot{\gamma}, \quad \frac{\alpha_\tau}{\alpha_{\dot{\gamma}}} = 1 - \dot{\gamma} \left(\frac{\eta}{\tau} \right)_T \quad (2)$$

$$\alpha_\tau = \frac{d \ln \eta}{d(T^{-1})} \text{ при } \tau = \text{const};$$

$$\alpha_{\dot{\gamma}} = \frac{d \ln \eta}{d(T^{-1})} \text{ при } \dot{\gamma} = \text{const}. \quad (3)$$

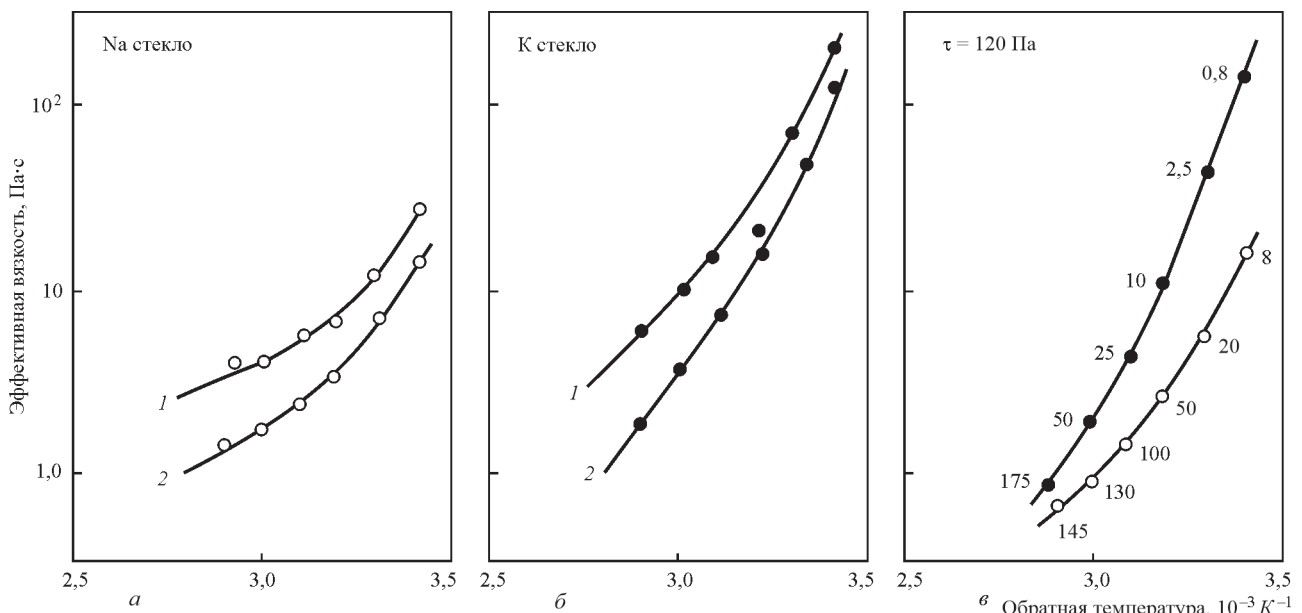


Рис. 1. Политермы вязкости 6%-ых дисперсий КМЦ марки 72/470 в жидком Na- и К-стекле с М = 2,9. Режим течения: $\dot{\gamma} = \text{const}$ (а, б) и $\tau = \text{const}$ (в). Остальные обозначения см. в тексте

Влияние избыточного давления на вязкость жидкого стекла. Влияние избыточного давления на вязкость жидких Na-, K- и комбинированных NaK-жидких стекол показано на рис. 2.

Как следует из приведенных данных, характер барических изменений вязкости жидких стекол, в принципе, можно представить степенной функцией $\eta(P) = \eta_0(1-P)^2$. В зависимости от состава и концентрации жидкого стекла ее график принимает в пределах использованного нами диапазона давлений вид либо полной параболы, либо левой или правой ее ветви. У низковязких жидких стекол параболы вырождается в прямую.

У жидких стекол, которые в большей или меньшей степени отреагировали на повышение давления, графики $\eta(P)$ имеют экстремальный, а не монотонно нарастающий вид, как у полимерных объектов. Наибольшее же понижение вязкости по существу приходится на давления, которые обычно не рекомендуется превышать при опрессовке электродов.

Параболическая форма $\eta = f(P)$ выявлена у жидких 2,9NaK- и 2,9Na-стекол с вязкостью 1250 мПа·с. У первого стекла ярче выражены минимум вязкости и левая асимметрия параболы, у второго – левая асимметрия параболы при меньшем минимуме вязкости.

С понижением вязкости сопоставляемых стекол до 570...500 мПа·с экстремальность кривых $\eta = f(P)$ существенно уменьшилась, но форма асимметрии осталась прежней. При понижении вязкости стекол до 100 мПа·с экстремальность и

ассиметрия кривых $\eta = f(P)$ полностью вырождаются (на рис. 2 они отображены пунктирной прямой).

С технологической точки зрения наиболее благоприятна форма кривых $\eta = f(P)$, которая выявлена у калиевых и натриево-калиевых жидких стекол со значениями модуля 3,0 и 3,3, соответственно, поскольку в них нет опасной с технологической точки зрения восходящей параболической ветви.

Поскольку барическая вязкость жидких стекол измерялась в наших опытах вискозиметром Гепплера, полученные результаты не могут быть грейдированы по τ и $\dot{\gamma}$. Принимая во внимание, что ход барической зависимости $\eta(P)$ в принципе совпадает с температурным изменением вязкости $\eta(T)$, барические коэффициенты вязкости по аналогии с активационными можно представить в виде [5]:

$$\beta_{\dot{\gamma}} = \frac{1}{\eta} \left(\frac{\eta}{P} \right)_{\dot{\gamma}, T} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{\tau}{P} \right)_{\dot{\gamma}, T}, \quad (4)$$

а их соотношение в виде

$$\beta_{\tau} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \frac{\dot{\gamma}}{\tau} \beta_{\dot{\gamma}} = \frac{d \ln \dot{\gamma}}{d \ln \tau} \beta_{\dot{\gamma}} \quad (5)$$

причем $\beta_{\tau} \geq \beta_{\dot{\gamma}}$, поскольку $\frac{d \ln \dot{\gamma}}{d \ln \tau} \geq 1$.

Чем выше температура, скорость и напряжения сдвига, тем меньше значения пьезокоэффициентов вязкости [5].

Отметим, что для идентификации условий, при которых получены значения вязкости P_0 и др. реологических характеристик, наряду с consistentными переменными τ и $\dot{\gamma}$, используют режимные символы напорно-расходных характеристик Q и P .

Уменьшение вязкости под влиянием избыточного давления и температуры вероятнее всего

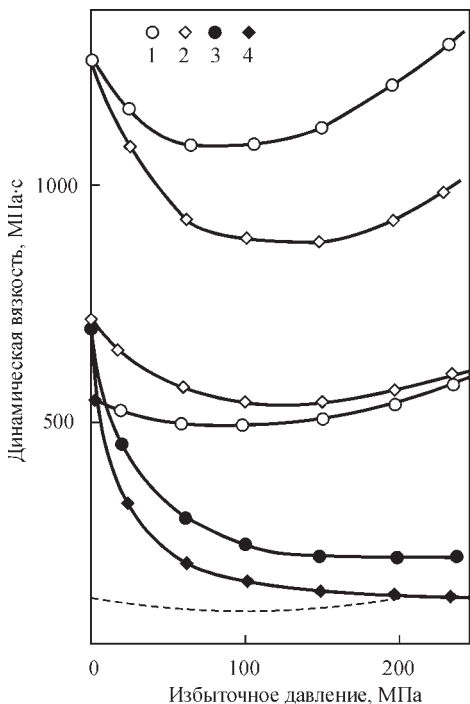


Рис. 2. Влияние избыточного давления на вязкость Na (1), NaK (2) и K (3) жидких стекол с модулем 2,9, а также NaK (4) жидкого стекла с $M = 3,4$; исходная вязкость стекол 500, 700 и 1250 мПа·с [3]

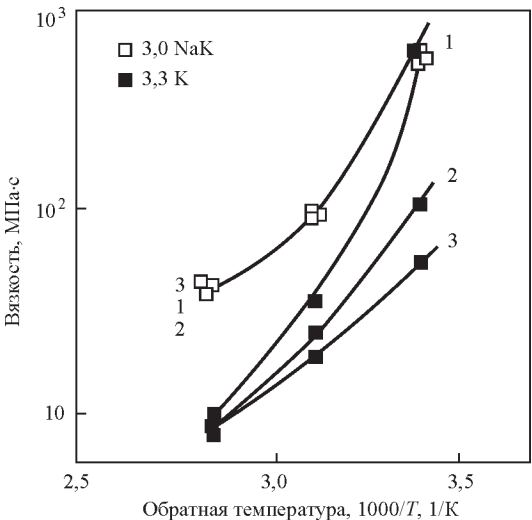


Рис. 3. Совместное влияние температуры и давления на вязкость K ($M = 3,3$) и NaK ($M = 3,0$) жидкого стекла с вязкостью 700 мПа·с. 1, 2, 3 – атмосферное и избыточное давление 10 и 20 МПа [3]

вызывается разрушением относительно слабых структурных связей в жидком стекле. Причем именно тех связей, которые образованы структурными элементами кремнийкислородных анионов (ККА), а не растворителя.

Действительно, влиянию давления в наибольшей мере подвержена вязкость калиевых и высокомодульных натриевокалиевых жидких стекол. Согласно представлениям о полиэлектролитической природе водных растворов щелочных силикатов структура именно таких жидких стекол, как правило, образуется слабыми, хаотичными, синергетическими связями.

Сами же структуры относятся к кластерному типу, чем и предопределяется их низкая стойкость против механического, активационного и барического разрушения [6, 7].

По влиянию на структуру объектов сопоставляемые виды воздействия можно считать практически равноценными друг другу. Это согласуется с результатами экспериментальной оценки влияния давления и температуры на вязкость, которые представлены на рис. 3 и 4.

С другой стороны, это согласуются с прочностью структурных связей Q^n , которые выявлены в структуре ККА жидких К-, а также высокомодульных NaK-стекол методом ЯМР-спектроскопии. Суммарная доля эластичных связей ($Q^2 + Q^3$) преобладает в структуре ККА калиевого $M = 3,65$ (76,5 %) и комбинированных NaK $M = 3,15$ жидких стекол (78,5 %). Минимальная доля наиболее жестких силоксановых связей Q^4 обнаруживается в структу-

ре ККА комбинированных жидких NaK (11,5 %), промежуточная – у LiNa (22,5 %), а максимальная у LiK модификаций (27,0 %), содержащих примерно 30 мол % сопутствующей составляющей. Как правило, эти же стекла демонстрировали и самый высокий синергетический подъем вязкости [8].

Совместное влияние давления и температуры на напорное течение электродных обмазок во внезапно сужающемся канале. Совместное воздействие на характер течения обмазочной массы двух факторов – избыточного давления и температуры, исследовалось с помощью математического моделирования. Анализировалось течение и теплообмен вязкой жидкости в цилиндрическом канале с внезапным сужением. Система уравнений движения и теплового баланса решалась численно методом конечных разностей [9]. Для оценки технологических свойств обмазочной массы использовалось соотношение

$$\eta(T, P) = \eta_0 \varphi(T) \psi(P), \quad (6)$$

где η_0 – вязкость при комнатной температуре и атмосферном давлении.

Температурное понижение вязкости учитывалось коэффициентом

$$\varphi(T) = A \exp(B/T), \quad (7)$$

а барические изменения – степенным законом (квадратным трехчленом):

$$\psi(P) = \left[1 - 5,7 \left(\frac{P}{10^9} \right) + \left(\frac{P}{10^9} \right)^2 \right], \quad (8)$$

где A – предэкспоненциальный множитель; B – энергия активации вязкого течения.

Принятое реологическое соотношение (6) позволяет получать перепады давления в канале от 20 МПа при расходе 1 л/мин до 170 МПа при расходе 10 л/мин.

Область течения моделировалась сопряжением цилиндрического резервуара (расходного цилиндра) и капилляра с соотношением диаметров $D_R/d_k > 5$, при котором отсутствует стерический эффект, т.е. обеспечивается независимость характера течения в капилляре от течения в резервуаре. Размерность использованной расчетной сетки (15×15 в резервуаре и 8×6 в капилляре) выбрана из соображений сочетания приемлемой точности и экономичности вычислений. Расход обмазки принят равным 10 л/мин: в этом случае моделируются реальные условия истечения, при которых в капилляре реализуется участок как уменьшающейся, так и нарастающей вязкости жидкого стекла [3]. Серия численных экспериментов продемонстрировала роль каждого из указанных факторов (температуры и перепада давления) при формировании потока в капилляре. Расчеты показывают, что основная часть перепада давления в канале с внезапным сужением формируется в капилляре.

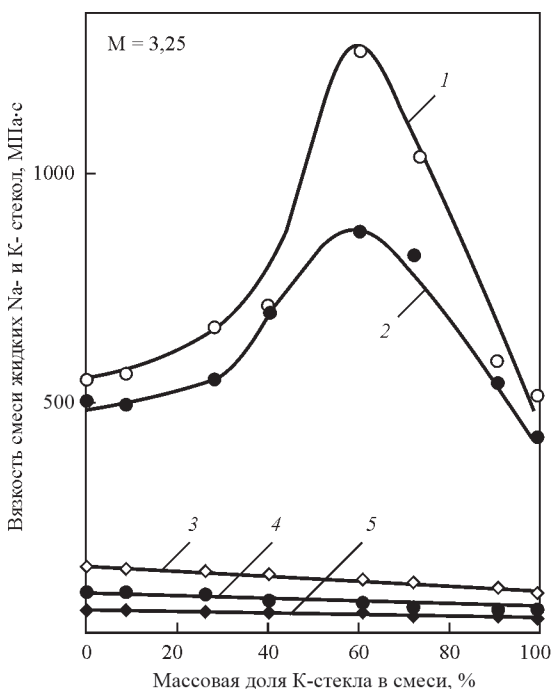


Рис. 4. Зависимость вязкости бинарных жидких Na- и K-стекол сразу после смешивания (1) и после термостатирования при температуре 20 (2), 40 (3), 60 (4) и 80 °C (5)

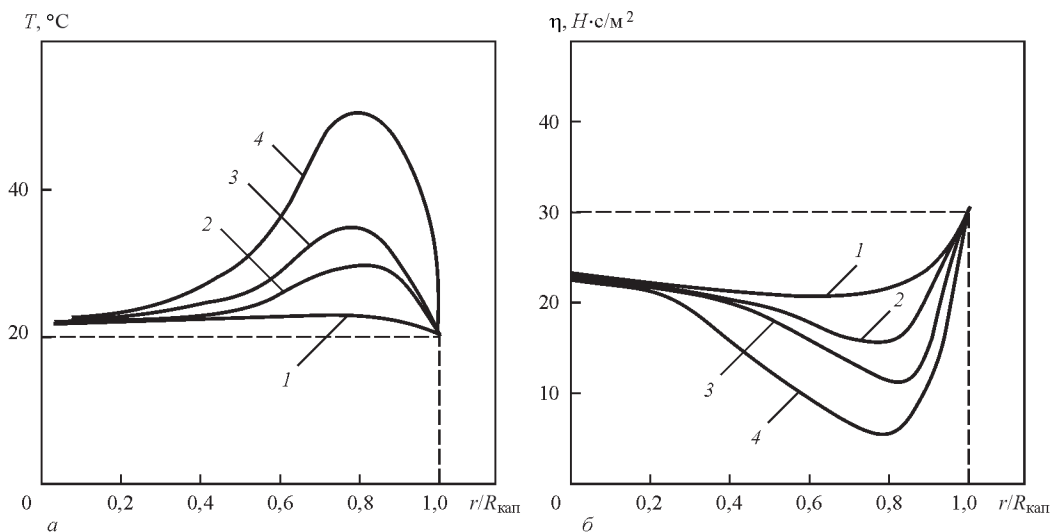


Рис. 5. Поле температуры (а) и вязкости (б) в капилляре. Расстояние от входа в капилляр $l/L_{\text{кап}}$: 0 (1), 2 (2), 4 (3) и 15 (4). $Q = 1,67 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$

Зависимость вязкости от температуры повышает неоднородность полей вязкости и температуры как в радиальном, так и в продольном сечении капилляра. Картина распределения вязкости в капилляре при фиксированном расходе приведена на рис. 5. Разогрев пристеночного слоя вследствие диссипативного фактора сопровождается оттоком материала из центральной зоны. Однако ни изменение поля скоростей, ни температура не влияют существенно (не более 0,5 %) на радиальное распределение давления. Диссипативный разогрев материала возрастает с увеличением расхода (рис. 6). Однако при этом разогретый слой не распространяется в сердцевину потока. Выявленные закономерности согласуются с наблюдаемым в опыте «пробковым» режимом течения сквозь калибрующую втулку. Правда, в реальных условиях регистрируемая температура вязкостного разогрева в пристеночном слое вдвое превышает ее расчетное значение.

Иная картина получается при моделировании потока, вязкость которого зависит только от повышения

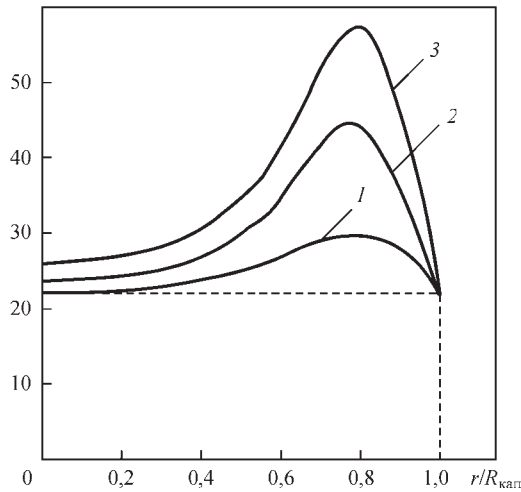


Рис. 6. Температура обложки на выходе из капилляра при секундном расходе: 1 – $1,7 \cdot 10^{-5}$; 2 – $5,0 \cdot 10^{-5}$; 3 – $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$; $\eta = \eta_0 \exp(B/T)$

ния давления. В этом случае, как следует из расчетов, вязкость изменяется только вдоль капилляра, а по его поперечному сечению остается без изменений.

Рис. 7 сопоставляет распределение давления вдоль канала для экструдированной массы с ньютоновскими свойствами (1), массы с барической (2) и термочувствительной вязкостью (3).

Здесь кривые 1 и 2 относятся соответственно к ньютоновской и барической вязкости. Видно, что в целом перепад давления у жидкости с барической вязкостью меньше, чем у ньютоновской. В зависимости от расхода это отклонение жидкости от ньютоновского поведения описывается экстремальным законом, причем максимальное понижение давления приходится на расход, примерно равный $8,0 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$.

Таким образом, ответственность за уменьшение перепада давления во внезапно сужающемся канале, в основном, ложится на диссипативный разогрев. Зависимость же вязкости от давления вызывает дополнительное (значительно меньшее по величине) понижение давления при заданном расходе (рис. 8).

Несмотря на наличие двух разных по мощности конкурирующих источников понижения вяз-

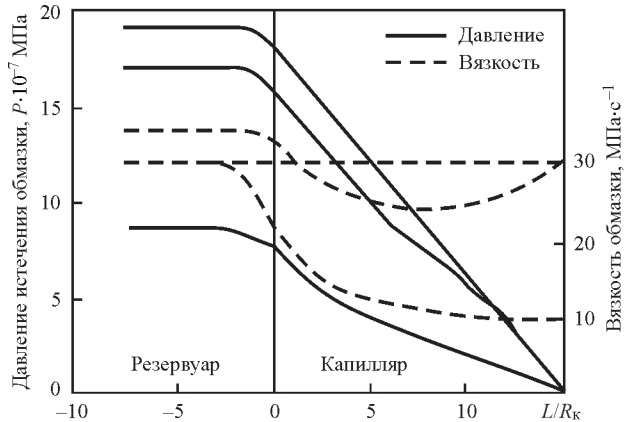


Рис. 7. Распределение давления и вязкости по длине капилляра: 1 – ньютоновская; 2 – барическая; 3 – термочувствительная обложка

Сопоставление теплофизических характеристик обмазок для электродов АНО-4 и УОНИ 13/55 (влажность 11,5 мас. %, температура комнатная) [10]

Вид электродов	Жидкое стекло			λ , Вт/м·К	$\nu \cdot 10^7$, м ² /с	$\rho \cdot c \cdot 10^{-6}$, Дж/м ³ ·К
	Модуль	Вязкость, МПа·с	Мас. %			
УОНИ 13/55	2,9	700	29,0	$\frac{1,30 \dots 1,35}{1,30}$	$\frac{4,60 \dots 5,30}{5,0}$	$\frac{2,50 \dots 2,80}{2,60}$
	3,2	50	19,5	$\frac{1,25 \dots 1,40}{1,35}$	$\frac{2,50 \dots 3,75}{3,20}$	$\frac{3,65 \dots 5,55}{4,20}$
АНО-4	2,9	700	29,0	$\frac{0,95 \dots 1,15}{1,05}$	$\frac{5,70 \dots 10,0}{7,80}$	$\frac{0,95 \dots 1,80}{1,30}$
	3,2	50	18,5	$\frac{1,20 \dots 1,25}{1,18}$	$\frac{4,65 \dots 11,5}{7,5}$	$\frac{1,05 \dots 2,35}{1,70}$

Примечание. В числителе приводятся минимальные и максимальные значения, в знаменателе – средние из трех определений.

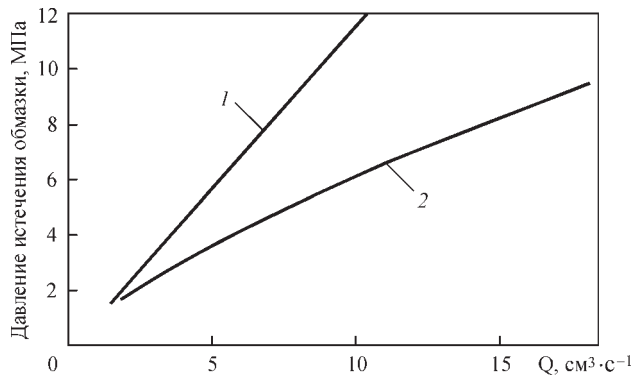


Рис. 8. Расходно-напорная характеристика обмазочной массы ньютоновского (1) и термочувствительного типа (2): $\eta = \eta_0 = \text{const}$; $2 - \eta = \eta_0 A \exp(B/T)$; $\eta_0 = 30 \text{ н·с/м}^2$; $A = 0,52$; $B = 65$

кости экструдированного материала в виде температуры и давления расчеты не выявили, по крайней мере, в диапазоне $L/R_k < 10$, ситуаций, при которых возникли бы неустойчивые (пульсирующие) режимы течения через внезапно сужающийся канал, способные спровоцировать разнотолщинность покрытия при опрессовке электродов. При больших значениях L/R_k такие ситуации могут стать вполне ожидаемы вследствие антибатного изменения, с одной стороны, эффективной и температурной, а с другой, – барической вязкости обмазки.

Экспериментальным путем установлено, что на вязкостный нагрев массы в капилляре влияет вид обмазки, химический состав, вязкость жидкого стекла, доля щелочного гидросиликата, вносимого в обмазку стеклом, и зерновой состав наполнителя. В известной мере это может быть следствием совместного влияния вещественного состава покрытия и характеристик жидкого стекла на теплофизические характеристики обмазочных масс. Как следует из данных, приведенных в таблице, при почти одинаковой теплопроводности ν , температуропроводность ν обмазки УОНИ 13/55 ниже, а объемная теплоемкость $\rho \cdot c$, выше, чем у обмазки АНО-4 [10].

Важно также, что обмазка УОНИ 13/55, особенно изготовленная на высокомодульном низковязком жидком стекле, обладает высокой структурированностью. На разрушение ее коагуляционной структуры расходуется какая-то часть энергии, в результате чего ее вязкостный разогрев

ослабляется. Восстановление структуры происходит за пределами капилляра и на тепловом балансе в капилляре сказаться не может.

Выводы

1. По результатам проведенных реологических исследований жидкостекольных дисперсий Na-КМЦ и чистых Na- и К- и NaK жидких стекол, представляющих собой консистентную среду реальных обмазочных масс, математическими методами моделировали изменение их структурной, активационной и барической вязкости в зависимости от скорости деформации, температуры и избыточного давления. Значениями последних варьировали в пределах, характерных для реальных условий опрессовки электродов.

2. Несмотря на наличие двух конкурирующих источников изменения сдвиговой вязкости обмазки (температуры и давления) расчеты не выявили, по крайней мере, в изученном диапазоне $L/R_k < 10$ и давлений, при которых реально прессыруются электроды, ситуаций с неустойчивыми (пульсирующими) режимами течения сквозь внезапно сужающийся канал. При больших значениях L/R_k и давлений такие ситуации вполне возможны вследствие антибатного изменения температурной и барической вязкости некоторых видов жидких стекол и изготовленных на них обмазок: первая прекращает понижаться, а вторая, после достижения минимума, начинает возрастать при $L/R_k > 10$ и $P > 100 \text{ МПа}$.

3. С технологической точки зрения калиевые и NaK жидкие стекла, особенно их высокомодульные модификации, заслуживают предпочтения. Они обеспечивают консистенции обмазок, мало склонные к появлению нестабильностей в состоянии напорного потока, поскольку не выявляют опасной восходящей ветви параболической зависимости вязкости от избыточного давления.

Список литературы

1. Cogswell F.N. (1972) Converging flow of polymer melts in extrusion dies. *Polym. Eng. And Sci.*, 12, 2, 64–73.
2. Kamal M.R., Nuyn H. (1980) Capillary viscometry a complete analysis including pressure and viscous heating effect. *Ibid*, 20, 2, 109–119.
3. Марченко А.Е., Скорина Н.В., Сидлин З.А., Костюченко В.П. (1992) *Исследование вязкости жидких стекол при*

- давлении опрессовки электродов. Новые сварочные и наплавочные материалы и их применение в промышленности: Материалы науч.-техн. семинара, посвященного 100-летию со дня рождения К.В. Петраня (г. С.-Петербург, 19–20 мая 1992 г.). С.-Петербург, сс. 43–49.
4. Ходаков Г.С. (2003) Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева)*, XLVII, 2, 33–44.
 5. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. (1977) *Реология полимеров*. Москва, Химия.
 6. Айлер Р.К. (1982) *Химия кремнезема* (в 2 ч.) Пер. с англ. Л.Т. Журавлева. Прямишников В.П. (ред.). Москва, Мир. Ч. I.
 7. Корнеев В.И., Данилов В.В. (1996) *Жидкое и растворимое стекло*. С.-Пб, Стройиздат.
 8. Марченко А.Е., Скорина Н.В., Киселев М.О., Трачевский В.В. (2017) Исследование структуры жидких стекол для сварочных электродов методом ядерной магнитной спектроскопии. *Автоматическая сварка*, 1, 49–54.
 9. Янков В.И., Глот И.О., Труфанова Н.М., Шакиров Н.В. (2010) *Течение полимеров в отверстиях фильер. Теория, расчет, практика*. Москва-Ижевск, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований.
 10. Марченко А.Е. (2015) О тепловой обстановке, создаваемой вязкостным разогревом электродной обмазочной массы, в зоне формирования напорного потока. *Сварочные материалы-2015 (Петраньевские чтения). Сб. докладов международной научно-технической конференции (15–17 окт. 2015 г., Санкт-Петербург)*. С.-Пб, сс. 65–68.
 1. Cogswell, F.N. (1972) Converging flow of polymer melts in extrusion dies. *Polym. Eng. and Sci.*, 12(2), 64–73.
 2. Kamal, M.R., Nuyn, H. (1980) Capillary viscometry a complete analysis including pressure and viscous heating effect. *Ibid.*, 20(2), 109–119.
 3. Marchenko, A.E., Skorina, N.V., Sidlin, Z.A., Kostyuchenko, V.P. (1992) *Examination of viscosity of liquid glasses under pressure of electrode crimping*. In: *Proc. of Sci.-Tech. Seminar dedicated to the 100th Anniversary of the Birth of K.V. Petran on New Welding and Surfacing Materials and their Application in Industry* (St.-Petersburg, 19-20 May, 1992). St.-Petersburg, 43–49 [in Russian].
 4. Khodakov, G.S. (2003) Rheology of suspensions. Theory of phase flow and its experimental substantiation. *Ros. Khim. Zhurnal*, XLVII, 2, 33–44 [in Russian].
 5. Vinogradov, G.V., Malkin, A.Ya. (1977) *Rheology of polymers*. Moscow, Khimiya [in Russian].
 6. Ayler R.K. (1982) *Chemistry of silica*. In: 2 Pts, Pt.1. Ed. by V.P. Pryanishnikov. Moscow, Mir [in Russian].
 7. Korneev, V.I., Danilov, V.V. (1996) *Liquid and soluble glass*. St.-Petersburg, Strojizdat [in Russian].
 8. Marchenko, A.E., Skorina, N.V., Kiselev, M.O., Trachevsky, V.V. (2017) Nuclear magnetic spectroscopy study of the structure of liquid glasses for welding electrodes. *The Paton Welding J.*, 1, 41-45.
 9. Yankov, V.I., Glot, I.O., Trufanova, N.M., Shakirov, N.V. (2010) *Flow of polymers in die holes. Theory, calculation, practice*. Moscow, Izhevsk, ICI [in Russian].
 10. Marchenko, A.E. (2015) On thermal environment created by viscous heating of electrode paste in the zone of formation of pressure flow. *Welding materials - 2015 (Petran lectures)*. In: *Proc. of Int. Sci.-Tech. Conf. (St.-Petersburg, 15-17 October, 2015)*. St.-Petersburg, 65–68.

References

ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК РІДКОГО СКЛА НА ЯКІСТЬ ФОРМУВАННЯ ПОКРИТТЯ ЗВАРЮВАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОДІВ

А.Ю. Марченко¹, І.О. Глот², М.В. Скорина¹

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

²Інститут механіки суцільних середовищ Уральського відділення РАН, РФ, 614018, м. Перм, вул. Академіка Корольова, 1

Досліджена в'язкість 6%-их дисперсій Na-КМЦ в рідких Na- та K-стеклах в залежності від температури, а також в'язкість чистих рідких Na-, K- та NaK – стекол від зовнішнього тиску і температури, що являють собою консистентне середовище реальних обмазувальних мас. З використанням отриманих результатів математичними методами перевірено функціонування моделі сумісного впливу надмірного тиску і дисипативного розігрівання на в'язкість, профіль швидкостей та стабільності напірного потоку електродних обмазок в ступінчатому каналі за умовами формування електродного покриття методом екструзійного нанесення на сталеві прутки. Хоча діють два різних за потужністю конкуруючі джерела зміни зсувної в'язкості обмазки (температура і тиск), проведеними розрахунками не були виявлені ситуації з нестійкими (пульсуючими) режимами її течії через канал, що раптово звужується, які могли б спровокувати нестійкості потоку обмазки, а отже і різновисцинності покриття. Принаймні, в межах дослідженого діапазону розмірів капілярів $L/R_k < 10$ і значень тиску, за якими реально виготовляються електроди. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: дугове зварювання, покриті електроди, технологія виробництва, різновисцинність покриття, реологія, в'язкопружність електродних обмазок

INFLUENCE OF LIQUID GLASS CHARACTERISTICS ON QUALITY OF COATING FORMATION OF WELDING ELECTRODES

A.E. Marchenko¹, I.O. Glot², M.V. Skoryna¹

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

²Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the RAS, 1, Academician Korolyov Str., 614018, Perm, Russia

The viscosity of 6% dispersions of Na-CMC in liquid Na- and K-glasses depending on temperature, as well as viscosity of pure liquid Na, K- and NaK-glasses depending on excess pressure and temperature was studied. Each of them represents a consistent medium of real electrode coating masses. Using the obtained results, by mathematical methods the functioning of the model of the joint effect of overpressure and dissipative heating on viscosity, velocity profile and stability of pressure flow of electrode coatings in the step channel under the conditions of coating formation by extrusion deposition on steel bars was verified. Although two competing sources of change in shear viscosity of the coating mass (temperature and pressure) are available, the calculations did not reveal situations with unstable (pulsating) flow modes through a suddenly narrowing channel, which could cause instability of the coating mass flow, and therefore electrode coatings with a thickness variation. At least, they were revealed in the studied range of capillary $L/R_k < 10$ sizes and pressures, at which the electrodes are actually pressed. 10 Ref., 1 Tabl., 8 Fig.

Keywords: arc welding, coated electrodes, production technology, coating thickness variation, rheology, viscoelasticity of coating masses

Поступила в редакцію 22.03.2021

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА МІЦНІСТЬ БІМЕТАЛЕВОГО Al–Ti СТІЛЬНИКОВОГО ЗАПОВНЮВАЧА

Ю.В. Фальченко, Л.В. Петрушинець, В.Є. Федорчук, Є.В. Половецький

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

Розглянуто вплив термічної обробки на міцність біметалевих алюміній-титанових стільникових конструкцій. Біметал алюміній–титан отримували дифузійним зварюванням в вакуумі з малолегованих сплавів алюмінію АД1 та титану ВТ1-0. Досліджено можливість точкового зварювання біметалевих стрічок шириною 12 мм для отримання стільникового заповнювача в різних поєднаннях шарів титану та алюмінію. Показано, що оптимальним є зварювання стрічок в комбінації Al/Ti + Al/Ti. При цьому середня міцність стільників на стиснення становить 41,1 МПа. Відпал біметалевих стільників проводили при температурах 600 та 700 °С. Час відпалу при 600 °С становив 60...1200 хв, при 700 °С – 10...30 хв. Встановлено, що відпал протягом 60 хв при 600 °С призводить до утворення в стику між шарами алюмінію та титану окремих осередків інтерметалідного прошарку товщиною до 1 мкм, що обумовлює підвищення міцності на стиснення стільникових зразків на 11,7 % у порівнянні з вихідним станом. Подальше зростання часу відпалу призводить до росту інтерметалідного прошарку в стику та зниження міцності на стиснення стільникових зразків. Показано, що стільникові зразки після відпалу протягом 60...600 хв при 600 °С при стисненні з максимальним рівнем деформації 50 % деформуються без руйнування місця зварювання та стінок біметалевого матеріалу. Збільшення часу відпалу призводить до окрихчення як місць зварювання, так і матеріалу в цілому. Бібліогр. 10, табл. 3, рис. 7.

Ключові слова: алюміній, титан, фольга, біметалеві з'єднання, дифузійне зварювання, відпал, інтерметалідний прошарок, міцність на стиснення

Тришарові алюмінієві панелі з стільниковим заповнювачем знайшли широке застосування в літако-, суднобудуванні, будівництві та інших галузях промисловості внаслідок своїх унікальних властивостей завдяки тому, що при відносно невеликій масі ці конструкції характеризуються високими значеннями міцності і жорсткості, крім того, вони мають хороші вібраційні і радіотехнічні характеристики, звуко- і теплоізоляційні властивості. Подібні конструкції можуть застосовуватися в якості силових елементів в крилі, фюзеляжі, підлозі, а також в якості теплозахисних елементів [1, 2].

Підвищення експлуатаційних характеристик стільникових панелей, а також збільшення стійкості заповнювача тришарової панелі можливе за рахунок застосування більш міцного матеріалу, наприклад, титану. Так, авторами роботи [3] було запропоновано між листами обшивки і поперечними ребрами з алюмінієвого сплаву встановити елементи коробчастого профілю з сплаву титану, які запобігають втраті стійкості під час зварювання. Коробчастий профіль в таких панелях виступає основним несучим конструктивним елементом, а листи алюмінієвого сплаву являють собою обшивку. Але з урахуванням того, що вага титану майже вдвічі більша за алюміній, то його використання призведе до суттєвого збільшення загальної ваги конструкції, що для авіакосмічної галузі є не бажаним.

Оптимальним варіантом між мінімальною вагою та максимальною міцністю стільникових кон-

струкцій, на нашу думку, є використання стільникового заповнювача, отриманого на основі біметалевих матеріалів. В роботі [4] була показана можливість отримання біметалу Al–Ti способом дифузійного зварювання у вакуумі (ДЗВ).

На основі досліджень, наведених в роботі [5], можна зробити припущення, що використання шаруватих композиційних матеріалів (ШКМ), до яких можна віднести біметали на основі фольги, може значно покращити властивості стільникових конструкцій. Беручи до уваги можливість широкого регулювання структури та складу ШКМ на етапі утворення з'єднання, дослідження з виготовлення таких матеріалів із регульованим вмістом інтерметалідної фази в стику є досить актуальним.

Перспективність використання отриманого способом дифузійного зварювання в вакуумі біметалу алюміній–титан для виготовлення тришарових стільникових панелей, а також можливість їх експлуатації при підвищених температурах буде визначатися міцністю та інтенсивністю росту інтерметалідного прошарку в біметалі під час виготовлення стільникових конструкцій та їх експлуатації.

Метою даної роботи було дослідження впливу термічної обробки на міцність Al–Ti стільникового заповнювача.

Методики досліджень, матеріали та підготовка зразків. Для виготовлення стільникового

Таблиця 1. Хімічний склад сплавів АД1 та ВТ1-0 [6], мас. %

Сплав	Al	Ti	Fe	Si	Mn	Cu	Mg	Zn	Сума домішок
АД1	Основа	0,15	0,3	0,3	0,025	0,02	0,05	0,1	—
ВТ1-0	—	Основа	0,025	0,10	—	—	—	—	0,30

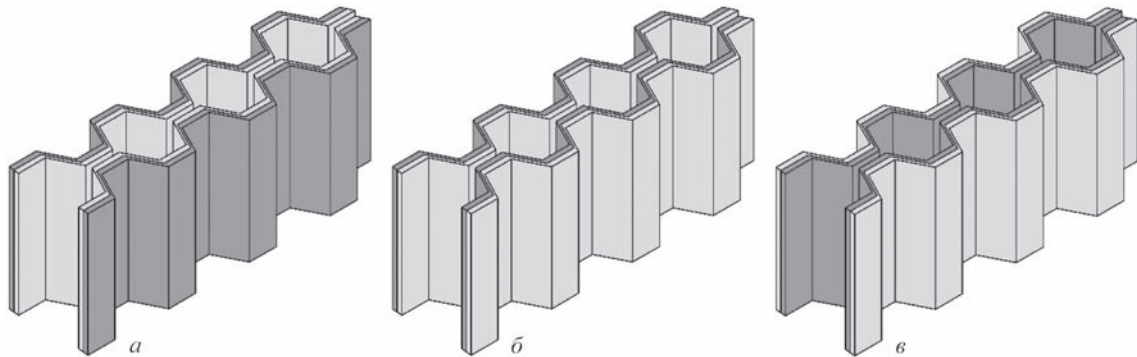


Рис. 1. Схематичне зображення можливих варіантів з’єднання двох гофрованих біметалевих стрічок Al–Ti: а – Ti/Al + Al/Ti; б – Al/Ti + Al/Ti; в – Al/Ti + Ti/Al

заповнювача застосовували біметалеві заготовки Al–Ti розміром 130×130×0,180 мм, які попередньо було отримано способом ДЗВ. В якості вихідних матеріалів використовували сплави алюмінію АД1 і титану ВТ1-0, склад яких наведено в табл. 1 [6]. З біметалевих листів виготовляли стрічки шириною 12 мм, з яких, в свою чергу, на спеціальному оснащенні було сформовано гофровані стрічки з кроком перегину 10 мм.

На відміну від однорідного матеріалу при точковому зварюванні біметалевих смуг можуть виникнути певні ускладнення, що обумовлені не тільки неоднорідністю матеріалу по товщині, але і різними фізико-механічними властивостями титану та алюмінію. Титан має низьку електро- і теплопровідність, дуже активний по відношенню до газів, що містяться в атмосфері. Його зварювання проводиться при відносно малих параметрах струму, зусиллі стиснення і тривалості нагрівання. Алюміній має високу теплопровідність, малий електричний опір і тугоплавку окисну плівку на поверхні. Тому поверхні деталей перед зварюванням необхідно ретельно обробляти для видалення товстої окисної плівки з метою запобігання несправ [7].

Для отримання якісних з’єднань з гофрованих стрічок та визначення оптимальної конфігурації шарів один відносно іншого проводили експерименти з трьох варіантів поєднання (рис. 1) зразків з біметалу:

Ti/Al + Al/Ti за рахунок приварювання алюмінієвого шару до алюмінієвого;

Al/Ti + Al/Ti за рахунок приварювання алюмінієвого шару до титанового;

Al/Ti + Ti/Al за рахунок приварювання титанового шару до титанового.

Точкове зварювання проводили при кімнатній температурі на повітрі. Перед зварюванням контактні поверхні гофрованих стрічок зачища-

ли механічним шляхом і знежирювали. Зварювання проводили при постійних значеннях напруги $U_{зв} = 3$ В та струму $I_{зв} = 270...300$ А, інтенсивність нагріву при цьому визначалась тривалістю імпульсу $t_{зв} = 0,5...5,0$ с і їх кількістю $N_{зв} = 1...20$.

Дослідження впливу термічної обробки на формування прошарку інтерметаліду між титаном та алюмінієм проводили при нормальних умовах на спеціально розробленому стенді, що являв собою муфельну піч і систему контролю температури, яка складалася з термоконтролеру REX C-100, твердотільного реле SSR-40 DA і хромель-алюмелевої термопари (рис. 2). Зразок розміщували в середині печі на керамічній підставці. Параметри термообробки задавали в наступних діапазонах: температура $T_{відп} = 600...700$ °С, тривалість витримки $t_{відп} = 10...1200$ хв.

Аналіз структурних характеристик фольги і зварних з’єднань виконували на шліфах за допомогою скануючого електронного мікроскопу CAMSCAN 4, оснащеного системою енергодисперсійного аналізу EDX INCA 200 для локального хімічного складу на плоских зразках.

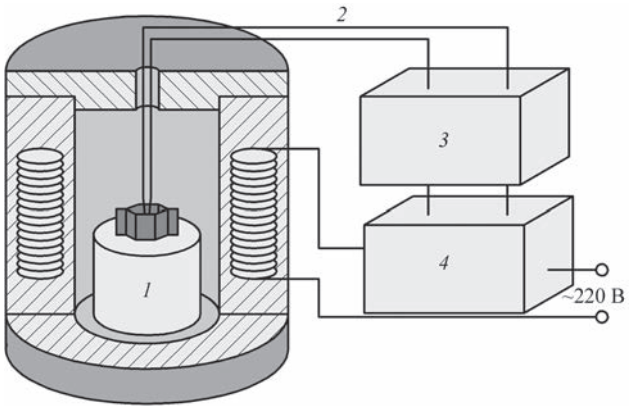


Рис. 2. Схема пристосування для термічної обробки зразків: 1 – керамічна підставка; 2 – термопара; 3 – термоконтролер REX C-100; 4 – твердотільне реле SSR-40 DA

Підготовку шліфів поперечного перерізу зварних з'єднань проводили за стандартною методикою з використанням шліфувально-полірувального устаткування фірми Struers.

Дослідження механічних властивостей зразків визначали при випробуванні їх на стискання, що відповідає методиці, наведеній в роботах [1, 8].

Для проведення механічних випробувань стільникової конструкції на стискання використовували цифровий контролер тиску фірми «KOLI» марки ХК3118Т1 і датчик тиску фірми «CAS» марки MNC-1 з робочим інтервалом від 0 до 1000 кг.

Результати досліджень. Для отримання стільникової конструкції заповнювача було розроблено технологію зварювання біметалевих профільованих стрічок. Встановлено, що для отримання з'єднань зразків біметалу при приварюванні алюмінієвого шару до алюмінієвого (Ti/Al+Al/Ti), достатньо використання циклу зварювання з 2-х імпульсів струму тривалістю $t_{зв} = 3$ с. Для отримання заповнювача при контакті алюмінієвого та титанового шару (Ti/Al+Ti/Al) кількість імпульсів зростає до 4-х, а тривалість залишається сталою $t_{зв} = 3$ с. Для отримання заповнювача при контакті титанового шару з титановим (Al/Ti+Ti/Al) тривалість імпульсів зростає до $t_{зв} = 5$ с, а їх кількість збільшується до 20-ти, при цьому спостерігається надмірний перегрів під електродами прошарку із алюмінію з його витіканням з зони з'єднання. Мікроструктура з'єднань приведена на рис. 3.

На основі аналізу режимів зварювання стільникових заповнювачів можна зробити висновок, що найменш енерго- та трудомістким є варіант приварювання алюмінієвого шару до алюмінієвого.

Проте, з урахуванням того, що при виготовленні стільникового заповнювача виникає необхідність контакту шарів алюмінію та титану, то оптимальним варіантом є приварювання алюмінієвого шару до титанового.

Для оцінки міцності зразків одиничних стільників проводили їх випробування на стиснення (рис. 4, а). Осадку стільників задавали на рівні 50 % від вихідної висоти. Встановлено, що у випадку поєднання шарів металу Ti/Al + Al/Ti і Ti/Al + Ti/Al (рис. 4, б), при стисненні відбувається деформування стінок стільникового заповнювача без руйнування місць точкового зварювання, а у випадку поєднання шарів Al/Ti + Ti/Al (рис. 4, в) спостерігається відшарування між шарами титану. Середня міцність з'єднань при поєднанні біметалу Ti/Al + Al/Ti і Ti/Al + Ti/Al близька за значенням і становить 44,5 та 41,1 МПа відповідно. Поєднання Al/Ti + Ti/Al призводить до падіння середнього значення міцності до 35,2 МПа і руйнування з'єднань (табл. 2). Можливо причиною падіння міцності є окислення поверхонь титану в процесі зварювання та формування в стику значної кількості дефектів (рис. 3, в).

Для дослідження особливостей росту прошарку інтерметаліду між шарами титану та алюмінію в процесі термічної обробки проводили нагрівання біметалевих з'єднань Al–Ti до температур 600 та 700 °С. Аналіз мікроструктури біметалу Al–Ti показав, що під час нагрівання відбувається утворення та ріст прошарку інтерметаліду, збільшення товщини якого передусім залежить від температури та тривалості термічної обробки (табл. 3).

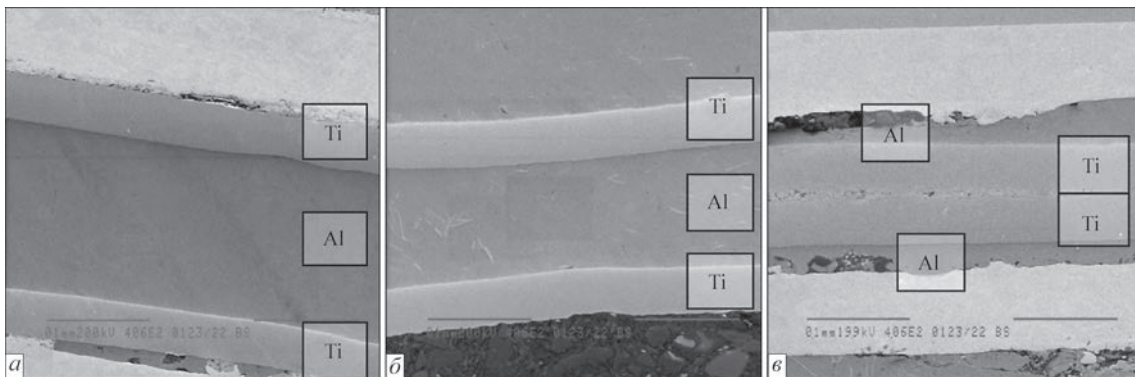


Рис. 3. Мікроструктура точкових з'єднань біметалевої фольги Al–Ti: а – Ti/Al + Al/Ti; б – Ti/Al + Ti/Al; в – Al/Ti + Ti/Al



Рис. 4. Загальний вигляд зразків одиничних стільників до механічних випробувань на стискання (а) та після (б, в)

Таблиця 2. Результати випробувань біметалевих зразків стільникового заповнювача на стиснення

Поєднання поверхонь біметалевих стрічок	Випробовування зразків	Міцність на стиснення, МПа	Середнє значення міцності на стиснення, МПа
Ti/Al + Al/Ti	Без руйнування	42,1	44,5
	-"-	54,1	
	-"-	37,4	
Ti/Al + Ti/Al	-"-	40,3	41,1
	-"-	38,5	
	-"-	44,6	
Al/Ti + Ti/Al	З руйнуванням	38,2	35,2
	-"-	32,2	
	-"-	35,1	

Таблиця 3. Залежність товщини інтерметалідного прошарку та міцності біметалу Al–Ti від режиму термічної обробки

Зразок	Температура нагрівання зразка $T_{\text{відп.}}$, °C	Тривалість витримки зразка, хв	Середні	
			товщина прошарку інтерметаліду, мкм	міцність на стиснення, МПа
1	—	—	—	41,1
2	600	60	—	45,9
3	600	150	2	39,9
4	600	300	4	35,6
5	600	600	10	32,4
6	600	1200	11	29,8
7	700	10	4	33,3
8	700	30	14	27,2

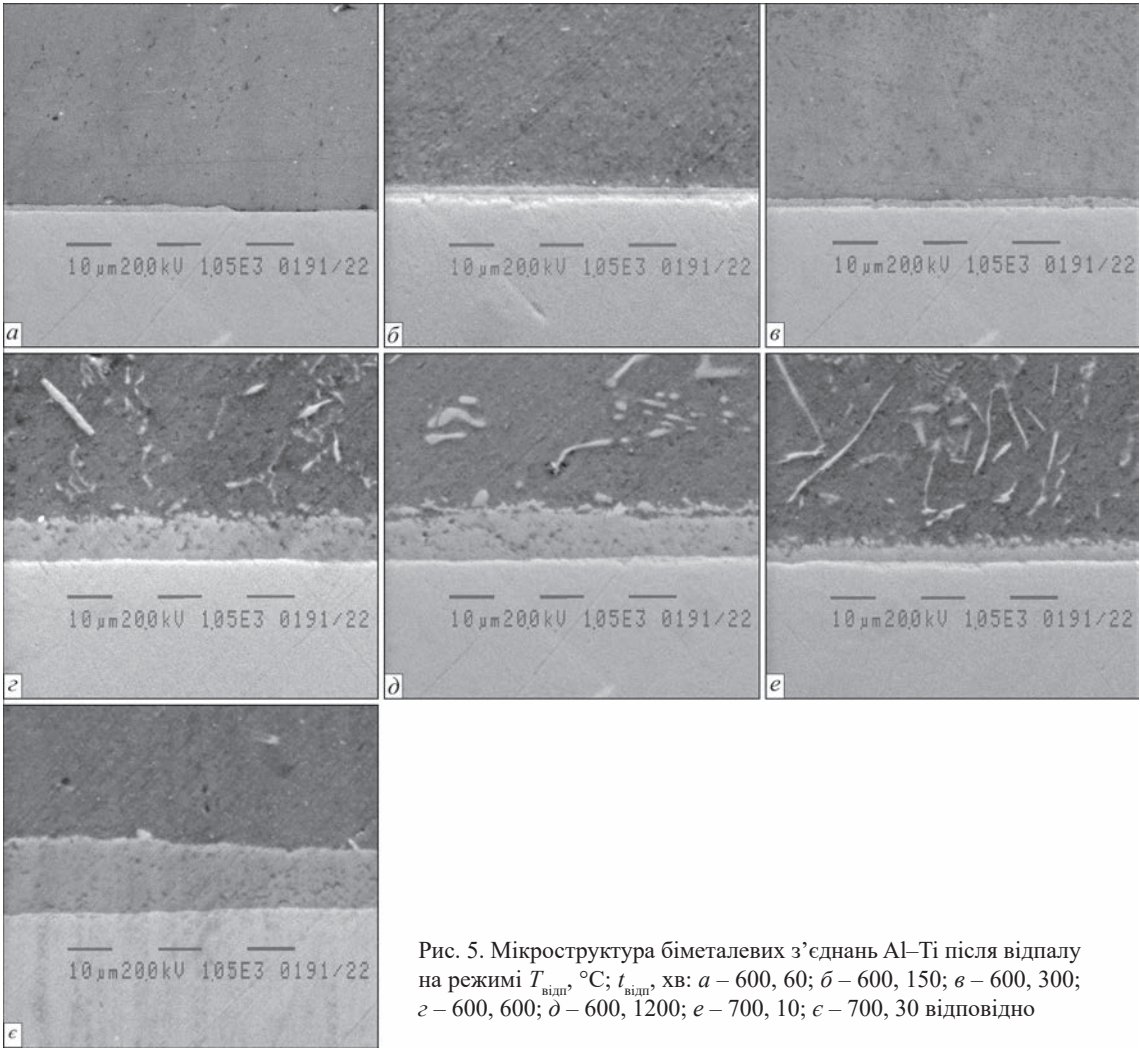


Рис. 5. Мікроструктура біметалевих з’єднань Al–Ti після відпалу на режимі $T_{\text{відп.}}$, °C; $t_{\text{відп.}}$ хв: а – 600, 60; б – 600, 150; в – 600, 300; г – 600, 600; д – 600, 1200; е – 700, 10; є – 700, 30 відповідно

У структурі біметалевої фольги Al–Ti після дифузійного зварювання інтерметалідний прошарок не ідентифікується [9]. Дослідження впливу термічної обробки показали, що витримка при температурі 600 °C протягом 60 хв не призводить до утворення суцільного інтерметалідного прошарку (рис. 5, а), але в зоні з'єднання алюмінію з титаном спостерігається утворення окремих ділянок інтерметалідів товщиною до 1 мкм. При збільшенні тривалості відпалу до 150 хв на границі алюміній/титан спостерігається утворення та ріст суцільного інтерметалідного прошарку товщиною до 2 мкм (рис. 5, б). Подальше збільшення тривалості відпалу до 300 хв призводить до росту товщини інтерметалідного прошарку до 4 мкм, що вдвічі більше за попередній результат (рис. 5, в). Проведення термообробки протягом 600 хв призводить до утворення інтерметалідного прошарку товщиною біля 10 мкм (рис. 5, г). Збільшення часу витримки при температурі 600 °C до 1200 хв впливає на товщину інтерметалідного прошарку вже несуттєво. Середня товщина інтерметалідного шару становить 11 мкм (рис. 5, д).

Хімічний аналіз, проведений за допомогою скануючого електронного мікроскопу, показав, що інтерметалідні прошарки мають наступний склад, мас. %: 55,58...58,93 Al та 41,07...44,42 Ti. Відповідно до подвійної діаграми Al–Ti цей склад відповідає сплаву на основі суміші інтерметалідів Al_2Ti та Al_3Ti .

Залежність товщини інтерметалідного прошарку від тривалості відпалу при 600 °C наведено на рис. 6.

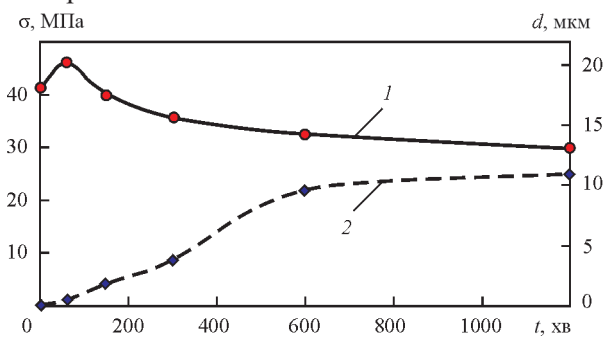


Рис. 6. Залежність міцності на стиснення σ (1) і товщини d (2) інтерметалідного прошарку від тривалості відпалу зразків при температурі 600 °C



Рис. 7. Загальний вигляд зразків одиничних стільників після відпалу та механічних випробувань на стиснення, $T_{\text{відп.}}$, °C; $t_{\text{відп.}}$, хв: а – 600, 150; б – 600, 600; в – 600, 1200

Збільшення температури витримки до 700 °C призводить до прискорення росту інтерметалідних прошарків (табл. 3, рис. 5, е, є).

Визначення міцності зразків після термообробки проводили на одиничних стільниках (рис. 3, а). Було встановлено, що після відпалу протягом 60 хв при 600 °C відбувається підвищення міцності на стиснення стільникових зразків на 11,7 % у порівнянні з вихідним станом (45,9 проти 41,1 МПа) (табл. 3, рис. 6). Таке підвищення міцності може бути пов'язано з утворенням окремих осередків інтерметалідної фази в зоні з'єднання титану з алюмінієм. Відпал зразків протягом 150 хв, згідно з результатами металографічних досліджень, призводить до утворення в стику тонкого шару інтерметаліду (~2 мкм), наявність якого неістотно впливає на несучу спроможність стільника, а міцність залишається майже на рівні вихідних значень (39,9 МПа). Подальше збільшення часу витримки до 1200 хв при 600 °C негативно впливає на міцність, значення якої знижуються до 29,8 МПа. Причиною цього є нерівномірність росту та дефектність шару інтерметаліду, що можна пов'язати зі зміною механізму його утворення [10], а також інтенсивною перекристалізацією алюмінію.

Підвищення температури термічної обробки до 700 °C призводить до значного падіння міцності внаслідок деградації структури шару алюмінію (табл. 3).

Аналіз стільників після проведення механічних досліджень показує, що при стисненні зразків, відпалених при 600 °C протягом 300 хв включно, відбувається деформування стінок стільникового заповнювача з утворенням окремих тріщин без руйнування місць точкового зварювання (рис. 7, а). Збільшення тривалості термообробки до 600 хв призводить до часткового руйнування матеріалу стільників і місць точкового зварювання (рис. 7, б). Після витримки при 600 °C протягом 1200 хв матеріал стільників розпадається на окремі елементи (рис. 7, в).

Таким чином, отримані результати досліджень, проведені на зразках, які складаються з одиничного стільника, свідчать, що використання біметалевого Al–Ti заповнювача у порівнянні з алюмінієвим дозволяє вчетверо підняти його міцність на стиснення з 9,8 до 41,1 МПа відповідно.

Висновки

1. Досліджено можливість точкового зварювання біметалевих стрічок для отримання стільникового заповнювача з різним поєднанням шарів титану та алюмінію. Показано, що оптимальним є зварювання стрічок, що відповідає з'єднанню Al/Ti + Al/Ti, середня міцність якого становить 41,1 МПа.

2. Показано, що відпал стільникового заповнювача при температурі 600 °С протягом 60 хв призводить до утворення в стику між шарами алюмінію та титану окремих часток інтерметалідної фази розміром до 1 мкм, що обумовлює підвищення міцності на стиснення зразків на 11,7 % у порівнянні з вихідним станом.

3. Подальше зростання часу відпалу з 60 до 1200 хв призводить до утворення і росту інтерметалідного прошарку в стику та зниження міцності на стиснення стільникових зразків.

4. Показано, що зразки стільникового заповнювача після відпалу при 600 °С протягом 60...600 хв при стисненні з максимальним рівнем деформації 50 % деформуються без руйнування місця зварювання та стінок біметалевого матеріалу. Збільшення часу відпалу призводить до окрихчення як місць зварювання, так і матеріалу стільників в цілому.

5. Використання біметалевого стільникового заповнювача у порівнянні з алюмінієвим дозволяє вчетверо підняти його міцність на стиснення з 9,8 до 41,1 МПа.

Список літератури/References

1. Bitzer, T. (1997) *Honeycomb Technology. Materials, Design, Manufacturing, Applications And Testing*. Springer-Science+Business Media Dordrecht.

2. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. (1991) *Конструкции с заполнителем. Справочник*. Москва, Машиностроение.
3. Panin, V.F., Gladkov, Yu.A. (1991) *Structures with filler: Refer. book*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Башурин А.В., Мاستихин Е.Ю., Колмыков В.И. (2010) Диффузионная сварка пустотелых биметаллических панелей. *Заготовительное производство в машиностроении*, 1, 13–15.
4. Bashurin, A.V., Mastikhin, E.Yu., Kolmykov, V.I. (2010) Diffusion welding of hollow bimetal panels. *Zagotov. Proizvodstvo v Mashinostroyenii*, 1, 13–15 [in Russian].
4. Falchenko, Ju.V., Petrushynets, L.V., Polovetskii, E.V. (2020) Peculiarities of producing Al–Ti bimetal sheet joints by the method of vacuum diffusion welding. *The Paton Welding J.*, 8, 25–28. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.08.04>.
5. Wadsworth, J., Lesuer, D.R. (2000) Ancient and modern laminated composites – from the Great Pyramid of Gizeh to Y2K. *Materials Characterization*, 4–5, 289–313. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1044-5803\(00\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S1044-5803(00)00077-2).
6. Карпачев Д.Г., Доронькин Е.Д., Цукерман С.А. и др. (2001) *Цветные металлы и сплавы*. Справочник. Нижний Новгород, Вента-2.
7. Karpachev, D.G., Doronkin, E.D., Tsukerman, S.A. et al. (2001) *Nonferrous metals and alloys: Refer. book*. Nizhny Novgorod, Venta-2 [in Russian].
7. Васильев К.В., Вилль В.И., Волченко В.Н. и др. (1978) *Сварка в машиностроении*. Справочник в 4-х т. Т.1. Москва, Машиностроение.
8. Vasiliev, K.V., Vill, V.I., Volchenko, V.N. et al. (1978) *Welding in mechanical engineering: Refer. book*. In: 4 Vol., Vol. 1. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
8. Seemann, R. (2020) *A Virtual Testing Approach for Honeycomb Sandwich Panel Joints in Aircraft Interior*, Springer Vieweg.
9. Falchenko, Ju.V., Petrushynets, L.V., Polovetskiy, Ye.V. (2020) Peculiarities of producing Al–Ti bimetal sheet joints by the method of vacuum diffusion welding. *The Paton Welding J.*, 8, 25–28. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.08.04>.
10. Falchenko, Ju.V., Petrushynets, L.V., Polovetskii, E.V. (2020) Peculiarities of producing layered metal composite materials on aluminium base. *The Paton Welding J.*, 4, 9–18. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.04.02>.

INVESTIGATION OF HEAT TREATMENT EFFECT ON THE STRENGTH OF Al–Ti BIMETAL HONEYCOMB CORE

Yu.V. Falchenko, L.V. Petrushynets, V.Ye. Fedorchuk, Ye.V. Polovetskiy

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 effect of heat treatment on the strength of aluminium-titanium bimetal honeycomb structures is considered. Aluminium-titanium bimetal was produced by vacuum diffusion welding of strips of AD1 aluminium and VT1-0 titanium low alloys. The possibility of spot welding of bimetal strips 12 mm wide for producing the honeycomb core was studied with different combinations of titanium and aluminium layers. It is shown that the optimal method is welding the strips in Al/Ti + Al/Ti combination. Here, the average compressive strength of the honeycomb is equal to 41.1 MPa. Annealing of bimetal honeycombs was performed at temperatures of 600 °C and 700 °C. Annealing time at 600 °C was 60...1200 min., at 700 °C it was 10...30 min. It is found that annealing for 60 min. at 600 °C leads to formation of individual sites of an intermetallic interlayer up to 1 ~m thick in the butt joint between the aluminium and titanium layers that results in increase of compressive strength of the honeycomb samples by 11,7 %, compared to the initial condition. Further increase of annealing time leads to growth of the intermetallic interlayer in the butt joint and to lowering of the compressive strength of the honeycomb samples. It is shown that the honeycomb samples after annealing for 60...600 min at 600 °C at compression with the maximum deformation level of 50 % deform without fracture of the welding site or bimetal material walls. Increase of annealing time leads to embrittlement of both the welding sites, and the material as a whole. 10 Ref., 2 Tabl., 7 Fig.

Keywords: aluminium, titanium, foil, bimetal joints, diffusion welding, annealing, intermetallic interlayer, compressive strength

Надійшла до редакції 22.03.2021

ФОРМУВАННЯ ШВІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ СТИКІВ З АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ АМг5М ПЛАВКИМ ЕЛЕКТРОДОМ В МОНТАЖНИХ УМОВАХ БЕЗ ЗАСТОСУВАННЯ ПІДКЛАДНОГО ФОРМУЮЧОГО ЕЛЕМЕНТА ТА З НИМ

Т.М. Лабур, М.Р. Яворська, В.А. Коваль

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

Представлено результати дослідження особливостей формування швів при імпульсно-дуговому зварюванні у різних просторових положеннях сплаву АМг5М товщиною 4 мм плавким електродом на швидкості 23 м/год. з використанням підкладного формуючого елемента (ПФЕ) та без нього. Показано, що незалежно від кута нахилу стиків відносно горизонтальної площини утворюються якісні шви. Наявність ПФЕ збільшує в середньому на 4...12 % геометричні розміри швів, зварених плавким електродом в залежності від просторового положення стиків. Отримані дані наглядно демонструють можливість отримання належної якості швів і високого рівня механічних властивостей при зварюванні плавким електродом алюмінієво-магнієвих сплавів у різних просторових положеннях стиків без використання ПФЕ. Бібліогр. 6, табл. 3, рис. 4.

Ключові слова: алюмінієвий сплав, аргонодугове зварювання, плавкий електрод, присадний дріт, просторові положення стиків, підкладний формуючий елемент, зварні з'єднання, шви, кристалізація, структура, механічні властивості

Алюмінієвий сплав АМг5М відноситься до класу деформованих магнелітв системи легування Al–Mg–Mn (4,8...5,2 Mg, 0,3...0,8Mn) та є термічно незміцнюваним. Його міцність становить $\sigma_b = 295...305$ МПа. Він має високу пластичність ($\delta = 20$ %) в широкому діапазоні температур застосування, а також значну корозійну міцність (після проведення операції відпалу) та стійкість до умов вібрацій [1]. Даний сплав та його зварні з'єднання застосовуються для виготовлення деталей та вузлів конструкцій різного призначення, зокрема, панелей обичайок та корпусів, днищ, фланців, трубних решіток, тощо.

Нагрівання металу при зварюванні призводить до зміни структури – збільшення розмірів зерна, локалізації та коагуляції фаз вздовж границь зерен, появи оксидних включень, що в цілому негативно позначається на значеннях механічних властивостей зварних з'єднань [2, 3]. Тому актуальним є потреба забезпечити якість зварних конструкцій з алюмінієвого сплаву АМг5М, чутливого до термічного циклу зварювання. Процес, який відбувається в монтажних умовах, потребує пошуку більш досконалих технологій зварювання стиків, коли не завжди можна використовувати підкладні формуючі елементи, що сприяють якісному формуванню кореня швів. З'єднання при цьому виконуються у різних просторових положеннях, відмінних від загальноприйнятих. В зв'язку з цим, метою даної роботи є вивчення характеру формування металу шва алюмінієво-

го сплаву АМг5М товщиною 4 мм при імпульсно-дуговому зварюванні плавким електродом (ІДЗПЕ) та встановлення його впливу на механічні властивості зварних з'єднань, отриманих у різних просторових положеннях стиків при наявності підкладного формуючого елемента (ПФЕ) та без нього.

Слід зазначити, що головною особливістю способу ІДЗПЕ є можливість переносу краплі електродного металу за короткий проміжок часу – порядком кількох мілісекунд. Відомо, що рухомість зварювальної ванни пов'язана з її плинністю і відповідно з температурою [4]. Вона головним чином залежить від середнього значення зварювального струму, який при ІДЗПЕ нижчий ніж при класичних способах зварювання. Тобто перенос електродного металу і кінетика кристалізації зварювальної ванни розділені у часі. Під час протяжної дії імпульсу зварювальний струм підвищується та відповідає режиму переносу металу. Сформована на торці електрода крапля скидається завдяки значним електромагнітним силам, які при цьому впливають на неї. Протягом періоду, коли імпульс зварювального струму низький, не відбувається плавлення електродного металу, а лише підтримується режим горіння дуги. Зменшення середнього зварного струму порівняно з умовами зварювання постійним струмом дозволяє отримати менший об'єм зварювальної ванни [2].

Методика досліджень. Перед зварюванням пластини алюмінієвого сплаву АМг5М розміром

Лабур Т.М. – <https://orcid.org/0000-0002-4064-2644>, Яворська М.Р. – <https://orcid.org/0000-0003-2016-6289>,

Коваль В.А. – <https://orcid.org/0000-0001-5154-1446>

© Т.М. Лабур, М.Р. Яворська, В.А. Коваль, 2021

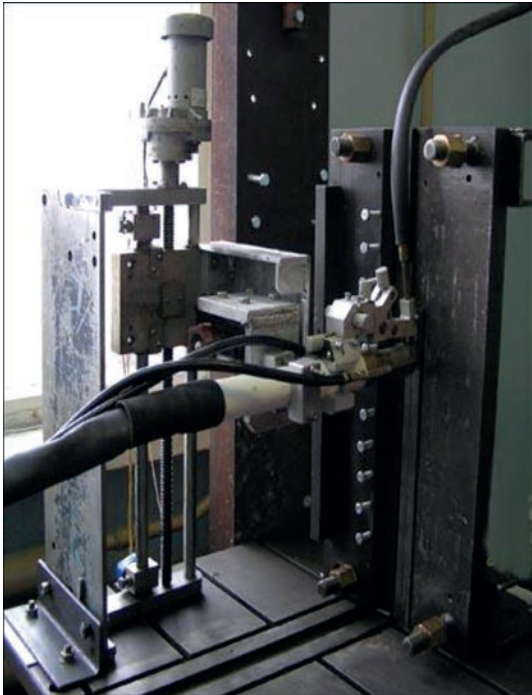
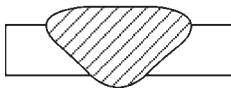
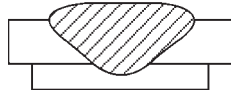


Рис. 1. Зовнішній вигляд установки PCSO-600 для отримання регульованого кута нахилу стиків у межах від 0 до 90° відносно горизонталі рухомої платформи при зварюванні

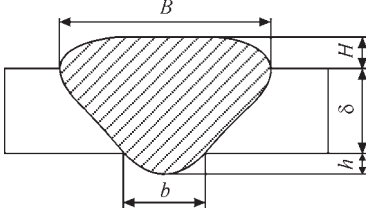
350×100×4 мм і присадний дріт марки ЗвАМг6 діаметром 1,6 мм традиційно очищали у розчині їдкого натру з наступним промиванням у холодній воді. Освітлення пластин та дроту здійснювали у розчині азотної кислоти з обов’язковою промивкою у воді та кінцевою сушкою [5]. Торці стиків зачищали механічним шляхом на глибину не менше 0,1 мм. Регламент робіт виконувався згідно загальноприйнятій методиці [6] та ГОСТ-14806.

Зварювання пластин зі сплаву АМг5М виконували плавким електродом зі швидкістю 23 м/год модульованим імпульсним струмом з використанням інверторного джерела живлення TPS 2700 фірми «Fronius» та установки PCSO-600 для отримання регульованого кута нахилу стиків у межах від 0 до 90° відносно горизонталі рухомої платформи (рис. 1). Зварні з’єднання отримували за один прохід на технологічних режимах, зазначених в табл. 1. Довжина дуги складала 3...5 мм, виліт електрода 8...10 мм, витрати захисного газу аргону високої чистоти марки «А» (ГОСТ 10157-76) становили 20 л/хв, а кут нахилу пальника відносно вертикальної вісі 10...15°. Процес з’єднання стиків здійснювали з використанням формуючого

Таблиця 1. Режими ІДЗПЕ сплаву АМг5М товщиною 4 мм на швидкості 23 м/год при різних просторових положеннях стиків відносно горизонтальної площини

Кут нахилу стиків до горизонтальної площини при зварюванні, град.	Без використання ПФЕ			З використанням ПФЕ		
						
	U_d , В	$I_{зв}$, А	$V_{др}$, м/хв	U_d , В	$I_{зв}$, А	$V_{др}$, м/хв
0	18,9	100	6,9	19,0	112	7,5
30	19,0	100		18,9	111	
60	19,3	101		18,9	114	
90	19,1	103		19,11	115	
Примітка: U_d – напруга на дузі, В; $I_{зв}$ – зварювальний струм, А; $V_{др}$ – швидкість подачі зварного дроту, м/хв.						

Таблиця 2. Геометричні параметри зварних з’єднань сплаву АМг5М, виконаних ІДЗПЕ, у різних просторових положеннях на швидкості зварювання 23 м/год без ПФЕ та з ПФЕ

Кут нахилу стиків до горизонтальної площини, град.	Геометричні параметри зварного шва									
										
	Без ПФЕ					З ПФЕ				
	B , мм	$b_{прош}$, мм	$H_{посл}$, мм	$h_{прош}$, мм	K	B , мм	$b_{прош}$, мм	$H_{посл}$, мм	$h_{прош}$, мм	K
0	10,11...10,2	4,58...4,60	1,45...1,50	1,85...1,90	1,85	10,53...10,57	5,82-5,99	2,14...2,18	1,64-1,70	1,71
30	9,96...10,10	5,24...5,25	1,64...1,81	1,43...1,47	1,79	11,6...1,69	4,78...4,9	1,85...2,06	1,69...1,7	1,95
60	9,74	6,94...6,98	1,66...1,70	1,49...1,70	1,71	11,40...11,7	3,95-5,56	2,17...2,27	1,64-1,84	1,82
90	10,03...10,26	6,54...6,71	1,87...1,93	1,42...1,52	1,72	10,69...10,79	5,16-5,27	2,28...2,46	1,48-2,16	1,69
Примітка: 1. K – коефіцієнт форми шва дорівнює відношенню ширини (B , мм) шва до його товщини ($H + \delta$, мм): $K = B / (H + \delta)$ 2. Значення K допускається в діапазоні від 0,5 до 4,0, оптимальним вважаються значення від 1,2 до 2,0.										

Кут нахилу стиків до горизонтальної площини, град.	Зовнішній вигляд швів без ПФЕ	Зовнішній вигляд швів з ПФЕ
0		
30		
60		
90		

Рис. 2. Зовнішній вигляд зварних швів сплаву АМг5М, виконаних плавким електродом у різних просторових положеннях на швидкості зварювання 23 м/год без застосування ПФЕ та при застосуванні

елемента (ПФЕ) та без нього, тим самим, моделювали різні монтажні умови, які застосовують при зварюванні на стапелях. Зовнішній вигляд зварних швів сплаву АМг5М, виконаних у різних просторових положеннях на швидкості зварювання 23 м/год без ПФЕ та з ним, надано на рис. 2.

Візуальний контроль отриманих зварних швів проводили за зовнішнім виглядом, а методом рентгенографії (ГОСТ 7512-89) оцінювали внутрішню їх якість. Аналіз рентгенограм показав, що зварні шви є щільними і не мають грубих дефектів типу тріщин, непроварів, пор. Геометричні розміри швів (B – ширина шва з лицевої поверхні з’єднань (технологічне посилення), b – ширина шва зі зворотної поверхні з’єднань (кореня шва), H – висота опуклості технологічного посилення,

h – висота опуклості кореня шва, δ – товщина заготовки) вимірювали електронним штангенциркулем «АРТ – 34460-150» з точністю 0,01 мм. За даними табл. 2 ширина досліджуваних швів має близькі значення, а невелика різниця, яка спостерігається при цьому, може бути зумовлена впливом гравітаційної складової, що діє на металеву ванну під час зварювання стиків при різних кутах їх нахилу відносно горизонтальної поверхні.

За умови застосування ПФЕ при зварюванні стиків модульованим імпульсним струмом в горизонтальній площині (кут нахилу стиків 0°) ширина швів становить 10,55 мм, а без використання технологічної підкладки – 10,20 мм. Зварювання стиків під кутом нахилу до 30° відносно горизонталі викликає збільшення ширини швів до

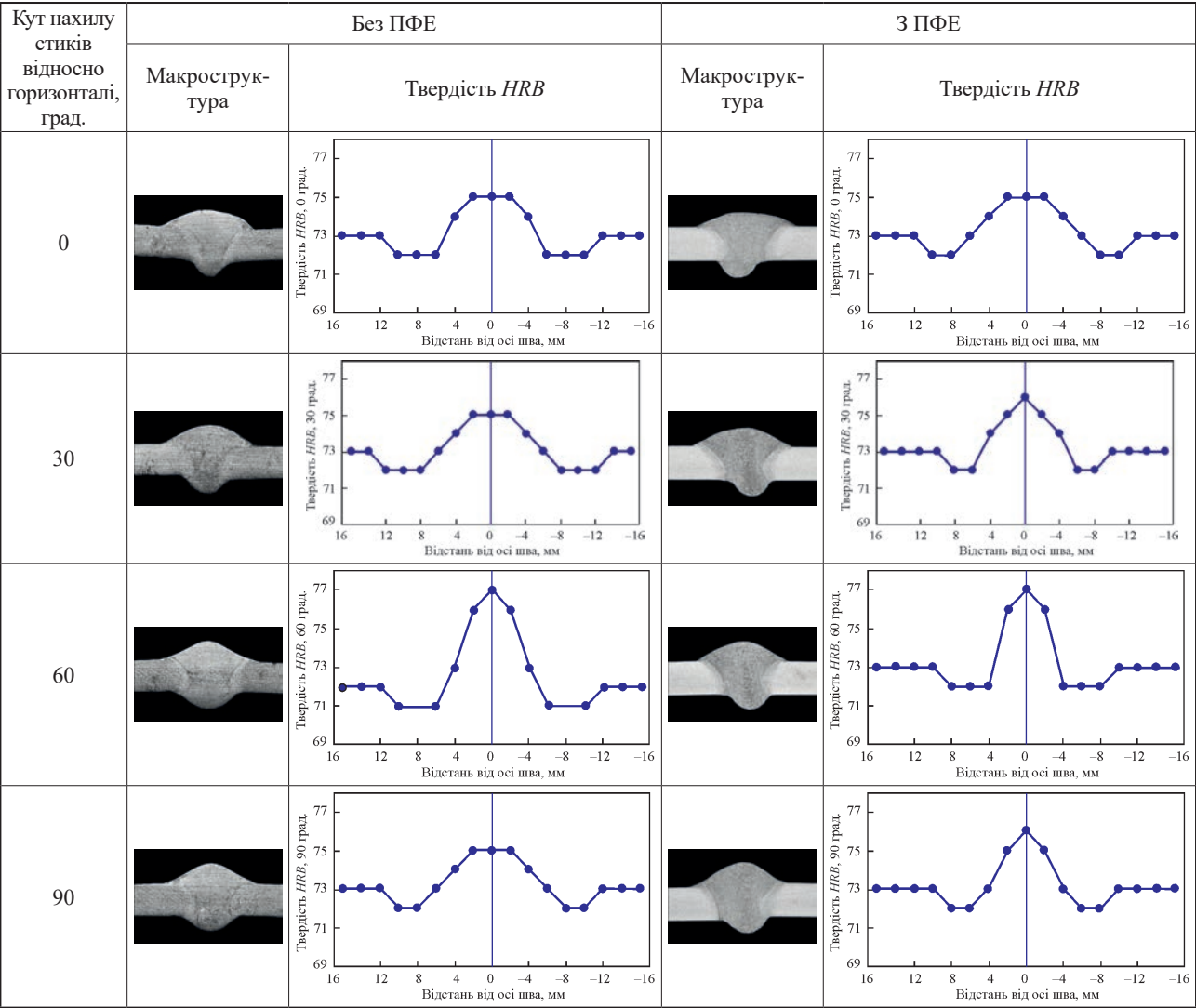


Рис. 3. Макроструктура та твердість зварних з’єднань сплаву АМг5М товщиною 4 мм, отриманих у різних просторових положеннях плавким електродом на швидкості зварювання 23 м/год без застосування ПФЕ та при використанні ПФЕ

11,65 мм, а без підкладки зменшення до 9,96 мм. У випадку, коли зварювання стиків здійснювали з ПФЕ під кутом 60°, ширина становила 11,40 мм, а без ПФЕ – 9,74 мм. При зварюванні стиків у вертикальному положенні, тобто під кутом 90° відносно горизонталі, ширина швів складала, відповідно, 10,74 та 10,12 мм.

Ширина кореня швів при цьому мала наступні значення: при зварюванні в горизонтальній площині (кут 0°) становить 4,58 мм без використання ПФЕ та 5,9 мм з ПФЕ. В положенні стиків під кутом 30° відносно горизонталі ширина кореня складала, відповідно, 5,24 та 4,84 мм. При розташуванні стиків під кутом 60° ширина кореня шва, виконаного без ПФЕ – 6,96 мм, а з ПФЕ – 4,84 мм. В умовах вертикального зварювання стиків (90° відносно горизонталі) – 6,62 та 5,21 мм, відповідно.

Показник твердості металу, який відображає його чутливість до термічного циклу зварювання, у з’єднаннях сплаву АМг5М товщиною 4 мм вимірювали твердоміром за загальноприйнятою

стандартною методикою (ГОСТ 9012-59 Твердість по Роквеллу). Залежність значень даного показника від кута нахилу стиків надано на рис. 3. Як показує аналіз результатів вимірювання твердості, використання дроту ЗвАМг6 з більшим вмістом магнію (6,0 %) забезпечує підвищення твердості металу швів порівняно з основним металом сплаву АМг5М. На значення показника майже не впливає кут розташування стиків при зварюванні. Рівень твердості співпадає з основним металом у стані відпалу і становить (*HRB* 72...73). Твердість у центральній зоні шва вища на 3...4 од. за твердість в ЗТВ та основного металу. Це пояснюється позитивним впливом зварного присадкового дроту. Твердість металу швів, виконаних у горизонтальному положенні (0°) на підкладці та без неї однакова та становить 75 од. Показник твердості швів, зварених у положенні 30°, становить 75 од. без використання ПФЕ та 77 од., коли застосовують ПФЕ. При розташуванні стиків під кутом 60°, твердість дорівнює в обох випадках 77 од.

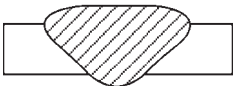
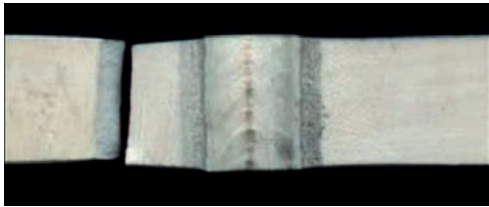
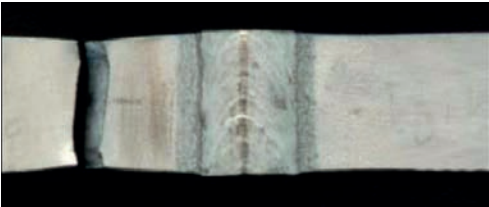
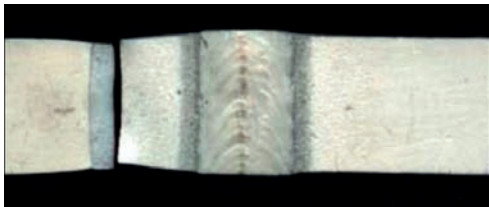
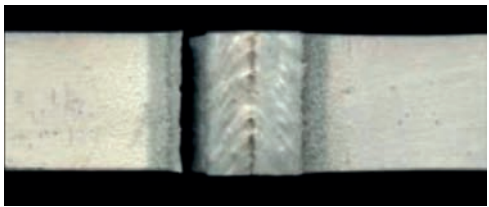
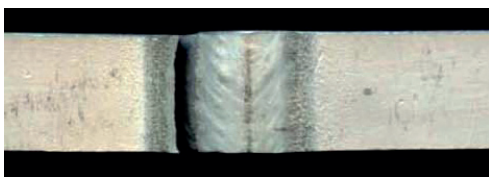
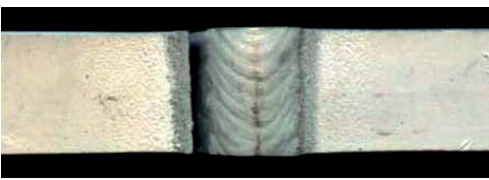
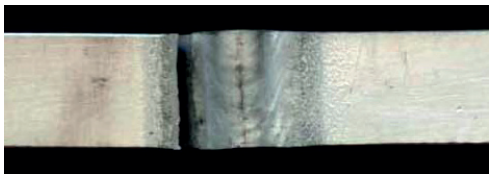
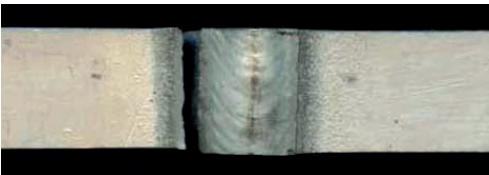
Кут нахилу стиків відносно горизонтальної площини, град.	Без використання ПФЕ	З використанням ПФЕ
		
0		
30		
60		
90		

Рис. 4. Характер руйнування зварних з’єднань сплаву АМг5М товщиною 4 мм, отриманих ІДЗПЕ у різних просторових положеннях, з ПФЕ та без нього

Зварювання стиків у вертикальному положенні (90°) без ПФЕ забезпечує твердість швів на рівні 75 од., а з ПФЕ – 76 од. Протяжність ЗТВ в умовах зварювання в горизонтальній площині становить 24 мм, включаючи шов, незалежно від використання ПФЕ. Зміна просторового положення від 0 до 90° викликає зменшення протяжності ЗТВ до 20 мм в стиках, виконаних у технологічному варіанті із застосуванням ПФЕ. У разі зварювання під кутом 30° відносно горизонталі без застосування підкладки розмір ЗТВ становить 28 мм. При зміні просторового положення з 60 до 90°, коли зварювання виконували без використання ПФЕ, протяжність ЗТВ зменшувалася та складала 24 мм, включаючи шов.

Показники міцності зварних з’єднань ($\sigma_{\text{в}}^{\text{зв.з.}}$) встановлювали на стандартних зразках з технологічним посиленням на лицевій поверхні шва та з видаленим коренем шва. Міцність металу шва ($\sigma_{\text{в}}^{\text{м.ш.}}$) визначали на зразках без посилення та кореня шва (ГОСТ 6996-66). Руйнування зразків зварних з’єднань відбувалося в основному металі, а також в зоні термічного впливу біля лінії сплавлення, що свідчить про зниження міцності металу в умовах нагрівання (рис. 4). За результатами ана-

лізу (табл. 3) шви зварних з’єднань, отримані без ПФЕ в горизонтальному положенні, мають міцність 280,0 МПа, а при використанні – 299,3 МПа. Міцність з’єднань, виконаних в положенні під кутом 30°, становила 285,0 та 294,8 МПа, відповідно. У випадку, коли зварювання виконують під кутом 60°, міцність з’єднань складає 291,3 та 279,8 МПа, а у вертикальному положенні (90°) значення міцності становить 282,0 МПа без ПФЕ та 280,4 МПа з ПФЕ. Коефіцієнт міцності зварних з’єднань ($K_{\text{в}}^{\text{зв.з.}}$), отриманих у різних просторових положеннях, складав 0,89...0,95, коли зварювання виконували без ПФЕ, та 0,92...0,98, коли з ПФЕ (табл. 3).

Показник пластичності (кут згину α) зварних з’єднань оцінювали в умовах триточкового згину з прикладенням робочого навантаження зі сторони кореня шва. Технологічне посилення та корінь шва, відповідно, були механічно видалені згідно до вимог ГОСТ 6996-66. Для порівняння показник деформаційної здатності визначали на зразках основного металу. За результатами аналізу (табл. 3) з’єднання, які були зварені в горизонтальному положенні, мають наступні значення пластичності: без ПФЕ – 85°, а при наявності ПФЕ – 129°. Після зварювання стиків в положенні 30° без використання ПФЕ показник

Таблиця 3. Вплив підкладного формуючого елемента та просторових положень стиків сплаву АМг5М товщиною 4 мм на механічні властивості зварних з'єднань

Показники механічних властивостей з'єднань	Без використання ПФЕ				З використанням ПФЕ			
								
	Кут зварювання, град.							
	0	30	60	90	0	30	60	90
$\sigma_{\text{в}}^{\text{зв.з}}$, МПа	<u>276,2...287</u> 280,0	<u>283,0...286,1</u> 285,0	<u>288,0...297,0</u> 291,3	<u>269...290</u> 282	<u>297,0...301,0</u> 299,3	<u>291,9...300,3</u> 294,8	<u>264,3...293,3</u> 279,8	<u>267,0...291,6</u> 280,4
$\sigma_{\text{в}}^{\text{м.ш.}}$, МПа	<u>268,8...294,4</u> 282,7	<u>280,2...285,1</u> 282,1	<u>274,0...284,0</u> 280,2	<u>269...278</u> 272,8	<u>287,3...289,4</u> 288,0	<u>285,0...285,0</u> 285,0	<u>271,0...284,0</u> 278,6	<u>277,0...281,9</u> 278,8
α , град.	<u>78...89</u> 85	<u>107...110</u> 105	<u>93...116</u> 103	<u>106...126</u> 113	<u>128...130</u> 129	<u>125...130</u> 127	<u>104...108</u> 106	<u>97...98</u> 98
$K_{\text{В}}^{\text{зв.з}}$	0,92	0,93	0,95	0,92	0,98	0,97	0,92	0,92
$K_{\text{В}}^{\text{м.ш}}$	0,93	0,92	0,92	0,89	0,94	0,93	0,91	0,91
Примітка. 1. Механічні властивості сплаву АМг5М: $\sigma_{\text{в}}^{\text{зв}} = 305$ МПа, $\sigma_{0,2}^{\text{зв}} = 180$ МПа, $\delta = 20$ %, $\alpha = 180^{\circ}$. 2. $K_{\text{В}}^{\text{зв.з}}$ – коефіцієнт міцності зварного з'єднання металу шва. $K_{\text{В}}^{\text{зв.з}} = \sigma_{\text{в}}^{\text{зв}} / \sigma_{\text{осн.м.}}$ відповідно, коефіцієнт міцності металу шва $K_{\text{В}}^{\text{м.ш}} = \sigma_{\text{м.ш}}^{\text{зв}} / \sigma_{\text{осн.м.}}$.								

пластичності дорівнює 105° , а при його використанні – 127° . У випадку, коли зварювання відбувається без ПФЕ в положенні стиків під кутом 60° , пластичність з'єднань становить 103° . Зварювання стиків з використанням ПФЕ майже не впливає на значення показника пластичності (106°). При зварюванні у вертикальному положенні стиків (під кутом 90°), коли ПФЕ не застосовували, пластичність з'єднань складала 113° , а в разі застосування – 98° . Порівняно з основним металом ($\alpha = 180^\circ$) значення пластичності з'єднань нижчі у всіх досліджуваних з'єднаннях, але при цьому слід відмітити наступне. Зварювання сплаву АМг5М без використання ПФЕ зумовлює пропорційне зростання рівня пластичності у міру збільшення кута просторового положення стиків: 85, 105, 103, 113° . Якщо при зварюванні застосовується ПФЕ, то відмічається зворотна залежність – показник пластичності зменшується – 129, 127, 106, 98° , відповідно, зберігаючи достатньо високий рівень.

Дослідження макроструктури зварних швів показало, що вони щільні, характеризуються наявністю зернистої структури. Грубої недопустимої пористості в структурі швів та зони сплавлення не спостерігається. Морфологія структури литого металу швів однакова, незалежно від значення кута нахилу стиків при зварюванні (див. рис. 3). Температурний діапазон нагрівання металу під час зварювання сплаву АМг5М викликає характерне утворення структурних зон: шва, зони сплавлення металу шва з основним металом та ЗТВ. Остання суттєво впливає на властивості та характер руйнування зварних з'єднань.

Висновки

1. Отримано додаткові дані щодо особливостей формування швів під час імпульсно-дугового зварювання у різних просторових положеннях сплаву АМг5М товщиною 4 мм плавким електродом на швидкості 23 м/год з використанням підкладного формуючого елемента (ПФЕ) та без нього. Вста-

новлено, що процес зварювання плавким електродом без ПФЕ незалежно від кута нахилу стиків відносно горизонтальної площини забезпечує належні умови формування якісних швів сплаву та суттєво не впливає на рівень міцності з'єднань. Наявність ПФЕ збільшує в середньому на 4...12 % геометричні розміри швів, зварених плавким електродом в залежності від просторового положення стиків.

2. Встановлені особливості формування структури зварних з'єднань сплаву АМг5М у різних просторових умовах дозволяють рекомендувати до застосування в монтажних умовах процес зварювання плавким електродом різноманітних корпусних алюмінієвих конструкцій без застосування ПФЕ. Це зумовлено тим, що зварні шви мають макроструктуру, яка ідентична швам, отриманим з використанням ПФЕ. В обох випадках шви не мають грубих недопустимих дефектів у вигляді крупних пор, тріщин, несупільностей, оксидних включень. Експериментальні результати наглядно демонструють, що для забезпечення належної якості швів і високого рівня експлуатаційних властивостей застосування ПФЕ не є обов'язковим при зварюванні алюмінієво-магнієвих сплавів плавким електродом у різних просторових положеннях стиків. Даний процес ІДЗПЕ можна рекомендувати для роботи у монтажних умовах без застосування ПФЕ, використовуючи оптимальні параметри режимів зварювання на відповідних кутах нахилу конструкційних елементів, без зниження якісних показників зварних з'єднань.

Список літератури

1. Андреев С.Б., Головаченко В.С., Гобач В.Д., Руссо В.А. (2006) *Основы сварки судовых конструкций*. Санкт-Петербург, Судостроение.

2. Колпаков И.Н., Осокин Е.П., Павлова В.И., Ушков С.С. (2006) Конструкционные алюминиевые материалы в судостроении. (ДРГУП ЦНИИ КМ «Прометей»). ТЛС, 1-2, 73–80.

3. Ищенко А.Я., Лабур Т.М., Бернадский В.Н., Маковецкая О.К. (2006) *Алюминий и его сплавы в современных сварных конструкциях*. Киев, Экотехнология.

4. Лабур Т.М., Жерносеков А.М., Яворская М.Р., Пашуля М.П. (2013) Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом алюминиевых сплавов с регулируемой формой импульсов. *Сварочное производство*, **11**, 3–7.
5. ДСТУ EN ISO 10042:2015 (EN ISO 10042:2005, TDT:ISO10042:2005, IDT) Зварювання. З'єднання з алюмінію та його сплавів, виконані дуговим зварюванням. Рівні якості залежно від дефектів.
6. Лабур Т.М., Гаврилюк Ю.М., Пашуля М.П., Яворская М.Р. (2014) Влияние технологии сварки на структуру и физико-механические свойства соединений алюминиевого сплава АМг5М. «Механика разрушения материалов и прочность конструкций»: сб. науч. тр. 5-й Международ. конф. (24–27.06.2014, Львов). ФМИ НАН Украины, сс. 457–461.
2. Kolpakov, I.N., Osokin, E.P., Pavlova, V.I., Ushkov, S.S. (2006) Structural aluminium materials in shipbuilding. *TsNII Prometej. TJS*, **1-2**, 73–80 [in Russian].
3. Ishchenko, A.Ya., Labur, T.M., Bernadsky, V.N., Makovetskaya, O.K. (2006) *Aluminium and its alloys in modern welded structures*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
4. Labur, T.M., Zhernosekov, A.M., Yavorskaya, M.R., Pashulya, M.P. (2013) Consumable electrode pulsed-arc welding of aluminium alloys with regulated pulse shape. *Svarochn. Proizvodstvo*, **11**, 3–7 [in Russian].
5. DSTU EN ISO 10042:2015 (EN ISO 10042:2005, TDT:ISO10042:2005, IDT) *Welding. Arc-welded joints in aluminium and its alloys. Quality levels for imperfections* [in Ukrainian].
6. Labur, T.M., Gavrilyuk, Yu.M., Pashulya, M.P., Yavorskaya, M.R. (2014) *Influence of welding technology on structure and physical-mechanical properties of joints of AMg5M aluminium alloy*. In: *Proc. of 5th Int. Conf. on Fracture Mechanics of Materials and Strength of Structures* (Ukraine, Lvov, 24–27.06.2014). PMI, 457–461 [in Russian].

References

1. Andreev, S.B., Golovachenko, V.S., Gobach, V.D., Russo, V.A. (2006) *Fundamentals of welding of ship structures*. St.-Petersburg, Sudostroenie [in Russian].

WELD FORMATION IN CONSUMABLE ELECTRODE WELDING OF BUTT JOINTS OF AMG5M ALUMINIUM ALLOY IN SITE WITH A FORMING BACKING ELEMENT AND WITHOUT IT

T.M. Labur, M.R. Javorska, V.A. Koval

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 presents the results of studying the features of weld formation at consumable electrode pulsed-arc welding of 4 mm AMg5M alloy in different positions at the speed of 23 m/h. with forming backing element (FBE) and without it. It is shown that sound welds form irrespective of the angle of butt joint inclination relative to the horizontal plane. FBE presence increases the geometrical dimensions of weld made with consumable electrode by 4 – 12% on average, depending on the position of butt joints. Obtained data clearly demonstrates the possibility of achieving the required quality of welds and high level of mechanical properties in consumable electrode welding of aluminium-magnesium alloys at different positions of the butt joints without FBE application. 6 Ref., 3 Tabl., 4 Fig.

Keywords: aluminium alloy, argon-arc welding, consumable electrode, filler wire, butt joint positions, forming backing element, welded joints, welds, solidification, structure, mechanical properties

Надійшла до редакції 10.03.2021

Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
Українське товариство неруйнівного контролю та технічної діагностики
Міжнародна Асоціація «Зварювання»
II МІЖНАРОДНА КОНФЕРЕНЦІЯ
**НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ
та
МОНІТОРИНГ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ**
6–10 вересня 2021
Одеса, Аркадія, готель «Аркадія»

Генеральний спонсор
ПрАТ «УкрНДІНК»



Офіційний спонсор
ТОВ «НВФ «Діагностичні
прилади»



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

МЕТОД АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ПРИ ОЦІНЮВАННІ СТАНУ ЗВАРНИХ ШВІВ ТА ЇХ СЛУЖБОВИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Частина 2. Практичне застосування

С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, О.І. Бойчук, М.А. Овсієнко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: inpat59@paton.kiev.ua

Більшість існуючих конструкцій містить зварні з'єднання. Розглядаються питання контролю службових характеристик зварних з'єднань з використанням методу акустичної емісії. Увага приділена зміні властивостей матеріалів діючих конструкцій, що мають зварні елементи, після тривалої експлуатації з урахуванням часу та ймовірного порушення експлуатаційних умов. Розглянуті приклади оцінки зміни характеристик матеріалів зварних конструкцій за даними акустичної емісії, визначення їх пошкодженості та залишкового ресурсу. Бібліогр. 17, табл. 5, рис. 24.

Ключові слова: зварні шви, службові властивості, акустична емісія (АЕ), АЕ активність, АЕ сканування, пошкодження, руйнування

Вплив типу зварного з'єднання на акустичну емісію (АЕ) і можливість кількісної оцінки такого впливу методом АЕ розглянуто в частині 1 даної статті [1].

Висока чутливість методу АЕ до виникнення та розвитку дефектів у матеріалах на дуже ранніх стадіях руйнування дозволяє контролювати службові властивості зварних з'єднань як безпосередньо в процесі зварювання, так і на будь-яких етапах експлуатації зварних конструкцій [2].

У частині 2 розглядаються питання практичного застосування методу АЕ для контролю процесу зварювання та оцінки службових властивостей зварних з'єднань різних типів на прикладі деяких конструкцій з тривалим експлуатаційним напруженням. Відзначимо, що несуча здатність конструкції і, відповідно, її ресурс значною мірою закладаються на стадії виготовлення. Коригування вказаних чинників відбувається під час регламентних або позапланових ремонтних заходів. Оскільки більшість металевих конструкцій є зварними,

їх якість суттєво залежить від стану зварних швів, зокрема тих, що виконують під час ремонту. Як приклад неякісно виконаного зварного шва можна привести руйнування у трубі газопроводу уздовж лінії неповного проплавлення, що виникли за рахунок зсуву дуги під час зварювання (рис. 1).

Важливою з точки зору запобігання ситуаціям, подібним представленим на рис. 1, є можливість контролювати за допомогою методу АЕ якість зварного шва безпосередньо в процесі зварювання. Такі експерименти проводилися у ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ і показали, що метод АЕ в процесі зварювання дозволяє відбраковувати неякісні ділянки зварних швів на сталевих зразках.

З метою показати можливість застосування методу АЕ для контролю виникнення дефектів під час зварювання алюмінієвих сплавів проведемо дослідження сплаву АМг5В. Зварювали пластину товщиною 10 мм, шов 600×12 мм. Для зварювання використовували пристрій АДСВ-2 (рис. 2, а). Зварювання виконували вольфрамовим електро-

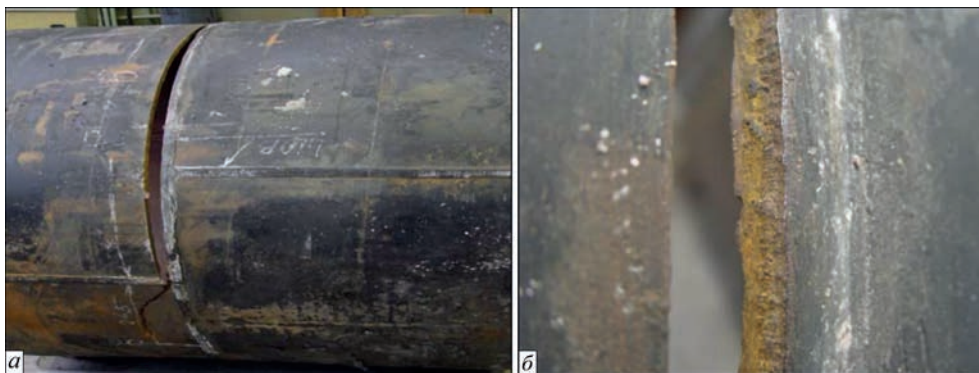


Рис. 1. Труба газопроводу після руйнування (а) та збільшене зображення ділянки, на якій видно результат неповного проплавлення металу (б)

Недосека С.А. – <https://orcid.org/0000-0002-3239-381X>, Недосека А.Я. – <https://orcid.org/0000-0001-9036-1413>, Яременко М.А. – <https://orcid.org/0000-0001-9973-4482>, Бойчук О.І. – <https://orcid.org/0000-0001-5800-1549>, Овсієнко М.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2202-827X>
С.А. Недосека, А.Я. Недосека, М.А. Яременко, О.І. Бойчук, М.А. Овсієнко

дом з присадкою дротом діаметром 2 мм зі сплаву АМгб. Параметри зварювання: напруга $U = 16$ В, струм $I = 350$ А, швидкість руху дуги 15 м/год. Для реєстрації АЕ використовували систему ЕМА-1 на базі вимірювального пристрою «Defectophone» та два датчики типу ДАЕ-01, розташовані на кінцях зони зварювання, що дозволило отримувати координати та амплітуди подій АЕ, які виникали в процесі зварювання. Картина розподілу подій АЕ та їх амплітуд представлена на рис. 2, б. За даними досліджень, проведених після зварювання, якість шва була задовільною, недопустимих для умов експлуатації дефектів не виявлено. В той же час (рис. 2, б) при проведенні випробувань зареєстровано значну кількість подій АЕ з високими амплітудами. Відповідно слід вважати, що система АЕ зареєструвала незначні пошкодження типу дислокаційних зсувів або їм подібних. Це означає, що більш значні дефекти також можуть бути зафіксовані, але потрібні розробка і застосування фільтрів для відбраковування отриманих сигналів АЕ за певними критеріями, виділяючи з них події, що відповідають наявності дійсно небезпечних дефектів. Це вимагає додаткових досліджень.

Для вирішення поставлених завдань для сталей проведено зварювання трьох зразків з матеріалу 09Г2С та двох – з 13ХГМРБ (матеріал, схильний до дефектоутворення). Товщина зразків 20 мм. Попередньо визначені та підготовлені місця установки датчиків АЕ, забезпечений їх захист під час зварювання. Для проведення контролю використовували систему ЕМА-2, для обробки да-

них – програмне забезпечення (ПЗ) ЕМА-3.92 [3]. Перед проведенням АЕ контролю було зроблено попереднє тестове прозвучування для визначення вихідних даних, необхідних для роботи системи ЕМА-2: фіксований поріг – 10 мВ; плаваючий поріг – 2σ ; мертвий час вимірювання – 10 мс; частота зрізу фільтра високої частоти – 100 кГц. АЕ контроль проводився як безпосередньо в процесі зварювання з метою оцінки рівнів АЕ, урахування впливу технологічних перешкод, оцінки впливу багатопрохідного та неякісного зварювання на загальну картину АЕ, так і при охолодженні зварного шва.

При проведенні АЕ контролю реєструють дискретну та неперервну АЕ. Дискретна АЕ характеризує розвиток тріщин, перехід конструкційного матеріалу в пластичний стан, розкриття окисних плівок і т.п. Механізмом генерації дискретної АЕ є зародження в структурі матеріалу пошкоджень та їх дискретний розвиток. Неперервна АЕ характеризує витікання рідини або газу крізь нещільності в матеріалі або інтенсивне переміщення груп дислокацій. Механізмами генерації неперервної АЕ є процеси безперервної локальної перебудови структури матеріалів при їх деформації або просочування і витікання рідин і газів через нещільності та тріщини.

З метою визначення координат джерел АЕ використовували 2 датчики (канали №№ 3, 5 для сталі 09Г2С та №№ 1, 2 – для 13ХГМРБ). Застосовували кластерну локацію. Розмір кластера для реєстрації зон підвищеної АЕ активності в процесі зварювання визначали як 10 % від розміру бази антени, яка становила 100...420 мм. Кластеризація зареєстрованих подій від гострої нещільності, такої як тріщина, є щільною, в той час як райони пластичної деформації, пов'язані, наприклад, з корозійними пошкодженнями, формують область джерела з великим ступенем невизначеності в розмірах. У більшості випадків зростаюча тріщина розглядається як найбільш небезпечний дефект. Джерела, які розглядаються як малоактив-

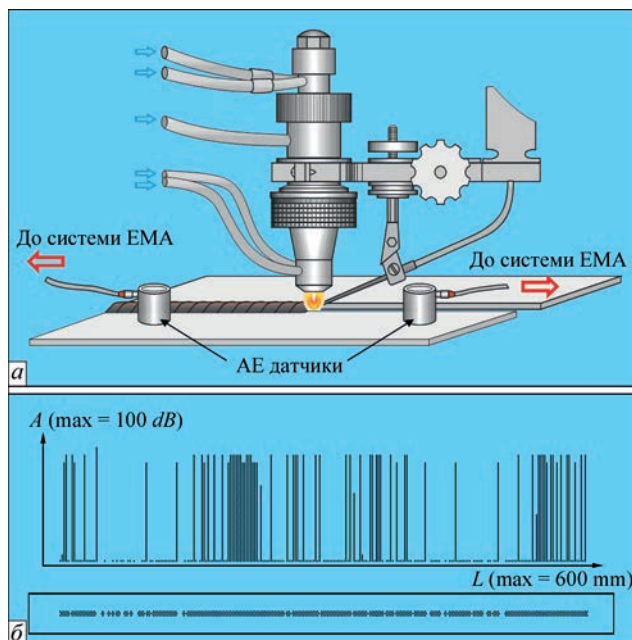


Рис. 2. Дослідження сплаву АМгб: а – схема зварювання пластини; б – гістограма амплітуд A подій АЕ уздовж зварного шва відповідно до координати L (зверху) та координати цих подій АЕ (внизу)

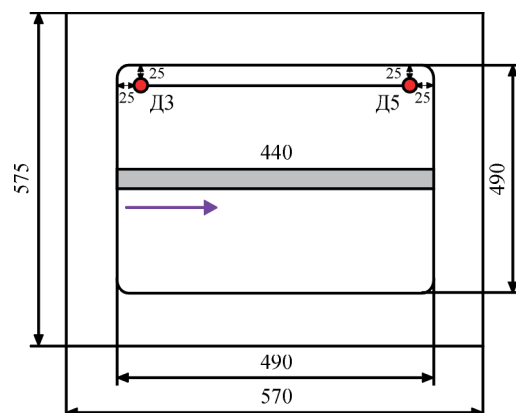


Рис. 3. Типова схема контролю зварювання сталевих пластин

ні або мало інтенсивні, зазвичай не вимагають подальшої оцінки.

Загальна схема випробування наведена на рис. 3 (інші схеми відрізняються лише шириною пластини та відстанню між датчиками АЕ).

Зупинимося на найбільш показових результатах досліджень. Головний та самий принциповий результат: у процесі зварювання незалежно від кількості проходів та якості шва отримується чітка картина АЕ, а зареєстровані події слідує за зварюванням. Параметри та картину АЕ під час п'ятипрохідного зварювання (жорсткий стик) наведено у табл. 1 та на рис. 4. Результати рентгенографічного дослідження, проведеного після охолодження шва, показують, що зварювання виконане з задовільною якістю (рис. 5).

На рис. 4 показані фрагменти екранів локації програми ЕМА-3, де у нижній частині – локаційна схема з номерами датчиків, а під нею – координати зареєстрованих подій АЕ (вертикальні риси, висота яких відповідає амплітуді події 0...500 мВ). Над локаційною схемою стовпчиками з прапорцями показані сформовані на основі подій АЕ кластери (колір відповідає певному діапазону амплітуд подій АЕ, прапорець показує кількість подій АЕ у відповідному кластері). Даний опис відноситься і до рис. 7, 21, 23.

Картина АЕ під час першого та п'ятого проходів зварювання (рис. 4) відрізняється неістотно як за кількістю подій АЕ, так і за їх розташуванням (під час інших трьох картина була в значній мірі ідентичною). Сформовані кластери мають

Таблиця 1. Параметри зварювання пластин зі сталі 09Г2С

Номер проходу	Параметри зварювання		
	I, A	U, B	$V_{зв}, м/год$
1	220...230	36...37	16...17
2	250	35...36	20
3	250	35	20
4	250	35	16...17
5	250	35	19...20

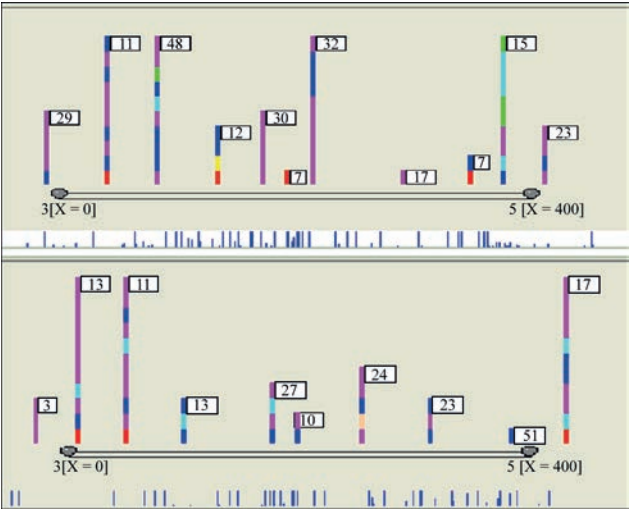


Рис. 4. Знімки екрану локації системи ЕМА. Перший (зверху) та останній (внизу) етапи зварювання пластини згідно з табл. 1

стохастичний характер розташування відповідно до стохастичного характеру виникнення сигналів АЕ під час зварювання та не несуть самі по собі суттєвої інформації про якість зварного з'єднання. Але на їх базі принципово можуть бути створені еталони якісного процесу зварювання.

Наступним важливим результатом є те, що по мірі охолодження зразка після зварювання кількість зареєстрованих подій АЕ поступово знижується і досягає нульової позначки ще до повного охолодження шва. Час зникання АЕ інформації після завершення зварювального процесу може бути використаний як критерій його якості. Наприклад, у наведеному вище експерименті, де якість шва достатньо висока, спостерігалось швидке зниження кількості подій АЕ по мірі охолодження, а при зниженні температури шва до 48 °С – їх повна відсутність у подальшому.

Зовсім по-іншому можна охарактеризувати поведінку матеріалу 13ХГМРБ. У процесі зварювання електродом АНП-2 ($d = 4,0$ мм) спостерігалась АЕ активність, подібна до тої, що і в сталі 09Г2С, але в матеріалі виникла тріщина довжиною близько 100 мм (рис. 6). Наслідком цього стало те, що на другий день після зварювання були зареєстровані події АЕ в області трі-

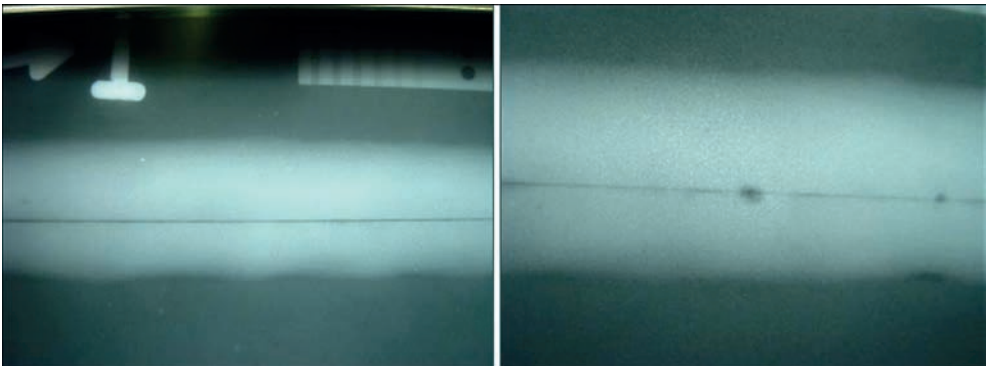


Рис. 5. Рентгенографія окремих ділянок зварного шва після п'яти проходів зварювання

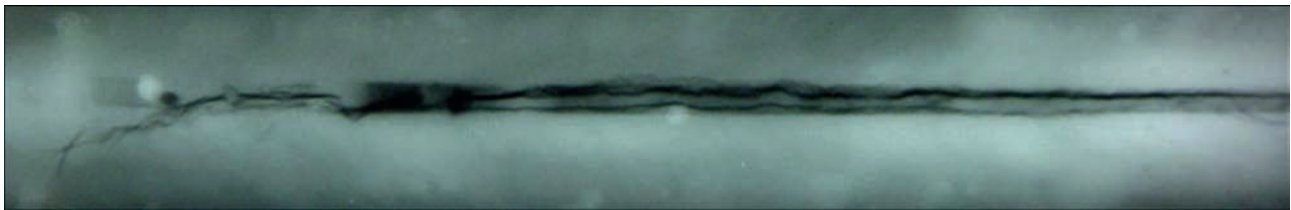


Рис. 6. Рентгенографія тріщини в матеріалі 13ХГМРБ після зварювання

щини (рис. 7). Датчики 1 та 2 при цьому були розташовані близько до країв тріщини.

Незважаючи на незначну акустичну активність, сама її наявність після повного охолодження зразка показує, що метод АЕ є чутливим до дефектів, розвиток яких не повністю загальмувався після закінчення зварювального процесу та наступного повного охолодження зразка до кімнатної температури.

Таким чином, одним з показників якості зварного шва є відсутність АЕ після повного охолодження шва, а час зникнення АЕ після охолодження може слугувати кількісним показником якості зварювання (звучання матеріалу може продовжуватися і після остигання, час звучання залежить від матеріалу).

Оскільки обсяг даної серії експериментів щодо контролю процесу зварювання методом АЕ був досить обмеженим, слід було б рекомендувати продовжити такі дослідження, тому що при досягненні результатів, що могли б використовуватися на виробництві, це б дозволило суттєво покращити контроль зварної продукції безпосередньо під час її виготовлення. Відзначимо також, що за останній час подібні дослідження активізувалися за кордоном [4–6, 12–13].

Розглянемо можливість АЕ контролю великогабаритних конструкцій невеликою кількістю датчиків АЕ. Як правило, такі конструкції містять значну кількість зварних швів. Особливістю вітчизняних конструкцій є те, що багато з них відпрацювали плановий ресурс, але за економічними чинниками не можуть бути замінені повністю або навіть частково. Єдиним засобом продовження їх безпечної експлуатації є періодичний контроль або постійний моніторинг. При цьому іншого неруйнівного методу, крім АЕ, який дозволяв би невеликою кількістю датчиків здійснювати стовідсотковий контроль стану таких конструкцій, не існує. Водночас, результати контролю, отримані

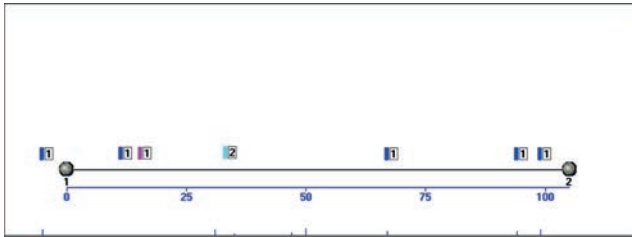


Рис. 7. Знімок екрану локації системи ЕМА (дані на наступний день після зварювання (13ХГМРБ)

методом АЕ, можуть бути ефективно перевірені іншими методами завдяки тому, що використання АЕ дозволяє з досить великою точністю локалізувати небезпечні ділянки, і вже на них має виконуватися перевірка отриманих даних додатковими методами. Це суттєво прискорює процес оцінки стану конструкцій, що контролюються, і водночас дозволяє пересвідчитись у достовірності результатів АЕ контролю.

Одним з таких показових випробувань було тестування методом АЕ змійовика печі П-101 загальною довжиною близько 1200 м, що складається з чотирьох потоків, які мають відповідно радіаційні та конвекційні ділянки кожний. Змійовик являє собою трубу діаметром 219 мм та товщиною 10 мм і є об'єктом підвищеної небезпеки, оскільки температура стінки труби може досягати 523 °С, робочий тиск – 60 ат, а робочим середовищем є вибухонебезпечний вакуумний дистилат. Загальна кількість зварних швів близько 500. Відзначимо, що повний контроль усієї поверхні змійовика іншими неруйнівними методами контролю потребував би у сотні разів більшого часу і складних підготовчих робіт. У даному ж випадку для проведення контролю необхідно було зачистити та знежирити чотири ділянки діаметром 13 мм, щоб встановити на них датчики (рис. 8) та зафіксувати їх спеціальною контактною акустопрозорою речовиною. Попередня перевірка показала незначне затухання АЕ сигналів у матеріалі (сталь 12Х18Н10Т), у зв'язку з чим вдалося провести повний контроль змійовика всього за 2 етапи – по 600 м за кожний. Це свідчить про суттєву перевагу методу АЕ у сенсі витрати часу та зусиль на підготовку вимірювального обладнання порівняно з іншими неруйнівними методами,

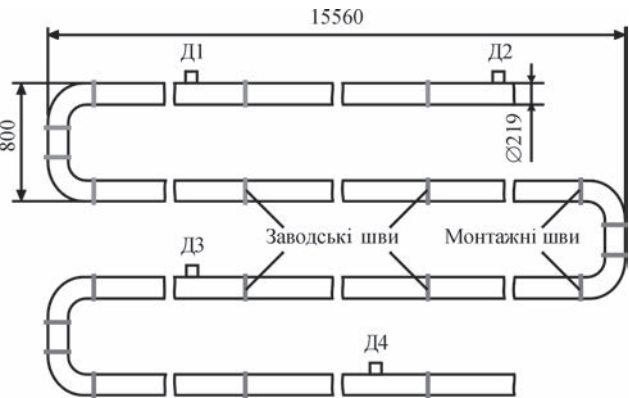


Рис. 8. Схема розташування зварних швів та датчиків АЕ (Д1...Д4) під час контролю змійовика

Таблиця 2. Результати АЕ контролю першого потоку, підтверджені кольоровою дефектоскопією та рентгенографією

Ділянка	Тріщина		Пора		Підріз	
	Кількість	Макс. довжина/глибина, мм	Кількість	Макс. діаметр, мм	Кількість	Макс. довжина, мм
Радіація	2	4/2	2	2	1	300
	1	60/3	2	2	3	200
	3	8/3	3	3	2	200
	2	5/2	-	-	1	100
	2	6/3	-	-	-	-
	2	8/3	-	-	-	-
Конвекція	2	6/2	3	2	-	-
	4	8/2	-	-	-	-
Перехід	-	-	2	3	1	60

а також про принципову можливість проведення стовідсоткового контролю стану об’єкту невеликою кількістю датчиків без необхідності їх пересування під час контролю в інші місця.

Навантаження виконували за стандартною для АЕ випробувань схемою – підйом тиску на 20 ат з наступною витримкою протягом 10 хв, потім знову підйом тиску та витримка, і так кілька разів до максимального випробувального тиску 60 ат. Процедура контролю при цьому зайняла близько 100 хв.

Оскільки результати проведеного контролю зміювика вже були опубліковані [7], сконцентруємося на отриманих висновках. Вони є важливими, тому що після АЕ контролю вказані методом АЕ небезпечні місця були перевірені незалежними фахівцями з використанням двох неруйнівних методів – кольорової дефектоскопії та рентгенографії, застосування яких для перевірки даних АЕ контролю може бути ефективно використано [8]. Це дозволило підтвердити високу достовірність даних, отриманих методом АЕ, а також визначити, які саме дефекти були причиною виникнення АЕ подій. Для більшої наочності наведемо у табл. 2 лише дані, отримані для першого потоку.

Як бачимо, більшість знайдених у зварних швах дефектів становлять тріщини, далі йдуть пори, і найменше знайдено підрізів. Ця статистика, типова для усіх чотирьох потоків, дозволяє зробити висновок, що метод АЕ успішно можна використовувати для контролю службових властивостей зварних конструкцій великих габаритів і при цьому потенційно небезпечних для навколишнього середовища. Це найбільш важли-

вий висновок, але отримані дані дають, крім цього, можливість оцінити, наскільки корисним був би безперервний АЕ моніторинг даного об’єкту. У табл. 2 показано, що труба продовжувала працювати з тріщиною в зварному шві, яка мала довжину 60 мм та глибину 3 мм – майже третину від товщини труби. Ймовірною причиною того, що труба не зруйнувалася, може бути статична невизначеність у місці, близькому до даного шва. Конструкції з такою особливістю можуть роками працювати за наявності досить великих тріщин (наприклад, мостові, фермові та кранові). Результати металографічного дослідження типових дефектів у зварних швах надані на рис. 9.

Виникає питання: як визначити, що тріщина на даному етапі експлуатації несе загрозу для конструкції? Є велика кількість розрахункових методів, у тому числі побудованих на базі механіки руйнування. При правильній постановці задачі і вирішенні її грамотним фахівцем може бути отриманий досить достовірний результат. Але розрахунки потребують часу, якого під час реальної експлуатації конструкції може не вистачити, оскільки руйнування може статися раніше. Альтернативою розрахункам є безперервний АЕ моніторинг з використанням нормованих та сертифікованих засобів оцінки безпеки та прогнозування руйнівного навантаження. При використанні постійного моніторингу будь-який розвиток небезпечного для конструкції дефекту буде заздалегідь зафіксований, після чого у реальному часі системою моніторингу буде видано кольоровий та звуковий сигнал про небезпеку, а на екрані

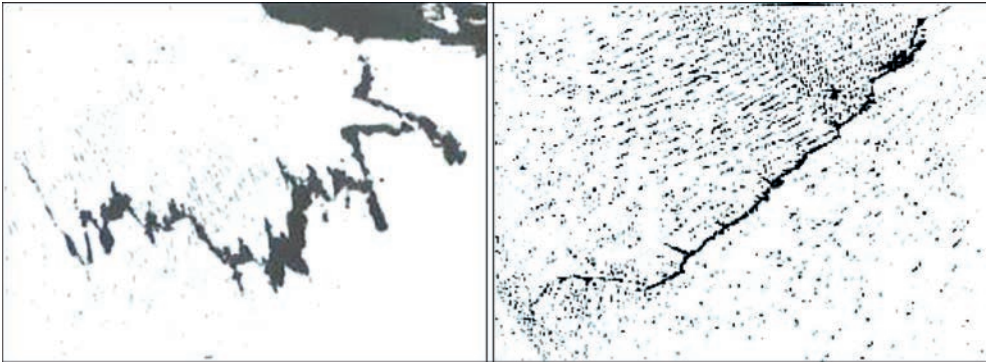


Рис. 9. Типові тріщини у зміювику печі П-101, ×120

Таблиця 3. Рекомендована кількість ділянок ремонту змійовика печі П-101 за результатами АЕ контролю

Ділянка	1 потік	2 потік	3 потік	4 потік
Радіація	12	19	8	12
Конвекція	9	-	-	9
Перехід	5	13	15	-
Загалом	26	32	23	21

відображені кількісні показники прогнозу руйнівного навантаження (рис. 14 [1]). Це є швидким та безпечним засобом запобігання аваріям.

У даному випадку відповідну небезпечну тріщину було зареєстровано методом АЕ як дефект, що розвивається. Стрімкість розвитку показала необхідність ремонту даної небезпечної ділянки. При цьому для методу АЕ неважливо, які габарити та розташування має небезпечний дефект. Значення має лише його акустична активність. А використання додаткових методів контролю показало, що дефект справді присутній, та дозволило встановити його розміри.

За результатами АЕ контролю змійовика печі П-101 був рекомендований ремонт певної кількості зварних швів (табл. 3).

Загальна кількість відбракованих зварних швів складає 102. Враховуючи, що загальна кількість швів сягає близько 500, приблизно оцінимо інтегральну пошкодженість об'єкту контролю в цілому, використовуючи в якості параметра пошкодженості відношення числа дефектних швів до їх загальної кількості [9, 11] згідно з формулою:

$$\Delta W_{\text{ср}} = (1 - N_{\text{пошк}} / N_{\text{заг}}) \cdot 100 \%, \tag{1}$$

де $\Delta W_{\text{ср}}$ – інтегральна пошкодженість об'єкта контролю; $N_{\text{заг}}$ – загальна кількість зварних швів; $N_{\text{пошк}}$ – кількість пошкоджених швів, і отримаємо $\Delta W_{\text{ср}} \approx 20 \%$.

Цікаво виконати перевірку залежності пошкодженості від експлуатаційного напруження, враховуючи, що на момент контролю змійовик мав строк напруження 15 років. Авторами на великому обсязі труб магістральних газопроводів і з використанням п'яти незалежних методів було отримано узагальнену формулу для середньоарифметичного значення пошкодженості $\Delta W_{\text{ср}}$, яка може бути описана [9] як

$$\Delta W_{\text{ср}} = a e^{bt} \cdot 100 \%, \tag{2}$$

де t – термін експлуатаційного напруження; $a = 0,1352$; $b = 0,0333$ [9].

Таким чином, для даного об'єкта контролю $\Delta W_{\text{ср}} = 0,1352 \exp(0,0333 \cdot 15) \cdot 100 \% \approx 22 \%$. Як бачимо, похибка між розрахунковими за результатами контролю даними пошкодженості 20 % та їх перевіркою за формулою (2) є несуттєвою. Формула застосовується тільки для матеріалів, що були в експлуатації. Це означає, що узагальнена формула пошкодженості (1) є справедливою не тільки для труб магістральних трубопроводів, які експлуатуються при зовсім інших умовах навантаження та середовища, а й для проконтрольовано-

го змійовика печі. Відповідно справедливим буде і оснований на формулі (2) розрахунок залишкового ресурсу об'єкта на момент контролю. Для цього можна скористатися номограмою (рис. 10), що пов'язує залишковий ресурс з пошкодженістю [9–11]. Відмінність полягає в тому, що на діаграмі пошкодженість виражена не у відсотках, а у долях одиниці, та максимальній пошкодженості 100 % на номограмі відповідає $\Delta W_{\text{ср}} = 1$.

Можна визначити, що при пошкодженості 20 % (або 0,2 на номограмі) інтегральний залишковий ресурс змійовика на момент контролю складає ≈ 47 років.

Таким чином, за результатами АЕ контролю подібних об'єктів можна визначати небезпечні ділянки, що потребують ремонту, які включають тріщини, пори та підрізи різних розмірів та розташування. На базі оцінки отриманих даних є можливість оцінити інтегральну пошкодженість об'єктів контролю та їх залишковий ресурс.

Відзначимо, що незважаючи на активізацію подібних досліджень за кордоном [4–6, 12–16], їх основним недоліком є відсутність чітко нормованої кількісної оцінки пошкодженості, прогнозу руйнування та ймовірності. При цьому спиратися при оцінці стану як основного матеріалу, так і матеріалу зварних з'єднань на табличні дані небезпечно, оскільки навіть сусідні ділянки однієї конструкції можуть мати різні фізико-механічні характеристики, різну пошкодженість і відповідно різний рівень небезпеки. Слід відзначити досить перспективний вітчизняний підхід, який теж базується на даних АЕ контролю [17].

Проведені відділом технічної діагностики зварних конструкцій ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України масштабні випробування зразків матеріалів трубопроводів з різних регіонів України з різним ек-

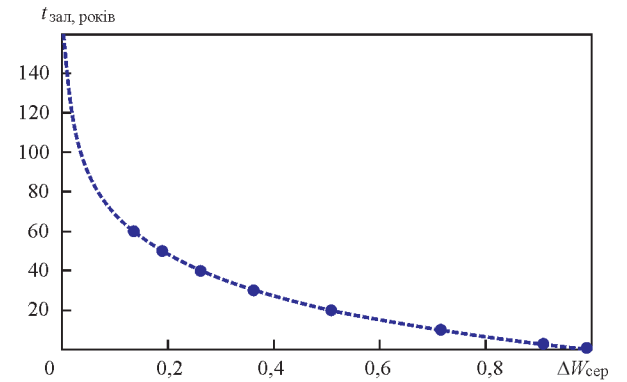


Рис. 10. Номограма для визначення залишкового ресурсу за відомою пошкодженістю

сплуатаційним напрацюванням показали істотну різноманітність АЕ, в тому числі відмінності у наступних параметрах:

- час виникнення першої АЕ події (від 1 с до 2 хв з моменту початку випробування);
- навантаження, при якому з'являється дискретна АЕ (2...55 % по відношенню до руйнівного);
- рівень неперервної АЕ (10...500 мВ);
- коливання рівня неперервної АЕ (2...1000 %);
- загальна кількість подій АЕ (7...12000);
- амплітуди АЕ на однакових стадіях деформування (1...500 мВ);
- активність АЕ на однакових стадіях деформування (1...100 с⁻¹);
- зміна числа подій АЕ в матеріалах з накопиченими пошкодженнями (від зменшення в 2...10 разів до такого ж збільшення).

Перераховане вище дозволяє стверджувати, що загальної картини АЕ для досліджених матеріалів не спостерігається. Проте результати проведених випробувань можна умовно розбити на 2 основні групи [9]. Перша група, що рідше зустрічається, характеризується зниженням числа подій АЕ в матеріалі з багаторічним напрацюванням. Друга, найбільш характерна, – істотним зростанням числа подій. Для матеріалів другої групи характерний також більш низький загальний рівень амплітуд АЕ. Додаткові металографічні дослідження підтвердили припущення про те, що для першої групи основною зміною, пов'язаною з напрацюванням, є окрихчування, яке призводить до зниження числа подій АЕ. Для другої групи, навпаки, збільшення числа подій АЕ говорить про накопичення великої кількості розсіяних пошкоджень, що підтверджується додатковими експериментами чотирма різними методами та служить основою при побудові моделі АЕ в пластичних матеріалах, руйнування в яких розвивається за механізмом виникнення, зростання та з'єднання великого числа пор. Така різноманітність призводить до того, що в критерій (1) в залежності від отриманих АЕ даних закладаються різні параметри з метою розрахунку пошкодженості та залишкового ресурсу. Якщо ж кількість подій АЕ після тривалого напрацювання майже не змінюється, можна припустити, що реалізується змішаний механізм накопичення пошкоджень – окрихчування одночасно з розвитком пор. Водночас слід відзначити, що алгоритми прогнозу руйнівного навантаження, закладені у ПЗ систем типу ЕМА, працюють однаково надійно незалежно від вказаної різноманітності механізмів руйнування.

Покажемо на прикладі труби з магістрального трубопроводу, що зазнав перед цим аварію, ефективність оцінки стану матеріалу з використанням прогнозу руйнування та порівняємо результати

оцінки з даними, отриманими іншими методами. Матеріал для досліджень був наданий з ділянки, розташованої біля місця руйнування (фрагмент труби з найближчим до ділянки руйнування зварним швом). Згідно з паспортом, труба виготовлена зі сталі 20, має діаметр 500 мм та товщину стінки 8 мм. На рис. 11–13 показані схеми виготовлення зразків різного типу для комплексного дослідження властивостей отриманого фрагменту труби. Відзначимо, що на рис. 11 зварний шов і зразки у правій частині показані умовно для більшої наочності. У реальності зразки типу АЕ-01Р вирізали з тієї ж частини труби, що й інші, з ділянки, розташованої зліва, таким чином, щоб зварний шов знаходився посередині зразка (рис. 12). Зразки типу МІ-50 використовували для визначення ударної в'язкості матеріалу. Також були зроблені

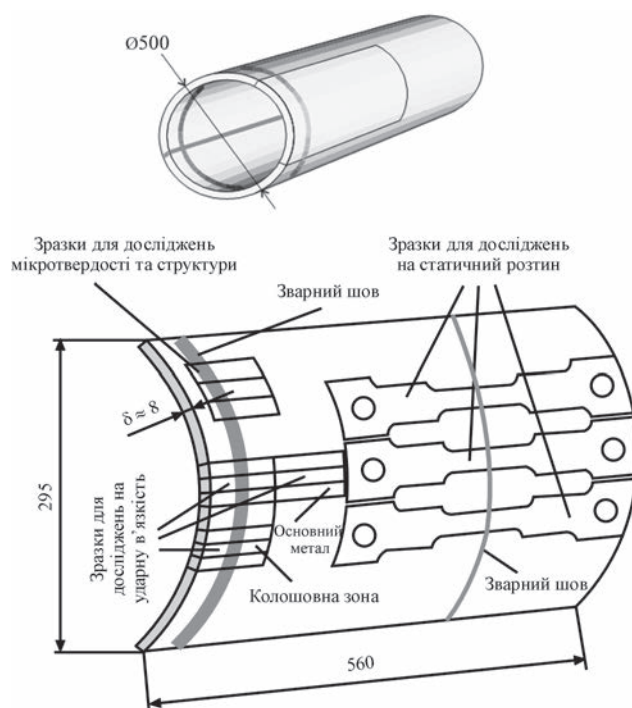


Рис. 11. Схема виготовлення зразків з фрагменту контрольованої труби

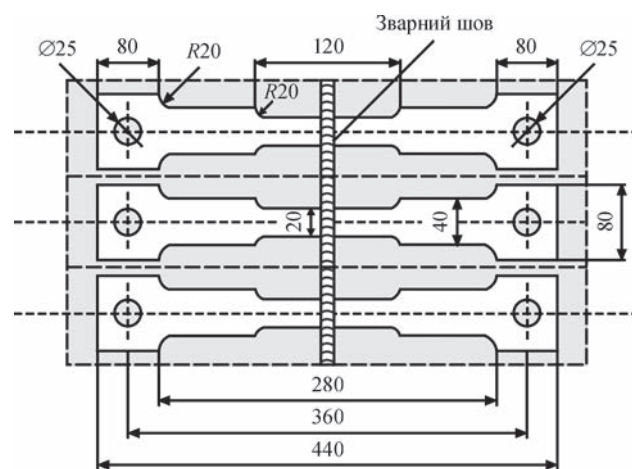


Рис. 12. Схема виготовлення зразків АЕ-01Р для АЕ дослідження при статичному розтягненні

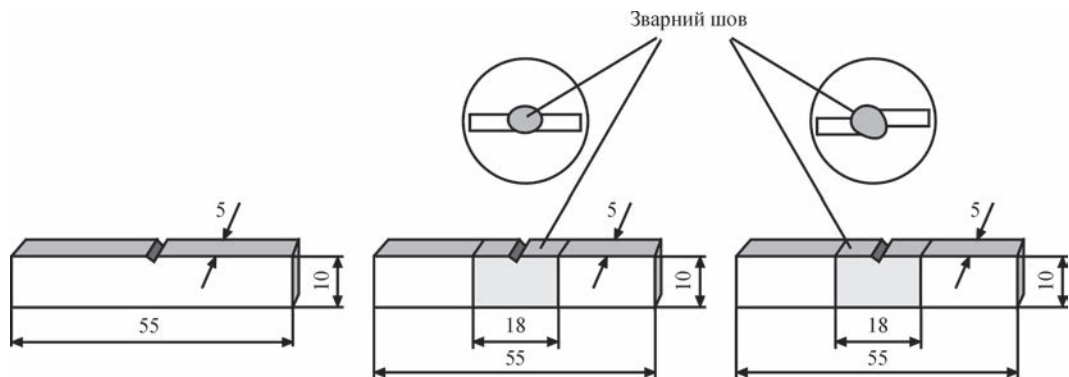


Рис. 13. Схема виготовлення зразків MI-50 для випробувань на ударну в'язкість

зразки в формі прямокутного паралелепіпеду, на яких досліджували мікротвердість матеріалу та проводили АЕ сканування шляхом подавання одним датчиком АЕ акустичного сигналу з одного торця паралелепіпеду та наступним отриманням зміненого сигналу іншим датчиком на другому торці [2, 9–11].

Макроструктурний аналіз проводили після травлення зразків у 20%-му водному розчині надсірчаноокислого амонію. Мікроструктуру досліджували після травлення у ніталі (4%-му розчині азотної кислоти в етиловому спирті). Дослідження і фотозйомку мікроструктури проводили на мікроскопі «Полівар-мет». Твердість вимірювали твердоміром М-400 фірми «КОМПАС» з навантаженнями 25 гс (мікротвердість) та 1 кгс (інтегральна твердість).

Хімічний склад основного металу і металу зварного шва наведено в табл. 4.

Дослідження хімічного складу показало, що матеріал труби не відповідає паспортним характеристикам і не є сталлю 20. Ґрунтуючись на результатах хімічного аналізу досліджуваних зразків і нормах хімічного складу сталей, регламентованого ГОСТ 1050-88, можна зробити висновок, що труба виготовлена зі сталі 15пс (напівспокійна). Виготовлення труб з таких сталей допускається тільки за умови, що тиск газу в них не буде перевищувати 4 ат. Візуальним оглядом зварного темплета, представленого для дослідження, встанов-

лено, що по всій його довжині поверхня шва має грубошарову будову зі слідами підварів. У кореневій частині шва практично по всій його довжині є вм'ятини з боку кореня, непровари та окремі протічки металу. Шви пористі, з окремими шлаковими включеннями і шлаковими прошарками між швами (рис. 14, а). Глибина корневих непроварів в окремих випадках досягає 50...60 % товщини зварюваного металу (рис. 14, б, в). Зварювання проведене з великим зрушенням крайок (рис. 14, в) і зазором між ними. На зовнішній поверхні виробу, що зварюється, є напливи.

Забруднення неметалевими включеннями контролювали відповідно до ГОСТ 1778-70. Для їх визначення використовували кількісний мікроскоп марки «Омнімет». Встановлено, що основний метал забруднений в основному включеннями типу пластичних силікатів, розташованими головним чином в центрі зразків (по товщині листа). Відповідні фотографії наведені на рис. 15. Рівень забрудненості вказаними включеннями відповідає балу 4,5 згідно з ГОСТ 1778-70 (метод ШІ, шкала СП). Підрахунок забрудненості показав, що в найбільш забруднених місцях вміст пластичних силікатів складає 2,366 % за об'ємом. Інші включення (сульфіди, оксисульфіди) містяться в основному металі в дуже малих кількостях (менш ніж бал 1 згідно з ГОСТ 1778-70).

У металі швів виявлено окисли включень глобулярної форми розмірами від декількох мікрометрів до субмікронних (рис. 16). Кількісний аналіз

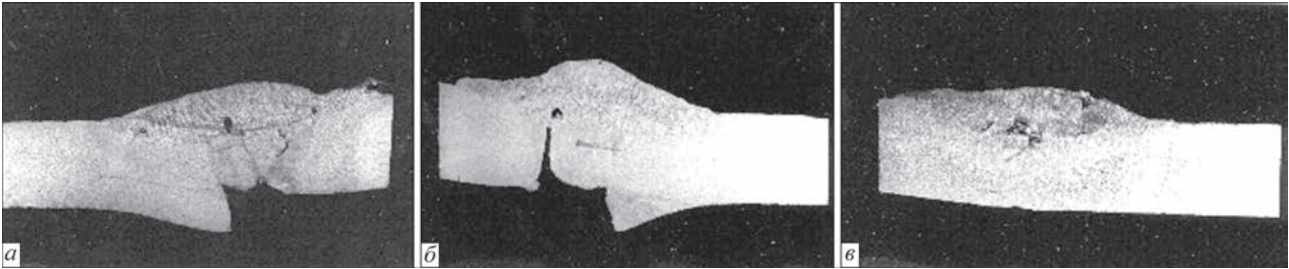


Рис. 14. Макроструктура (×2,5) зварних швів. Зразки I (а), II (б), III (в)

Таблиця 4. Хімічний склад основного металу і металу зварного шва досліджуваних зразків, мас. %

Об'єкт аналізу	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S	P	[O]	[N]
Основний метал	00,137	00,138	00,40	00,05	<0,05	<0,03	<0,02	00,013	00,009	00,02	00,073
Зварний шов	0,129	0,430	0,90	0,06	0,05	<0,03	0,03	0,020	0,017	0,043	0,011

показав, що вміст неметалевих включень у верхніх валиках швів зразків I, II і III дорівнює відповідно 0,156, 0,122 та 0,105 % за об'ємом.

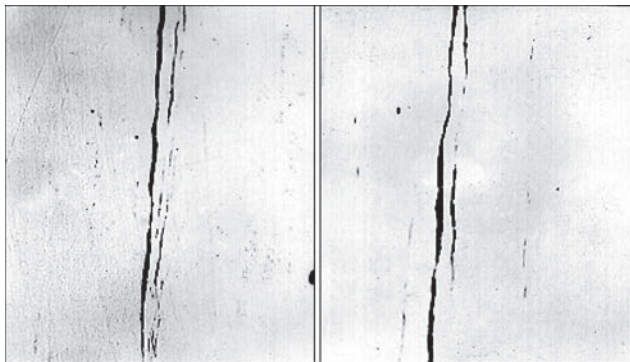


Рис. 15. Неметалеві включення в основному металі (пластичні силікати)

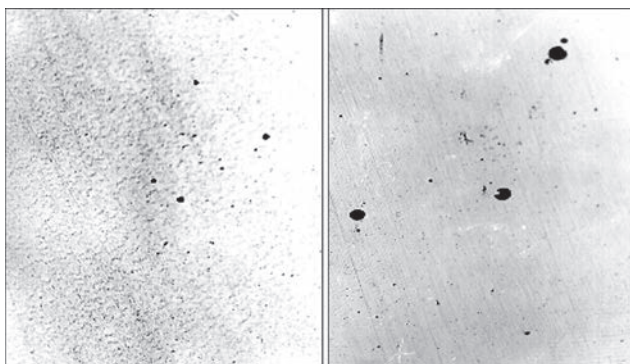


Рис. 16. Неметалеві включення (окисли) у металі шва

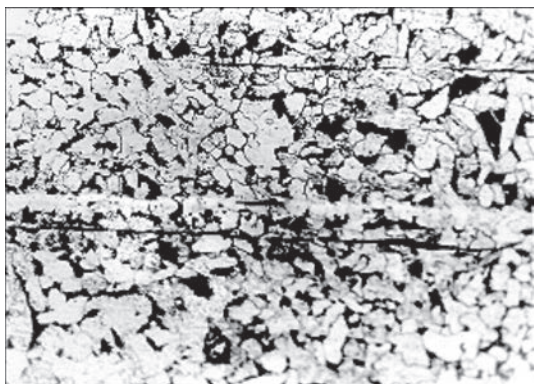


Рис. 17. Мікроструктура ($\times 400$) основного металу

На мікрошліфах були детально досліджені дефекти та мікроструктура різних ділянок зварного з'єднання. Аналіз показав, що мікроструктура основного металу на всіх трьох зразках однакова. Вона являє собою ферит і перліт з смугастістю, відповідної балу 2 (ГОСТ 5640-68), і розміром зерна фериту, відповідним № 8 (ГОСТ 5639-82). Фотографії мікроструктури основного металу представлені на рис. 17.

Характерною особливістю структури основного металу є наявність білої смуги неоднорідності по центру зразка (в напрямку по товщині листа). Відомо, що такого типу ліквацийні смуги часто бувають насичені вуглецем в кількостях, достатніх для випадання мартенситу.

Однак у досліджуваній сталі зазначена смуга складається з фериту. Це підтверджується зокрема вимірами мікротвердості, яка, як і відома мікротвердість зерен фериту, становить за Віккерсом $HV - 1180 \dots 1300$ МПа. Інтегральна твердість основного металу дорівнює при цьому $HV - 1450 \dots 1500$ МПа. У зразку I були досліджені дефекти при збільшенні, більшому, ніж при макродослідженні. Були виявлені нещільності, які можна охарактеризувати як пори (рис. 18). Мікроструктура верхнього шва являє собою суміш полігонального фериту, перліту та пластинчастого фериту з невпорядкованою другою фазою (рис. 19, а). Мікротвердість HV цих складових дорівнює відповідно $1100 \dots 1300$, 2200 та $1700 \dots 1800$ МПа. Інтегральна твердість верхнього шва становить $1500 \dots 1600$ МПа. При збільшенні $\times 40$ проглядається кореневий канал, заповнений шлаком, макропори та мікропори (рис. 18).

Мікроструктура нижнього шва, який піддався нагріву при накладенні верхнього шва, являє собою змішані ферит та перліт (рис. 19, б). На цьому ж фото показана зона сплавлення з основним металом. Чітко видно, що пластичні силікати в зоні сплавлення видозмінилися під впливом тепла зварювальної ванни. Зростання зерна в ділянці перегріву не зафіксовано.

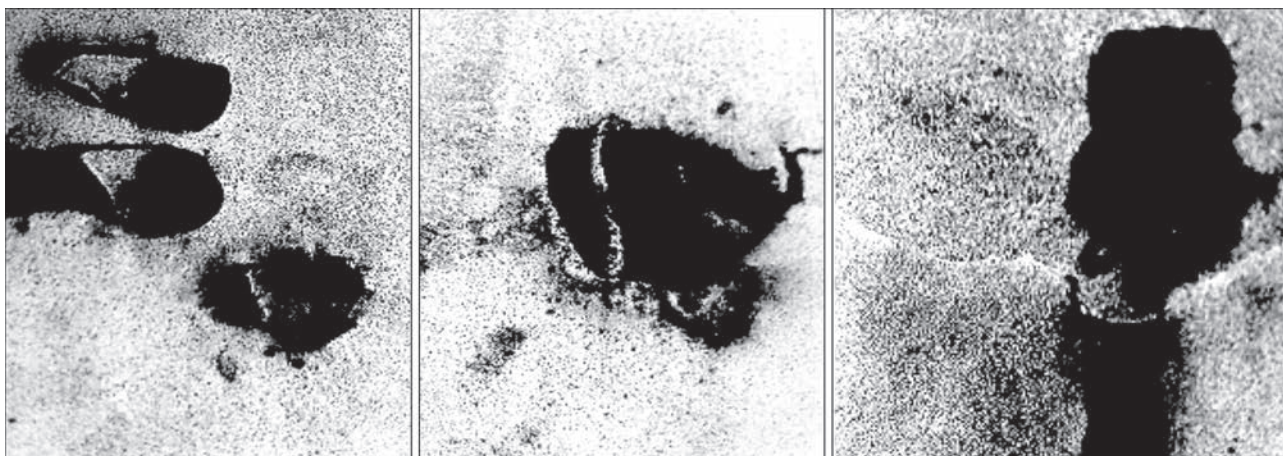


Рис. 18. Пори у шві зразка I ($\times 40$)

Аналіз мікроструктури зразка ІІІ також показав наявність в металі зварного з'єднання множинних дефектів. Так, поряд з порами спостерігаються непровари у формі коми, а також протяжні непровари, головним чином розташовані між валиками. На рис. 20 наведені фотографії металу зразка з непроварами, які являють серйозну небезпеку для експлуатованого трубопроводу, оскільки істотно знижують міцність зварних з'єднань в трубах. Мікроструктура та твердість різних ділянок зварного з'єднання в даному зразку не відрізняється від мікроструктури та твердості попередніх зразків на відповідних ділянках.

Слід зазначити, що в зонах термічного впливу всіх досліджених зразків не спостерігалось збільшення обсягів зерна в ділянках перегріву. В інших ділянках зони термічного впливу структура металу являє собою дрібнозернистий ферит і перліт. Твердість всіх ділянок зони термічного впливу не перевищує 2000 МПа.

Загальний висновок з хімічного та металографічного аналізу зварних швів показав, що множинні дефекти зварювання, а також використання іншої марки сталі замість проектної призвели до руйнування сусідньої ділянки трубопроводу, але вони могли стати й причиною руйнування того фрагменту труби, який досліджувався.

Пошкодженість матеріалу показує і суттєве зниження ударної в'язкості. Для металу в стані по-

ставки вона складає 218 Дж/см². Для зразків МІ-50 дані (табл. 5) дають чітке уявлення щодо стану як основного металу труби, так і зварних швів.

Як бачимо, у найгіршому випадку ударна в'язкість знизилася у 2,5 рази, а пошкодженість згідно з формулою (1) складе 60 %.

АЕ сканування [2, 8–10] трьох зразків у формі паралелепіпеду показало, що максимальна пошкодженість металу спостерігається у напрямку, перпендикулярному поверхні труби, та складає 68 %. Визначимо міцність матеріалу труби, вважаючи, що вона зроблена зі сталі 20, щоб отримати еталонні характеристики для порівняння з реальним матеріалом, з якого виготовлена труба. Вихідні параметри матеріалу є наступними: межа міцності $\sigma_{\text{в}} = 440$ МПа, межа плинності $\sigma_{\text{т}} = 288$ МПа, відносне подовження $\psi = 28...34$ %, відносне звуження $\psi = 28...34$ %, ударна в'язкість основного металу $[a_{\text{т}}] = 218$ Дж/см². Далі в розрахунку величиною σ будемо позначати товщину стінки труби, розглядаючи її як тонку ($r/\delta \gg 10$) оболонку.

Розрахунок труби може бути проведено, з урахуванням співвідношення $r/\delta = 41,34 \gg 10$ за формулою Лапласа для тонкої оболонки. Відповідно до згаданої формули напруження, що діють у трубі, будуть визначатися як $\sigma = pr/(2\delta_{\text{сф}})$, де $\delta_{\text{сф}}$ – реальна товщина стінки оболонки. При виборі величини $\sigma_{\text{сф}}$ слід враховувати, що від неї слід віднімати товщину непроварів і інших недосконаlostей, що змінюють реальну товщину стінки труби, не забуваючи також про те, що вони є

Таблиця 5. Ударна в'язкість металу труби ($t_{\text{випр}} = 20$ °С)

Номер з/п	Ділянка труби	Ударна в'язкість, Дж/см ²
1	Основний метал	187
2		170
3		165
4	Зварний шов	155
5		130
6		88
7	Зварний шов зі зміщенням крайок	182
8		155
9		140

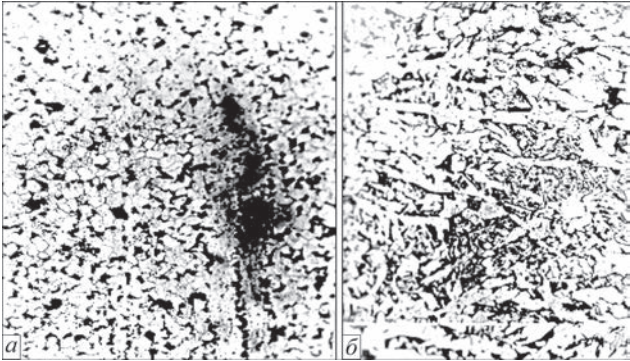


Рис. 19. Мікроструктура ($\times 400$) верхнього шва (а) та зони сплавлення основного металу з другим швом (б)

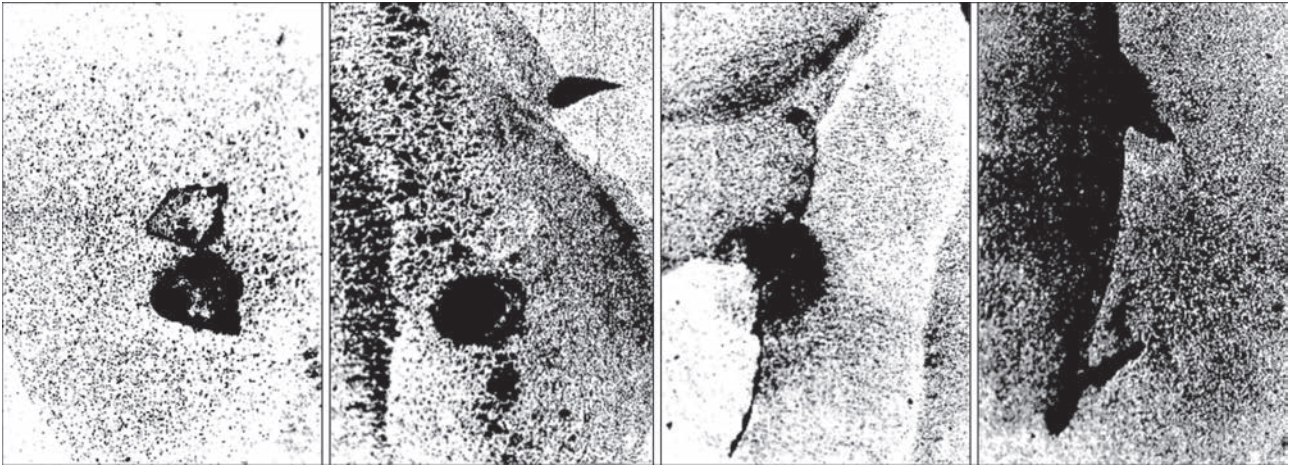


Рис. 20. Дефекти у зразку ІІІ ($\times 40$)

концентраторами напружень. Коефіцієнт концентрації напружень K для концентраторів такої форми дорівнює 4,5.

Таким чином, при заданих розмірах труби $\sigma = 113,7$ МПа, що нижче $\sigma_T = 288$ МПа. Отже, коли матеріал знаходиться у неокрихчуваному стані, вплив концентрації напружень призведе до їх перерозподілу в зоні концентратору.

При окрихчуванні матеріалу пластичні деформації будуть відсутні та $\sigma_{ef} = 113,7 \cdot 4,5 = 511,6$ МПа $> \sigma_B$. Отже, в зоні концентрації напруження перевищать межу міцності та відбудеться руйнування матеріалу. Рекомендованим заходом для недопущення руйнування є зниження робочого тиску до 20...25 ат. Оскільки за хімічним складом та іншими характеристикам матеріал відповідає сталі 15пс, для нього слід чекати ще нижчих показників працездатності.

Для завершення аналізу службових властивостей даної труби, включаючи зварні шви, слід проаналізувати результати АЕ досліджень зразків АЕ-01Р на статичний розтяг. Приведемо типові знімки екранів програми ЕМА-3.92 з результатами прогнозу руйнівного навантаження та відповідні ним графіки випробувань зразків із сталі 20 спочатку для матеріалу без напрацювання, узятого з аварійного запасу (рис. 21–22), а потім для матеріалу труби, що підлягав аналізу (рис. 23–24). Усі елементи екрану локації відповідають тим, що були описані вище для рис. 4 та в роботі [1]. Згори над локаційною схемою наведені результати прогнозу руйнівного навантаження та автоматичного перерахування їх програмою ЕМА в межу міцності згідно з відомими геометричними характеристиками зразка. На графіках (рис. 22, 24) стовпчиками показані амплітуди подій дискретної АЕ (мВ), навантаження P (кг) та сумарна крива N накопичення подій АЕ в залежності від часу випробувань.

Як бачимо з рис. 21, спрогнозована межа міцності повністю відповідає паспортним характеристикам сталі 20. Відзначимо також, що прогноз руйнівного навантаження, яке в реальності склало 9068 кг (рис. 22), відповідає



Рис. 21. Екран програми ЕМА-3.92 після випробування типового зразка сталі 20 з аварійного запасу

вимогам до його точності згідно сертифікату на системи типу ЕМА та вкладається в межі $\pm 15\%$.

Для графіку (рис. 22) характерним є наявність великої кількості подій з максимальними амплітудами. Крива накопичення пошкоджень (сумарна крива N амплітуд АЕ) має вигин, спрямований угору, та у значній мірі повторює криву навантаження. Як вказувалося в [1], це є свідомством відсутності зварного з'єднання в зразку.

Для випробуваного зразка з пошкодженої труби, який крім цього мав зварний шов, спрогнозована межа міцності суттєво нижча за паспортні характеристики сталі 20. Це підтверджує, по-

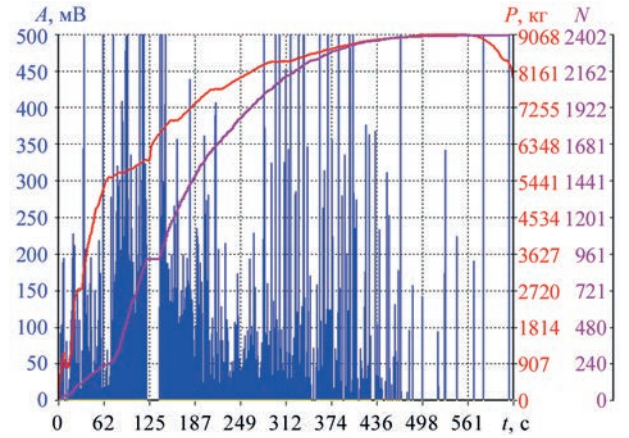


Рис. 22. Графік випробування типового зразка сталі 20 з аварійного запасу



Рис. 23. Екран програми ЕМА-3.92 після випробування типового зразка сталі 20 з пошкодженої труби

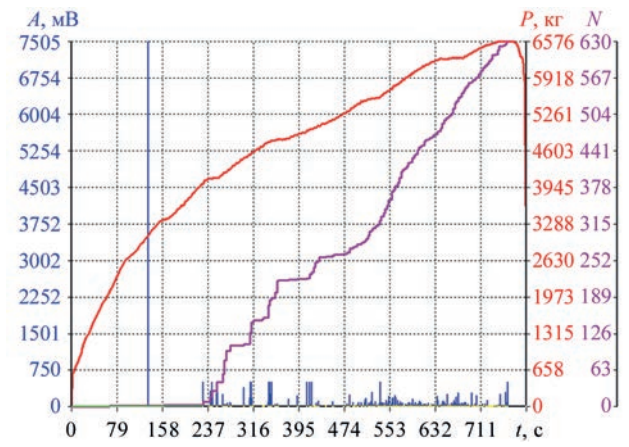


Рис. 24. Графік випробування зварного зразка з пошкодженої труби

перше, що випробувався інший матеріал (як вже вказувалося раніше, це сталь 15пс), по-друге, що матеріал пошкоджувався за механізмом виникнення, розвитку та злиття пор з подальшим утворенням тріщини. Відзначимо, що й у даному випробуванні прогноз руйнівного навантаження, яке в реальності склало 6576 кг (рис. 24), відповідає вимогам до його точності та вкладається в межі $\pm 15\%$.

Для графіка (рис. 24), у порівнянні з результатами випробування зразка з аварійного запасу, характерною є незначна кількість подій та вони більшою частиною мають низькі амплітуди. Крива накопичення пошкоджень (сумарна крива N амплітуд АЕ) має вигин, спрямований униз, та не повторює криву навантаження, що є свідомством наявності зварного з'єднання у зразку.

Згідно з формулою (1) вираховуємо пошкодженість зразка зі зварним з'єднанням порівняно з еталонним зразком з аварійного запасу. В якості параметру пошкодженості використовуємо суму подій N . Після підрахунків отримаємо значення пошкодженості 73 %. Про достовірність такого рівня пошкодження свідчать і усі попередні результати, підтверджені металографічними дослідженнями.

Оскільки даний показник пошкодженості є найбільшим з отриманих для даної труби, скористаємося ним для оцінки залишкового ресурсу. Згідно з номограмою (рис. 10), для пошкодженості 0,73 він складає ≈ 10 років. Враховуючи велику кількість знайдених дефектів, відмінність марки сталі від паспортної та ймовірне руйнування при перевантаженнях, була надана рекомендація замінити пошкоджені ділянки труби з такими показниками.

Таким чином, комплексне дослідження матеріалу з аварійно небезпечної труби дозволяє стверджувати, що метод АЕ є чутливим до зміни службових властивостей зварних швів і при своєчасному застосуванні може допомогти запобіганню аварійних ситуацій.

Висновки

1. Показано високу чутливість методу АЕ до виникнення та розвитку в зварних швах дефектів різних типів як під час процесу зварювання, так і при подальшій їх експлуатації.

2. Показником, який міг би використовуватися для контролю якості при виконанні зварювання, може служити час, за який зникає акустична активність після завершення зварювання.

3. На прикладі змійовика печі П-101 показано, що метод АЕ є ефективним під час контролю великогабаритних потенційно небезпечних конструкцій з великою кількістю зварних швів, причому

контроль великих поверхонь може бути здійснений мінімальним числом датчиків (у даному випадку чотирма). З використанням додаткових методів контролю показано, які саме дефекти є характерними для різних ділянок змійовика печі П-101.

4. Запропоновано метод інтегральної оцінки пошкодженості об'єктів такого типу. Зворотна перевірка показала, що запропонована авторами методика розрахунку залишкового ресурсу є справедливою для таких об'єктів.

5. На прикладі аварійної ділянки труби з магістрального газопроводу показано, як можна комплексно оцінити пошкодженість основного металу та зварних з'єднань, використовуючи різні методи. За допомогою методу АЕ підтверджений висновок, зроблений у Частині 1, щодо можливості за нахилом кута сумарної кривої подій АЕ визначити наявність зварного з'єднання у матеріалі.

6. Підтверджено, що для зварних з'єднань можна використовувати прогноз руйнівного навантаження, який виконується системами типу ЕМА. Показано, що крім власне руйнівного навантаження можливим є його коректний автоматичний перерахунок у межу міцності. Отримані результати перерахунку співпадають з механічними властивостями досліджених матеріалів, визначеними іншими методами.

7. Промислове застосування методу АЕ є ефективним методом оцінки службових властивостей зварних з'єднань, що є вельми важливим, тому що вони являють один з основних чинників пошкодження конструкцій, що експлуатуються. Безперервний АЕ моніторинг забезпечує найбільш надійну гарантію запобігання аварійним ситуаціям, оскільки метод АЕ одразу реагує на найменші зміни у стані матеріалу.

Список літератури

1. Недосека С.А., Недосека А.Я., Яременко М.А. та ін. (2021) Метод акустичної емісії при оцінюванні стану зварних швів та їх службових властивостей. Частина 1. Вплив типу зварного з'єднання на акустичну емісію. *Автоматичне зварювання*, 2, 52–59. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2021.02.09>.
2. Недосека А.Я., Недосека С.А. (2020) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*: уч. пособие. 5-е изд., перераб. и доп. Патон Б.Е. (ред.). Киев, Индпром.
3. Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А. и др. (2013) Программное обеспечение систем АЭ диагностики кривых ЕМА-3.9. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, 3, 16–22.
4. Huang, W., Yang, S., Lin, D., Kovacevic, R. (2009) Real-time monitoring of the weld penetration state in laser welding of high-strength steels by airborne acoustic signal. *ASME Turbo expo: power for land, sea, and air: cycle innovations; industrial and cogeneration; manufacturing materials and metallurgy. Marine*, 4, 799–805.
5. ASTM E749/E749M-17 (2017) *Standard practice for acoustic emission monitoring during continuous welding*. ASTM International, West Conshohocken.
6. Zhang, L., Basantes-Defaz, A.C., Ozevin, D. et al. (2019) Real-time monitoring of welding process using air-coupled ultrasonics and acoustic emission. *Int J. Adv Manuf*

- Technol.*, 101, 1623–1634. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3042-2>.
7. Недосека А.Я., Недосека С.А., Яременко М.А. и др. (2003) О применении акустической эмиссии для контроля промышленных конструкций. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **3**, 3–6.
 8. Щербинский В.Г., Феоктистов В.А., Полевик В.А. и др. (1987). *Методы дефектоскопии сварных соединений*. Москва, Машиностроение.
 9. Недосека С.А. (2010) *Діагностика і прогнозування ресурсу зварних конструкцій методом акустичної емісії*. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Київ.
 10. Недосека С.А., Недосека А.Я., Бойчук О.І. та ін. (2020) Особенности акустической эмиссии при оценке stanu материала. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*, **2**, 3–12. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.02.01>.
 11. Недосека С.А., Недосека А.Я. (2010) Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой. *Там само*, **1**, 9–16.
 12. Карлов С.А., Сульженко В.А., Яковлев А.В. (2019) Акустико-эмиссионный контроль качества сварных швов морской техники. *Труды Крыловского государственного научного центра*. Специальный выпуск.
 13. Иванов А.Б., Иевлев В.А., Неуступов А.С. и др. (2019) Внедрение нового способа контроля качества монтажных сварных соединений трубопроводов. *Труды Крыловского государственного научного центра*. Специальный выпуск 2.
 14. Droubi, Mohamad & Faisal, Nadimul & Orr, Fraser & Steel, John & El-Shaib, Mohamed. (2017) Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded joints. *J. of Constructional Steel Research*, **134**. 10.1016/j.jcsr.2017.03.012.
 15. Aboali, Abdalla et al. (2014) Screening for Welding Defects Using Acoustic Emission Technique. *Advanced Materials Research*, vol. 1025–1026, Trans Tech Publications, Ltd., Sept. 2014, pp. 7–12. Crossref. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.1025-1026.7.
 16. Савченко С.В., Тимчик Г.С. (2017) Метод контролю зварних з'єднань балістичних сталей за допомогою акустичної емісії. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. Том 20.
 17. Скальський В. Р. (2003) Оцінка накопичення об'ємної пошкодженості твердих тіл за сигналами акустичної емісії. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 29–36.
 3. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A. et al. (2013) Software of AE diagnostic systems EMA-3.9. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 16–22 [in Russian].
 4. Huang, W., Yang, S., Lin, D., Kovacevic, R. (2009) Real-time monitoring of the weld penetration state in laser welding of high-strength steels by airborne acoustic signal. *ASME. Turbo expo: Power for land, sea, and air: cycle innovations; industrial and cogeneration; manufacturing materials and metallurgy. Marine*, **4**, 799–805.
 5. ASTM E749/E749M-17 (2017) *Standard practice for acoustic emission monitoring during continuous welding*. ASTM International, West Conshohocken.
 6. Zhang, L., Basantes-Defaz, A.C., Ozevin, D. et al. (2019) Real-time monitoring of welding process using air-coupled ultrasonics and acoustic emission. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **101**, 1623–1634. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3042-2>.
 7. Nedoseka, A.Ya., Nedoseka, S.A., Yaremenko, M.A. et al. (2003) About application of acoustic emission method for control of industrial structures. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **3**, 3–6 [in Russian].
 8. Shcherbinsky, V.G., Feoktistov, V.A., Polevik, V.A. et al. (1987) *Methods of flaw detection of welded joints*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
 9. Nedoseka, S.A. (2010) *Diagnostics and prediction of service life of welded structures by acoustic emission method*. In: Syn. of Thesis for Dr. of Tech. Sci. Degree. Kyiv [in Ukrainian].
 10. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya., Boichuk, O.I. et al. (2020) Features of acoustic emission at evaluation of the state of materials. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 3–12 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.37434/tdnk2020.02.01>.
 11. Nedoseka, S.A., Nedoseka, A.Ya. (2010) Integrated assessment of damage level and residual life of metals with certain operating life. *Ibid.*, **1**, 9–16 [in Russian].
 12. Karlov, S.A., Sulzhenko, V.A., Yakovlev, A.V. (2019) Acoustic emission control of weld quality in marine engineering: *Transact. of Krylov State scientific center*. Special Issue [in Russian].
 13. Ivanov, A.B., Ievlev, V.A., Neustupov, A.S. et al. (2019) Implementation of a new method for quality control of field welded joints of pipelines: *Transact. of Krylov State scientific center*. Special Issue 2 [in Russian].
 14. Droubi, Mohamad & Faisal, Nadimul & Orr, Fraser & Steel, John & El-Shaib, Mohamed (2017) Acoustic emission method for defect detection and identification in carbon steel welded joints. *J. of Constructional Steel Research*, **134**. 10.1016/j.jcsr.2017.03.012.
 15. Aboali, Abdalla et al. (2014) Screening for welding defects using acoustic emission technique. *Advanced Materials Research*, Vol. 1025–1026, Trans. Tech. Publ., Ltd., Sept. 2014, 7–12. Crossref. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.1025-1026.7.
 16. Savchenko, S.V., Timchik, G.S. (2017) Method of control of welded joints on ballistic steels using acoustic emission. *Visnyk NTU KhPI*. Series: Mechanical-technological systems and complexes, Vol. 20 [in Ukrainian].
 17. Skalsky, V.R. (2003) Evaluation of accumulation of bulk damage in solid, based on acoustic emission signals. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 29–36 [in Ukrainian].

References

METHOD OF ACOUSTIC EMISSION AT EVALUATION OF THE STATE OF WELDS AND THEIR SERVICE PROPERTIES. Part 2. Practical application

S.A. Nedoseka, A.Ya. Nedoseka, M.A. Yaremenko, O.I. Boichuk, M.A. Ovsienko

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

E-mail: inpat59@paton.kiev.ua

The majority of existing structures contain welded joints. Questions of monitoring service characteristics of welded joints, using acoustic emission method are considered. Attention is given to a change in material properties of operating structures with welded elements after long-term service, taking into account the time and probable violation of service conditions. Examples of evaluation of the change in properties of welded structure materials by the data of acoustic emission, determination of their damage and residual service life, are given. 17 Ref., 5 Tabl., 24 Fig.

Keywords: welds, service properties, acoustic emission (AE), AE activity, AE scanning, damage, destruction

Надійшла до редакції 22.03.2021

ПЕРЕНОСНИЙ МОДУЛЬ ДЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗВАРНИХ СТИКІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ РЕЙОК

Є.О. Пантелеймонов

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

Розглянуті особливості конструкції переносного модуля для термічної обробки зварних стиків залізничних рейок, виконаних способом контактної зварювання. Процес термічної обробки включає індукційний нагрів зварних стиків струмами частотою 2,4 кГц та подальше загартовування поверхні катання голівки стислим повітрям. Конструкція переносного модуля включає індуктори, що з'єднані безпосередньо з узгоджувальними трансформаторами. Індуктуючі дрони індукторів повторюють форму вигину поверхні рейки зі збільшеними повітряними проміжками над шийкою та пір'ям і містять магнітопроводи, що розташовані над поверхнею катання, бічними поверхнями голівки, шийкою та підшою рейки. Показано, що в зварних стиках рейок типу Р65 із сталі К76Ф після термічної обробки на переносному модулі в зоні гартівного охолодження голівки утворюється рівномірна мілкозерниста структура з твердістю, що досягає рівня твердості основного металу. Також підвищується твердість металу в глибинних шарах голівки рейок відносно твердості основного металу на відповідній глибині. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: рейки, зварні стики, термічна обробка, переносний модуль, твердість металу

Проблемними місцями зварних стиків залізничних рейок, виконаних способом контактної зварювання, є локальні зони зі зміною структури та твердості металу в зоні термічного впливу (ЗТВ). Для досягнення структурної однорідності металу та підвищення механічних властивостей зварних стиків застосовується термічна обробка (ТО). Технологія ТО зварних стиків струмами високої частоти забезпечує рівномірний нагрів елементів рейки в зоні стику, необхідну швидкість фазових перетворень у структурі металу ЗТВ, низький перепад температури між поверхневими та глибинними шарами рейки [1, 2]. У зв'язку з використанням на залізницях світу нових типів високоміцних рейок, виникла необхідність вдосконалення технології та обладнання для ТО зварних стиків. В дослідженнях, проведених у КНР, вивчено вплив ТО на структуру та твердість металу зварних стиків. Встановлено, що механічні властивості зварних стиків поліпшуються після нагріву до температури нормалізації [3]. В обладнанні для ТО зварних стиків при будівництві залізничних шляхів в КНР використовувались роз'ємні одновиткові індуктори без магнітопроводів з паралельними індуктуючими дротами [4]. В РФ створені комплекси для ТО зварних стиків струмами частотою 8...15 кГц, в яких застосовані багатовиткові індуктори без магнітопроводів [5].

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона проводяться роботи по вдосконаленню технології та обладнання для ТО зварних стиків залізничних рейок. Створений переносний модуль для ТО стиків рейок типу Р50, Р65 та Р75 струмами частотою 2,4 кГц. Процес ТО включає нагрів зварних стиків рейок до тем-

ператури 850...950 °С та подальше загартовування поверхні катання голівки стислим повітрям. Переносний модуль призначений для застосування в шляхових умовах у складі пересувних рейкозварювальних машин та в цехових умовах рейкозварювальних підприємств.

В даній роботі розглянуті особливості конструкції переносного модуля та приведені результати його випробування при ТО зварних стиків рейок типу Р65 із сталі К76Ф. В якості джерела живлення струмами високої частоти використовували тиристорний перетворювач частоти ТПЧТ-160/2,4.

В конструкції переносного модуля індуктори 1 безпосередньо з'єднані з узгоджувальними трансформаторами, утворюючи нагрівальні блоки 2 (рис. 1). Нагрівальні блоки розташовані на рамі 3. Для пересування нагрівальних блоків до бічних поверхонь рейки 4 використані актуатори. На рамі також встановлені спреєр 5 з вузлом 7 для подачі стислого повітря, пульт керування 6, вузли 8 та 9 для подачі та зливу охолоджувальної рідини, фіксатори 10 для кріплення переносного модуля на рейці, лазерний показчик для наведення індукторів на зварний стик, кінцеві вимикачі, роз'єми для підключення джерела живлення струмами високої частоти. Пірометр для вимірювання температури нагріву стиків змонтований на одному з нагрівальних блоків. Електрична схема переносного модуля забезпечує послідовність виконання операцій нагріву зварних стиків та загартовування поверхні катання рейок. Маса переносного модуля 65 кг [6, 7].

Необхідний розподіл потужності по елементах рейки досягається тим, що індуктуючі дрони індук-

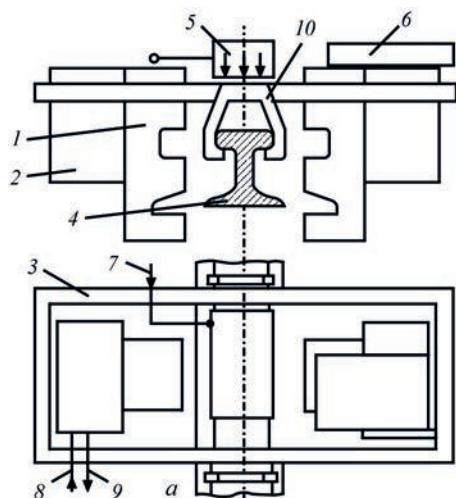


Рис. 1. Переносний модуль для термічної обробки зварних стиків залізничних рейок: схема конструкції (а) та загальний вигляд (б) (опис 1–10 див. у тексті)

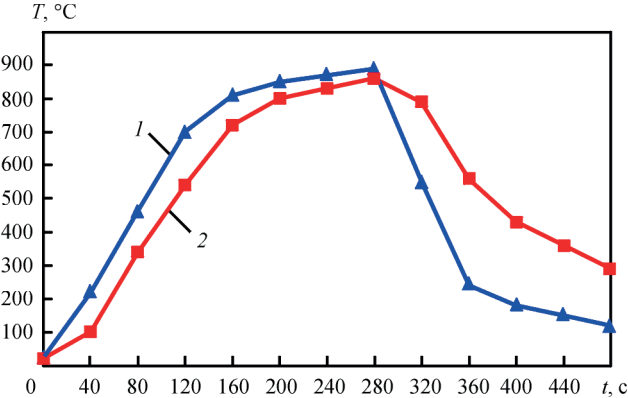


Рис. 2. Часові залежності температури нагріву поверхні катання (ПК) рейки та шару на глибині 25 мм від поверхні катання (25 мм від ПК) при виконанні ТО на переносному модулі: 1 – ПК; 2 – 25 мм від ПК

торів повторюють форму вигину поверхні рейки зі збільшеними повітряними проміжками над шийкою та пір'ям і містять магнітопроводи над поверхнею катання, бічними поверхнями голівки, шийкою та підшвою рейки. Після нагріву зварних стиків протягом 140 с перепад температури між поверхнею катання рейки та шару на глибині 25 мм не перевищував 60 °C [8, 9]. Для зменшення перепаду температури до 40 °C, час нагріву стиків на переносному модулі збільшили до 260...280 с. Швидкість нагріву поверхні катання рейки Р65 до температури магнітних перетворень становила 5,4 °C/с, на глибині 25 мм від поверхні катання – 4,6 °C/с (рис. 2). Після втрати металом магнітних властивостей швидкість нагріву поверхні катання зни-

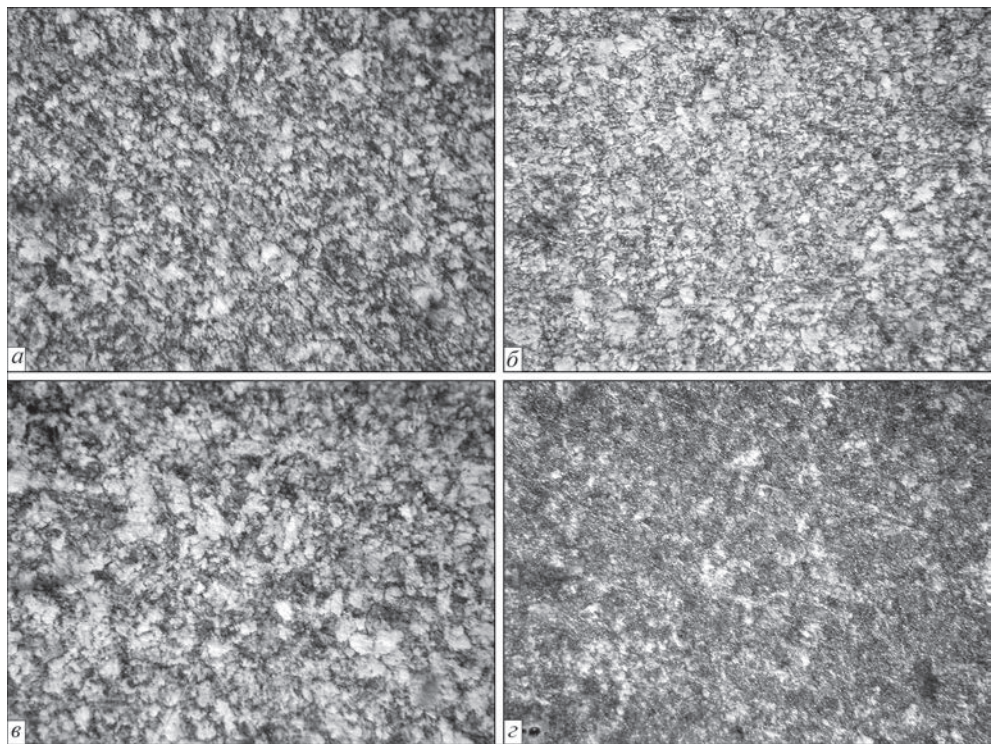


Рис. 3. Мікроструктура (×500) металу зварних стиків рейок типу Р65 із сталі К76Ф на глибині 5 мм від поверхні катання: а – основний метал; б – лінія з'єднання; в – 10 мм від лінії з'єднання; г – зона неповної перекристалізації

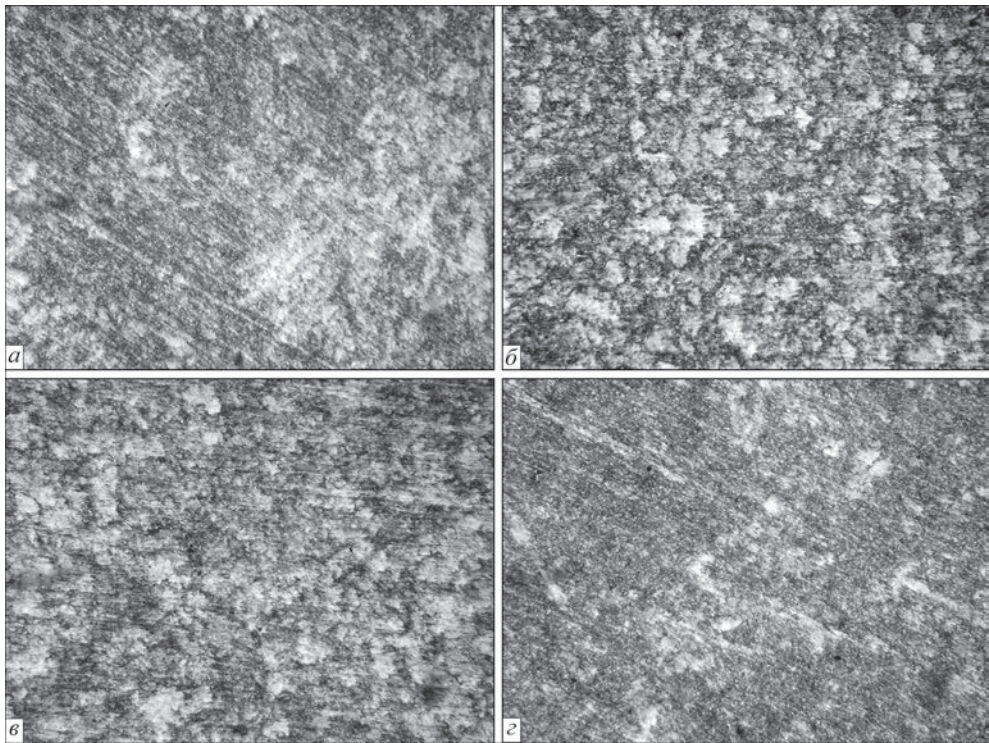


Рис. 4. Мікроструктура (×500) металу зварних стиків рейок типу Р65 із сталі К76Ф на глибині 25 мм від поверхні катання: а – основний метал; б – лінія з’єднання; в – 10 мм від лінії з’єднання; г – зона неповної перекристалізації

Таблиця 1. Бал зерна металу зварних стиків рейок Р65 із сталі К76Ф на глибині 5 мм від поверхні катання

Лінія з’єднання	10 мм від лінії з’єднання	Зона неповної перекристалізації	Основний метал
10	7-8	10	8

зилася до 1,06...1,08 °С/с. Ширина ЗТВ зварних стиків після ТО досягла 52...58 мм, що більше ширини ЗТВ стиків високоміцних і високолегованих рейок після зварювання [10].

При дослідженні металу зварних стиків використовували поздовжні зразки. Поверхня зразків співпадала з віссю симетрії рейки. Для виявлення мікроструктури металу застосовували метод хімічного травлення полірованих поверхонь зразків у 4 % спиртовому розчині азотної кислоти. Розмір зерна металу визначали за ГОСТом 5639-82.1. Інтегральну твердість металу *HRC* вимірювали на твердомірі ТК-2М при навантаженні 150 кг.

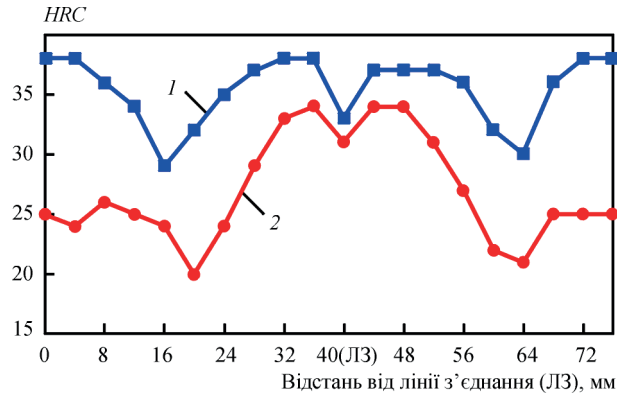


Рис. 5. Розподіл твердості металу по ширині ЗТВ на глибині 5 мм та 25 мм від поверхні катання (ПК) зварних стиків рейок Р65 із сталі К76Ф: 1 – 5 мм від ПК після ТО; 2 – 25 мм від ПК після ТО

Таблиця 2. Бал зерна металу зварних стиків рейок Р65 із сталі К76Ф на глибині 25 мм від поверхні катання

Лінія з’єднання	10 мм від лінії з’єднання	Зона неповної перекристалізації	Основний метал
7-8	7	7-8	7

Дослідження показали, що в зоні загартування основного металу, на глибині 5 мм від поверхні катання, були присутні ділянки сорбіту та троститу (рис. 3). Структура мілкозерниста, бал зерна 8 (табл.1). Після ТО зварних стиків метал на глибині 5 мм від поверхні катання по лінії з’єднання мав рівномірне зерно по типу сорбіту з балом зерна 10. На відстані 10 мм від лінії з’єднання – середня та неоднорідна структура по типу сорбіту з ділянками троститу. Бал зерна 7–8. В зоні неповної перекристалізації на відстані 22...24 мм від лінії з’єднання – дрібне дисперсне рівномірне зерно по типу сорбіту з ділянками троститу. Бал зерна 10. На глибині 25 мм від поверхні катання в структурі основного металу були присутні ділянки фериту та сорбіту (рис. 4). Основний метал мав явну неоднорідність. Бал зерна 7 (табл. 2). Структура металу по ширині ЗТВ – по типу сорбіту з рівномірним зерном. В порівнянні з металом зони загартування, бал зерна знизився до 7–8.

На глибині 5 мм від поверхні катання рейок твердість основного металу становила *HRC* 37...38 (рис. 5). Після ТО зварних стиків метал на глибині 5 мм від поверхні катання по лінії з’єднання мав твердість *HRC* 33, що менше твердості основного металу. На відстані 10 мм від лінії з’єднання твердість металу наблизилася до рівня основного металу; в зоні неповної

перекристалізації на відстані 22...24 мм від лінії з'єднання – знизилася до *HRC* 29...30. На глибині 25 мм від поверхні катання рейки твердість основного металу рейки становила *HRC* 24...25. Твердість металу поміж зонами неповної перекристалізації підвищилася до *HRC* 31...34, що вище твердості основного металу на такій глибині (*HRC* 24...25). В зонах неповної перекристалізації твердість знизилася до *HRC* 20...22.

Висновки

1. Створений переносний модуль для ТО зварних стиків залізничних рейок, виконаних способом контактного стикового зварювання. Технологія ТО зварних стиків включає індукційний нагрів струмами частотою 2,4 кГц та подальше загартування поверхні катання голівки стислим повітрям.

2. Переносний модуль призначений для застосування в шляхових та цехових умовах.

3. Нагрівальне обладнання переносного модуля забезпечує рівномірний нагрів елементів рейки в зоні зварних стиків.

4. Дослідження зварних стиків рейок типу Р65 із сталі К76Ф після ТО на переносному модулі показали, що в зоні гартівного охолодження голівки рейок утворюється рівномірна мілкозерниста структура з твердістю, що досягає рівня твердості основного металу. Також підвищується твердість металу в глибинних шарах голівки рейок відносно твердості основного металу на відповідній глибині.

Список літератури

1. Головин Г.Ф., Зимин Н.В. (1979) *Технология термической обработки металлов с применением индукционного нагрева*. Ленинград, Машиностроение
2. Нестеров Д.К., Сапожков В.Е., Левченко Н.Ф. и др. (1990) Термическая обработка рельсовой стали с использованием индукционного нагрева. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 8, 30-34.
3. Gong L., Zhu L., Zhou H. X. (2017) Effect on hardness and microstructures of rail joint with ultra-narrow gap arc welding by post weld heat treatment. *Engineering Materials*, 737, 90-94.
4. Ding Wei, Song Hongtu, Li Li, et al (2012) *Heat treatment device of welding joint of steel rail*. China Pat. CN 201120285569.

5. Фещуков А.Н., Земан С.К., Муркин М.К. *Установка термической обработки сварных стыков рельсов в путевых условиях*. РФ, Пат. 57752, МПК E01B31/18.
6. Пантелеймонов С. О. *Комплекс для термической обработки сваренных стиков залізничних рейок в шляхових умовах*. Україна, Пат. на кор. модель 114593, МПК E01B31/18. 10.03.2017.
7. Пантелеймонов С. О. *Переносний модуль для термичної обробки зварних стиків залізничних рейок*. Україна, Пат. на кор. модель 143908, МПК E01B 31/18 (2006.01), C21D 1/10 (2006.01)
8. Пантелеймонов С.О. *Індукційний пристрій для термичної обробки зварених стиків залізничних рейок*. Україна, Пат. на кор. модель 109123, МПК C21D 1/10 (2006.01)
9. Пантелеймонов Е.А., Губатюк Р.С. (2016) Индукционное устройство для термической обработки сварных стыков железнодорожных рельсов. *Автоматическая сварка*, 10, 41–44.
10. Кучук-Яценко С.І., Антіпін Є.В., Дідковський О.В. та ін. (2020) Оцінка якості зварних з'єднань високоміцних залізничних рейок сучасного виробництва з урахуванням вимог українського та європейського стандартів. *Автоматичне зварювання*, 7, 3 – 11. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.07.01>

References

1. Golovin, G.F., Zimin, N.V. (1979) *Technology of heat treatment of metals using induction heating*. Leningrad, Mashinostroenie [in Russian].
2. Nesterov, D.K., Sapozhkov, V.E., Levchenko, N.F. et al. (1990) Heat treatment of rail steel using induction heating. *Metallovedenie i Termich. Obrab. Metallov*, 8, 30-34 [in Russian].
3. Gong, L., Zhu, L., Zhou, H. X. (2017) Effect on hardness and microstructures of rail joint with ultra-narrow gap arc welding by post weld heat treatment. *Engineering Materials*, 737, 90-94.
4. Ding Wei, Song Hongtu, Li Li, et al (2012) *Heat treatment device of welding joint of steel rail*. China Pat. CN 201120285569.
5. Feshchukov, A.N., Zeman, S.K., Murkin, M.K. (2016) *System for heat treatment of welded joints of railway rails in track conditions*. RF Pat. 57752, Int. Cl. E01B31/18 [in Russian].
6. Panteleimonov, E.O. *System for heat treatment of welded joints of railway rails in track conditions*. Ukraine Pat. on utility model 114593, Int. Cl. E01B31/18 [in Ukrainian].
7. Panteleimonov, E.O. *Portable module for heat treatment of welded joints of railway rails*. Ukraine Pat. on utility model 143908, Int. Cl. E01B 31/18 (2006.01), C21D 1/10 (2006.01) [in Ukrainian].
8. Panteleimonov, E.O. *Induction device for heat treatment of welded joints of railway rails*. Ukraine Pat. on utility model 109123, Int. Cl. C21D 1/10 (2006.01) [in Ukrainian].
9. Panteleimonov, E.A., Gubatyuk, R.S. (2016) Induction device for heat treatment of welded joints of railway rails. *The Paton Welding J.*, 10, 41-43.
10. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Antipin, E.V., Didkovskyi, O.V. et al. (2020) Evaluation of quality of welded joints of high-strength railway rails of modern production taking into account the requirements of Ukrainian and European standards. *The Paton Welding J.*, 7, 2-10. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.07.01>

PORTABLE MODULE FOR HEAT TREATMENT OF WELDED JOINTS OF RAILWAY RAILS

E.O. Panteleimonov

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 design features of the portable module for heat treatment of welded joints of railway rails produced by the method of flash butt welding are considered. The process of heat treatment includes an induction heating of welded joints with the currents of 2.4 kHz frequency and a subsequent hardening of the rolling surface of the head by a compressed air. The design of the portable module includes inductors connected directly to matching transformers. The inductor wires repeat the shape of the rail surface bend with increased air gaps above the web and feathers and contain magnetic conductors located above the rolling surface, side surfaces of the head, web and the flange of the rail. It was shown that in welded butts of R65 type rails made of K76F steel after heat treatment on a portable module in the zone of hardening cooling of the head, a uniform fine-grained structure with a hardness is formed, reaching the level of hardness of the base metal. The hardness of the metal in the deep layers of the rail head increases also relative to the hardness of the base metal at the appropriate depth. 10 Ref., 2 Tabl., 5 Fig.

Keywords: rails, welded butts, heat treatment, portable module, metal hardness

Надійшла до редакції 03.02.2021

ПОРТАЛЬНИЙ СТЕНД ЗІ ЗВАРЮВАЛЬНИМ РОБОТОМ ВИРОБЛЯЄ АЛЮМІНІЄВІ ВАГони ДЛЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

У виробничому секторі гроші можна економити дякуючи правильному вибору технології виробництва. У даний час компанія Waggonbau Niesky GmbH виробляє сучасні пасажирські вагони за допомогою зварювальних роботів та 60-метрової направляючої, однією з найдовших в клієнтському портфелі фірми Carl Cloos Schweisstechnik GmbH з м. Хайгер. Результат – менші витрати на виробництво та значне скорочення часу на виготовлення продукції – в цьому впевнені експерти вагонобудівного заводу Waggonbau Niesky GmbH (WBN).

Історично будівництво вагонів знаходиться в невеликому саксонському містечку Niesky. На початку промислової революції 1900-х років було побудовано парові двигуни. У 1917 р. виробництво залізничних транспортних засобів почалося з вагонів для перевезення товарів, вагонів поштових і пасажирських потягів, а також трамваїв. У часи Німецької Демократичної Республіки вони спеціалізувались на вантажних вагонах і візках. Після возз'єднання Германії вагонобудівний завод Niesky став частиною групи DWA і в наступні роки був проданий канадській компанії Бомбард'єр. «Але з нашими вантажними вагодонами ми були екзотикою в цій групі», – згадує Вернер Вейнхольд, відповідальний за планування на заводі Niesky. Таким чином, через два роки після возз'єднання результатом був новий старт в якості незалежної компанії.

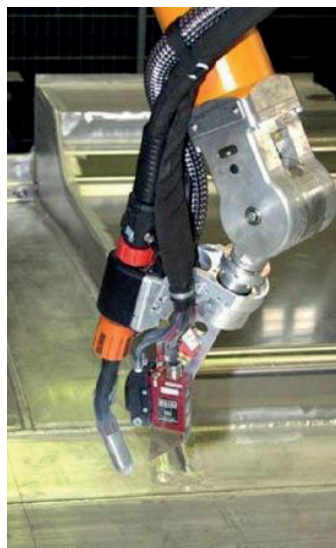
Сьогодні 250 співробітників, які працюють на виробничих площах більше за 36000 м², виробляють сучасні вагони з алюмінію і сталі для вантажних і пасажирських перевезень для європейсько-

го ринку. «Наші книги заказів щільно заповнені на найближчі декілька років», – каже з ентузіазмом Вейнхольд. «Декілька сотен вагонів виготовляються за виробничим планом тільки для німецьких, швейцарських і австрійських залізних доріг. У доповнення до всього цього ми отримали широкий розголос в цьому секторі промисловості про нашу компетентність та гнучкість, так що ми додатково працюємо з постачальниками для інших виробників вагонів».

Вернер Вейнхольд і Клаус-Дітер Ешке (куратори процесу зварювання на заводі WBN) шукали ефективне рішення для зварювання тільки для тих замовлень, які потребують високого ступеня гнучкості, що мають можливість раціонально виробляти групи алюмінієвих вагонів до 20 м довжиною. «Так як у інших виробників порталів рішення були успішними, ми почали шукати рішення з урахуванням цих вимог». Але коли спеціалісти заводу Niesky отримали пропозиції від постачальників, то їх спіткало повне розчарування. Навіть найнижча ціна пропозицій була на 30 % вища за розрахунковий бюджет. Добра порада не з дешевих. «Крім того, великі терміни поставки і дорогі роботи з реконструкції існуючого цеху не були прийнятні для нас».

У якості альтернативи було встановлення зварювального робота на підлозі. Чи було це дешевим рішенням? «Тут ми вступили в дискусію з експертами фірми CLOOS Schweisstechnik. У найкоротші терміни вони переконали нас в системі, в якій робот рухається на 60-метровій порталній направляючій», – пояснює Клаус-Дітер Ешке. «Протягом чотирьох тижнів ми розглянули цей





проект з усіх сторін, змогли прийняти рішення, і ми зробили замовлення на CLOOS».

Що було дуже добре для співробітників WBN: портал з пристроєм лінійного переміщення може бути встановлений під час поточного виробництва, так як він розташований всього на 9-ти опорах збоку у великому виробничому цеху. Замість дорогого фундаменту під встановлення в підлозі в цеху повинні бути встановлені тільки опори, які несуть 60-метровий портал. Це дозволило обійтись без дорогих, громіздких мір з реконструкції і пов'язаними з цим перервами в виробництві. «Ми змогли таким чином притримуватись нашого графіку поставок клієнтам навіть на етапі реконструкції», – каже Вейнхольд. Ще одним плюсом для рішення CLOOS є покращення досяжності до завантаження деталей під зварювання. Алюмінієві деталі для даху, підлоги та стін вагонів легко завантажуються, оскільки робот на треку зверху не заважає цьому.

Пройшло всього півроку після прийняття рішення і можна було впроваджувати нового робота в експлуатацію. Вейнхольд: «Проект запустили гладко, рука об руку з нами і CLOOS».

Існував безперервний обмін інформацією між філіалом берлінського CLOOS і саксонською компанією, так що будь-які виникаючі проблеми можна було вирішувати за короткий термін. «Навіть на той момент ми не завжди мали хороший досвід роботи з іншими постачальниками». Рішення про закупівлю роботів і зварювальних технологій у одного постачальника «з одних рук» зарекомендувало себе. «Всі компоненти системи дуже добре працюють один з одним», – каже Ешке, куратор зі зварювання.

Сучасні алюмінієві вагони зварюються на 60-метровому роботизованому стенді. Шість власних осей робота та дві зовнішні вісі забезпечують оптимальний доступ до кожної потрібної точки для зварювання. Два роботи Ромат-350 рухаються

по порталі, а також по стрілі порталу довжиною кожної з них 2,5 м. Обладнання працює в складі шести внутрішніх осей роботів і двох зовнішніх осей, в результаті досягаються всі необхідні позиції зварювання. Дякуючи широкому розмаху шести осей робота в результаті отримуємо сферичну робочу зону робота (3500 мм). Незважаючи на компактність збірки, Ромат розроблено дуже жорстко. Дякуючи цифровому управлінню приводів, шести осям і точним вимірювальним системам досягається точне і швидке позиціонування навіть при високих швидкостях.

На окремих візках разом з роботами рухаються джерела зварювального струму CLOOS, а також розмотувальники великогабаритних котушок з підігрівом дроту для зварювання алюмінію для виключення конденсації вологи.

6-осеві зварювальні роботи, процес MIG зварювання алюмінієвих профілів з товщиною стінки від 3 до 10 мм, захисний газ – чистий аргон, стикові та кутові шви. Використовується зварюваний дріт діаметром 1,6 мм, який автоматично подається в зону зварювання через систему Duo-Drive з великої (40 кг) котушки. Система Duo-Drive забезпечує подачу зварювального дроту без ковзання. Складально-зварювальний стенд поділяється на 2 робочі секції – 2×21 м і 1×17 м. В той час як зварювання відбувається в одній з секцій, оператор може вставляти нові заготовки в другій секції або видаляти готові деталі. На кожну секцію припадає коло 200 м довжини зварювального шва.

«Ця система дає нам необхідну гнучкість, щоб легко реагувати на всілякі запити різних клієнтів», – підводить підсумок Вернер Вейнхольд, який кожен день може бути щасливим, згадуючи про сміливе рішення впровадження унікальних зварювальних роботів. «Зрештою, якість продукції, ціна і надійність понад усе».

За матеріалами www.waggonbau-niesky.com

Welding in the World, №3, 2021

Volume 65, issue 3, March 2021

<https://link.springer.com/journal/40194/volumes-and-issues/65-3>

Неруйнівне резонансне акустичне випробування та класифікація дефектів решітчастих конструкцій, виготовлених 3D. *A.-F. Obaton, Y. Wang, B. Butsch & Q. Huang*

Вплив хімічного складу зварювального матеріалу на шлакоутворення та стійкість до корозії. *Yoona Lee, Jonghoon Jang, Stephen Liu*

Тенденція гарячого розтріскування при дуговому зварюванні порошковими дротами типів Ni 6625. *Stefan Burger, Manuela Zinke, Sven Jüttner*

Дослідження процесу зварювання методом тертя з перемішуванням, застосованого до сталевих пластини ASTM 572, покритої Inconel®625. *Renan Mensch Landell, Cleber Rodrigo de Lima Lessa, Benjamin Klusemann*

Дослідження впливу хімічного складу при контактному-стиковому зварюванні на зварюваність сталей за допомогою поєднання експериментів та моделювання. *Nikhil Shajan, Ipsita Madhumita Das, Kanwer Singh Arora, Manas Paliwal & Mahadev Shome*

Зварювання тертям звичайного сплаву Ti-6Al-4V металевим матричним композитом на основі Ti-6Al-4V, армованим TiC. *Sergey V. Prikhodko, Dmytro G. Savvak, Pavlo E. Markovsky, Olexander O. Stasuk, James Penney, Norbert Enzinger, Michael Gaskill & Frank Deley*

Вплив різних покриттів Ni на довготривалу поведінку звареного ультразвуком кабелю EN AW 1370/EN CW 004A. *Tobias Köhler, Michael Grätzel, Jean Pierre Bergmann*

Дослідження зміщення інструменту на механічні властивості різнорідних з'єднань AA6061-T6 та AA7075-T6 в паралельному процесі методом тертя з перемішуванням. *Amir Ghiasvand, Soran Hassanifard, Maziar Mahdipour Jalilian & Hasan Kheradmandan*

Локалізація дефекту зварного шва в процесі зварювання методом тертя з перемішуванням.

Debasish Mishra, Sristi Shree, Abhinav Gupta, Ashok Priyadarshi, Sarthak M. Das, Surjya K. Pal, Debashish Chakravarty, Srikanta Pal, Tanushyam Chattopadhyay & Arpan Pal

Дослідження теплового навантаження процесу лазерного імпульсного з'єднання металу з металізованою термочутливою підкладкою. *W.-S. Chung, F. Nagel, A. Olowinsky & A. Gillner*

Морфологія та характеристика текстури зерен при лазерному зварюванні алюмінієвих сплавів. *Qihan Gao, Cheng Jin, Zhibin Yang*

Дослідження різних параметрів глибини проникнення та ширини зварювання сплаву Ti-6Al-4V методом плазмового дугового зварювання. *Y. Vahidshad, A. H. Khodabakhshi*

Сприяння утворенню аустеніту при лазерному зварюванні дуплексної нержавіючої сталі – вплив захисного газу та лазерне перегрівання. *Amir Baghdadchi, Vahid A. Hosseini, Kjell Hurtig & Leif Karlsson*

Характеристика місцевого крихкого шару, що утворюється в металі шва при тандемному електрогазовому зварюванні. *Kangmyung Seo, Hoisoo Ryoo, Hee Jin Kim, Joong Geun Yoon & Changhee Lee*

Мікроструктура дуплексної нержавіючої сталі, наплавленої лазерним випромінюванням. Вплив захисного газу та термообробки. *Maria Asuncion Valiente Bermejo, Karthikeyan Thalavai Pandian, Björn Axelsson, Ebrahim Harati, Agnieszka Kisielewicz & Leif Karlsson*

Вплив випрямлення полум'я на мікроструктуру та механічні властивості сталей різної міцності. *László Gyura, Marcell Gáspár & András Balogh*



НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут матеріалознавства та зварювання імені Є.О. Патона
Міжнародна конференція

«Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні і споріднених процесах – PolyWeld 2021»

27-28 травня 2021, Київ, Україна
polyweldconf@gmail.com

НАПРЯМКИ РОБОТИ КОНФЕРЕНЦІЇ

- Фізико-хімічні процеси
- Міцність, надійність та ресурс
- Інноваційні технології
- Комп'ютерні технології
- Контроль якості
- Нанотехнології
- Обладнання та джерела живлення
- Формування структури і властивостей з'єднань та матеріалів

ЯК ОБРАТИ ЗВАРЮВАЛЬНИЙ ІНВЕРТОР

На сьогоднішній день обладнання для ручного дугового зварювання штучними електродами більшою мірою представлено саме апаратами на основі інверторних перетворювачів. Тому в даній статті ми спробуємо якомога повніше ознайомити з принципом роботи, перевагами та особливостями інверторів.

Улаштування інверторного зварювального апарата

Апарат складається з двох частин: силової і блоку управління зі зворотним зв'язком. Перетворення промислового або побутового струму в зварювальний (в силовій частині) відбувається завдяки наявності в ньому наступних обов'язкових компонентів:

- випрямляча, який перетворює змінний струм в постійний пульсуючий, і фільтра, що згладжує пульсацію;
- інвертора на основі IGBT або MOSFET транзисторів, в якому відбувається перетворення постійного струму в змінний високої частоти;
- трансформатора струму, за допомогою якого через блок управління контролюються його параметри на первинній обмотці силового трансформатора;
- силового трансформатора, який перетворює напругу та струм інвертора у відповідності до параметрів, що необхідні для зварювання металу;
- випрямляча, на виході якого ми отримаємо постійний зварювальний струм високої частоти;
- дроселя для заглушення пульсацій.

У залежності від моделі зварювальні інвертори можуть бути оснащені додатковими фільтрами, які забезпечують «плавний пуск», фільтрами ЕМС, які забезпечують захист мережі від виникнення електромагнітних завад. Але слід зазначити, що практично всі зварювальні апарати мають тепловий захист від перегріву силового трансформатора та блок захисту випрямляча, який запобігає появі імпульсів струму при підключенні до мережі.

Блоки управління мають різне улаштування, але головна їх якість – контроль параметрів зварювального струму в ручному або автоматичному режимі, а також можливість отримання додаткових функцій, які суттєво полегшують процес зварювання. Але про них декілька нижче.

Може виникнути логічне питання: навіщо купувати такий недешевий пристрій, тим більше ускладнений додатковими елементами, коли можна купити недорогий звичайний зварювальний апарат, в якому всього-то діодний міст і трансформатор? Давайте розбиратися.

Переваги інверторного зварювального апарату:

- мала вага і габаритні розміри в порівнянні з традиційним трансформатором. Справа в тому, що

високочастотні трансформатори суттєво менші за своїми габаритами та вагою. Так що інвертор практично в 5 разів легший і, відповідно, компактніший;

- високий ККД, який досягає 90 % і більше, на відміну від 70 % у традиційного;

– низьке енергоспоживання, в 2 рази нижче, ніж у зварювальних трансформаторів і випрямлячів;

- неритмічність до вхідної напруги в робочому діапазоні;

– широкий діапазон регулювань, який дозволяє досягати оптимальних параметрів зварювального шва незалежно від мінімального діаметра електродів, умов і розташування зварюваних поверхонь;

- система зворотнього зв'язку, що дозволяє виконувати якісне зварювання людям, які не мають спеціальної підготовки, за рахунок контролю параметрів дуги під час роботи;

- мале розбризкування;

– наявність додаткових функцій, таких, як Hot Start, Anti-Stick і Arc Force. Ці функції, як правило, наявні у всіх моделях інверторних зварювальних апаратів і дозволяють відповідно полегшити запалювання дуги, вимикають струм при приварюванні електрода та збільшують струм для руйнування «містків» при металопереносі, що передусе залипанню.

Недоліки:

- вартість вища за традиційні зварювальні трансформатори;

- критичність до наявності вологи, пилу та низьких температур.

Висока ціна зварювальних інверторних апаратів компенсується їх численними перевагами. Другий недолік, який був відзначений вище, пов'язаний з тим, що застосовується доволі велика елементна база, що і визначає високі технічні характеристики. Так, високочастотні трансформатори генерують відповідне магнітне поле, яке як би притягує пил. Також наявність вентиляторів



сприяє цьому. Проте, ніхто не жаліється на те, що доводиться періодично пілососити системні блоки комп'ютерів. Так що своєчасний періодичний догляд за деталями інверторів просто необхідний.

Тепер слід зупинитися на параметрах, які треба враховувати при підборі зварювального інвертора.

Критерії вибору зварювального інвертора

Область застосування. В залежності від умов роботи та вимог до якості зварювання розподіл проводиться за трьома категоріями:

- *побутова*, коли потрібна нетривала робота та апарат знаходиться в приватному користуванні для здійснення невеликих робіт в умовах домашньої майстерні, гаражу, дачної ділянки і т.п.;

- *професійна*, що ставить підвищені вимоги до якості зварних з'єднань при використанні в різних організаціях, таких, як автосервіс, ЖКХ, різного роду майстернях, обслуговуючих цехах;

- *промислова*. У цьому випадку повинна забезпечуватись велика тривалість роботи протягом довгого часу, що сприяє безперервності виробничого циклу з високою якістю.

Максимальний зварювальний струм. Даний критерій визначається тим, з якою товщиною матеріалу доведеться працювати і, відповідно, з яким діаметром електродів. Само собою, можна зварити деталі сантиметрової товщини, використовуючи електрод діаметром в 3 мм, застосовуючи методи багатопарового зварювання, проте в цьому випадку якість шва залишить бажати кращого, так як не відбудеться достатнього прогріву зварюваних деталей і проникнення металу електрода. При визначенні цієї характеристики зварювального інвертора беріть за основу максимальну товщину металу, з яким доведеться працювати.

Тривалість включення. Дана характеристика завжди наводиться в техпаспорті приладу. Зазвичай вона позначається аббревіатурою ТВ та її значення вказується у відсотках. Наприклад, якщо вказано, що ТВ – 60 %, то це означає, що протягом 10 хв роботи сам процес зварювання повинен займати 6 хв, а 4 хв апарат повинен «відпочивати».

Елементна база. Зварювальні апарати інверторного типу виробляються на базі двох типів транзисторів:

- MOSFET – потужні полеві транзистори з ізолюваним затвором;

- IGBT – біполярні транзистори з ізолюваним затвором.

Перші значно дешевші, але транзистори IGBT мають значні переваги, – компактніший розмір і меншу кількість для повноцінного функціонування. Так, для виготовлення середнього за характеристиками інвертора треба від 2 до 4 IGBT

транзисторів проти 10 – 12 MOSFET. Відповідно, відрізняються вага і габаритні розміри, так як потрібне більше відведення тепла та більші радіатори. Тому, як правило, апарати з MOSFET транзисторами мають елементну базу на трьох платах. Апарати з IGBT мають вищий ККД та вищу межу робочої температури, яка досягає 90 °С, тоді як працездатність MOSFET не перевищує 60 °С.

Виробник. Прагнення придбати якісний зварювальний апарат інверторного типу за найнижчою ціною (як, втім, і інше обладнання), підштовхує на придбання китайських підробок невідомих марок або підробок в сумнівного типу магазинах або, що ще гірше, з рук. Звісно, може попастися цілком працездатний апарат, який пропрацює не один рік. Але ймовірність такого випадку вкрай мала. Для початку скористуйтеся інтернетом. Оберіть ряд моделей, які відповідають вашим вимогам за технічними параметрами. І якщо вам бракує коштів і, крім обладнання китайського виробництва, ви не можете собі дозволити зварювальний інвертор марок, що зарекомендували себе, то витратьте трохи часу і йдіть наступним шляхом:

- з'ясуйте, чи є в інтернеті сайт виробника та чи існує він хоча б англійською мовою. Звісно, в кращому випадку в нього повинна бути багатомовна підтримка. Це буде означати, що свою продукцію вони позиціонують не тільки на внутрішньому ринку;

- почитайте відгуки про апарат, який придбаєте. За ними можна оцінити його надійність хоча б віртуально;

- поцікавтеся, чи є у вашому населеному пункті або поблизу майстерні, що здійснюють як гарантійний, так і післягарантійний ремонт обраного обладнання;

- не полінуйтеся дійти до них або хоча б зателефонуйте і поцікавтеся, наскільки часто їм приносять в ремонт дану модель, після якого строку експлуатації та яка тривалість ремонту, чи забезпечує їх гарантійну майстерню фірма-виробник необхідними комплектуючими для проведення ремонту. Це важливий момент, так як у випадку закупівлі комплектуючих своїми силами немає ніякої гарантії, що, наприклад, дорогі IGBT транзистори, поставлені вам при проведенні ремонту (вони виходять з ладу в першу чергу) не будуть контрафактною продукцією, оскільки в даний час підробляють навіть лазерне маркування.

І все ж, краще придбати зварювальний інвертор, який виробили фірми, що відомі та мають вагу на світовому ринку зварювального обладнання. Тоді ви отримаєте і гарантійне обслуговування, і післягарантійний ремонт на високому професійному рівні.



Провідна міжнародна виставка-ярмарка у світі для з'єднання, різання та нанесення покриттів SCHWEISSEN & SCHNEIDEN не відбудеться у 2021 р.

Нова дата проведення 11-15 вересня 2023 р.

SCHWEISSEN & SCHNEIDEN не відбудеться у 2021 р. Нова дата проведення провідної міжнародної виставки для з'єднання, різання та нанесення покриттів перенесена на 11-15 вересня 2023 р. Компанії та особи, які приймають рішення з усього світу, зустрінуться у Messe Essen, щоб обмінятися інформацією про останні інновації, послуги та результати досліджень у цій важливій галузі економіки. Спочатку запланована дата на вересень цього року ярмарка була неможливою з огляду на поточні рамкові умови. Це тому, що учасникам та організаторам провідної виставки у світі, яка нещодавно залучила близько 50000 відвідувачів, потрібні надійність планування та час на виконання.

«SCHWEISSEN & SCHNEIDEN збирає відвідувачів з більш ніж 120 країн», – говорить Олівер Курт, керуючий директор Messe Essen. «З огляду на поточні обмеження на поїздки, ми не зможемо задовольнити вимоги провідної світової виставки-ярмарки в цьому році. До цього додається проблема часу – кілька місяців для наших експонентів, які представляють складне високотехнологічне обладнання на детально розроблених стендах торгової ярмарки. В даний час ми не можемо запропонувати нашим клієнтам необхідну безпеку планування. З новою датою виставки у 2023 р. ми виконуємо виправдані очікування галузі щодо провідної виставки у світі, що гідна цього імені».

Йоханнес Рід, керуючий директор Microster Europa GmbH, вітає рішення скасувати виставку і вітає нову дату у 2023 р.: «Як один з провідних світових виробників систем різання з ЧПУ, SCHWEISSEN & SCHNEIDEN є абсолютно необхідною подією. Ми покладемо великі сподівання на виставку, яка дотепер завжди була більш ніж виконана. З цієї причини ми вітаємо нову дату 2023 р., коли умови для провідної у світі виставки такого формату знову будуть прийнятні».

Цю оцінку також поділяє Конрад Мор, директор підрозділу ринку, кластер Центральної Європи в Air Liquide: «Зазвичай ми починаємо планувати та координувати свою участь у виставці більш ніж за рік наперед ікладаємо багато зусиль у презентацію своєї продукції та послуги для широкої аудиторії. Ці зусилля винагороджуються зустрічами під час проведення SCHWEISSEN & SCHNEIDEN з національними та міжнародними керівними органами, яких ми зустрічаємо там лише в такій кількості та якості. Проведення ярмарку цього року неминуче було б пов'язано із значними обмеженнями, які ми також накладаємо на себе як на групу, щоб зупинити пандемію. Нова дата забез-

печує нас і галузь безпекою та підтримує якісні обіцянки SCHWEISSEN & SCHNEIDEN. Я впевнений, що і те, і інше позитивно позначиться на виставці та галузевих зустрічах».

Промисловість чекає SCHWEISSEN & SCHNEIDEN. Про важливість провідної виставки у світі свідчить той факт, що багато компаній розробляють свої інновації після циклу SCHWEISSEN & SCHNEIDEN. Тому нова дата події 2023 р. є важливим сигналом для галузі. Доктор-інж. Роланд Бокінг, керуючий директор Німецького зварювального товариства, каже: «Компанії, постачальники послуг та дослідницькі установи потребують SCHWEISSEN & SCHNEIDEN для презентації своєї продукції та послуг особам, що приймають рішення в галузі. Це тим більше вірно після викликів, пов'язаних з пандемією. Ми з нетерпінням чекаємо нової дати і тим часом пропонуємо більше можливостей для спілкування».

Самі SCHWEISSEN & SCHNEIDEN. Хоча провідна виставка-ярмарок не може відбутися у своєму звичному міжнародному вигляді цього вересня, принаймні національна галузь може сподіватися на захоплюючу програму. Саміт SCHWEISSEN & SCHNEIDEN запланований як захід присутності в Messe Essen, запропонує три професійні зустрічі в період з 14 по 17 вересня 2021 р. Це DVS CONGRESS та Grosse Schweisstechnische Tagung, а також DVS CAMPUS. Одночасно чотири комітети DVS зберуться на свої засідання в Messe Essen. Програму конференції завершить супровідна виставка.

Підготовка до 2023 р. в самому розпалі. Тим часом попередні плани щодо SCHWEISSEN & SCHNEIDEN продовжуються безперервно. Зовсім недавно провідна виставка у світі вразила галузь: у 2017 р. 1030 експонентів з 41 країни представили свої новітні технології з'єднання, різання та нанесення покриттів. 94 відсотки із загальної кількості 50000 відвідувачів із 120 країн вже заявили, що також відвідають майбутню виставку.

«Немає сумнівів, що ми воліли б встановлювати ділові контакти та будувати відносини в SCHWEISSEN & SCHNEIDEN цього року, а не в 2023 р. Однак ця нова дата надає галузі розумну перспективу і дозволяє нам розпочати планування ярмарку», – каже Йохан Франссон, керуючий директор у Європі, ESAB Europe GmbH, підсумовуючи очікування наступної ярмарки SCHWEISSEN & SCHNEIDEN.

Додаткова інформація на: www.schweissen-schneiden.

ДИСЕРТАЦІЇ НА ЗДОБУТТЯ НАУКОВОГО СТУПЕНЯ



Гринюк А.А. (Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України) захистив 7 квітня 2021 р. кандидатську дисертацію на тему «Плазмово-дугове зварювання алюмінієвих сплавів різнополярним асиметричним струмом».

Дисертація присвячена дослідженню особливостей процесів плазмово-дугового зварювання різнополярним асиметричним струмом (ПДЗ) алюмінієвих сплавів. Встановлено, що крім основних параметрів, характерних для зварювання постійним струмом, таких як сила зварювального струму, швидкість зварювання та витрати плазмоутворюючого газу, при плазмово-дуговому зварюванні різнополярним струмом додатковими засобами збільшення глибини проплавлення є частота різнополярного струму та баланс дуги (тривалість протікання струму при прямій полярності). Збільшення частоти різнополярного струму з 50 до 200 Гц дозволяє збільшити глибину проплавлення швів у 2,0...2,5 рази. Шви алюміній-літєвих сплавів, отримані плазмово-дуговим зварюванням різнополярним струмом, мають на 30 % вищі показники міцності та ударної в'язкості при позациндровому розтягуванні у порівнянні зі швами, отриманими звичайним аргондуговим зварюванням неплавким електродом. Розроблено заходи боротьби з газовою пористістю при зварюванні алюміній-літєвих сплавів за рахунок зміни тиску на рідкий метал внаслідок модуляції зварювального струму або імпульсного подавання плазмоутворюю-

ючого газу. Встановлено, що більш ефективним, порівняно з модуляцією струму, є імпульсне подавання (з частотою 4...6 Гц) плазмоутворюючого газу із співвідношенням максимальних витрат до мінімальних 10:1 при рівні мінімальних витрат порядку 0,1 л/хв. При цьому зі збільшенням швидкості зварювання до 200 см/хв не спостерігається погіршення формування поверхні шва, яке притаманне зварюванню з модуляцією струму. Визначено вплив швидкості на показники міцності зварних з'єднань алюмінієвих сплавів з різним хімічним складом. Виявлено ефект «пікової» швидкості зварювання – зростання показників міцності з ростом швидкості зварювання до певної величини швидкості зварювання. Після досягнення «пікової» швидкості спостерігається зниження показників міцності. Для термічно зміцнюваних сплавів товщиною 2,0 мм ця величина знаходиться в діапазоні від 120 до 200 см/хв. При цьому зменшення кількості міді в основному металі збільшує значення «пікової» швидкості зварювання. Запропоновано комбіноване використання плазмово-дугового зварювання та зварювання плавким електродом для зварювання алюмінієвих сплавів товщиною до 16 мм за один прохід з розробкою крайок. Виконано промислове впровадження результатів роботи при виготовленні ПДЗ елементів електричної арматури на ПАТ «Мотор-Січ» (Україна), а також у серійному виробництві в ТОВ «НВЦ «ПЛАЗЕР» (Україна) обладнання для ручного, автоматичного (роботизованого) плазмово-дугового зварювання, із яких два комплекси в даний час експлуатуються на підприємствах та організаціях КНР.



Дем'янов О.І. (Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України) захистив 7 квітня 2021 р. кандидатську дисертацію на тему «Фізичні та металургійні процеси при плазмово-дуговому напилюванні покриттів плавким дротом-анодом».

Дисертація присвячена розробці фізико-математичних моделей процесів тепло- і масопереносу в електродуговій зоні та турбулентному плазмовому струмені при плазмово-дуговому розпиленні металевго дроту-аноду та їх дослідній перевірці. Встановлено, що після формування розплаву на дроті-аноді відбувається злив металевих крапель діаметром 500...700 мкм та їх подальше дроблення до діаметрів 40...150 мкм в плазмовому струмені. Також проведено вимірювання швидкості і температури частинок вздовж довжини струменя. Запропоновано управління характеристиками плазмового струменя за ра-

хунок його стиснення зовнішнім високошвидкісним повітряним потоком із витратами від 16 до 40 м³/год, який підвищує напруженість електричного поля і забезпечує захист розплавлених крапель металу від окислення. Розроблено рекомендації по вибору оптимізованих технологічних режимів, що дозволяють одержувати металеві покриття товщиною до 5 мм і більше із зниженою поруватістю (1...2 %), а також безпоруваті покриття із міцністю зчеплення з основою близько 60...70 МПа при коефіцієнті використання матеріалу до 72 % плазмово-дуговим напилюванням дротом-анодом діаметром 1,0...1,6 мм, що плавиться при струмах 160...260 А, із використанням в якості плазмоутворюючого газу із витратами 1,0...1,5 м³/год. Також створено рекомендації по конструюванню обладнання і режимам його функціонування. Доведено високий рівень зносостійкості нанесених покриттів в умовах тертя ковзання. Виконано низку промислових впроваджень на промислових підприємствах України і КНР.



*Безперервний шлях до досконалості
тривалістю більше 60 років*

НОВИЙ ЕТАП РОЗВИТКУ ТОРГОВОЇ МАРКИ ПАТОН

Розвиток виробництва зварювального обладнання в Україні налічує вже майже вікову історію. З них 62 роки тісно пов'язані з діяльністю Дослідного заводу зварювального устаткування ІЕЗ ім. Є.О. Патона, який було створено при Інституті електрозварювання в січні 1959 р. для втілення в життя нових розробок спеціалістів ІЕЗ та ДКТБ ІЕЗ. За весь час від свого створення і до сьогодні Заводом було виготовлено сотні тисяч одиниць зварювального обладнання для різнопрофільних підприємств майже на всіх континентах світу. На сьогоднішній день ДЗЗУ ІЕЗ ім. Є.О. Патона є провідним виробником зварювального обладнання та матеріалів в Україні та одним з лідерів ринку на пострадянському просторі. Завдяки власним розробкам, високій культурі виробництва та значному досвіду фахівців Заводу зварювальні апарати та електроди під торговою маркою ПАТОН™ гідно оцінюються спеціалістами зварювальної справи як в Україні, так і далеко за її межами.

Розвиток експортних ринків збуту своєї продукції є одним із найбільш пріоритетних напрямків стратегії розвитку Заводу. Сьогодні продукція ПАТОН™ поставляється у більш ніж 50 країн по всьому світу – від Латинської Америки до Далекого Сходу. І перелік цих країн не стоїть на місці! Лише з початку 2021 р. до нього додався ряд європейських (Данія, Великобританія), африканських (Кенія) та близькосхідних країн (Саудівська Аравія, Бахрейн).

Саме для посилення експортного вектору розвитку керівництвом Заводу було прийнято рішення про оновлення назви підприємства та її



Центральний корпус ДЗЗУ ім. Є.О. Патона

зміни на ПАТОН ІНТЕРНЕШНЛ. Очікується, що такий крок допоможе підкреслити перед споживачами та партнерами Заводу міжнародну направленість бізнесу, який вже давно виріс за межі ринку України, та полегшить просування бренду ПАТОН™ у світі. Як часто буває, необхідність таких змін була продиктована самим ринком, адже в сучасних реаліях навіть назва підприємства має відповідати певним вимогам споживачів – простота, лаконічність, доступність та зрозумілість.

Деякий час тому Заводом разом із партнерами було розпочато процес створення представництв в тих країнах, до яких експортується найбільше продукції. Основна мета створення таких представництв – забезпечення ефективної роботи Заводу на локальному ринку та надання високоя-



кісної підтримки локальним споживачам. Згодом планується уніфікувати назви представництв з використанням єдиної торгової марки – ПАТОН Польща, ПАТОН Великобританія, ПАТОН Данія, ПАТОН Єгипет, ПАТОН Грузія, ПАТОН Південна Корея та ще більше 20 представництв. І лише сучасна назва головної компанії із розташованими в Україні дослідно-конструкторською базою та виробничими потужностями надає можливість логічно об'єднати всі представництва в рамках єдиного бізнесу – ПАТОН ІНТЕРНЕТІОНЛ. Сама така назва буде однаково зрозуміла споживачам та партнерам Заводу у будь-якій країні та сприятиме формуванню довіри до українського бренду.

Завод має бездоганну репутацію надійного виробника та постачальника високоякісного зварювального обладнання та матеріалів і робить все необхідне для її підтримки на такому високому рівні. Завдяки співпраці Заводу з провідними українськими та міжнародними сертифікаційними компаніями продукція ПАТОН™ відповідає всім необхідним вимогам та регулярно проходить сертифікацію. Для посилення своїх позицій на міжнародному ринку, а також для мінімізації ризиків експортної діяльності Заводом було укладено угоду про співпрацю з експортно-кредитним

агентством. Така співпраця відкриває можливості щодо розширеного страхування міжнародних поставок продукції Заводу, додатково гарантуючи виконання умов поставки всіма сторонами процесу. При цьому за недовгий час існування даної угоди Завод вже встиг її задіяти при нещодавніх поставках до Буркіна-Фасо, Нігерії, Південної Африки та Кенії. Використання даного додаткового механізму страхування покликане ще більше покращити імідж компанії ПАТОН ІНТЕРНЕТІОНЛ в якості надійного міжнародного торгового партнера та посилити позиції продукції ПАТОН™ на світовому ринку.

Завдяки вказаним заходам Завод продовжує свій рух до поставлених цілей – забезпечення сталого розвитку свого науково-дослідного та виробничого потенціалу, нарощування виробництва високоякісного зварювального обладнання та матеріалів, просування продукції ПАТОН™ серед якнайбільшої кількості фахівців зі зварювання з різних країн, збільшуючи тим самим власний внесок у розвиток української виробничої галузі та популяризації бренду «ЗРОБЛЕНО В УКРАЇНІ» серед споживачів по всьому світу.

За матеріалами прес-релізу ДЗЗУ



Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Міжнародна Асоціація «Зварювання»

Десята міжнародна конференція

ПРОМЕНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЗВАРЮВАННІ та ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ

6 – 11 вересня 2021 р.

Україна, Одеса

Голова програмного комітету

академік І.В. Кривцун

Тематика конференції

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

ОБЛАДНАННЯ ♦ ТЕХНОЛОГІЇ ♦ МОДЕЛЮВАННЯ



АДРЕСА ОРГКОМІТЕТУ
Україна, 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
Тел./факс: (38044) 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
<http://pwi-scientists.com/rus/ltwmp2021>



ПАМ'ЯТІ С.І. КУЧУКА-ЯЦЕНКА



22 березня 2021 р. пішов з життя перший заступник директора Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, академік НАН України Сергій Іванович Кучук-Яценко.

Сергій Іванович після закінчення Київського політехнічного інституту за розподілом був направлений на роботу в Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, де пройшов славний трудовий шлях від молодого фахівця-інженера до професора, доктора технічних наук, завідувача одного з провідних відділів, першого заступника директора Інституту з наукової роботи, академіка Національної академії наук України. У 1960 р. С.І. Кучук-Яценко захистив кандидатську, а у 1972 р. – докторську дисертації. У 1978 р. був обраний членом-кореспондентом, а у 1987 р. – дійсним членом Національної академії наук України.

Наукова діяльність С.І. Кучука-Яценка пов'язана з дослідженнями фізико-металургійних процесів при зварюванні різних матеріалів у твердій фазі. Зокрема, ним отримані нові дані про особливості формування з'єднань з утворенням тонкого шару розплаву на контактуючих поверхнях деталей, що зварюються, його поведінці під дією електродинамічних сил і особливості його взаємодії з газовим середовищем в зоні контакту. Вперше було показано, що стан розплаву в період деформації деталей, що зварюються, надає домінуючий вплив на утворення металевих зв'язків між контактуючими поверхнями і формування хімічної неоднорідності в зоні з'єднання. Детально вивчено вплив оксидних структур в розплаві на якість з'єднань та визначено шляхи мінімізації окислювальних процесів в зазначений період зварювання. Поряд з перерахованими дослідженнями С.І. Кучук-Яценко протягом багатьох років проводить цілеспрямоване вивчення швидкоплинних процесів нагріву і руйнування одиничних контактів при високих концентраціях енергії. Встановлено ряд нових закономірностей, що характеризують енергетичні показники процесу контактного плавлення металів, визначено шляхи автоматичного управління основними параметрами процесу з метою отримання найбільш сприятливих умов нагріву і деформації деталей, що зварюються.

Практичним результатом перерахованих фундаментальних досліджень була розробка С.І. Кучуком-Яценком нових способів контактного зва-

рювання безперервним, імпульсним, пульсуючим оплавленням, запатентованих в провідних країнах світу. На їх основі С.І. Кучуком-Яценком спільно з колективом співробітників розроблені технології зварювання різних виробів, системи управління і нові зразки зварювального обладнання, що не мають аналогів у світовій практиці. Устаткування відрізняється високою продуктивністю, мінімальною споживаною потужністю і масою, забезпечує стабільну і високу якість з'єднань. Ці переваги найбільш значимі при зварюванні деталей складної конфігурації з великими поперечними перетинами. Наукова та інженерна діяльність С.І. Кучука-Яценка характеризувалася комплексним підходом до вирішення поставлених завдань. Виконані ним фундаментальні дослідження супроводжувалися розробкою оригінальних технологій зварювання, автоматичного і в останні роки комп'ютеризованого управління процесом зварювання і створенням сучасного зварювального обладнання.

За його безпосередньої участі була здійснена організація промислового виробництва нового зварювального устаткування і його масове впровадження у виробництво. Ось деякі найбільш значущі етапи діяльності С.І. Кучука-Яценка.

Понад п'ятдесят років С.І. Кучук-Яценко займався роботами по зварюванню рейок. Розроблені за його активної участі і керівництві технології та обладнання для зварювання рейок дозволили вперше в світовій практиці застосувати високопродуктивне контактне зварювання в польових умовах, що значною мірою сприяло переходу залізниць на безстикові шляхи. За активної участі С.І. Кучука-Яценка серійний випуск такого устаткування по документації ІЕЗ був організований на Каховському заводі електрозварювального обладнання, який з 1970-х років став світовим експортером такого обладнання. За минулі роки створено понад десяти поколінь рейкозварювальних машин, які використовуються і зараз в багатьох країнах світу. С.І. Кучук-Яценко брав активну участь в удосконаленні цього обладнання і технології зварювання, що дозволяє підтримувати його високу конкурентоспроможність. В останні роки створені нові покоління зварювальних машин, що дозволяють зварювати рейки нескінченної довжини при ремонті безстикових шляхів з одночасною стабілізацією їх напруженого стану. У 1966 р. за розробку та впровадження машини для стикового зварювання рейок при ремонті і будівництві безстикових залізничних колій С.І. Кучуку-Яценку в складі авторського колективу присуджена

Ленінська премія. Йому присвоєно звання «Почесний залізничник СРСР».

Розробки С.І. Кучука-Яценка та його співробітників успішно використані також на машинобудівних заводах при виготовленні кільцевих заготовок, валів і заготовок з різномірних матеріалів. Особливо ефективним виявилось застосування багатопозиційного контактного зварювання, що дозволило зварювати великогабаритні деталі одночасно в декількох місцях (корпуси двигунів, радіатори потужних трансформаторів). Впровадження однієї установки в лінії виробництва картерів блоків потужних дизелів на одному з тепловозобудівних заводів дозволило підвищити продуктивність праці в 70 разів і вивільнити 380 зварювальників. Значний ефект отримано також в результаті багатопозиційного зварювання на Запорізькому трансформаторному заводі при виготовленні радіаторів трансформаторів. У 1976 р. С.І. Кучук-Яценко в складі авторського колективу був удостоєний Державної премії УРСР за створення і промислове впровадження нової технології та високоефективних складально-зварювальних комплексів для серійного виробництва великогабаритних конструкцій з уніфікованих елементів. Вперше у світовій практиці С.І. Кучук-Яценком з групою співробітників була розроблена оригінальна технологія контактного зварювання виробів складної форми і великого перетину з високоміцних сплавів на основі алюмінію, що забезпечила отримання сполук з міцністю, що практично дорівнює міцності основного металу. На її основі розроблено і освоєно виробництво унікального обладнання, яке використовується при виробництві космічної техніки на заводах України. У 1986 р. С.І. Кучук-Яценко в складі авторського колективу удостоєний Державної премії СРСР за створення технології та обладнання для контактної стикового зварювання конструкцій з високоміцних алюмінієвих сплавів. Значний внесок С.І. Кучук-Яценко вніс у створення технології та обладнання для контактної стикового зварювання трубопроводів різного призначення. За його активної участі розроблені технології, системи керування й устаткування для контактної стикового зварювання труб діаметром від 60 до 1400 мм і виконано його широкомасштабне впровадження при будівництві трубопроводів на території колишнього СРСР. З використанням КСЗ зварено понад 70 тис. км різних трубопроводів, в тому числі 4 тис. км найпотужніших трубопроводів в районах Крайньої Півночі. Застосування КСЗ дозволило підвищити продуктивність праці і забезпечити надійність трубопроводів. Ця робота була також відзначена Ленінською премією у 1989 р.

Під керівництвом С.І. Кучука-Яценка та за його безпосередньої участі безперервно тривали роботи зі створення технологій зварювання тиском неповоротних стиків труб різного призначення. Вперше у світовій практиці були розроблені технології та обладнання для пресового зварювання з нагрівом дугою, керованою магнітним полем, труб діаметром до 300 мм з товщиною стінки 5...15 мм, що відрізнялися високою продуктивністю при мінімальній енергоємності процесу.

С.І. Кучук-Яценко брав активну участь на всіх етапах виконання перерахованих робіт. У 1998 р. йому присвоєно звання «Заслужений діяч науки і техніки України», у 2000 р. – Премія ім. Є.О. Патона за наукову роботу «Зварювання в твердій фазі». С.І. Кучук-Яценко автор більше 700 наукових публікацій, в тому числі 10-ти монографій, 350-ти авторських свідоцтв, а також понад 300 українських і зарубіжних патентів, багато з яких придбані за ліцензійними угодами зарубіжними фірмами.

Академік С.І. Кучук-Яценко займався актуальними проблемами в галузі зварювання, створенням прогресивних технологій з'єднання важкозварювальних матеріалів. Він очолював один з провідних наукових відділів Інституту електрозварювання. С.І. Кучук-Яценко тривалий час плідно співпрацював з Каховським заводом електрозварювального устаткування – одним з провідних підприємств-виробників зварювального обладнання в Україні. Брав активну участь в організації серійного виробництва контактних стикових машин для зварювання залізничних рейок і труб.

С.І. Кучук-Яценко був заступником голови Вченої ради ІЕЗ, членом редколегії та головним редактором журналу «Автоматичне зварювання». Ним підготовлено більше десяти кандидатів і докторів технічних наук. Він був обраний першим президентом Товариства зварників України, входив до складу його правління, членом Товариства зварників США та Великобританії.

Заслуги вченого відзначені двома орденами Трудового Червоного Прапора, орденом Знак Пошани, орденами Князя Ярослава Мудрого, медалями.

Талант вченого і керівника, душевна теплота та доброзичливість здобули С.І. Кучуку-Яценку авторитет та повагу зварювальної спільноти. З глибоким сумом переживають цю втрату друзі, колеги, учні і пам'ять про Сергія Івановича збережеться назавжди в їх серцях.

*Колектив Інституту електрозварювання
ім. Є.О. Патона, редколегія та редакція журналу
«Автоматичне зварювання»*

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 2021 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2019 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>