

З АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ 1 2026

«Автоматичне зварювання»

«Avtomatychne Zvaryuvannya» (Automatic Welding)

Видається з 1948 р.

www.patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as

Published since 1948

ЗМІСТ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗДІЛ

- Жуков В.В., Костін В.А., Григоренко С.Г., Губатюк Р.С.
Сучасні підходи до побудови діаграм термодинамічного перетворення для зварювання (Огляд)3
- Лобанов Л.М., Лисак В.В., Міходуй О.Л., Тимошенко О.М., Пащин М.О., Кондратенко І.П., Чопик В.В., Карлов О.М.
Залишкові зварювальні напруження в сплаві АМГ6 після електродинамічної обробки в умовах попереднього пружного розтягу 11
- Барвінко А.Ю., Барвінко Ю.П., Яшник А.М., Костеневич О.С.
Відновлення клепанних циліндричних резервуарів зварюванням 17
- Качинський В.С., Allford D., Клименко В.І.
Технологія пресового зварювання магнітокерованою дугою з імпульсним нагріванням та контрольованим припуском осадки 28
- Онищенко П.І., Майданчук Т.Б.
Сучасні технології зварювання сталей великих товщин 37
- Калеко Д.М.
Динаміка контакту між деталями, що зварюються, при конденсаторному приварюванні шпильок 48
- Дмитрик В.В., Чень Сінлей, Касьяненко І.В., Гаращенко О.С., Платухін О.Л.
Підвищення якісних характеристик зварного з'єднання комбінованого ротора 58

ІНФОРМАЦІЯ

- Пам'яті В.М. Ілюшенка 65
- Міжнародний конкурс зварників Ессен – 2025 66
- Високоєфективний процес MIG-зварювання подвійним дротом. Рішення AOTAI 68

CONTENTS

SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL

- Zhukov V.V., Kostin V.A., Grigorenko S.G., Gubatyuk R.S.
Modern approaches to obtaining thermokinetic transformation diagrams for welding and related technologies (Review)3
- Lobanov L.M., Lysak V.V., Mikhoduj O.L., Timoshenko O.M., Pashchyn M.O., Kondratenko I.P., Chopyk V.V., Karlov O.M.
Residual welding stresses in AMG6 alloy after electrodynamic treatment under conditions of preliminary elastic tension 11
- Barvinko A.Yu., Barvinko Yu.P., Yashnyk A.M., Kostenevych O.S.
Restoration of riveted cylindrical tanks by using welding 17
- Kachinsky V.S., Allford D., Klymenko V.I.
Press magnetically impelled arc butt welding technology with pulsed heating and controlled upset allowance 28
- Onyshchenko P.I., Maidanchuk T.B.
Modern welding technologies for thick-section steels 37
- Kaleko D.M.
Dynamics of contact between parts being welded during capacitor welding of studs 48
- Dmitrik V.V., Chen Xinlei, Kasianenko I.V., Harashchenko O.S., Platuhin O.L.
Improvement of quality characteristics of a welded joint of a combined rotor 58

INFORMATION

- In memory of V.M. Ilyushenko 65
- Essen International Welding Competition – 2025 66
- Highly efficient MIG welding process with double wire. AOTAI solution 68



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



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

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Вчені Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона
НАН України (Київ):

І.В. Кривцун (головний редактор),

О.М. Берднікова, В.В. Книш,

В.М. Коржик, В.А. Костін, Ю.М. Ланкін,

Л.М. Лобанов, С.Ю. Максимов,

О.В. Махненко, М.О. Пашчин,

В.Д. Позняков, І.О. Рябцев,

І.Ю. Романова – відповідальний секретар;

В.В. Дмитрик, НТУ «ХПІ», Харків;

В.В. Квасницький, Є.П. Чвертко,

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ;

А.Л. Майстренко,

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАНУ;

В.В. Перемітько,

Дніпровський державний технічний університет, Кам'янське;

У. Райсген, Інститут зварювання та з'єднань,

Аахен, Німеччина.

Журнал зареєстровано Національною радою України
з питань телебачення і радіомовлення 11.09.2025;
ідентифікатор друкованого/онлайн медіа
R30-06491/ R40-06488.

Засновник (реєстрант) – Інститут електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України.

ISSN 3041-2374 print, ISSN 3041-234X online
DOI: <https://doi.org/10.37434/as>

Журнал входить до переліку затверджених
Міністерством освіти і науки України видань
для публікації праць здобувачів наукових ступенів за
спеціальностями G8, G9, G10, G11, G12 кластеру
«Механічна інженерія та машинобудування».
Рекомендовано до друку редакційною колегією журналу.

Видавець

ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ «ПАТОН»
03150, Україна, Київ, вул. Казимира Малевича, 11
Тел./факс: (38044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/ukr/journal/as

Передплата 2026

Передплатний індекс 70031.

6 випусків на рік (видається раз на два місяці).

Друкована версія: 2520 грн. за річний комплект
з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

Електронна версія: 2520 грн. за річний комплект
(випуски журналу надсилаються електронною
поштою у форматі .pdf).

Передплата можлива на попередні випуски за будь-який рік.

Статті з журналу «Автоматичне зварювання» вибірково
перевідаються англійською мовою в журналі
«The Paton Welding Journal»:

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

За зміст рекламних матеріалів
видавець відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

Scientists of E.O. Paton Electric Welding Institute
of NAS of Ukraine (Kyiv):

I.V. Krivtsun (Editor-in-Chief),

O.M. Berdnikova, V.V. Knysn,

V.M. Korzhyk, V.A. Kostin, Yu.M. Lankin,

L.M. Lobanov, S.Yu. Maksimov,

O.V. Makhnenko, M.O. Pashchin,

V.D. Poznyakov, I.O. Ryabtsev,

I.Yu. Romanova – Executive Secretary;

V.V. Dmitrik, NTU «Kharkiv Polytechnic Institute»,
Kharkiv, Ukraine;

V.V. Kvasnytskyi, E.P. Chvertko, NTUU «Igor Sykorsky
Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine;

A.L. Maistrenko, V. Bakul Institute for Superhard Materials
of the NASU, Kyiv, Ukraine;

V. V. Peremitko, Dniprovsky State Technical University,
Kamianske, Ukraine;

U. Reisgen, Welding and Joining Institute, Aachen, Germany.

The Journal was registered by the National Council of Ukraine
on Television and Radio Broadcasting on 11.09.2025,
carrier identifier print/online media
R30-04566/ R40-06488.

Founder (registrant) – E.O. Paton Electric Welding Institute of
NAS of Ukraine.

ISSN 3041-2374 print, ISSN 3041-234X online.
DOI: <https://doi.org/10.37434/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 G8, G9, G10, G11, G12 of the cluster
«Mechanical Engineering and Machine Building».
Recommended for publishing Editorial Board of the Journal.

Publisher

«PATON PUBLISHING HOUSE» LLC
03150, Ukraine, Kyiv, 11 Kazymyr Malevych Str.
Tel./fax: (38044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/as

Subscription 2026

Subscription index 70031.

6 issues per year, back issues available.

192€, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.

156€, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format).

Subscription is possible for previous issues for any year.

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

www.patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj

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

Індекс реклам

ТОВ «ВТЦ» – I стор. обкладинки, стор. 68-72.

ТОВ «Патон Інтернешнл» – II стор. обкладинки.

ТОВ «Інтерхім БТВ» – IV стор. обкладинки.

Підписано до друку 16.01.2026.
Формат 60×84/8. Офсетний друк.
Ум. друк. арк. 9,8.

Друк ТОВ «ДІА».
03022, м. Київ-22, вул. Васильківська, 45.

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ПОБУДОВИ ДІАГРАМ ТЕРМОКІНЕТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ТА СПОРІДНЕНИХ ТЕХНОЛОГІЙ (Огляд)

В.В. Жуков, В.А. Костін, С.Г. Григоренко, Р.С. Губатюк

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

У статті представлено огляд сучасних підходів до побудови ССТ-діаграм і спеціальних діаграм, сформованих на основі результатів дилатометричного експерименту, для аналізу структурно-фазових перетворень у сталях під час охолодження. Розглянуто методологію фізичного моделювання теплових циклів на установках Gleeble, а також типові параметри нагріву й охолодження. Особливу увагу приділено впливу швидкості охолодження на формування мікроструктури в зоні термічного впливу зварних з'єднань. Порівняно підходи з використанням постійних і змінних (нелінійних) режимів охолодження з акцентом на їх відповідність реальним умовам зварювання. Обґрунтовано переваги нелінійних термічних циклів для підвищення достовірності моделювання та коректності побудови ССТ-діаграм при оцінці зварюваності сталей. Бібліогр. 16, рис. 8.

Ключові слова: фізичне моделювання, фазові перетворення, мікроструктура, аустеніт, мартенсит, ССТ та DCCT діаграми, Gleeble, зварні з'єднання

Вступ. Термокінетичні діаграми (ТКД) розпаду переохолодженого аустеніту (в англійській літературі ССТ-діаграми – Continuous Cooling Transformation) є важливим інструментом для аналізу структурно-фазових перетворень у сталях під час охолодження. Вони відображають, як змінюється структура аустеніту при різних швидкостях охолодження, тобто яка фаза (ферит, перліт, бейніт або мартенсит) формується в залежності від температури та часу [1–3].

Використовуючи ТКД, фахівці можуть:

- прогнозувати структуру в кожній зоні термічного впливу (ЗТВ) – знати, чи утвориться мартенсит (що призводить до крихкості) або ферит/перліт (що забезпечує пластичність);
- оцінювати ризик холодних тріщин, що часто пов'язано з появою мартенситу при швидкому охолодженні;
- обирати зварювальні режими (струм, швидкість зварювання, попередній/допоміжний підігрів), щоб зменшити шкідливі структурні зміни;
- визначати необхідність термічної обробки після зварювання.

Таким чином, ТКД є критично важливими при зварюванні відповідальних конструкцій – від трубопроводів до броні – де потрібен контроль структури та властивостей металу в ЗТВ.

Дилатометричний експеримент – це основа експериментальної побудови ТКД. Це – метод дослідження фазових перетворень у матеріалах, за-

снований на вимірюванні змін лінійних розмірів зразка під час термічного циклу (нагріву або охолодження). Він проводиться за допомогою дилатометра – високоточного приладу, який фіксує деформацію матеріалу з точністю до мікронів при зміні температури. Зразок сталі нагрівають до температури аустенізації (вище A_{C3}), витримують певний час для стабілізації структури. Далі зразок охолоджують з постійною заданою швидкістю (наприклад 1 °C/c). Під час охолодження дилатометр реєструє зміну довжини зразка в реальному часі. У точках фазових перетворень (аустеніт→ферит, перліт, бейніт тощо) відбуваються стрибкоподібні або характерні зміни кривої деформації, що фіксуються приладом [4]. В Україні, на жаль, досі не існує стандарту, що регламентує побудову ТКД, а також проведення дилатометричного експерименту.

Стандарт ASTM A1033-18 (2023) [5], що має назву «Standard Practice for Quantitative Measurement and Reporting of Hypoeutectoid Carbon and Low-Alloy Steel Phase Transformations», описує методику кількісного вимірювання та представлення фазових перетворень у гіпоeutектоїдних вуглецевих і низьколегованих сталях за допомогою високошвидкісної дилатометрії. У розділі 1.3 цього стандарту зазначено, що методика застосовується для визначення поведінки фазових перетворень сталі як за ізотермічних умов, так і за умов безперервного охолодження. Хоча термін «ССТ-діаграма» (Continuous Cooling Transformation) прямо не використовується, описані методи дозволяють отримувати дані, необ-

Жуков В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-3358-8491>, Костін В.А. – <https://orcid.org/0000-0002-2677-4667>,

Григоренко С.Г. – <https://orcid.org/0000-0003-0625-7010>, Губатюк Р.С. – <https://orcid.org/0000-0002-0851-743X>

© В.В. Жуков, В.А. Костін, С.Г. Григоренко, Р.С. Губатюк, 2025

хідні для побудови таких діаграм. Таким чином, стандарт не містить прямого посилання на CCT-діаграми, але надає методологію, що дозволяє отримувати інформацію для їх побудови.

У стандарті ASTM A1033-18 (2023) методика побудови даних фазових перетворень передбачає використання лінійних (тобто постійних) швидкостей охолодження. Якщо контроль за постійною швидкістю неможливий (наприклад у реальному технологічному процесі), то необхідно фіксувати миттєву швидкість охолодження при 700 °C і тривалість охолодження в інтервалі 800...500 °C.

Мета роботи – проаналізувати сучасні методи побудови термодинамічних діаграм фазових перетворень в умовах зварювання з метою урахування складних температурно-механічних впливів та нелінійного характеру термічного циклу зварювання.

Виклад основного матеріалу. Доволі часто CCT-діаграми, що побудовані з використанням постійних швидкостей охолодження, використовуються для оцінки структурно-фазового складу сталей в ЗТВ. Наприклад, у [6] досліджено мікроструктурні перетворення в ЗТВ сталі X70 (C – 0,06 %; Mn – 1,28 %; Si – 0,26 %; Nb – 0,045 %; Ti – 0,014 %; Mo – 0,17 %) для трубопроводів при зварювальних теплових циклах. Експерименти проводили на установці Gleeble 3500. Для вивчення фазових перетворень зразки нагрівали зі швидкістю 10 °C/c до максимальної температури 1300 °C, потім охолоджували до 900 °C за 1 с, витримували 16 с при цій температурі, а потім охолоджували до кімнатної температури з постійними швидкостями охолодження від 60 до 0,1 °C/c. Слід зазначити, що діаграма побудована від температури 900 °C. Автори роблять висновок, що оптимальна швидкість охолодження для забезпечення міцності та в'язкості ЗТВ становить 10...20 °C/c (рис. 1).

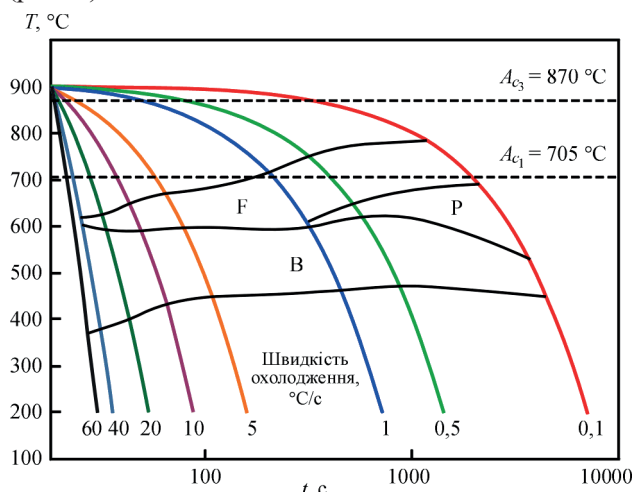


Рис. 1. CCT-діаграма сталі трубної сталі X70. Мікроструктури: F – ферит; B – бейніт; P – перліт [6]

У [7] представлено побудову CCT-діаграми для ЗТВ вуглецевої сталі SA106 Grade B (C – 0,3 %; Mn – 0,7 %; Si – 0,1 %; Cr – 0,4 %; Cu – 0,4 %; Mo – 0,15 %; Ni – 0,4 %; V – 0,08 %). Мета дослідження – оцінка фазових перетворень і мікроструктури, які утворюються в ЗТВ при різних швидкостях охолодження, що відтворює умови дугового зварювання.

Дилатометричний експеримент виконано на установці Gleeble 3500. Зразки нагрівали зі швидкістю 100 °C/c до 1200 °C, витримували при цій температурі 1 с та охолоджували до кімнатної температури із заданими постійними швидкостями від 0,1 до 100 °C/c. У загальних висновках вказано, що оптимальний інтервал охолодження для формування сприятливої структури – 10...20 °C/c. Отримана CCT-діаграма рекомендована для розробки технологій зварювання сталі SA106 Grade B (рис. 2).

У [8] досліджено вплив різних швидкостей охолодження на мікроструктуру ЗТВ та побудовано CCT-діаграму для умов процесу зварювання сталі CLAM (China Low Activation Martensitic, C – 0,093 %; Cr – 8,39 %; W – 1,499 %; V – 0,196 %; Ta – < 0,01 %; Mn – 0,44 %), що є феритно-мартенситною сталлю, призначеною для застосування в атомних реакторах.

Фізичне моделювання виконували на установці Gleeble-1500. Термічний цикл містив нагрів до температури 1623 K (~ 1350 °C) за 2 хв, витримку 1 хв та охолодження до кімнатної температури з постійними швидкостями охолодження в діапазоні 3600...1 K/хв (60...0,017 °C/c). Побудована CCT-діаграма містить лише дві області фазових перетворень: феритне та мартенситне. Автори зазначають, що діаграма дозволяє передбачити структуру ЗТВ та є корисним інструментом для оцінки зварюваності сталі CLAM (рис. 3).

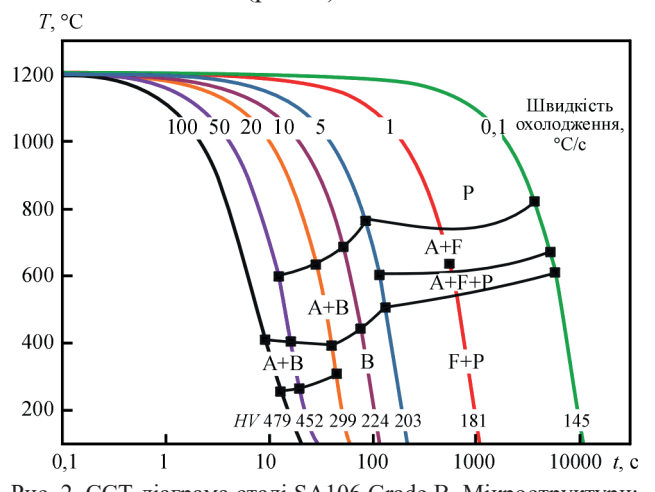


Рис. 2. CCT-діаграма сталі SA106 Grade B. Мікроструктури: A – аустеніт; F – ферит; B – бейніт; P – перліт; M – мартенсит [7]

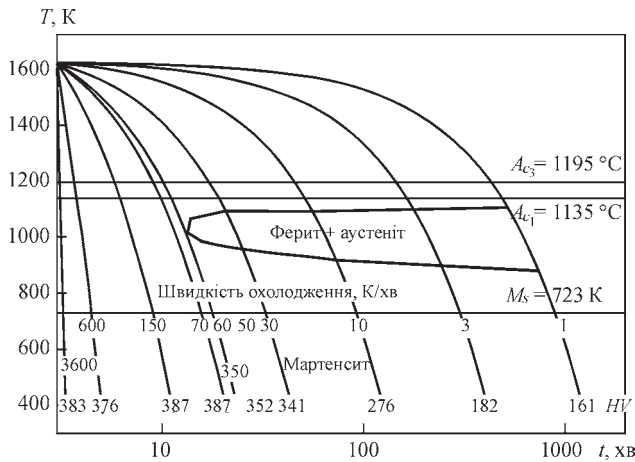


Рис. 3. CCT-діаграма сталі CLAM для ЗТВ [8]

Хоча розглянуті вище роботи щодо побудови ТКД-діаграм автори позиціонують як роботи для вивчення впливу ЗТВ на структуру сталі при зварюванні, діапазони швидкостей охолодження, які використовуються в побудові ТКД у цих роботах, дуже схожі з такими, які використовуються у роботах з побудови ТКД для створення та оптимізації циклів термічної обробки.

У [9] досліджено поведінку при безперервному охолодженні такої ж сталі, що й в [8] феритно-мартенситної сталі CLAM. Основна мета – побудова CCT-діаграми та вивчення впливу швидкості охолодження на фазові перетворення та мікротвердість. Однак у цій роботі основні зусилля було направлено на розробку термічної обробки цієї сталі.

Фізичне моделювання проведено на установці Gleeble 1500. Зразки нагрівали до 1253 K ($\approx 980\text{ }^\circ\text{C}$) за 15 хв, витримували 30 хв, після чого охолоджували до кімнатної температури зі швидкостями від 240 K/хв ($4\text{ }^\circ\text{C/s}$) до 1 K/хв ($0,017\text{ }^\circ\text{C/s}$). Усі термічні цикли охолодження проводили з постійною швидкістю. Автори зазначають, що отримані результати можуть бути використані для розробки режимів термічної обробки з прогнозованим фазовим складом у кри-

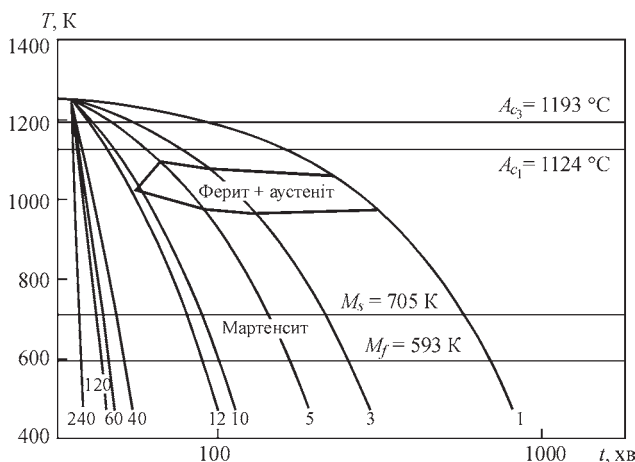


Рис. 4. CCT-діаграма сталі CLAM для термічної обробки [9]

тичних зонах конструкцій атомних реакторів (рис. 4).

Умови побудови CCT/ТКД відрізняються для кожного випадку й по суті проведення дилатометричного експерименту є фізичним моделюванням технологічного впливу на матеріал. Якщо під час технологічної обробки матеріалу окрім термічного відбувається й деформаційний вплив, то необхідно врахувати це при вивченні кінетики структурно-фазових перетворень.

У літературі іноді зустрічається опис так званих DCCT-діаграм (Deformation Continuous Cooling Transformation). Такі діаграми використовуються для оптимізації режимів термодформаційної обробки та викликані необхідністю врахування термодформаційної обробки на кінетику структурно-фазових перетворень. Так, у [10] досліджено вплив попередньої пластичної деформації на характер CCT-діаграми пружинної сталі 51CrV4 ($C - 0,47...0,55\%$; $Si - \leq 0,40\%$; $Mn - 0,70...1,10\%$; $P - \leq 0,025\%$; $S - \leq 0,035\%$; $Cr - 0,90-1,20\%$; $V - 0,10-0,25\%$).

На симуляторі Gleeble 3800 було побудовано як стандартну CCT-діаграму, так і DCCT-діаграму, що враховує деформацію до охолодження сталі 51CrV4 (рис. 5).

Для побудови CCT-діаграми без деформації зразки нагрівали до $850\text{ }^\circ\text{C}$, витримували 120 с і охолоджували зі сталими швидкостями в діапазоні $0,16...12\text{ }^\circ\text{C/s}$. У циклах з деформацією зразки після такої ж витримки стискали одночасно при $850\text{ }^\circ\text{C}$ з істинною деформацією 0,35 при швидкості 1 s^{-1} , а потім охолоджували з тими ж швидкостями. Всі цикли охолодження були з постійною швидкістю.

DCCT-діаграма показала зсув кривої початку перлітного перетворення вліво (в область більших швидкостей охолодження), тобто перліт формувався швидше. Крива початку бейнітного перетворення дещо змістилась вгору (до вищих температур), з'явилась також крива завершення бейнітного перетворення. Крива початку мартенситного перетворення трохи знизилась у зоні високих швидкостей. Загалом деформація прискорює анізотермічний розпад аустеніту для даної сталі, особливо це помітно для перлітної складової.

Слід зазначити, що для деформованого металу існує тенденція до прискорення перетворення в умовах постійного охолодження у порівнянні з металом без деформації.

Так, наприклад, у [11] автори дослідили вплив вмісту хрому та попередньої деформації аустеніту на вигляд CCT- і DCCT-діаграм для низьковуглеце-

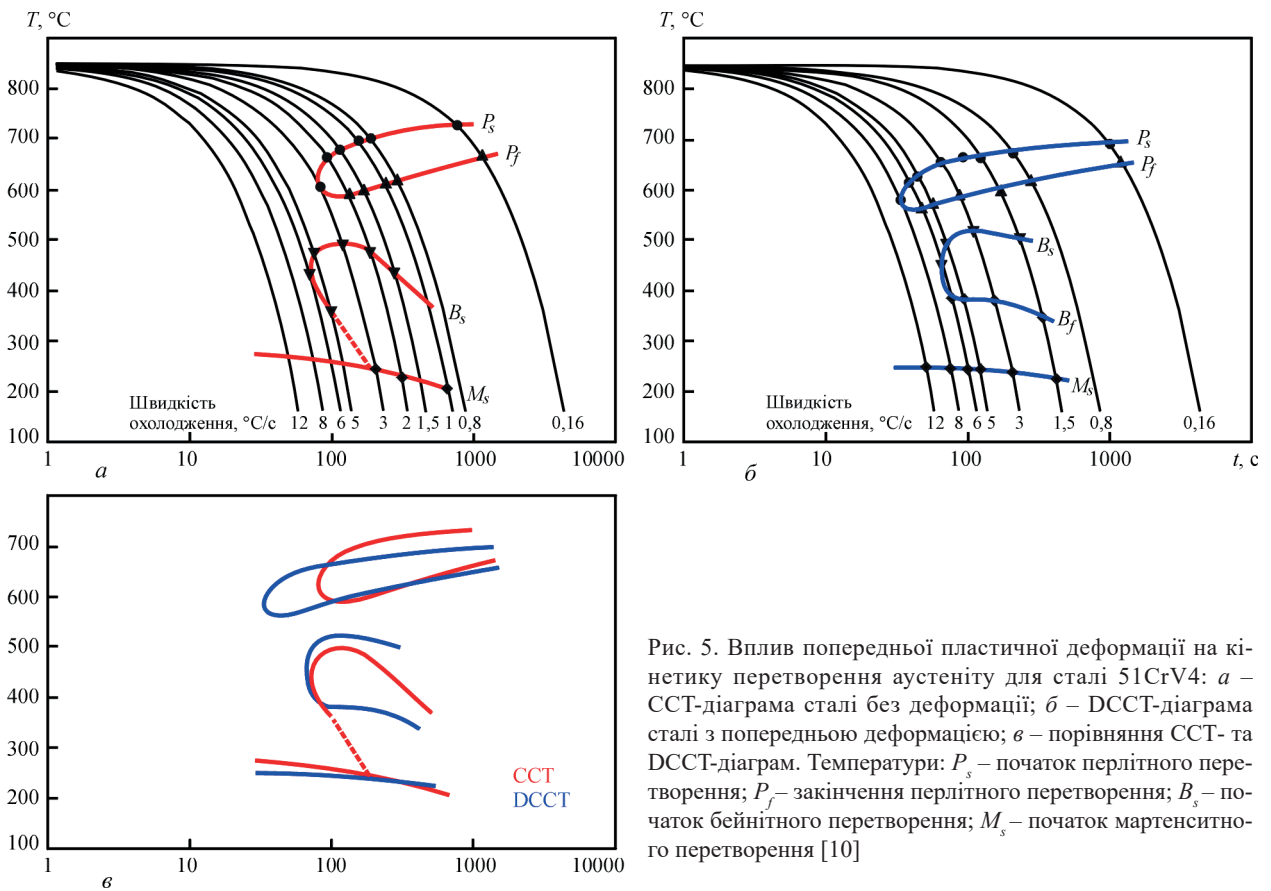


Рис. 5. Вплив попередньої пластичної деформації на кінетику перетворення аустеніту для сталі 51CrV4: *a* – CCT-діаграма сталі без деформації; *б* – DCCT-діаграма сталі з попередньою деформацією; *в* – порівняння CCT- та DCCT-діаграм. Температури: P_s – початок перлітного перетворення; P_f – закінчення перлітного перетворення; B_s – початок бейнітного перетворення; M_s – початок мартенситного перетворення [10]

вих бейнітних сталей. Метою роботи було оцінити, як змінюється структура та твердість залежно від складу, температури охолодження та деформації. Було досліджено три сталі з однаковим вмістом вуглецю (~ 0,033 %), марганцю (~ 0,9...1 %) і ніобію (~ 0,06 %), але з різною концентрацією хрому: 3,97 % (А), 2,52 % (В) і 1,02 % (С) (рис. 6). Усі зразки нагрівали до температури 1100 °C зі швидкістю 10 °C/c і витримували 3 хв. Для побудови CCT-діаграм зразки після витримки охолоджували до кімнатної температури з різними швидкостями охолодження, що варіювалися від 2 до 80 °C/c. Для побудови DCCT-діаграм після витримки зразки охолоджували зі швидкістю 2 °C/c до температури 880 °C. При цій температурі зразки витримували протягом 15 с, а потім до них застосовували стискаючу деформацію із загальною деформацією 0,6 та швидкістю деформації 1 с⁻¹. Після деформації зразки витримували ще 20 с і потім охолоджували до кімнатної температури з різними швидкостями охолодження в діапазоні від 2 до 80 °C/c.

Слід зазначити, що деформаційний вплив призводить до зниження температур початку перетворення аустеніту та зміщення появи феритної фази до вищих швидкостей охолодження (рис. 6). Підвищення вмісту хрому покращує схильність до гартування, знижує температури фазових перетворень, збільшує частку бейніту та зменшує

чутливість структури до деформації. Натомість при низькому вмісті Cr деформація стимулює феритоутворення та істотно змінює кінетику перетворень. Автори вказують, що для формування повністю бейнітної структури необхідно уникати фериту й перліту, чого можна досягти при вмісті Cr у межах 2,5...4 % і швидкості охолодження понад 20 °C/c (рис. 6).

Урахування деформаційного впливу на характер структурно-фазових перетворень має безпосереднє значення при зварюванні. Так, термічні деформації, що виникають при зварюванні в залежності від конструктивних особливостей зварювального виробу, можуть впливати на термікінетику перетворення аустеніту.

Наприклад, у [12] представлено новий підхід до аналізу схильності матеріалів до утворення залишкових напружень у зоні термічного впливу зварного з'єднання – так звані «діаграми зварювальних термічних напружень» (WTSD, Welding Thermal Stress Diagrams). На відміну від класичних CCT-діаграм, які описують фазові перетворення без урахування механічних обмежень, WTSD-діаграми дозволяють прямо оцінити, як реальні зварювальні температурні цикли впливають на розвиток напружень у металі.

Для аналізу було обрано високоміцну низьколеговану сталь ферито-бейнітного класу (C – 0,12 %; Si – 0,07 %; Mn – 1,73 %; P – 0,023 %;

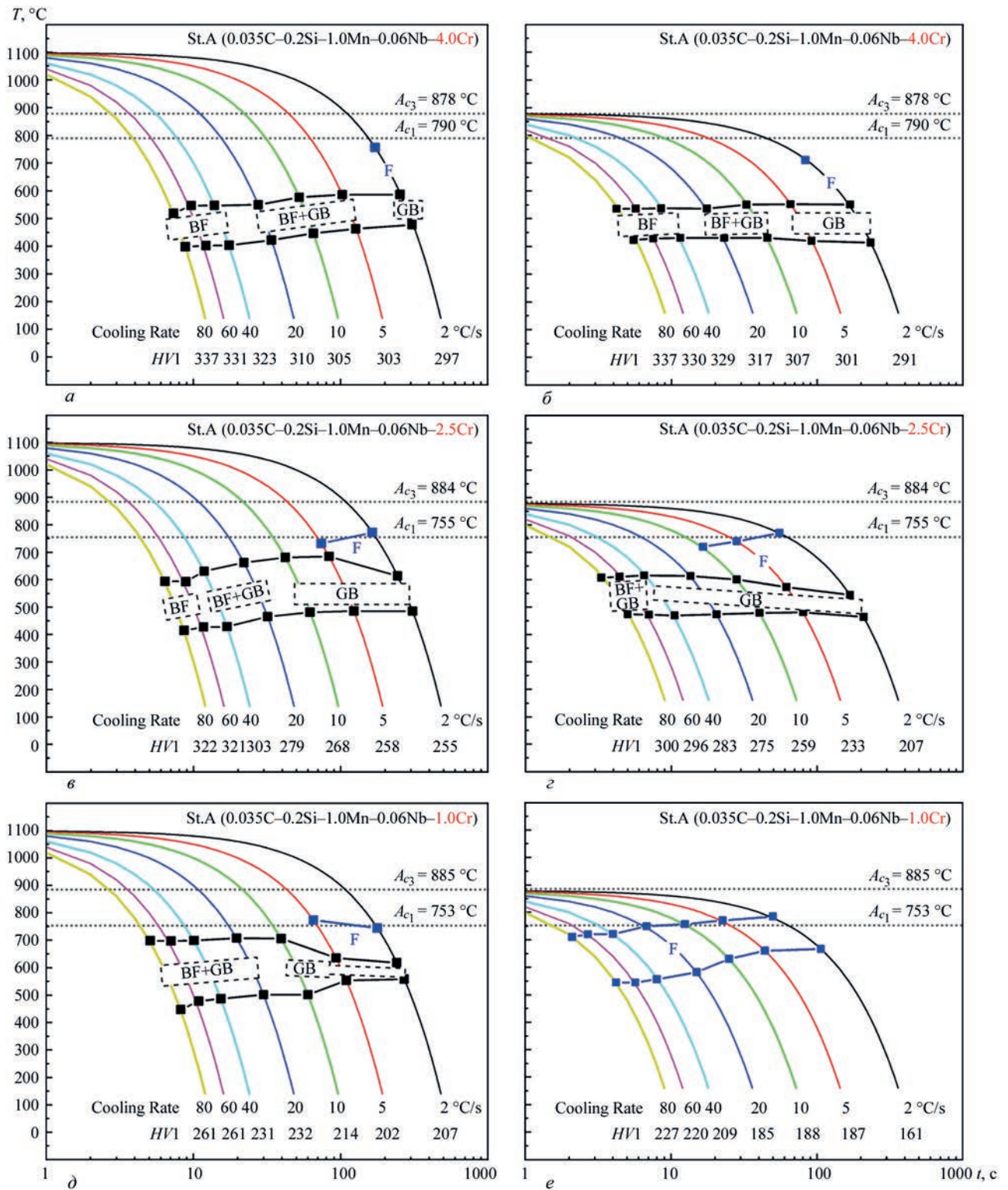


Рис. 6. Вплив вмісту хрому та попередньої пластичної деформації на кінетику перетворення аустеніту низьковуглецевих бейнітних сталей з різним вмістом хрому 3,97 % (A), 2,52 % (B) і 1,02 % (C): *a, в, д* – CCT-діаграми; *б, з, е* – DCCT-діаграми сталей. Мікроструктури: BF – бейнітний ферит; GB – гранулярний бейніт; F – ферит [11]

S – 0,003 %; Al – 0,042 %). Зразки фіксувались у жорстких захватах термомеханічного симулятора Gleeble 3550-GTC, що дозволяло повністю блокувати подовження зразка під час нагріву та охолодження. Таким чином забезпечувалось виникнення внутрішніх напружень, подібних до тих, що формуються в реальних зварних з'єднаннях.

У роботі було проведено моделювання різних зон термічного впливу, які відрізнялись максимальною температурою нагрівання: 1350 °C для зони крупного зерна CGHAZ (Coarse-Grained Heat-Affected Zone), 1100 °C для зони дрібного зерна FGHAZ (Fine-Grained HAZ), 900 °C для міжкритичної ICHAZ (Intercritical HAZ) та 700 °C для

субкритичної зони SCHAZ (Subcritical HAZ). Після досягнення максимальної температури нагріву відбувалось охолодження з різними швидкостями охолодження, які складали від 10 до 100 °C/c (в інтервалі 800...500 °C). Слід зазначити, що автори роботи для моделювання охолодження використовували не постійні швидкості охолодження, а температурні цикли на основі модифікованих рівнянь Розенталя [13] – аналітичних рішень для температурних полів під час зварювання, які враховують швидкість руху теплового джерела, теплопровідність матеріалу та інші параметри. У ході експерименту реєструвалися реактивні зусилля, тобто сила, яка розвивалась у відповідь на теплове розширення та стиснення зразка. За цими показниками визначались величини механічних напружень (термічних і залишкових), які будувались як функція температури. Це дозволяло отримати діаграми типу σ - T (напруження – температура) для кожного режиму (рис. 7).

При аналізі результатів виявлено (рис. 7), що максимальні залишкові напруження не завжди виникають при найвищих або найнижчих швидкостях охолодження, як це прийнято вважати. Наприклад, у зоні CGHAZ максимальні напруження були зафіксовані при середній швидкості охолодження 50 °C/c. Причиною цього є складна взаємодія між фазовими перетвореннями (особливо формуванням мартенситу) та обмеження теплового розширення.

У висновку автори стверджують, що WTSD – це дієвий інструмент для оцінки та моделювання залишкових напружень у зварних з'єднаннях, особливо при використанні сучасних сталей, чутливих до тріщиноутворення. Цей метод може також бути використаний для калібрування чисельних моделей напружень і механічних властивостей металу після зварювання.

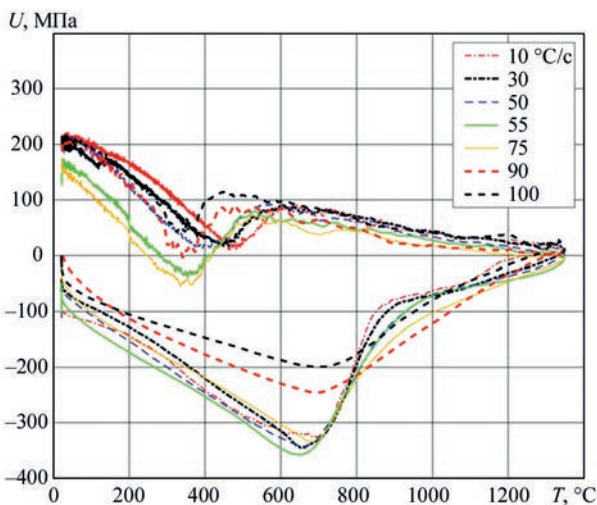


Рис. 7. WTSD діаграма для високоміцної низьколегованої сталі [12]

У реальних умовах процесу зварювання охолодження металу відбувається зі змінною швидкістю, яка залежить від тепловідведення, геометрії з'єднання, режиму зварювання та інших факторів. Лінійні режими не відображають цих особливостей, тому не дозволяють адекватно моделювати структурні перетворення в ЗТВ. Використання наближених до реальних нелінійних циклів забезпечує вищу достовірність результатів і дозволяє точніше відтворити умови формування мікроструктури у зварному з'єднанні.

Так, у [14] використання нелінійних термічних циклів для побудови ТКД обґрунтовується наявністю невідповідності та похибками діаграм, побудованих із використанням постійних швидкостей охолодження, та прагненням наблизити фізичне моделювання до реальних умов зварювання. У роботі представлено результати фізичного моделювання структури та фазових перетворень у зоні крупного зерна термічного впливу (CGHAZ) конструкційної сталі 700MC (C – 0,065 %; Mn – 1,82 %; Al – 0,025 %; Cu – 0,0115 %; Cr – 0,025 %; Ni – 0,037 %; V – 0,014 %; Nb – 0,053 %; Ti – 0,102 %) (рис. 8).

Модулювання виконувались на установці Gleeble 3800. Для моделювання CGHAZ обрано пікову температуру 1300 °C, що відповідає температурному полю поблизу зварного шва. Швидкість нагріву становила 100 °C/c, витримка при максимальній температурі 1 с. Було реалізовано 13 варіантів охолодження зі швидкістю від 1,25 до 100 °C/c. Цикли охолодження були нелінійними, з використанням моделі Рикаліна [15]. Ця модель також є аналітичною схемою теплопередачі, яка враховує розподіл температур у масивних зварних деталях з урахуванням геометрії, теплопровідності

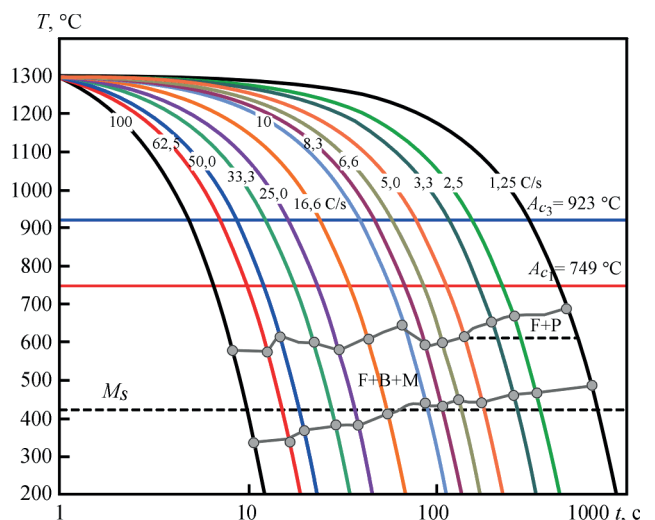


Рис. 8. CCT-діаграма для сталі 700MC. Мікроструктури: F – ферит; B – бейніт; P – перліт; M – мартенсит; M_s – початок мартенситного перетворення [14]

та щільності матеріалу. Її застосування обґрунтоване потребою точно імітувати неоднорідні теплові умови в товстостінних зварних конструкціях, де лінійні моделі дають суттєві похибки. Автори дійшли висновку, що точне фізичне моделювання CGHAZ з використанням нелінійних теплових циклів дозволяє обґрунтовано будувати ССТ-діаграми, специфічні саме для зварювання. Зокрема при оптимізації режимів зварювання для сталі 700МС варто уникати швидкостей охолодження понад 25 °С/с, щоб запобігти надмірному мартенситоутворенню, яке супроводжується підвищенням твердості та зниженням в'язкості металу зони термічного впливу.

Основною метою [16] було вивчення впливу характеру охолодження на структурно-фазовий склад металу ЗТВ сталі 15Х2НМФА, що використовується в корпусах реакторів ВВЕР-1000 при дуговому наплавленні. Автори прагнули зіставити теоретичні уявлення, засновані на стандартних термокінетичних діаграмах, з реальними умовами формування структури в процесі зварювання/наплавлення. Оскільки реальний процес наплавлення вирізняється нелінійним охолодженням, що значно відрізняється від лінійних циклів, було проведено як фізичне моделювання, максимально наближене до умов зварювання/наплавлення, так і ряд експериментів з використанням лінійних циклів охолодження. Автори прагнули перевірити, як ці реальні умови вплинуть на формування кінцевої мікроструктури. Для побудови класичних термокінетичних діаграм зразки сталі 15Х2НМФА нагрівалися до 1000 °С, витримувалися при цій температурі 170 хв, а потім охолоджувалися з різними постійними швидкостями (1, 3, 5 і 7 °С/с).

При моделюванні циклів, наближених до реальних умов зварювання, було проведено дві серії дослідів, у яких зразки нагрівалися до 1000 чи до 1350 °С. Потім зразки охолоджувалися зі швидкостями 3, 4 та 5 °С у діапазоні 800...500 °С для обох серій. Усі експериментальні роботи проводили на Gleeble 3800.

Ключовою відмінністю реальних циклів наплавлення від лінійних (для побудови ССТ-діаграм) є вкрай короткий час перебування металу при температурі аустенітизації (~ 1 с). При короткій витримці та подальшому охолодженні в умовах, наближених до наплавлення, у металі може утворюватися повністю мартенситна структура, тоді як при лінійному охолодженні при аналогічних швидкостях охолодження формується бейнітно-мартенситна структура.

Зміна максимальної температури нагріву (1000 проти 1350 °С) практично не впливала на кінетику утворення мартенситної фази та незначно впливала на температури початку/закінчення фазоутворення. Однак ця зміна впливала на максимальну частку фаз у кінцевій мікроструктурі, що вказує на важливість урахування пікової температури циклу.

Автори роботи переконливо показали, що характер охолодження – зокрема нелінійність і вкрай короткий час перебування при температурі аустенітизації – має вирішальне значення для формування структурно-фазового складу в ЗТВ сталі 15Х2НМФА. Використання стандартних ССТ-діаграм, побудованих на основі лінійних циклів охолодження з тривалою витримкою, не дозволяє адекватно прогнозувати мікроструктуру в умовах реального зварювального процесу. Для точного прогнозування необхідно застосовувати експериментально побудовані ССТ-діаграми, отримані в умовах, максимально наближених до фактичних термічних циклів наплавлення, враховуючи специфіку їх нелінійності та короткого часу аустенітизації.

Висновки

1. Термокінетичні діаграми (ССТ) є важливим інструментом для прогнозування структури у зоні термічного впливу зварних з'єднань. Їх побудова базується на дилатометричних експериментах з постійною швидкістю охолодження. Однак такий підхід лише частково відповідає реальним умовам зварювання.

2. Деформаційні термокінетичні діаграми (DCСТ) дозволяють враховувати вплив пластичної деформації, яка може істотно змінювати кінетику фазових перетворень, зокрема прискорювати формування перліту та бейніту, а також знижувати температуру мартенситного перетворення.

3. Урахування складних температурно-механічних впливів (залишкові напруження, реальні температурні градієнти тощо) дозволяє точніше прогнозувати можливий рівень залишкових напружень у залежності від швидкості охолодження матеріалу.

4. Нелінійні термічні цикли, які моделюють реальне охолодження під час зварювання, забезпечують точнішу відповідність фазових перетворень фактичним умовам зварювання. Їх використання дозволяє будувати більш релевантні діаграми та уникати похибок, притаманних лінійним моделям.

5. Фізичне моделювання на установках Gleeble залишається ключовим методом дослідження термічної поведінки сталей при зварюванні за умови правильної постановки експерименту

з урахуванням як температурних, так і деформаційних параметрів.

Список літератури/References

- Atkins, M. (1980) *Atlas of continuous cooling transformation diagrams for engineering steels*. Rev. U.S. ed. Metals Park, Ohio: ASM International (American Society for Metals).
- Seyffarth, P., Meyer, B., Scharff, A. (1992) *Großer atlas schweiß-ZTU-Schaubilder*. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik, DVS-Verl.
- Zhang, Z., Farrar, R. A. (1995) *An atlas of continuous cooling transformation (CCT) diagrams applicable to low carbon low alloy weld metals*. London: The Institute of Materials.
- Костін В.А., Жуков В.В. (2021) Удосконалення методики аналізу термкінетичних діаграм фазових перетворень металу зварних швів високоміцних низьколегованих сталей. *Сучасна електрометалургія*, 2, 40–46. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2021.02.06>
- Kostin, V.A., Zhukov, V.V. (2021) Improvement of the procedure of analysis of thermokinetic diagrams of phase transformations in metal of high-strength low-alloy steel welds. *Suchasna Elektrometalurhiya*, 2, 40–46 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/sem2021.02.06>
- ASTM A1033-18 (2023). *Standard practice for quantitative measurement and reporting of hypoeutectoid carbon and low-alloy steel phase transformations*. ASTM International, 2018, reapproved 2023. DOI: <https://doi.org/10.1520/A1033-18R23>
- Li, H., Liang, J.-L., Feng, Y.-L., Huo, D.-X. (2014) Microstructure transformation of X70 pipeline steel welding heat-affected zone. *Rare Metals*, 33(4), 493–498. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12598-014-0344-x>
- Vimalan, G., Muthupandi, V., Ravichandran, G. (2018) Construction of continuous cooling transformation (CCT) diagram using Gleeble for coarse grained heat affected zone of SA106 grade B steel. *AIP Conference Proceedings*, 1966, 020013. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5038692>
- Zheng, S., Wu, Q., Huang, Q., Liu, S., Han, Y. (2011) Influence of different cooling rates on the microstructure of the HAZ and welding CCT diagram of CLAM steel. *Fusion Engineering and Design*, 86, 2616–2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2011.02.072>
- Wu, Q.-s., Zheng, S.-h., Huang, Q.-y., Liu, S.-j., Han, Y.-y. (2013) Continuous cooling transformation behaviors of CLAM steel. *J. of Nuclear Materials*, 442, S67–S70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.03.072>
- Kawulok, R., Schindler, I., Kawulok, P., Rusz, S., Opéla, P., Malis, M., Vašek, Z., Subíková, M., Váňová, P. (2015) Effect of plastic deformation on CCT diagram of spring steel 51CrV4. *METAL 2015, Conference Proceedings*, 345–350.
- Ali, M., Kajjalainen, A., Hannula, J., Porter, D., Kömi, J. (2020) Influence of chromium content and prior deformation on the continuous cooling transformation diagram of low-carbon bainitic steels. *Key Engineering Materials*, 835, 58–67. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.835.58>
- Mishchenko, A., Scotti, A. (2021) Welding thermal stress diagrams as a means of assessing material proneness to residual stresses. *J. of Materials Sci.*, 56, 1694–1712. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05294-y>
- Rosenthal, D. (1946) The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments. *Transact. of the American Society of Mechanical Engineers*, 68(8), 849–866. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4018624>
- Roshan, R., Naik, A.K., Saxena, K.K., Msomi, V. (2022) Physical simulation on joining of 700MC steel: A HAZ and CCT curve study. *Materials Research Express*, 9(4), 046522. DOI: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac6792>
- Rykalin, N.N. (1960) Calculation of heat processes in welding. In: *42nd Annual Meeting of the American Welding Society*, 64.
- Lobanov, L.M., Kostin, V.A., Makhnenko, O.V., Zhukov, V.V., Kostenevich, E.S. (2020) Forecasting of structural transformations in HAZ steel of 15Kh2NMFA at anti-corrosion cladding. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2(126), 89–96. DOI: <http://dx.doi.org/10.46813/2020-126-089>

MODERN APPROACHES TO OBTAINING THERMOKINETIC TRANSFORMATION DIAGRAMS FOR WELDING AND RELATED TECHNOLOGIES (Review)

V.V. Zhukov, V.A. Kostin, S.G. Grigorenko, R.S. Gubatyuk

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

E-mail: zhukov.kyiv@gmail.com

The article presents a review of modern approaches to constructing CCT-diagrams and special diagrams formed on the basis of the results of a dilatometric experiment for the analysis of structural-phase transformations in steels during cooling. The methodology of physical modeling of thermal cycles on Gleeble installations, as well as typical heating and cooling parameters, is considered. Special attention is paid to the influence of the cooling rate on the formation of the microstructure in the heat-affected zone of welded joints. Approaches using constant and variable (nonlinear) cooling modes are compared with an emphasis on their compliance with the real welding conditions. The advantages of nonlinear thermal cycles for increasing the reliability of modeling and correctness of constructing the CCT-diagrams when assessing the weldability of steels are substantiated. 16 Ref., 8 Fig.

Keywords: physical modeling, phase transformations, microstructure, austenite, martensite, CCT and DCCT diagrams, Gleeble, welded joints

Отримано 09.06.2025

Отримано у переглянутому вигляді 27.11.2025

Прийнято 15.01.2025

З АВТОМАТИЧНЕ ЗВАРЮВАННЯ

ТОВ «ВИДАВНИЧИЙ ДІМ «ПАТОН»

03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11

тел./факс: (38044) 205-23-90, E-mail: journal@paton.kiev.ua

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as>

ПІДПИШИТЬСЯ СЬОГОДНІ

Передплата доступна

у друкованому

та цифровому форматах!



ЗАЛИШКОВІ ЗВАРЮВАЛЬНІ НАПРУЖЕННЯ В СПЛАВІ АМГ6 ПІСЛЯ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНОЇ ОБРОБКИ В УМОВАХ ПОПЕРЕДНЬОГО ПРУЖНОГО РОЗТЯГУ

Л.М. Лобанов¹, В.В. Лисак¹, О.Л. Міходуй¹, О.М. Тимошенко¹, М.О. Пашин¹, І.П. Кондратенко²,
В.В. Чопик², О.М. Карлов²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: svarka2000@ukr.net

²Інститут електродинаміки НАН України. 03057, м. Київ, Берестейський пр., 56.

Запропоновано концепцію регулювання залишкових напружено-деформованих станів зварних з'єднань, яка базується на сумісному застосуванні електродинамічної обробки (ЕДО) металу шва, який є попередньо навантаженим пружним розтягом (ППР). Показано, що застосування ЕДО створює передумови для зменшення металоємності та жорсткості оснащення для ППР. Доведено, що сумісне застосування методів ППР і ЕДО може сприяти синергії механізмів зменшення залишкових зварювальних напружень, яка базується на ефекті електропластичності, що реалізується в умовах попереднього пружного деформування зварного з'єднання. Встановлено, що використання ЕДО зварних з'єднань зі сплавом АМГ6, які знаходяться в умовах ППР, дозволяє застосовувати на 50 % менший рівень навантаження $\sigma_{\text{ппр}}$, для зниження залишкових зварювальних напружень розтягу, ніж за відсутності ЕДО. Доведено, що ППР зварного з'єднання при $\sigma_{\text{ппр}} = 90$ МПа та сумісне застосування ЕДО і ППР (при аналогічному значенні $\sigma_{\text{ппр}}$) відповідно сприяють зниженню залишкових зварювальних напружень розтягу в сплаві АМГ6 на 20 і 85 % відповідно. Застосування ЕДО створює передумови для зменшення металоємності та жорсткості оснащення для ППР і сприятиме розвитку методів регулювання залишкових напружених станів зварних з'єднань на базі їхнього попереднього навантаження. Бібліогр. 14, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: імпульс струму, зварні конструкції, залишкові напруження, зварне з'єднання, електропластичний ефект, попередній пружний розтяг, пластична деформація, алюмінієвий сплав, електродинамічна обробка, зменшення напружень

Вступ. Актуальність і мета роботи. Необхідність регулювання залишкових напружень зварних з'єднань, які негативно впливають на їхню довговічність, точність і корозійну стійкість, є однією з актуальних проблем інженерної практики. При виготовленні нових типів зварних конструкцій традиційні методи забезпечення їхніх оптимальних напружено-деформованих станів (НДС) не завжди можливо застосувати.

Традиційні методи регулювання НДС можна розділити на термічні та механічні, які використовуються як у процесі, так і після зварювання конструкцій [1]. У сучасних умовах виробництва застосування термічних методів регулювання НДС, з урахуванням витрат на енергоносії, істотно підвищує собівартість виготовлення металоконструкцій. Особливо це стосується великогабаритних металовмісних [2] конструкцій, а також виробів із легких сплавів з високою теплопровідністю.

Силові методи засновані на прикладанні до конструкції на різних етапах її виготовлення механічних навантажень, що компенсують її залишковий НДС від зварювання. Зворотний вигин є ефективним способом мінімізації зварювальних

деформацій у виробах з відносно невеликою згинальною жорсткістю, наприклад під час вварювання фланців у тонкостінні оболонкові конструкції [3]. Це вимагає ускладнення технології зварювання, але в низці випадків є раціональнішим рішенням, ніж корегування НДС конструкції після її зварювання. При цьому застосування вигину доцільне лише при багатосерійному виробництві через високу вартість збирального оснащення.

Зварювання з попереднім пружним розтягом (ППР) деталей – метод оптимізації НДС тонколистових конструкцій, який був застосований під час виробництва великогабаритних стрингерних панелей із легких сплавів [4]. Застосування ППР забезпечує зменшення залишкових зварювальних пластичних деформацій стиску. Недоліком методу є значна металоємність оснащення для навантаження елементів конструкцій, що зварюються.

Перспективним підходом, що вирізняється простотою застосування, малим енергоспоживанням і не вимагає металомісткого устаткування, є вдосконалення та розробка імпульсних методів, що базуються на ударно-хвильових впливах на конструкцію в процесі (або після) її зварювання. Так,

Лобанов Л.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9296-2335>, Лисак В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-6565-2793>,
Міходуй О.Л. – <https://orcid.org/0000-0001-6660-7540>, Тимошенко О.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9163-1067>,
Пашин М.О. – <https://orcid.org/0000-0002-2201-5137>, Кондратенко І.П. – <https://orcid.org/0000-0003-1914-1383>,
Чопик В.В. – <https://orcid.org/0000-0002-5046-5223>, Карлов О.М. – <https://orcid.org/0000-0002-1350-1870>

© Л.М. Лобанов, В.В. Лисак, О.Л. Міходуй, О.М. Тимошенко, М.О. Пашин, І.П. Кондратенко, В.В. Чопик, О.М. Карлов, 2025

традиційний метод проковування зварних швів знайшов свій розвиток у застосуванні ультразвукового ударного інструменту [5, 6], що вирізняється широкими можливостями для керування, але здійснює тільки поверхневий вплив на метал, який обробляється.

Результати попередніх досліджень дали змогу встановити явище підвищення пластичності та зниження спротиву металу деформуванню завдяки одночасній дії активного механічного навантаження та імпульсного електричного струму (ІЕС) густиною $j \geq 1$ кА/мм². Явище було названо електропластичним ефектом (ЕПЕ) [7], а його практичне використання було реалізовано в методі електродинамічної обробки (ЕДО) зварних з'єднань. Застосування ЕДО відкрило нові можливості оптимізації НДС і підвищення точності виготовлення зварних конструкцій [8]. Особливість дії ЕПЕ відрізняється від відомого теплового ефекту при дії ІЕС (джоулевого розігріву) тим, що проявляється лише в деформованому металі, який перебуває під впливом механічних навантажень [9]. При цьому синергія сумісної дії ІЕС і динамічного (ударного) навантаження ініціює в металевих конструкціях перерозподіл залишкових напружень [8, 10].

У [11] досліджено механізм формування НДС за ЕДО в умовах одноісного розтягу плоских зразків сплаву АМгб системи Al–Mg. Доведено, що ЕДО зразків, які розтягнуті попереднім навантаженням $\sigma_{\text{поп}} \approx \sigma_{0,2}$ сплаву АМгб, забезпечує більшу релаксацію напружень розтягу $\Delta\sigma_{\text{поп}}$ у порівнянні з варіантами $\sigma_{\text{поп}} < \sigma_{0,2}$ або $\sigma_{\text{поп}} > \sigma_{0,2}$. Результати [12] показали, що за ЕДО в умовах ППР зразків зварних з'єднань сталі Ст3 їхнє локальне пластичне деформування починалася в пружній області навантаження металу, що візуально було підтверджено формуванням картин смуг Чернова-Людерса. Досліджували вплив ІЕС на пластичність титанових сплавів при випробуванні плоских зразків на розтяг за різного ступеня відносної деформації. Показано, що дія ІЕС у процесі навантаження сприяє підвищенню пластичності сплавів за рахунок синергії ЕПЕ та джоулевого розігріву [13].

З урахуванням результатів [11–13] слід зазначити доцільність застосування ЕДО до зварних з'єднань, що виконані в умовах ППР. Переваги поєднання методів (у порівнянні з їхнім окремим застосуванням) базуються на тому, що за силової схеми ППР до деталей перед зварюванням прикладають зовнішні зусилля, які викликають пружні напруження розтягу. Це, згідно з [11], забезпечує більшу величину зниження напружень за ЕДО у порівнянні з обробкою металу без навантаження.

Але застосування ППР не виключає утворення залишкових пластичних деформацій стиску $\epsilon_{\text{зв}}^{\text{пл}}$ при охолодженні металу зварного шва, хоча й зменшує їхній рівень. Це знижує можливості ППР забезпечити повне усунення залишкових зварювальних НДС розтягу.

Застосування ЕДО металу шва сприяє утворенню залишкових пластичних деформацій розтягу $\epsilon_{\text{ЕДО}}^{\text{пл}}$, наслідком взаємодії яких із $\epsilon_{\text{зв}}^{\text{пл}}$ стиску є зменшення останніх. Позитивним наслідком використання ЕДО є зниження зусилля ППР за рахунок формування $\epsilon_{\text{ЕДО}}^{\text{пл}}$, що дозволяє оптимізувати металоємність силового збирального оснащення. Таким чином, ЕДО зварних з'єднань, виконаних в умовах ППР, має забезпечити більшу ефективність впливу на залишкові НДС зварних конструкцій у порівнянні з використанням кожного з методів окремо.

Метою даної роботи є дослідження впливу ЕДО в умовах супутнього ППР зварних з'єднань зі сплавом АМгб на їх залишкові НДС.

Методика, матеріали та обладнання для досліджень. У якості предмету досліджень використовували зразки зварних з'єднань у вигляді пластин розміром 1100×400×2 мм зі сплаву АМгб, які були піддані ППР за різних значень пружного навантаження $\sigma_{\text{ппр}}$ у спеціалізованому збирально-силовому оснащенні. Схему ППР і геометричні характеристики зварного шва наведено на рис. 1, а. Після навантаження кожного зразка ППР, а також у подальших дослідженнях проводили реєстрацію зміни значення поздовжньої (вздовж шва) компоненти напружень σ_x розтягу на його зовнішній поверхні двома методами – із застосуванням механічного тензометра (на базі 100 мм) та електронної спекл-інтерферометрії із використанням лазерного інтерферометра (рис. 1, б) [14]. Похибка реєстрації значень напружень не перевищувала 10 %. Враховуючи малу товщину дослідних пластин і виключення їхніх вертикальних переміщень (за рахунок умов закріплення зразків в оснащенні), приймали допущення про рівність напружень σ_x на зворотній і зовнішній поверхнях пластин. На підготовлену під зварювання поверхню кожного пружно розтягнутого зразка до значення $\sigma_{\text{ппр}}$ методом ТІГ наплавляли (з повним проплавленням) валик із розмірами 200×8×2 мм із застосуванням присадного дроту. Наплавлений валик задавали близьким за геометричними характеристиками до зварних з'єднань зі сплавів на основі Al.

Зварювання ТІГ виконували із застосуванням джерела живлення ТІР-315 на режимі при значеннях напруги, струму та швидкості процесу відпо-

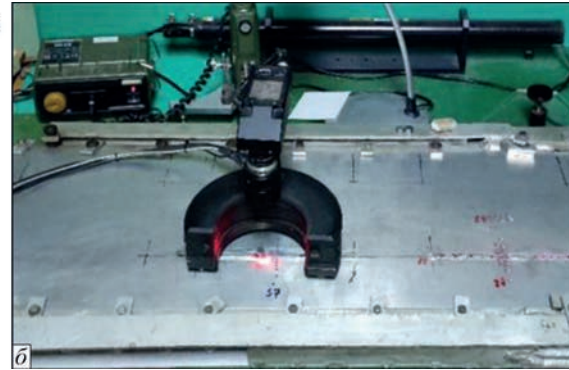
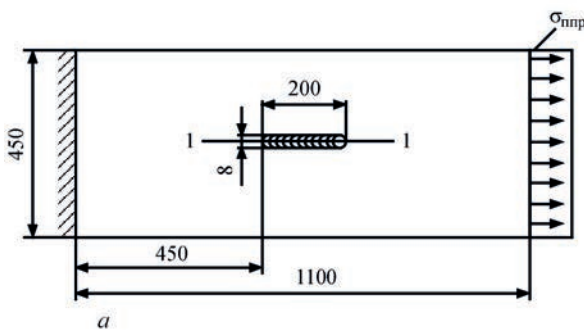


Рис. 1. Технологія поздовжнього пружного розтягу (ППР) зразків зварних з'єднань зі сплаву АМгб: а – схема ППР пластин, де 1-1 – лінія, вздовж якої проводили реєстрацію НДС пластини на етапах зварювання, навантаження, ЕДО та розвантаження, $\sigma_{\text{ппр}}$ – навантаження пружним розтягом; б – пластина зі зварним швом і встановленим інтерферометром, яка зафіксована в оснащенні в стані ППР

відно: $U_{\text{зв}} = 18 \text{ В}$, $I_{\text{зв}} = 110 \text{ А}$, $V_{\text{зв}} = 1,4 \text{ мм/с}$, матеріал присадки – дріт СвАМгб $\varnothing 1,6 \text{ мм}$. Після охолодження та контролю значень напружень σ_{TIG} після зварювання виконували ЕДО зафіксованого в оснащенні зразка. Обробку проводили за ручного тримання електродного пристрою із застосуванням джерела живлення «Іскра-1» у напрямку лінії вздовж центра шва та обох ліній сплавлення. Режим ЕДО: $U_i = 370 \text{ В}$, $U_p = 250 \text{ В}$, $I_i = 4240 \text{ А}$, $I_p = 1170 \text{ А}$, $V_{\text{ЕДО}} = 4 \text{ мм/с}$, де U_i , I_i та U_p , I_p – значення напруги, струму відповідно електроімпульсної (I) та ударної (P) складових електродинамічної дії, а $V_{\text{ЕДО}}$ – швидкість обробки. Після ЕДО проводили реєстрацію значень напружень $\sigma_{\text{ЕДО}}$ у розтягнутому зразку (рис. 1, а) та напружень $\sigma_{\text{розв}}$ – після його розвантаження. Також виконували ППР пластини з наступним наплавленням валика без застосування ЕДО.

Значення ППР пластин і характеристики поздовжньої компоненти НДС на різних етапах навантаження та ЕДО представлені у таблиці.

На першому етапі досліджень проводили ППР зразка до значення $\sigma_{\text{ппр}} = 45 \text{ МПа}$ ($0,3\sigma_{0,2}$ сплаву АМгб) з наступним наплавленням валика та його ЕДО (рядок 1 таблиці). На другому та третьому етапах виконували наплавлення після ППР зразків до значення $\sigma_{\text{ппр}} = 90 \text{ МПа}$ ($0,6\sigma_{0,2}$ сплаву АМгб) відповідно з наступною ЕДО (рядок 2 таблиці) та без обробки (рядок 3 таблиці).

Із результатів попередніх досліджень відомо, що пікове значення компоненти σ_x залишкових зварювальних напружень розтягу для сплаву АМгб становить 120 МПа . При цьому максимальна ефективність ППР досягається за значень $\sigma_{\text{ппр}} \approx 0,9\sigma_{0,2}$

Зміни НДС зразків зі сплаву АМгб $\delta = 2 \text{ мм}$ після ППР та ЕДО

№	$\sigma_{\text{ппр}}$, МПа	ЕДО, Так «+», Ні «-»	σ_{TIG} , МПа	$\sigma_{\text{ЕДО}}$, МПа	$\sigma_{\text{розв}}$, МПа	$\Delta\sigma_{\text{ЕДО}}^*$, МПа/%	$\Delta\sigma_{\text{ппр}}^*$, МПа/%	$\Delta\sigma_{\Sigma}^*$, МПа/%
1	45	+	110	90	75	-20*/18	-15/16	-35/32
2	90	+	155	75	25	-80/52	-50/65	-130/ 85
3	90	-	150	-	120	-	-30/20	-30/20

*Примітки: 1. $\Delta\sigma_{\text{ЕДО}} = \sigma_{\text{ЕДО}} - \sigma_{\text{TIG}}$, $\Delta\sigma_{\text{ппр}} = \sigma_{\text{розв}} - \sigma_{\text{ЕДО}}$, $\Delta\sigma_{\Sigma} = \Delta\sigma_{\text{ЕДО}} + \Delta\sigma_{\text{ппр}}$. 2. Знак «-» свідчить про зниження напружень відносно попередніх значень.

сплаву АМгб [1, 2, 4]. Але в даній роботі не застосували ППР зразків за значень $\sigma_{\text{ппр}} > 0,6\sigma_{0,2}$ сплаву АМгб, оскільки це вимагало б суттєвого збільшення жорсткості, а, відповідно, й металоємності оснащення для розтягу. Це протирічить меті даної роботи, яка полягає у доведенні можливості зменшення металоємності оснащення для ППР за рахунок застосування ЕДО.

Обговорення результатів експериментів.

Розподіл поздовжньої компоненти σ_x напружень по лінії вздовж центра шва на етапах навантаження-розвантаження та ЕДО дослідних зразків представлені на рис. 2-4. Із даних таблиці при порівнянні стовпців 2 і 4 для всіх варіантів навантаження зразків (рядки 1-3) можна бачити, що в загальному випадку наплавлення валика сприяє підвищенню напружень розтягу в шві на $60...65 \text{ МПа}$ за рахунок усадкового скорочення металу шва при охолодженні.

ЕДО зразка в стані розтягу за значення $\sigma_{\text{ппр}} = 45 \text{ МПа}$ (рядок 1 таблиці) сприяє зниженню напружень на 18% – із $\sigma_{\text{TIG}} = 110 \text{ МПа}$ до $\sigma_{\text{ЕДО}} = 90 \text{ МПа}$ (рис. 2). Це підтверджує отримані раніше результати [11] стосовно регулювання напружень зразків сплаву АМгб при ЕДО. Подальше повне розвантаження зразка внаслідок зняття ППР знижує напруження ще на 16% – з $\sigma_{\text{ЕДО}} = 90 \text{ МПа}$ до $\sigma_{\text{розв}} = 75 \text{ МПа}$. Таким чином, ефективність застосування ППР при $\sigma_{\text{ппр}} = 0,3\sigma_{0,2}$ сплаву АМгб близька до впливу ЕДО на релаксацію залишкових зварювальних напружень σ_{TIG} розтягу. Сумісний вплив ППР і ЕДО знижує σ_{TIG} на 32% , тобто $\Delta\sigma_{\Sigma} = 35 \text{ МПа}$ (рядок 1 таблиці).

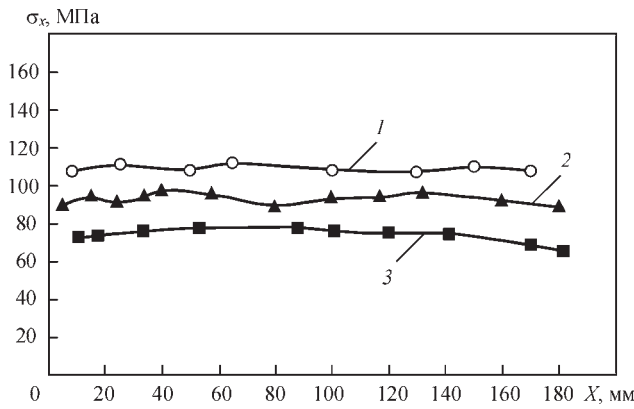


Рис. 2. Розподіл поздовжньої компоненти σ_x напружень по лінії вздовж центра шва на етапах навантаження–розвантаження та ЕДО зразка при дії ППР із $\sigma_{\text{ппр}} = 45$ МПа (рядок 1 таблиці), де: крива 1 – σ_{TIG} після ППР і наплавлення ТІГ, 2 – $\sigma_{\text{ЕДО}}$ після ЕДО, 3 – $\sigma_{\text{розв}}$ після розвантаження

Напружений стан зразка при зростанні $\sigma_{\text{ппр}}$ до 90 МПа (рядок 2) наведено на рис. 3. ЕДО зразка в стані розтягу сприяє зниженню напружень на 52 % – з $\sigma_{\text{TIG}} = 155$ МПа до $\sigma_{\text{ЕДО}} = 75$ МПа, що підтверджує результати [11]. Подальше повне розвантаження зразка (зняття ППР) знижує напруження ще на 65 % – з $\sigma_{\text{ЕДО}} = 75$ МПа до $\sigma_{\text{розв}} = 25$ МПа. Слід зазначити, що значення відносної (γ %) ефективності ЕДО і ППР (стовпці 7 і 8 у рядку 2 таблиці) є близькими та складають 52 і 65 % відповідно. Але їхні абсолютні значення відрізняються й мають значення 80 МПа (ЕДО) і 50 МПа (ППР). Таким чином, ЕДО має більший вплив на зниження зварювальних напружень, ніж ППР. Сумісний вплив ППР і ЕДО – $\Delta\sigma_x$ при $\sigma_{\text{ппр}} = 90$ МПа знижує σ_{TIG} на 85 % – на 130 МПа (рядок 2 таблиці).

Напружений стан зразка при ППР до значення $\sigma_{\text{ппр}} = 90$ МПа без застосування ЕДО (рядок 3) наведено на рис. 4. Повне розвантаження пластини (зняття ППР) знижує напруження σ_{TIG} на 20 % – з 150 МПа до $\sigma_{\text{розв}} = 120$ МПа. У цьому випадку (виключення ЕДО) значення $\Delta\sigma_{\text{ппр}} = \Delta\sigma_x$ і воно є сут-

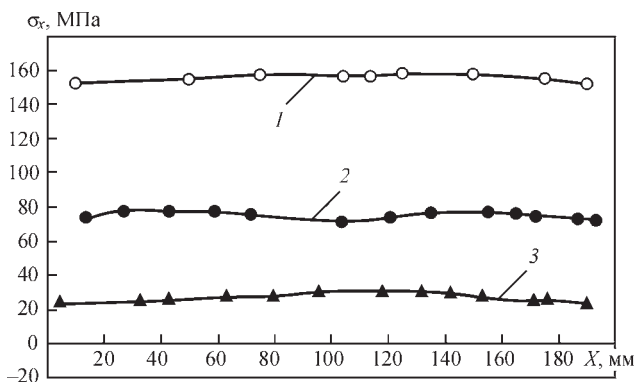


Рис. 3. Розподіл поздовжньої компоненти σ_x напружень по лінії вздовж центра шва на етапах навантаження–розвантаження та ЕДО зразка при дії ППР із $\sigma_{\text{ппр}} = 90$ МПа (рядок 2 таблиці), де: крива 1 – σ_{TIG} після ППР і наплавлення ТІГ, 2 – $\sigma_{\text{ЕДО}}$ після ЕДО, 3 – $\sigma_{\text{розв}}$ після розвантаження

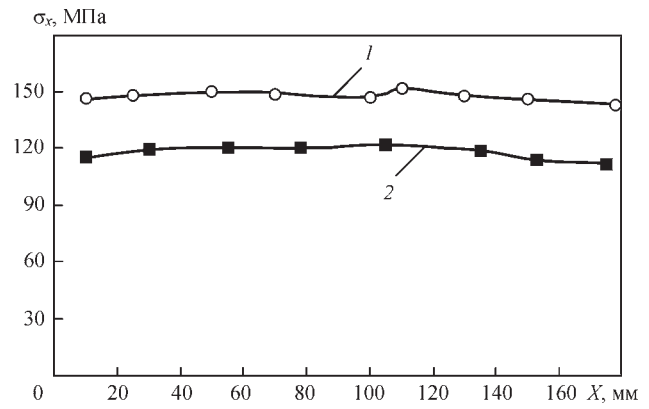


Рис. 4. Розподіл поздовжньої компоненти σ_x напружень по лінії вздовж центра шва на етапах навантаження–розвантаження зразка при дії ППР без застосування ЕДО з $\sigma_{\text{ппр}} = 90$ МПа (рядок 3 таблиці), де: крива 1 – σ_{TIG} після ППР і наплавлення ТІГ, 2 – $\sigma_{\text{розв}}$ після розвантаження

тево меншим у порівнянні з отриманими за аналогічних умов ППР зразка з використанням ЕДО (рядок 2 таблиці). Так, застосування ЕДО та його виключення у $\sigma_{\text{ппр}} = 90$ МПа за близьких значеннях σ_{TIG} , наведених у рядках 2 і 3 (стовпчик 4 таблиці), забезпечує зниження залишкових зварювальних напружень σ_{TIG} на 85 і 20 % від початкового рівня відповідно. Отримані результати можна пояснити тим фактом, що ЕДО (при реалізації ефекту електропластичності) трансформує частку пружної складової напружено-деформованого стану металу зварного шва у пластичні деформації розтягу, наслідком чого є додаткове зниження напружень σ_{TIG} .

Як було показано вище з посиланням на результати попередніх досліджень, напрямком зростання $\Delta\sigma_{\text{ппр}}$ може бути застосування ППР при значеннях $\sigma_{\text{ппр}}$, що є близькими до $\sigma_{0,2}$ сплаву АМг6 [4]. Але даний підхід потребує суттєвого зростання металоємності оснащення ППР і виходить за рамки даної роботи.

При порівнянні даних таблиці можна бачити, що ППР зразка з наступною ЕДО (рядок 1) при $\sigma_{\text{ппр}} = 45$ МПа і ППР при $\sigma_{\text{ппр}} = 90$ МПа без ЕДО (рядок 3) забезпечують близькі абсолютні значення ефективності $\Delta\sigma_x$, які знаходяться в діапазоні 30...35 МПа (стовпчик 9).

Із наведених вище результатів можна зробити висновок, що використання ЕДО зварних з'єднань, що знаходяться в умовах ППР, дозволяє застосовувати менші значення $\sigma_{\text{ппр}}$ для зниження залишкових зварювальних напружень розтягу, ніж при ППР за відсутності ЕДО. Таким чином, застосування ЕДО створює передумови для зменшення металоємності та жорсткості оснащення для ППР і сприятиме розвитку методів регулювання залишкових напружених станів зварних

з'єднань із використанням їхнього попереднього навантаження.

Висновки

1. За результатами попередніх досліджень запропоновано концепцію регулювання залишкових напружено-деформованих станів зварних з'єднань, яка базується на сумісному застосуванні електродинамічної обробки металу шва, що є попередньо навантажений пружним розтягом. Показано, що застосування ЕДО створює передумови для зменшення металоємності та жорсткості оснащення для ППР.

2. Доведено, що сумісне застосування методів ППР і ЕДО може сприяти синергії механізмів зниження залишкових зварювальних напружень, що базується на ефекті електропластичності, який реалізується в умовах попереднього пружного деформування зварного з'єднання.

3. Встановлено, що застосування ЕДО зварних з'єднань зі сплаву АМг6, що знаходяться в умовах ППР, дозволяє застосовувати на 50 % менші значення навантаження розтягу $\sigma_{\text{нпр}}$ для зниження залишкових зварювальних напружень розтягу, ніж за відсутності ЕДО.

4. Доведено, що ППР зварного з'єднання при $\sigma_{\text{нпр}} = 90$ МПа та сумісне застосування ЕДО і ППР (при аналогічному значенні $\sigma_{\text{нпр}}$) сприяють зниженню залишкових зварювальних напружень у сплаві АМг6 на 20 і 85 % відповідно.

Список літератури

1. Недосека А.Я. (2001) *Основы расчета и диагностики сварных конструкций*. Киев, Издательство «ИНДПРОМ».
2. Винокуров В.А., Григорьянц А.Г. (1984) *Теория сварочных деформаций и напряжений*. Москва, Машиностроение.
3. Лобанов Л.М., Махненко В.И., Великоиваненко Е.А. и др. (1988) О параметрах предварительного упругого выгиба применительно к сферическим оболочкам. *Автоматическая сварка*, **9**, 1–4.
4. Патон Б.Е., Уткин В.Ф., Лобанов Л.М. и др. (1989) Изготовление сварных крупногабаритных тонкостенных панелей из высокопрочных алюминиевых сплавов. *Автоматическая сварка*, **10**, 10–18.
5. Кравцов Т.Г., Рыжков И.Ф., Статников Е.Ш. (1981) Повышение сопротивления усталости наплавленных валов ультразвуковой обработкой. *Автоматическая сварка*, **10**, 35–38.
6. Махненко В.И., Кравцов Т.Г. (1986) Толщина пластически деформированного слоя при ультразвуковой ударной обработке наплавленных изделий. *Автоматическая сварка*, **8**, 98–110.
7. Conrad, H., Sprecher, A. (1989) *The electroplastic effect in metals*. Elsevier Science Publishers B.V., Dislocations in Solids, Ed. by F.R.N. Nabarro, 500–529.
8. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Loginov, V.P., Poklyatsky, A.G. (2010) Effect of electric pulse treatment on residual change in shape of thin-sheet welded structures (Review). *The Paton Welding J.*, **3**, 10–13.
9. Стрижало В.А., Новогрудский Л.С., Воробьев Е.В. (2008) *Прочность материалов при криогенных температурах*

с учетом воздействия электромагнитных полей. Киев, ИПП.

10. Степанов Г.В., Бабуцкий А.И., Мамеев И.А. (2004) Нестационарное напряженно-деформированное состояние в длинном стержне, вызванное импульсом электрического тока высокой плотности. *Проблемы прочности*, **4**, 60–67.
11. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Mikhodui, O.L. (2012) Influence of the loading conditions on the deformation resistance of AMg6 alloy during electrodynamic treatment. *Strength of Materials*, **44**, 472–479. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-012-9401-6>
12. Lobanov, L.M., Makhnenko, V.I., Pashchin, N.A., Loginov, V.P. (2007) Features of formation of plastic deformations at electrodynamic treatment of welded joints of St3 steel. *The Paton Welding J.*, **10**, 7–11.
13. Семашко Н.А., Крупский Р.Ф., Купов А.В. и др. (2004) Акустическая эмиссия при электроимпульсной деформации титановых сплавов. *Материаловедение*, **7**, 29–33.
14. Касаткин Б.С., Прохоренко В.М., Чертов И.М. (1987) *Напряжения и деформации при сварке*. Киев, Вища школа. Головное изд-во.

References

1. Nedoseka, A.Ya. (2001) *Fundamentals of calculation and diagnostics of welded structures*. Kyiv, INDPROM [in Russian].
2. Vinokurov, V.A., Grigoryants, A.G. (1984) *Theory of welding stresses and strains*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
3. Lobanov, L.M., Makhnenko, V.I., Velikoivanenko, E.A. et al. (1988) About parameters of preliminary out-of-plane bending for spherical shells. *Avtomaticheskaya Svarka*, **9**, 1–4 [in Russian].
4. Paton, B.E., Utkin, V.F., Lobanov, L.M. et al. (1989) Manufacturing of large-sized thin-walled panels from aluminium alloys. *Avtomaticheskaya Svarka*, **10**, 10–18 [in Russian].
5. Kravtsov, T.G., Ryzhkov, I.F., Statnikov, E.Sh. (1981) Increase in fatigue resistance of surfaced shafts by ultrasonic treatment. *Avtomaticheskaya Svarka*, **10**, 35–38 [in Russian].
6. Makhnenko, V.I., Kravtsov, T.G. (1986) Thickness of plastically deformed layer in ultrasonic peening of surfaced products. *Avtomaticheskaya Svarka*, **8**, 98–110 [in Russian].
7. Conrad, H., Sprecher, A. (1989) *The electroplastic effect in metals*. Elsevier Science Publishers B.V., Dislocations in Solids, Ed. by F.R.N. Nabarro, 500–529.
8. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Loginov, V.P., Poklyatsky, A.G. (2010) Effect of electric pulse treatment on residual change in shape of thin-sheet welded structures (Review). *The Paton Welding J.*, **3**, 10–13.
9. Strizhalo, V.A., Novogrudskiy, L.S., Vorobiov, E.V. (2008) *Strength of materials at cryogenic temperatures taking into account electromagnetic field action*. Kyiv, IPS [in Russian].
10. Stepanov, G.V., Babutskiy, A.I., Mameev, I.A. (2004) Nonstationary stress-strain state in a long rod caused by a high-density pulse of electric current. *Problemy Prochnosti*, **4**, 60–67 [in Russian].
11. Lobanov, L.M., Pashchin, N.A., Mikhodui, O.L. (2012) Influence of the loading conditions on the deformation resistance of AMg6 alloy during electrodynamic treatment. *Strength of Materials*, **44**, 472–479. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-012-9401-6>
12. Lobanov, L.M., Makhnenko, V.I., Pashchin, N.A., Loginov, V.P. (2007) Features of formation of plastic deformations at electrodynamic treatment of welded joints of St3 steel. *The Paton Welding J.*, **10**, 7–11.
13. Semashko, N.A., Krupskiy, R.F., Kupov, A.V. et al. (2004) Acoustic emission at electric pulse deformation of titanium alloys. *Materialovedenie*, **7**, 29–33 [in Russian].
14. Kasatkin, B.S., Prokhorenko, V.M., Chertov, I.M. (1987) *Stresses and strains during welding*. Kyiv, Vyshcha Shkola [in Russian].

RESIDUAL WELDING STRESSES IN AMG6 ALLOY AFTER ELECTRODYNAMIC TREATMENT UNDER CONDITIONS OF PRELIMINARY ELASTIC TENSION

L.M. Lobanov¹, V.V. Lysak¹, O.L. Mikhoduj¹, O.M. Timoshenko¹, M.O. Pashchyn¹, I.P. Kondratenko², V.V. Chopyk², O.M. Karlov²

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: svarka2000@ukr.net

²Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine. 56 Beresteysky Ave., 03057, Kyiv, Ukraine.

A concept for regulating the residual stress-strain states of welded joints based on the combined use of electrodynamic treatment (EDT) of weld metal that is preloaded with elastic tension (PET) is proposed. It is shown that the use of EDT creates prerequisites for reducing the metal consumption and stiffness of tooling for PET. It is proved that the combined use of PET and EDT methods can contribute to the synergy of mechanisms for reducing residual welding stresses, which is based on the effect of electroplasticity, which is realized under conditions of preliminary elastic deformation of a welded joint. It has been established that the use of EDT of AMg6 alloy welded joints under PET conditions allows applying a 50 % lower load level σ_{PET} to reduce residual tensile welding stresses unlike in the absence of EDT. It has been proven that PET of a welded joint at $\sigma_{PET} = 90$ MPa and the combined use of EDT and PET (at a similar value of σ_{PET}), respectively, contribute to a reduction in residual tensile welding stresses in AMg6 alloy by 20 % and 85 %, respectively. The use of EDT creates the prerequisites for reducing the metal consumption and stiffness of the tooling for PET and will contribute to the development of methods for regulating the residual stress states of welded joints based on their preload. Ref. 14, Table 1, Fig. 4.

Keywords: current pulse, welded structures, residual stresses, welded joint, electroplastic effect, preliminary elastic tension, plastic deformation, aluminium alloy, electrodynamic treatment, stress reduction

Отримано 08.07.2025

Отримано у переглянутому вигляді 27.11.2025

Прийнято 14.01.2026

IX Міжнародна спеціалізована виставка технологій, обладнання та матеріалів для аддитивного виробництва та 3D друку



Addit EXPO 3D



Актуально для 3D стоматології

26-28 травня 2026



Місце проведення:
МВЦ, м. Київ,
Броварський пр-т, 15,
станція метро «Лівобережна»

+38 (095) 268-05-87
helen@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua



ВІДНОВЛЕННЯ КЛЕПАНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ ЗВАРЮВАННЯМ

А.Ю. Барвінко, Ю.П. Барвінко, А.М. Яшник, О.С. Костеневич

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

У результаті проведених досліджень було встановлено, що для стінки клепаних резервуарів була застосована вуглецева сталь з низьким вмістом вуглецю: 0,045...0,05 % при наявності мангану 0,4...0,5 %. Враховуючи те, що при цьому вміст азоту складає приблизно 0,0030 %, а кисню – 0,03 %, досліджувану сталь можна розглядати як напівспокійну. Вміст сірки в сталі може досягати 0,1 %. Однак беручи до уваги, що структура основного металу та ЗТВ переважно представлена дрібнозернистим феритом, робота удару для сталі при $T = +15,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ($60 \text{ }^\circ\text{F}$) задовольняє умові $KV_{min} = 20$ Дж, окрихчування металу по лінії сплавлення відсутнє. Це свідчить про можливість з достатньою ймовірністю виключити крихке руйнування зварних з'єднань вказаної сталі та відновлювати клепані резервуари за допомогою зварювання. Розроблені на основі результатів проведених досліджень технічні рішення були апробовані під час ремонту резервуарів, які перебували в експлуатації 86 та 114 років. Успішна наступна експлуатація протягом 10 років з максимальним рівнем наливу нафтопродукту відновлених клепаних резервуарів підтвердила правильність прийнятих рішень. Бібліогр. 27, табл. 7, рис. 19.

Ключові слова: низьковуглецева сталь, зварюваність, крихке руйнування, зварні конструкції, клепані резервуари, ремонт

Вступ. Один із найбільших регіонів за запасами та видобутком нафти є Південно-Каспійський нафтогазоносний басейн, розташований на території Апшеронського півострова (Азербайджан) і прилеглої акваторії Каспійського моря. Промислова розробка нафти там почалася з останньої третини 19 століття, і, починаючи з 1870 р. по сьогоднішній день, було видобуто більше як 2 млрд т нафти [1]. Великий внесок у розвиток нафтової галузі в цьому регіоні було зроблено братами Нобелями. Після відкриття Робертом Нобелем у 1873 р. значних покладів нафти на Апшеронському півострові ним було придбано перший нафтоперегінний завод. У 1879 р. створюється «Товариство нафтового виробництва братів Нобель» (скорочено «БраНобель») – на той час перша в Російській імперії вертикально інтегрована компанія [2], що інтенсивно розвивалася. Так, за період 1879–1904 рр. заводами компанії було перероблено 19,6 млн т нафти і вироблено 6,2 млн т гасу, 39 тис. т бензину, 0,76 млн т солярового мастила, 0,82 млн т мастильної оливи, 11,7 млн т нафтових залишків. У 1889 р. «БраНобель» досягла піка видобутку нафти – 8,6 % світового об'єму [3]. Такий бурхливий розвиток компанії потребував застосування сучасних інженерних ідей і технологій.

У 1877 р. у Баку (Азербайджан) відкрилося відділення «Строительной конторы инженера А.В. Бари» [4]. Головним інженером стає В.Г. Шухов. Разом з А.В. Барі вони знайомлять Людвіга Нобеля зі своїми інженерними розробками, і після цього починається тісне співробітництво ком-

паній. Стрімкий розвиток нафтоперероблення та транспортування нафти потребував створення резервуарних парків великою місткістю. У 1878 р. В.Г. Шухова вперше у світі спроектував та під його керівництвом було побудовано сталевий клепаний вертикальний циліндричний резервуар для зберігання гасу. У 1883 р. він опублікував теоретичне обґрунтування конструкції сталевих циліндричного резервуара [5]. Контора А.В. Барі разом із проектуванням і будівництвом нафтопроводів побудувала до 1881 р. понад 130 сталевих резервуарів за проектами В.Г. Шухова. А в період 1880–1905 рр. під керівництвом В.Г. Шухова було побудовано біля 3000 сталевих клепаних циліндричних резервуарів загальною ємністю 2,6 млн т для зберігання гасу, нафтопродуктів, нафтових залишків, води тощо [5].

Станом на 1990 р. багато сотень клепаних сталевих резервуарів після 70–100 років експлуатації ще знаходилися в робочому стані [2, 5]. На сьогодні, за оцінкою авторів, у розглянутому вище регіоні можна очікувати наявними в експлуатації до 100 клепаних резервуарів об'ємом до 10 тис. м³, тому питання відновлення їхньої працездатності може бути достатньо актуальним.

Визначення марки сталі та можливості її зварювання. Головним фактором, який визначає принципову можливість проведення ремонту клепаних резервуарів, є марка сталі, що була застосована для циліндричної стінки, і можливість проведення її ремонтного зварювання з отриманням достатнього рівня механічних властивостей звар-

Барвінко А.Ю. – <https://orcid.org/0000-0002-5719-0576>, Барвінко Ю.П. – <https://orcid.org/0009-0001-8751-1801>,

Яшник А.М. – <https://orcid.org/0009-0003-8365-210X>, Костеневич О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-7427-2805>

©А.Ю. Барвінко, Ю.П. Барвінко, А.М. Яшник, О.С. Костеневич, 2025

них з'єднань для виключення крихкого руйнування ємності. Особливо це питання потребує дослідження, беручи до уваги той факт, що клепані резервуари проектувалися в той час, коли ще не існувало ані теорії крихкого руйнування сталевих конструкцій [6], ані визначення зварюваності сталі.

Дослідження проводилися для сталі, що була застосована для клепаного резервуара 1901 р. будівництва (розробник проекту – конструкторське бюро «Строительная контора інженера А.В. Бари») і резервуара 1929 р. будівництва (розробник проекту невідомий), характеристики яких наведено в табл. 1.

Досліджуване зварне з'єднання було зварене з пластин завтовшки 15 мм, що були вирізані із нижнього поясу стінки резервуара 1929 р. будівництва та імітувало зварювання вертикального ремонтного стикового зварного шва. Розробка кромок у зварному з'єднанні була прийнята симетричною – Х-подібна з кутом 50°. Для ремонтного зварювання був обраний процес механізованого зварювання 135 у суміші M21-ArC-18 суцільним дротом G3Si1 діаметром 1,2 мм. Погонна енергія зварювання для кореневого проходу становила $Q \approx 0,9$ кДж/мм, при заповненні розробки $Q = 1,1 \dots 1,2$ кДж/мм.

Дослідження сталі стінки резервуара 1901 р. будівництва. Для досліджень вирізалися ділянки клепаного горизонтального з'єднання між I та II поясами стінки (рис. 1). Номінальна товщина 1. Геометричні характеристики двох сталевих клепанних вертикальних резервуарів циліндричної форми для зберігання нафти

Рік будівництва резервуара	Діаметр, м	Висота стінки, м	Товщина поясів стінки, мм
1901	23,4	9,54	12+11+9+8+7+6+5
1929	30,73	10,25	15+13+11+9+7+5+5

Таблиця 2. Хімічний склад сталі стінки резервуара 1901 р. будівництва

Товщина металу δ , мм	Вміст хімічних елементів, масова частка %						
	C	Si	Mn	S	P	O	N*
10	0,05	0,011	0,52	0,036	0,05	не визнач.	не визнач.
12	0,045	0,01	0,54	0,043	0,038	0,029	0,0030

*Вміст азоту в киплячій сталі становить $N = 0,04 \dots 0,08$ %.

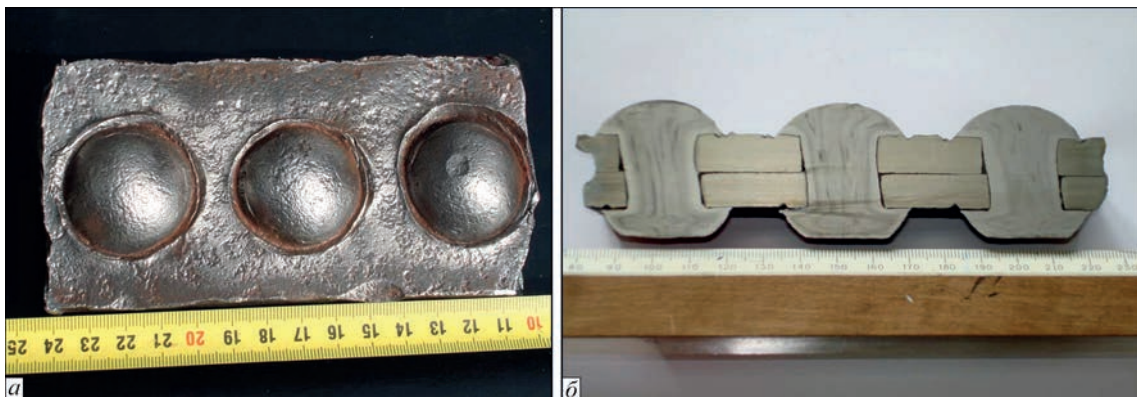


Рис. 1. Горизонтальне клепане з'єднання між I і II поясами стінки резервуара (товщина сталі 12 + 10 мм), 1901 р. будівництва: вигляд ззовні резервуара (а), поперечний макророзріз з'єднання (б)

щина металу δ становила 12 та 10 мм, фактична – 11,6; 11,6 та 10,3; 10,1 мм відповідно. Для дослідження механічних властивостей сталі застосовували поздовжні зразки. Хімічний склад сталі визначали спектральним методом. Властивості міцності визначали за результатами випробувань коротких зразків з діаметром робочої частини 5 мм [7]. Ударну в'язкість визначали на зразках Менаже (U-подібний надріз) [8]. Для товщини сталі $\delta = 12$ мм випробовували зразки 10×10 мм, для $\delta = 10$ мм – 7,5×10 мм. Ударну в'язкість визначали за температури 0 та –20 °С [12].

Неметалеві включення вивчали під час перегляду нетравлених мікрошліфів, мікроструктуру – на мікрошліфах, протравлених у пікраті натрію. Задля можливості порівняння характеристик досліджуваної сталі з близькими марками вуглецевої сталі, що вже застосовувалися для відповідальних зварних конструкцій у найближчому історичному періоді, оцінювання неметалевих включень і характеристик структури сталі виконували згідно з ГОСТ 1778-70 [9] і ГОСТ 5640-68 [10].

Хімічний склад сталі наведено в табл. 2. Аналіз отриманих даних показує, що досліджувану сталь можна класифікувати як конструкційну сталь із невисоким вмістом вуглецю. Враховуючи, що сталь, ймовірно, частково розкислялася вуглецем і манганом, вміст кремнію може не бути визначальним показником ступеня її розкислення. Беручи до уваги низький вміст азоту $N = 0,0030$ %, що менше за допустимий вміст $N < 0,008$ % для напівспокійної (спокійної) сталі [11], а також низький вміст вуглецю $C = 0,05$ % при вмісті кисню $O =$

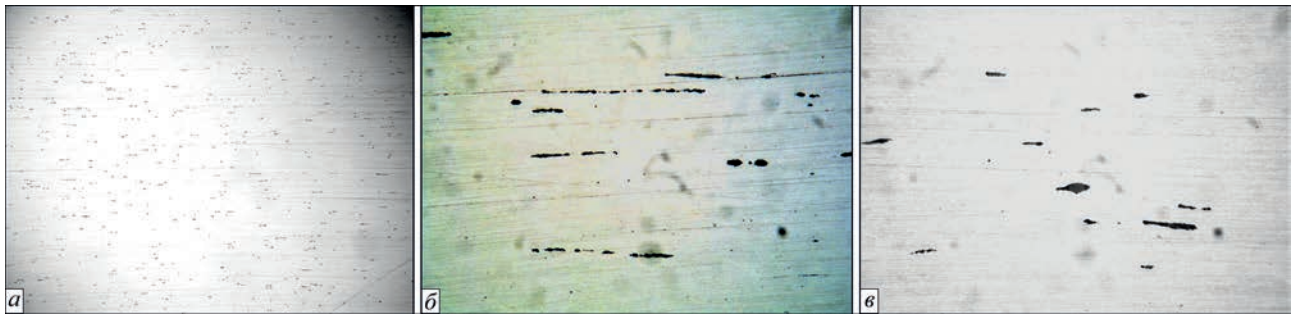


Рис. 2. Сульфіди мангану в сталі, $\delta = 12$ мм: $a - \times 100$, $b - \times 1000$; $v - \delta = 10$ мм, $\times 1000$

$= 0,025 \dots 0,03$ %, досліджену сталь можна розглядати як напівспокійну.

Вміст фосфору $P = 0,05$ % у зразку завтовшки 12 мм не перевищує допустимий для сталі ВСтЗсп [12]. Невисокий вміст вуглецю $C \leq 0,05$ % за відносно помірного вмісту сірки та фосфору має забезпечити задовільну зварюваність напівспокійної низьковуглецевої сталі.

У результаті проведених металографічних досліджень встановлено, що в зразках сталі завтовшки 10 та 12 мм спостерігаються переважно дрібні включення світло-сірого кольору, витягнуті вздовж напрямку прокатування (рис. 2–3). При цьому у зразку 12 мм ці включення більш тонкі та витягнуті (рис. 2 a, b), а у зразку 10 мм – коротші, овальної форми (рис. 2, v , 3, a, b).

Мікротвердість цих включень є досить високою: $HV_{0,01} = 5357 \dots 6142$ МПа. Дослідження з використанням сканувального електронного мікроскопа JSM за допомогою енергодисперсійного спектрометра Link 860-500 дозволили встановити, що ці включення можна віднести до сульфідів мангану. Виявлено також поодинокі рядкові включення складного складу, що містять силікат мангану та оксид кальцію (рис. 3).

Забрудненість сульфідами мангану за ГОСТ 1778-70 [9] неможливо оцінити внаслідок невеликого розміру включень. Витягнуті рядки складних включень відповідають балу № 2 (рядкові оксиди та силікати) [9].

Для дослідження мікроструктури сталі зразки 12 та 10 мм були протравлені в 4 % спиртовому розчині азотної кислоти протягом $t = 10$ с. У результаті було встановлено, що сталь має ферито-перлітну структуру з невеликою кількістю цементиту за гранями зерен (рис. 5), при цьому об'ємна частка перліту невелика. Необхідно зазначити деяку різнозернистість мікроструктури зразка завтовшки 10 мм: разом із зернами бала № 7–8 спостерігаються окремі зерна бала № 4–5 [13]. Структура зразка 12 мм більш однорідна та відповідає балу № 7–8 [13].

При вимірюванні твердості сталі за Віккерсом встановлено, що твердість металу зразка завтовшки 12 мм поступається твердості зразка завтовшки 10 мм: $HV_1 = 1163 \dots 1204$ МПа та $HV_1 = 1377 \dots 1428$ МПа відповідно.

Таким чином, на підставі проведених металографічних досліджень можна зробити висновок, що у зв'язку з тим, що у структурі металу переважають досить дрібні зерна фериту, а дисперсних неметалевих включень, деформованих вздовж напрямку прокатування та розташованих рівномірно між зернами, небагато, слід очікувати достатньо високу пластичність і в'язкість сталі. Фактичний розмір зерна сталі та об'ємна частка перліту мають забезпечити потрібний рівень міцності сталі. Стан постачання сталевого прокату – гарячекатаний.

Результати дослідження механічних властивостей зразка сталі резервуара 1901 р. будівниц-

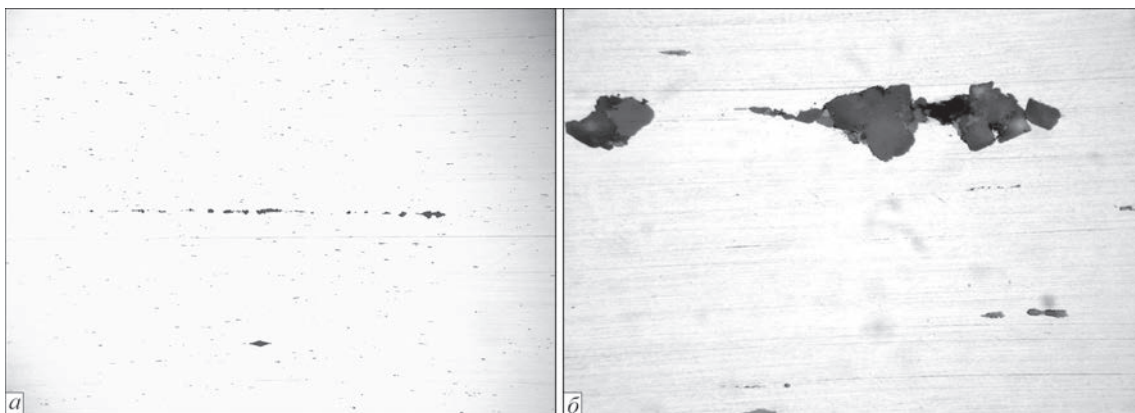


Рис. 3. Складні неметалеві включення $\delta = 10$ мм: $a - \times 100$, $b - \times 1000$

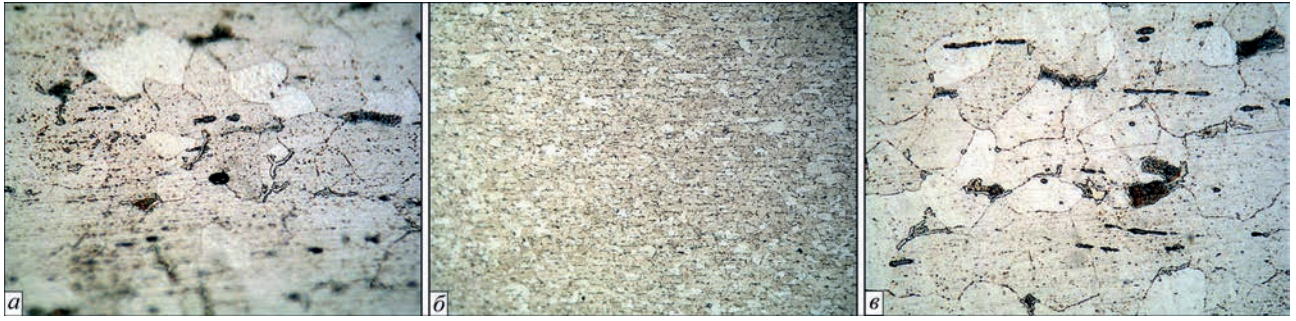


Рис. 4. Мікроструктура сталі, $\delta = 10$ мм: а – $\times 100$, б – $\times 1000$; в – $\delta = 12$ мм, $\times 1000$

тва у співставленні з необхідними механічними властивостями листового прокату вуглецевої сталі ВСтЗсп ГОСТ 380-60 [12], яка використовувалась для відповідальних зварних конструкцій [14], наведено в табл. 3. Аналіз цих даних показує, що з урахуванням результатів випробування поздовжніх зразків міцність і пластичність дослідженої сталі відповідає вимогам, що висуваються ГОСТ 380-60 [12] до сталі ВСтЗсп. Ударна в'язкість дослідженої сталі має достатній рівень при температурі випробування $T = -20$ °С: $KCU > 29$ Дж/см².

Дослідження сталі та її зварних з'єднань стінки резервуара 1929 р. будівництва. Дослідження проводилися для I поясу стінки резервуара завтовшки 15 мм. Хімічний склад сталі наведено в табл. 4. Тут видно, що її марка аналогічна застосованій для стінки резервуара 1901 р. будівництва, але вміст сірки суттєво, удвічі, перевищує допустимі ГОСТ 380-60 [12] значення, а вміст фосфору відповідає вимогам.

Дослідження неметалевих включень показало, що в основному металі спостерігаються переважно сульфіди світло-сірого кольору веретеноподібної форми, витягнуті в напрямку прокату (рис. 5). Довжина цих включень становить 10...75 мкм. Бал забрудненості сульфідами становить 56 [9]. В основному металі також спостерігаються оксисульфіди та пластинчасті силікати у невеликій кількості (рис. 6, а), а іноді й ланцюжки оксидів, орієнтовані в напрямку прокату (рис. 6, б).

Було встановлено, що структура основного металу – ферито-перлітна (рис. 7, а, б), перліт витягнутий вздовж напрямку прокатування. Також

у невеликій кількості спостерігається цементит (рис. 7, в), травлення в лужному розчині пікрату натрію). Діаметр зерна фериту становить $d = 80...90$ мкм. Твердість основного металу складає $HV_1 = 1560$ МПа.

Дослідження структури зварного стикового з'єднання показує, що на ділянці перегріву утворюється ферит з дрібнодисперсним перлітом (рис. 8, а). По границях зерен спостерігаються виділення невеликої кількості цементиту. Розмір зерна фериту несуттєво збільшується та становить 80...90 мкм. Твердість металу ділянки перегріву дорівнює $HV_1 = 1917$ МПа. Поблизу лінії сплавлення сульфідні включення під впливом зварювального нагріву мають форму, ближчу до овальної. Максимальна довжина сульфідів становить 15...20 мкм (рис. 6, в). На ділянці нормалізації структура сталі дещо подрібнюється, її твердість становить $HV_1 = 1800$ МПа. У процесі неповної перекристалізації відбувається деяке подрібнення фериту, сфероїдизація та подрібнення перліту, утворення невеликої кількості цементиту (рис. 8, б). Твердість цієї ділянки становить $HV_1 = 1725$ МПа.

Аналіз результатів дослідження мікроструктури зварного з'єднання показує, що збільшення твердості на ділянці перегріву пов'язане з утворенням більш дрібнодисперсного перліту в більшому об'ємі, що рівномірно розташований по площі зерна (рис. 7, а, рис. 8, а). На ділянці нормалізації та неповної перекристалізації збільшення твердості відбувається переважно за рахунок

Таблиця 3. Механічні властивості сталі, що була застосована для стінки резервуара 1901 р. будівництва

Конструктивний елемент	Механічні властивості сталі				
	σ_r , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %	KCU_0 , Дж/см ²	KCU_{-20} , Дж/см ²
I пояс, $\delta = 12$ мм*	278,4	386,2	37,3	–	74
	273,1	381,9	40,0		69
II пояс, $\delta = 10$ мм*	–	–	–	122	–
				120	
				118	
Сталь СтЗсп5** [12]	> 240	380...400	> 27	–	> 29**

* Повздовжні зразки. ** Вимоги факультативні.

Таблиця 4. Хімічний склад сталі стінки резервуара 1929 р. будівництва

Товщина металу δ , мм	Вміст хімічних елементів, масова частка %						
	C	Si	Mn	S	P	N	O
15	0,045	<0,05	0,43	0,10	0,05	0,0026	0,027

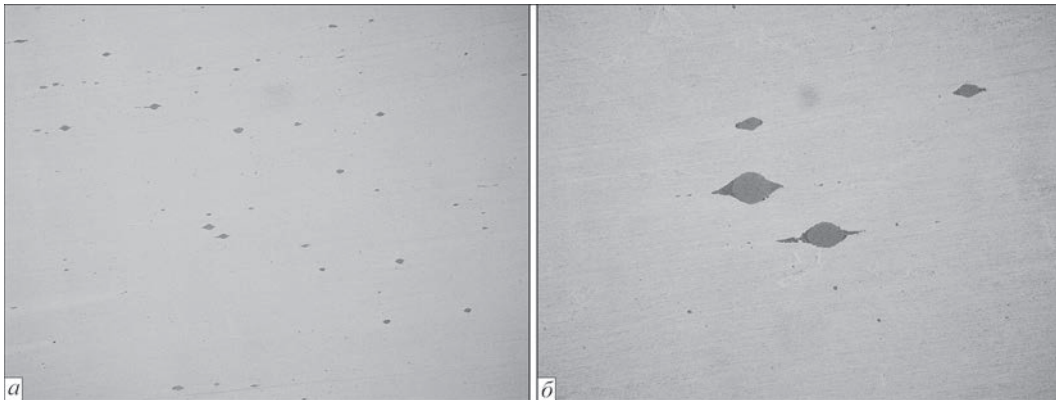


Рис. 5 Сульфіди та оксисульфіди в сталі, $\delta = 15$ мм: а – $\times 100$, б – $\times 500$



Рис. 6 Силікати пластинчасті в сталі: а – $\delta = 15$ мм, $\times 500$; б – ланцюжок оксидів у сталі, $\delta = 15$ мм, $\times 500$; в – сульфіди та оксисульфіди біля лінії сплавлення, $\delta = 15$ мм, $\times 500$

утворення при охолодженні більш дрібнозернистої структури (рис. 8, б).

Загалом аналіз отриманих даних показує, що у зварному з'єднанні дослідженого зразка сталі резервуара 1929 р. будівництва на ділянці крупного зерна немає значного зростання феритних зерен, тут формується достатньо дрібнодисперсна ферито-перлітна структура з невеликою об'ємною часткою перліту. Виділення по границях зерен незначні. Відсутні протяжні неметалеві включення в основному металі та біля лінії сплавлення. Це дає підстави очікувати на достатньо високий рівень в'язкості металу на ділянці крупного зерна та основного металу.

Результати визначення механічних властивостей дослідженої сталі при випробування зразків на розтяг наведено в табл. 5. Аналіз результатів випробувань показує, що міцність сталі практично задовольняє вимогам для сталі 08пс ГОСТ 1050-88 [11].

На другому етапі досліджень ударну в'язкість сталі та ЗТВ визначали на зразках з V-подібним надрізом перерізом 10×10 мм. У [6] зазначено, що на основі оброблення статистичних даних механічних властивостей різних марок сталі, які застосовувалися для суден, що зазнали крихкого руй-

нування, основним критерієм оцінки можливості крихкого руйнування була температура, за якої енергія руйнування за методом Шарпі дорівнювала $KV = 2$ Дж ($KCV = 24$ Дж/см²). Було встановлено, що у випадку зварних суден для досліджених марок сталі (вуглецеві, типу киплячих з відносно низькою ударною в'язкістю) вказана температура випробувань зразків становить $T = +15,5$ °C (60 °F) [6]. Для м. Батумі температура найбільш холодних діб з ймовірністю 98 % становить $T_{0,98} = -4$ °C [15], а для м. Баку $T_{0,98} = -8$ °C [15]. У цих випадках розрахункова температура металу дорівнює $T = +1$ °C (33,8 °F) та $T = -3$ °C (26,6 °F) відповідно [16], що є достатнім для виключення крихкого руйнування стінки з урахуванням товщини поясів [17]. Тобто, з огляду на кліматичний район розташування резервуарів, застосування вищевказаного критерію є достатньо коректним.

З урахуванням неоднорідності механічних властивостей листового прокату, а також для оцінки надійності нижньої границі перехідного інтервалу випробування зразків проводилося для двох значень температури: $T = +15,5$ °C (60°F) і $T = 0$ °C (32 °F). Отриману величину ударної в'язкості основного металу та лінії сплавлення наведено в табл. 6.

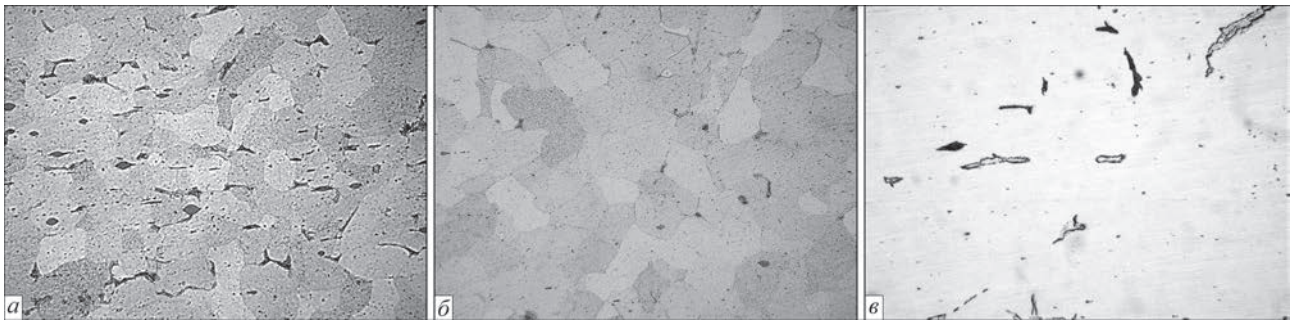


Рис. 7. Мікроструктура основного металу, травлення в ніталі: *a* – $\times 250$, *б* – $\times 500$; *в* – травлення в лужному розчині пікрату натрію, $\times 250$

Аналіз даних табл. 6 показує, що основний метал має достатню в'язкість для уникнення крихкого руйнування при застосуванні зварювання – рівень в'язкості становить $KCV_{+15,5} = 24$ Дж/см² та $KCV_0 = 21$ Дж/см² [6, 17]. Злами зразків за температури випробувань $T = 0$ °С – крихкі, з утяжкою зразків у нижній частині $\approx 0,34$ мм (рис. 9). Висока ударна в'язкість зразків з надрізом по лінії сплавлення (ЛС) пов'язана з присутністю високої частки металу шва, що має значно більшу в'язкість у перерізі руйнування. Візуальне дослідження зламів зразків показує, що метал ЛС не переходить у крихкий стан. Тобто при оцінюванні ударної в'язкості зварного з'єднання, зважаючи на наявну структуру металу ЛС, можна орієнтуватися на показники в'язкості основного металу.

Для оцінювання достатності в'язкості руйнування сталі для попередження крихкого руйнування резервуара було визначено критичну довжину тріщини для I поясу стінки завтовшки 15 мм. На основі значень ударної в'язкості KCV_0 було визначено величину критичної в'язкості руйнування сталі за формулою [19]:

$$K_{Ic} = \sqrt{\frac{0,1 \cdot E \cdot KCV}{10^2(1 - \nu^2)}} \quad (1)$$

де K_{Ic} – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень для умов навантаження, за яких краї тріщини зміщуються в напрямку нормалі до площини тріщини, МПа $\cdot\sqrt{м}$; E – модуль Юнга, для

сталі $E = 210000$ МПа; KCV – величина ударної в'язкості, $KCV = 20$ Дж/см²; ν – коефіцієнт Пуассона, для сталі $\nu = 0,25$.

У цьому випадку критична довжина тріщини становить [20]:

$$a_{cr} = \frac{\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma \cdot F}\right)^2}{\pi} \quad (2)$$

де σ – напруження, що діють у напрямку нормалі до площини тріщини в I поясі стінки, МПа. Беручи до уваги величину співвідношення $2l/b = 0$ ($2l$ – довжина тріщини, b – ширина пластини), значення функції F приймали $F(0) = 1$ [20].

Напруження σ , що діють у напрямку нормалі до площини тріщини, визначалися згідно з [17] $\sigma = 2/3 \cdot Y = 2/3 \cdot 186$ МПа = 124 МПа, де Y – мінімальна величина границі текучості, що приймалася згідно з табл. 5.

Результати розрахунку критичної довжини наскрізної тріщини для основного металу I поясу, що отримані на основі значень його ударної в'язкості (табл. 6), наведено в табл. 7.

З табл. 7 видно, що критична довжина наскрізної тріщини a_{cr} становить 97 мм. Початкову довжину наскрізної тріщини, з якої починається витік нафти, можливо прийняти як у випадку поверхневої раковини, що має форму напівкола: $2t$, де t – товщина стінки або 2×15 мм = 30 мм [21]. У цьому

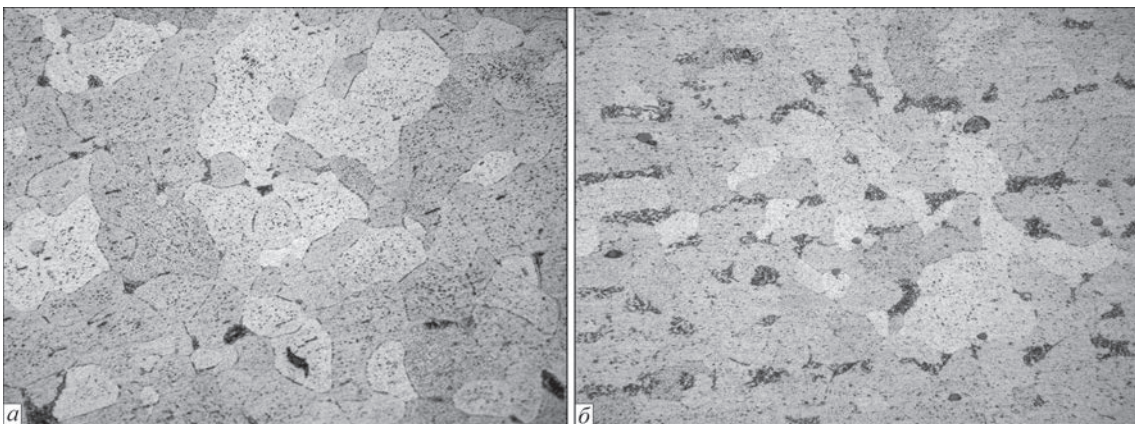


Рис. 8. Мікроструктура ЗТВ, $\times 250$: *a* – ділянка крупного зерна, *б* – ділянка неповної перекристалізації

Таблиця 5. Результати випробувань на розтяг сталі, що була застосована для стінки резервуара 1929 р. будівництва

Конструктивний елемент	Механічні властивості сталі		
	σ_r , МПа	σ_B , МПа	δ_5 , %
І пояс, $\delta = 15,0$ мм*	189	335	38,7
	186	336	40,3
Сталь 08пс [11]	> 196	> 320	> 33

*Поперечні зразки.

випадку до досягнення критичної довжини тріщини повинна збільшитися на 67 мм. Очікувану кількість циклів для досягнення наскрізної тріщини критичної довжини можливо консервативно оцінити як $N = 1000$ [22]. У цьому випадку при запасі $N = 10$ [23] очікувана кількість циклів при наскрізній тріщині становить $N = 100$, що відповідає одному року експлуатації резервуара. За цей термін наскрізний дефект буде гарантовано виявлено при регулярному зовнішньому огляді стінки резервуара, що дозволяє застосувати критерій «витік до руйнування» для гарантування безвідмовної експлуатації резервуарів [21, 23, 24].

Таким чином, особливістю дослідженої марки сталі є низький рівень вуглецю – на рівні 0,045...0,05 % С у поєднанні з частковим розкисленням сталі (напівспокійна), а також підвищений вміст сірки до 0,1%S та вміст фосфору до 0,05 % Р. Це означає, що холодостійкість сталі визначатиметься феритною матрицею, яка має достатній рівень пластичності та в'язкості. Своєю чергою, на енергію руйнування металу також впливають кількість і розміри неметалевих включень [25]. У [26] показано, що для С–Si–Mn сталей збільшення вмісту сірки до 0,1 % суттєво не впливає на нижню границю T_0 критичного інтервалу крихкості. Згідно з отриманими даними (табл. 6) ударна в'язкість сталі становить $KCV_0 = 20$ Дж/см², що забезпечує достатню величину нижньої границі температури переходу T_0 для кліматичних районів, де побудовані резервуари [17].

У випадку зварювання досліджених низьковуглецевих сталей крихке руйнування металу лінії сплавлення відсутнє, що пов'язано з форму-

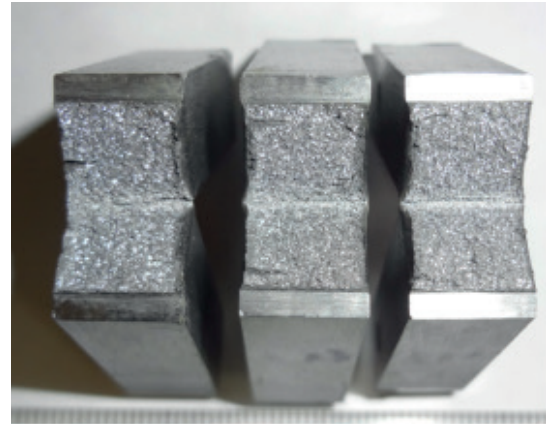


Рис. 9. Злами випробуваних за Шарпі при $T = 0$ °С зразків (І пояс, товщина $\delta = 15$ мм, резервуар 1929 р. будівництва)

ванням в основному феритної структури (низький вміст вуглецю $C \leq 0,05$ %), несуттєвим зростанням розміру зерна фериту та відсутністю виділення крихких фаз по границях зерен у металі ЛС. Усе це забезпечує виключення крихкого руйнування зварних з'єднань досліджених сталей та дає підставу для проведення ремонту клепаних резервуарів із застосуванням зварювання.

Основні технічні рішення, прийняті у процесі ремонту клепаних резервуарів. Резервуар 1901 р. будівництва, $D = 23,40$ м, $H = 9,54$ м. Обстеження технічного стану клепаного резервуару показало необхідність ремонту основи, повної заміни днища та кінцевого покриття резервуара, монтажу в стінці та покритті нових патрубків і люків.

Для підсилення нижньої частини стінки, яка зазнала виразкової корозії, всередині резервуара приварювався бандаж завтовшки 6 мм зі сталі СтЗсп5-св (рис. 10). Проводилося відновлювання основи та монтувалося нове днище: окрайки завтовшки 8 мм і центральна частина завтовшки 6 мм сталі СтЗсп5-св. Зовнішні контурні листи днища залишалися. У стінку врізалися нові люки-лази Ду600 і нові патрубки (рис. 10). Нове кінцеве каркасне покриття з кутом нахилу 6° проектувалося із центральною стійкою Ду500, що закріплювалася до залізобетонного привантаження для запобігання його підймання під дією надлишкового тиску в резервуарі (рис. 10). Головною радіальною балкою

Таблиця 6. Результати випробувань на ударну в'язкість основного металу та лінії сплавлення сталі, застосованої для стінки клепаного резервуара 1929 р. будівництва

Характеристика резервуара	Температура випробування зразків, °С	Ударна в'язкість KCV , Дж/см ²	
		основного металу*	надріз по лінії сплавлення**
t15 мм, № 1	+15,5 (60 °F)	$\frac{24-28-20}{24}$	–
	0 (32 °F)	$\frac{23-20-20}{21}$	$\frac{158-129-125}{137}$
t15 мм, № 2		$\frac{30-20-23}{24}$	–

* Зразки для випробувань на удар за Шарпі вирізалися поперек прокату.
 ** Розташування V-подібного надрізу приймали по лінії сплавлення за поз. 2 [18].

Таблиця 7. Результати розрахунку критичної довжини тріщини для I поясу клепаного резервуара 1929 р. будівництва, основний метал

Ударна в'язкість KCV_0 , Дж/см ²	Коефіцієнт інтенсивності напружень, K_{Ic} , МПа·√м	Напруження розтягу σ , МПа	Критична довжина тріщини a_{cr} , мм
20	67	124	97



Рис. 10. Процес ремонту клепаного резервуара РВС-5000, вигляд із середини



Рис. 12. Ремонтні стрингери, що встановлені в місцях приходу до стінки радіальних балок

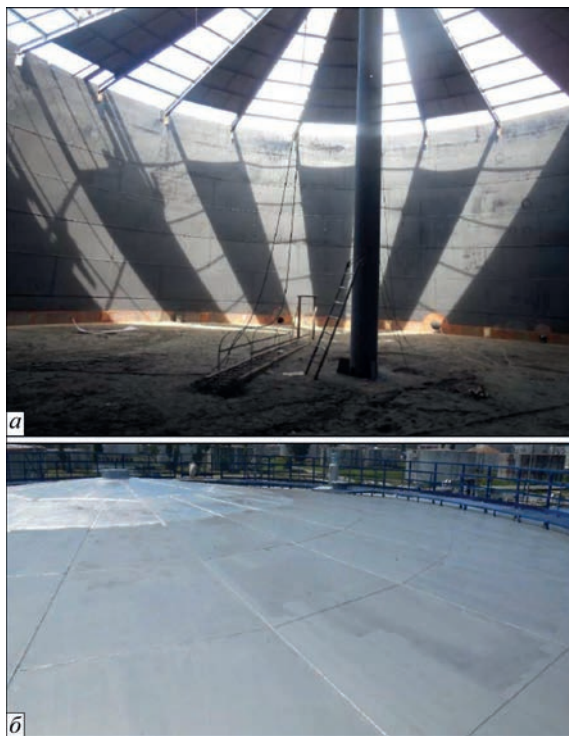


Рис. 11. Ремонт конічного покриття клепаного резервуара РВС-5000: а – монтаж щитів покриття, вигляд із середини; б – змонтоване покриття, вигляд із зовнішньої сторони

слугував двотавр № 27, товщина нового настилу становила 4 мм. Обпирали двотаври на стінку через опорні столики, монтаж покриття проводився з використанням заводських щитів, між щитами заводський набір та настил монтувалися розсипом (рис. 11, а, б). Із зовнішньої сторони резервуара місце обпирання радіальних двотаврів на стінку додатково підсилювалося стрингерами у вигляді рівнополичного кутика 100×100×8 мм (рис. 12).



Рис. 13. Демонтаж існуючого днища та покриття резервуара

Для зменшення нагріву металу під час зварювання та можливості отримання сприятливої структури й механічних властивостей металу ЗТВ застосовувалося багатопрхідне зварювання покритими електродами діаметром 3,2 мм.

Після проведення ремонту із застосуванням зварювання була відновлена працездатність резервуара з отриманням максимально можливого рівня його заповнення.

Резервуар 1929 р. будівництва, $D = 30,73$ м, $H = 10,25$ м. У процесі ремонту цього резервуара було проведено ремонт основи, заміну днища, покриття та верхнього поясу стінки (рис. 13). Ухил нового конічного каркасного покриття складав 1:10. Як головну радіальну балку використовували двотавр № 27, який обпирали на стінку через опорний столик завдовжки 0,5 м. Нове конічне покриття спиралося в центрі на балкове кільце із двотавру № 27, що своєю чергою спиралося через каркас із балок на 8 колон із труби Тр.426×8 мм, які встановлювалися на кільцевий залізобетонний фундамент по колу радіусом $R = 7$ м (рис. 14, а, б, 15). Товщина нового настилу покриття стано-

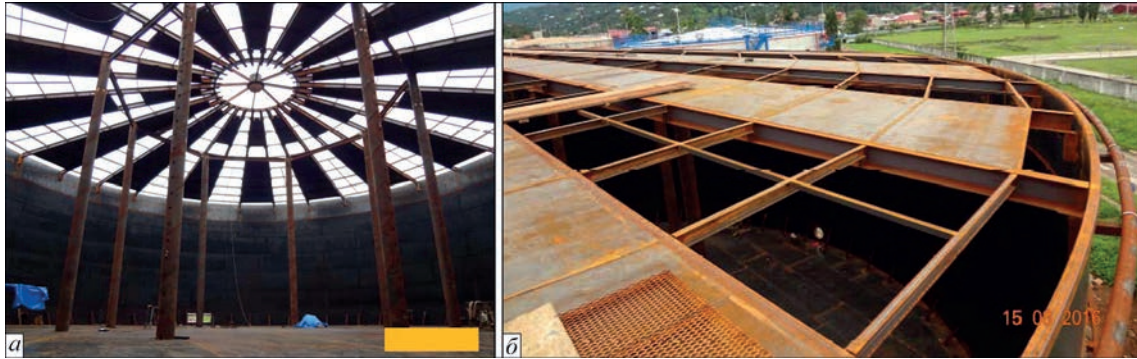


Рис. 14. Монтаж конічного покриття з обпиранням у центрі: вигляд зсередини резервуара (а), вигляд із зовнішньої сторони резервуара (б)



Рис. 15. Влаштування кільцевого залізобетонного фундаменту для опорних колон покриття



Рис. 16. Монтаж нового днища: окрайка завтовшки 8 мм, центральна частина – завтовшки 6 мм

вила 4 мм. При відновлюванні днища проводили демонтаж його центральної частини, залишивши по периметру сегмент окрайки, що прилягає до стінки, завдовжки 600 мм. Відновлювалася основа та монтувалося нове днище: окрайка завтовшки 8 мм, центральна частина завтовшки 6 мм зі сталі СтЗсп5-св (рис. 16). Внаслідок інтенсивної виразкової корозії верхній сьомий пояс стінки заввишки 1400 мм замінювався на новий завтовшки 6 мм також зі сталі СтЗсп5-св. З метою збереження проектної геометричної форми верхніх поясів стінки на шостому поясі попередньо монтувалося кільце жорсткості з труби квадратного перерізу 80×80×4 мм (рис. 17). У стінці для зручності обслуговування влаштовувалися нові овальні лючки-лази 600×900 мм і круглі Ду600, а патрубки замінялися на нові ПРП (рис. 18, а, б).



Рис. 17. Заміна верхнього поясу стінки з установкою фіксуючого кільця жорсткості

Проведений ремонт резервуара у вищезазначених обсягах дозволив відновити проектний рівень наливу нафти (рис. 19).

Для зварювання стикових швів стінки використовувався процес 135 в суміші М21-АгС-18 дротом типу G3Si1 діаметром 1,2 мм. Особлива увага при проведенні ремонту приділялася неруйнівному контролю ремонтних стикових зварних швів у першому поясі – усі ремонтні стикові шви були проконтрольовані по всій довжині ультразвуковим методом згідно з вимогами СНиП 3.03.01-87 [27]. Під час проведення візуально-вимірального контролю ремонтних швів глибина підрізів допускалася не більше 0,5 мм. Допуск зварників до зварювальних робіт проводився за позитивними результатами випробування допускних стиків. Сукупність вказаних вище організаційно-технічних заходів дозволила забезпечити високу якість зварних швів і гарантувати відсутність таких небезпечних протяжних тріщиноподібних дефектів, як непровари по крайці та у корні шва, шлакові включення, а також підрізи, що можуть бути місцем ініціації крихкого руйнування.

Після успішного гідровипробування резервуари були введені в експлуатацію. Тривала експлуатація відновлених ємностей (понад 10 років) показала, що технічні рішення, розроблені на основі проведених досліджень щодо можливості застосування зварювання для ремонту клепанних резервуарів, можуть забезпечити достатньо надійну їхню

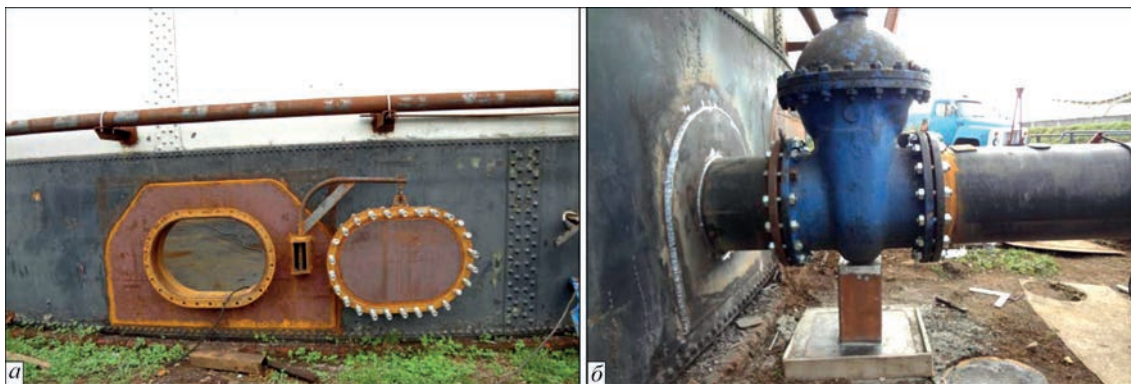


Рис. 18. Вварювання в стінку овального люка – лазу (а) та патрубка ПРП (б)



Рис. 19. Вигляд резервуара після ремонту в процесі нанесення протикорозійного покриття

подальшу експлуатацію з максимально допустимими рівнем наливу нафтопродуктів.

Висновки

Сталь, що була застосована для будівництва досліджених клепаних резервуарів, є низьковуглецевою із вмістом вуглецю 0,05 % С і манганом 0,4...0,5 % Мп, яку можна віднести до напівспокійної.

Хоча вміст сірки в сталі може досягати 0,1 % S, за наявної структури сталі та її ЗТВ, що в основному складається з фериту, а протяжні легкоплавкі сульфідні та виділення фаз по границях зерен відсутні, холодостійкість дослідженої сталі та її зварних з'єднань задовольняє умові виключення крихкого руйнування у випадку зварних сталевих конструкцій: робота удару $KV \geq 20$ Дж ($KCV \geq 24$ Дж/см²) при температурі випробувань зразків $T = +15,5$ °С (60 °F), яка відповідає кліматичному району розташування резервуарів.

Розрахунковий мінімальний розмір дефекту за ударної в'язкості сталі $KCV_0 = 20$ Дж/см² є достатнім для використання для ремонтних стикових зварних з'єднань стінки критерію «витік до руйнування», що дозволяє застосовувати зварювання при ремонті клепаних резервуарів і забезпечує їхню наступну тривалу безаварійну експлуатацію після ремонту.

Для визначення можливості проведення ремонту клепаних резервуарів із застосуванням зварювання необхідно проводити комплексне дослідження фізико-механічних властивостей сталі та її ремонтних зварних з'єднань спеціалізованими організаціями. Технологія зварювання має забезпечувати мінімальну погонну енергію, що максимально обмежує зростання розміру зерна та запобігає утворенню фаз на границях зерен.

Для ремонтних стикових зварних з'єднань стінки потрібно проводити ультразвуковий контроль якості по всій їх довжині. Особливу увагу необхідно приділяти виявленню протяжних площинних дефектів по крайці або в корені шва.

Для ремонтних стикових зварних з'єднань стінки потрібно проводити ультразвуковий контроль якості по всій їх довжині. Особливу увагу необхідно приділяти виявленню протяжних площинних дефектів по крайці або в корені шва.

Список літератури

1. https://az.wikipedia.org/wiki/Bak%C4%B1_neft-qaz_rayonu
2. <https://en.wikipedia.org/wiki/Branobel>
3. Ергин Д. (2011) *Добыча: Всемирная история борьбы за нефть, деньги и власть*. Пер. с англ. М., Альпина Паблишер.
4. <http://www.transneft.ru/About/History/>
5. (1990) *Металлические конструкции* академика В.Г. Шухова. Отв. ред. В.П. Мишин. М., Наука.
6. Бойд, Дж. М. (1977) *Практические примеры проектирования конструкций судов. Разрушение. Т. 5. Расчет конструкций на хрупкую прочность*. Пер. с англ. под. ред. Г. Либовца. М., Машиностроение.
7. ГОСТ 1497-84 *Металлы. Методы испытаний на растяжение* (ISO 6892-84, СТ СЭВ 471-88)
8. ГОСТ 9454-78 *Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах*.
9. ГОСТ 1778-70 *Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений* (ИСО 4967-79)
10. ГОСТ 5640-68 *Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты*.
11. ГОСТ 1050-88 *Сталь качественная и высококачественная. Сортовой и фасонный прокат, калиброванная сталь*.
12. ГОСТ 380-60 *Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки и общие технические требования*.
13. ГОСТ 5639-82 *Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. С изм. № 1*.
14. СНиП II В.3-62 *Строительные нормы и правила. Часть II, раздел В. Глава 3. Стальные конструкции, нормы проектирования*.
15. СНиП 2.01.01-82 *Строительная климатология и геофизика*.
16. prEN 14015:2004 *Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above*.
17. (2014) *API Standart 653 Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction – Fifth edition*.

18. MSC.177(79) *Code for the construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk. Chapter 6. Materials of construction.*
19. Гиренко В.С., Дядин В.П. (1985) Зависимость между ударной вязкостью и критериями механики разрушения δ_{1c} , R_{1c} конструкционных сталей и их сварных соединений. *Автоматическая сварка*, **9**, 13–20.
20. Сиратори М., Миёси Т., Мацусита Х. (1986) *Вычислительная механика разрушения*. М., Мир.
21. Брок Д. (1980) *Основы механики разрушения*. Пер. с англ. М., Высшая школа.
22. Барвинко А.Ю., Барвинко Ю.П. (2016) О возможности предотвращения лавинных разрушений стенки цилиндрических резервуаров для хранения нефти путем применения листовой стали с повышенным значением ударной вязкости. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 44–49. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2016.02.05>
23. Кныш В.В., Барвинко А.Ю., Барвинко Ю.П., Яшник А.Н. (2012) Обоснование критерия «течь перед разрушением» применительно к вертикальным цилиндрическим резервуарам для хранения нефти. *Автоматическая сварка*, **9**, 29–33.
24. Bourga, R., Moore, P., Janin, Y.-J., Wang, B., Sharples, J. (2015) Leak-before-break: Global perspectives and procedures. *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, **129-130**, 43–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2015.02.004>
25. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. (1985) Специальные стали. М., Металлургия.
26. Скороходов В.Н., Одесский П.Д., Рудченко А.В. (2002) *Строительная сталь*. М., Металлургиздат.
27. СНиП 3.03.01-87 *Несущие и ограждающие конструкции*.
10. GOST 5640-68. *Steel. Metallographic method for assessing the microstructure of sheets and strips* [in Russian].
11. GOST 1050-88. *High-quality and high-quality steel. Rolled and shaped products, calibrated steel* [in Russian].
12. GOST 380-60. *Carbon steel of ordinary quality. Grades and general technical requirements* [in Russian].
13. GOST 5639-82. *Steels and alloys. Methods for detecting and determining grain size. With amendment No. 1* [in Russian].
14. SNiP II B.3-62. *Construction norms and rules. Part II, section B. Chapter 3. Steel structures, design standards* [in Russian].
15. SNiP 2.01.01-82. *Building climatology and geophysics* [in Russian].
16. prEN 14015:2004 *Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above.*
17. (2014) API Standart 653 *Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction – Fifth edition.*
18. MSC.177(79). *Code for the construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk. Chapter 6. Materials of construction.*
19. Hireno, V.S., Dyadin, V.P. (1985) Dependence between impact toughness and fracture mechanics criteria δ_{1c} , R_{1c} of structural steels and their welded joints. *Avatomatycheskaia svarka*, **9**, 13–20 [in Russian].
20. Shiratori, M., Miyoshi, T., Matsushita, H. (1986) *Computational fracture mechanics*. Moscow, Mir [in Russian].
21. Broek, D. (1980) *Fundamentals of fracture mechanics*. Trans. from Engl. Moscow, Vysshaya shkola [in Russian].
22. Barvinko, A.Yu., Barvinko, Yu.P. (2016) On possibility of prevention of avalanche-like fractures of the wall of cylindrical tanks for oil storage by application of sheet steel with increased values of impact toughness. *Tekhnicheskaya dyahnostyka i nerazrushaiushchii kontrol*, **2**, 44–49 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/tdnk2016.02.05>.
23. Knysh, V.V., Barvinko, A.Yu., Barvinko, Yu.P., Yashnik, A.N. (2012) Substantiation of «leak-before-break» criterion for vertical cylindrical tanks for oil storage. *The Paton Welding J.*, **9**, 26–29.
24. Bourga, R., Moore, P., Janin, Y.-J., Wang, B., Sharples, J. (2015) Leak-before-break: Global perspectives and procedures. *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, **129-130**, 43–49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2015.02.004>
25. Goldshtein, M.I., Grachev, S.V., Veksler, Y.G. (1985) *Special steels*. Moscow, Metallurgy [in Russian].
26. Skorokhodov, V.N., Odessky, P.D., Rudchenko, A.V. (2002) *Construction steel*. Moscow, Metallurgizdat [in Russian].
27. SNiP 3.03.01-87. *Supporting and enclosing structures* [in Russian].

References

1. https://az.wikipedia.org/wiki/Bak%C4%B1_neft-qaz_rayonu
2. <https://en.wikipedia.org/wiki/Branobel>
3. Yergin, D. (2011) *Extraction: A global history of the struggle for oil, money, and power*. Transl. from Engl. Moscow, Alpina Publisher [in Russian].
4. <http://www.transneft.ru/About/History/> [in Russian]
5. (1990) *Metal structures of academician V.G. Shukhov*. V.P. Mishin (Ed.). Moscow, Nauka [in Russian].
6. Boyd, J.M. (1977) *Practical examples of ship structural design. Failure. Vol. 5. Brittle strength analysis of structures*. Trans. from Engl. G. Libovets (Ed.). Moscow, Mashinostroyeniye [in Russian].
7. GOST 1497-84. *Metals. Tensile test methods (ISO 6892-84, СТ ПЕВ 471-88)* [in Russian]
8. GOST 9454-78. *Metals. Method of impact bending test at low, room and elevated temperatures* [in Russian].
9. GOST 1778-70. *Steel. Metallographic methods for the determination of non-metallic inclusions (ISO 4967-79)* [in Russian].

RESTORATION OF RIVETED CYLINDRICAL TANKS BY USING WELDING

A.Yu. Barvinko, Yu.P. Barvinko, A.M. Yashnyk, O.S. Kostenevych

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

E-mail: tanksweld@gmail.com

As a result of the conducted research, it was found that low-carbon steel with content of 0.045-0.05%C and 0.4...0.5Mn was used for the shell of riveted tanks. Taking into account the nitrogen content at the level of 0.003%N and oxygen 0.03%O at a low carbon level, the studied steel may be considered as semikilled. The sulphur content in the steel can reach 0.1%S. However, taking into account that the structure of the base metal and the HAZ is mainly represented by a sufficiently fine-grained ferrite the impact energy of the steel at $T = + 15.5 \text{ }^\circ\text{C}$ (60 °F) satisfies the condition $KV_{\min} = 20 \text{ J}$, embrittlement of the overheated zone metal is not observed. This indicates the possibility of sufficiently eliminating brittle fracture of welded joints of the specified steel and restoring the riveted tanks using welding. Based on the conducted studies, technical solutions for the complete (partial) replacement of riveted metal structures with welded ones were developed and tested during the repair of tanks after 114 years and 86 years of their operation: bottom, replacement of part of the shell, welding in pipes into the shell and installing a new roof. Successful operation for 10 years with the maximum level of oil product filling of the restored riveted tanks confirmed the correctness of the decisions made. 27 Ref., 7 Tabl., 19 Fig.

Keywords: low carbon steel, weldability, brittle fracture, welded structures, riveted tank, repair

Отримано 12.06.2025

Отримано у переглянутому вигляді 23.10.2025

Прийнято 27.12.2025

ТЕХНОЛОГІЯ ПРЕСОВОГО ЗВАРЮВАННЯ МАГНІТОКЕРОВАНОЮ ДУГОЮ З ІМПУЛЬСНИМ НАГРІВАННЯМ ТА КОНТРОЛЬОВАНОЮ ОСАДКОЮ

В.С. Качинський¹, D. Allford², В.І. Клименко¹

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

²ARC SPECIALTIES, 1730 Stebbins Drive, Houston, TX 77043-2807 USA. E-mail: dan@arcspecialties.com

У статті наведено результати розробки технології пресового зварювання магнітокерованою дугою, відомої як Magnetically impelled arc butt welding (MIAB welding), із застосуванням імпульсного зварювального струму та контрольованого прецизійного припуску осадки під час формування з'єднань трубних сталей і деталей автомобільної промисловості. Основна увага приділяється зниженню енерговитрат за умови забезпечення високої якості зварних з'єднань. У ході зварювання здійснювався операційний контроль основних технологічних параметрів: зварювального струму, напруги, переміщення та зусилля в момент осадки. Для вивчення процесів, що відбуваються в дуговому проміжку між торцями труб, застосовувалась високошвидкісна відеозйомка з роздільною здатністю до 4500 кадрів/с, а також реєстрація основних параметрів зварювального циклу. Отримані зварні з'єднання були випробувані відповідно до вимог міжнародних стандартів для газо- та нафтопроводів (API, DNV), що дозволило оцінити їх механічні характеристики, надійність і відповідність вимогам щодо промислового застосування. Бібліогр. 20, табл. 4, рис. 17.

Ключові слова: пресове зварювання магнітокерованою дугою, трубні сталі, імпульсний зварювальний струм, осадка, імпульсне нагрівання

Вступ. Пресове зварювання магнітокерованою дугою (ПЗМД), відоме як Magnetically impelled arc butt welding (MIAB welding), є інноваційним процесом, який об'єднує переваги теплової обробки та механічного стикового зварювання сталевих труб і трубчастих деталей. ПЗМД знайшло застосування у різних галузях промисловості завдяки своїй високій продуктивності, стабільності якості зварних з'єднань, а також високому рівню механізації та автоматизації технологічного процесу.

У ході досліджень було встановлено, що вплив термічного та деформаційного циклів із застосуванням імпульсного зварювального струму перед осадкою та виконання контрольованого припуску осадки сприяє формуванню з'єднань з оптимальними характеристиками згідно з технічними вимогами підприємств.

Промислове застосування ПЗМД. До основних переваг процесу належать висока продуктивність, зумовлена потенційно високим рівнем автоматизації, а також зниження вартості виготовлення зварних трубних з'єднань. Цей процес є особливо перспективним для застосування в автомобільній промисловості, на електростанціях, у котельному виробництві, на трубопроводах різного призначення, нафтопереробних і нафтохімічних підприємствах, суднах і в інших галузях, де транспортування рідин і газів здійснюється під високим тиском і температурою, а також де висувуються підвищені вимоги до надійності та точності зварних з'єднань.

Результати наукових досліджень, проведених дослідниками різних країн, визначили основні напрямки використання ПЗМД [1–13]. Завдяки короткому зварювальному циклу та високій відтворюваності якості з'єднань ПЗМД є ефективним рішенням для масового промислового виробництва.

Метод використовується в автомобільній промисловості для з'єднання приводних валів, карданних валів, пневматичних пружин, амортизаторів тощо. Промислове використання в автомобільній індустрії отримали розробки технології та устаткування для Magnetarc зварювання компанії КУКА (Німеччина) та ПЗМД, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України [14–16].

Програма досліджень. Для всебічного вивчення зварювання в широкому діапазоні типорозмірів сталевих труб і трубчастих деталей діаметром 20...300 мм використовувались машини К872, МД-205 та МД101. Зварювання виконувалось на установках, розроблених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Конструкцію дослідної машини К-872 представлено на рис. 1. Основні технічні характеристики експериментальних установок представлені в табл. 1. Марки сталей та їхні механічні властивості наведено в табл. 2–4.

До складу установок К872 та МД205 входять (рис. 2, а): машина зварювальна 1, захист 2, насосна станція 3, гідравлічна система 4, комп'ютеризована система керування 5, джерело зварювального

Качинський В.С. – <https://orcid.org/0000-0001-9695-6434>, Клименко В.І. – <https://orcid.org/0000-0002-8709-5924>

© В.С. Качинський, D. Allford, В.І. Клименко, 2025

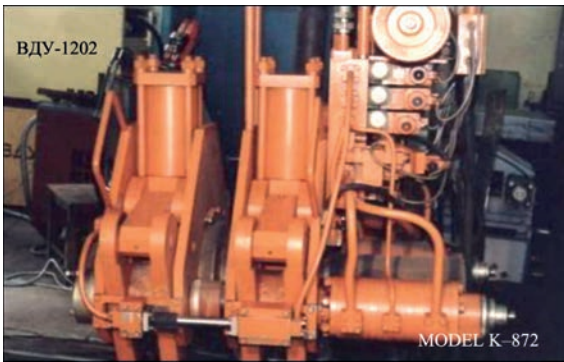


Рис.1. Лабораторна установка К-872

струму 6, пульт керування 7, гідравлічні рукава 8, електричні кабелі 9. На рис. 2, б представлено промислову установку МД205 для зварювання трубчастих деталей корпусів гідравлічних циліндрів.

Конструкцію модернізованої машини МД101 із розробленим гідравлічним приводом для зварювання труб діаметром до 60 мм представлено на рис. 3.

Для проведення робіт було модернізовано устаткування за такими напрямками:

1. Доопрацьовано гідравлічні системи машин з можливістю осадки, контрольованої з заданим припуском.

2. Розроблено систему імпульсного підвищення зварювального струму перед осадкою.

3. Доопрацьовано програму управління та систему реєстрації технологічних параметрів зварювання для виконання вищевказаних розробок.

Блок-схему зварювальної установки після модернізації наведено на рис. 4.

Для забезпечення реалізації алгоритму контролю якості було виконано модернізацію системи керування на базі індустріального комп'ютера. Для живлення дуги використовували три зварювальних випрямляча Lincoln Linc 635SA, під'єднаних паралельно. Також для створення імпульсного струму використовувалися суперконденсатори [17].

Функціонування програми керування та реєстрації технологічних параметрів зварювання. Підготовка виконавчих пристроїв машини до

Таблиця 1. Основні технічні характеристики машин для ПЗМД труб

Марка машини	Діаметр труб, мм	Товщина стінки, мм	Продуктивність, стиків/год	Зусилля осадки, кН	Споживана потужність, кВА	Маса, кг
МД101	10...61	1...5	60	40	30	230
К872	32...220	3...10	60	280	150	2700
МД205	32...240	3...11	60	350	170	2300

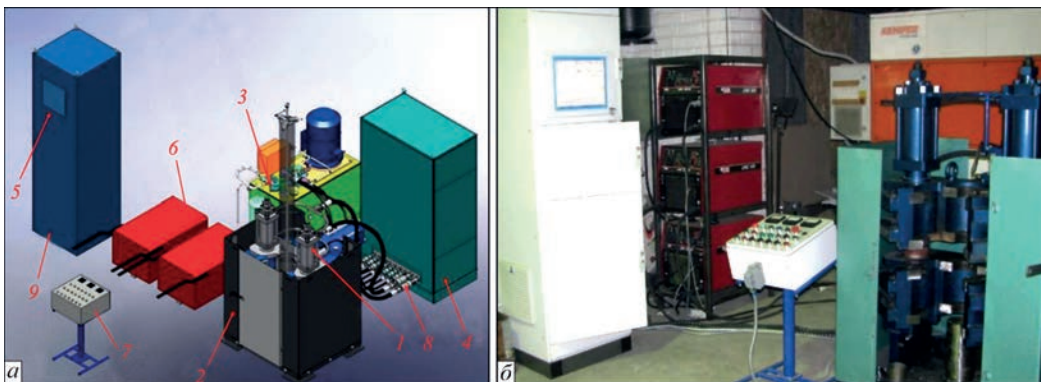


Рис. 2. Установка МД205 для зварювання труб: а – склад обладнання; б – машина МД205 на виробництві

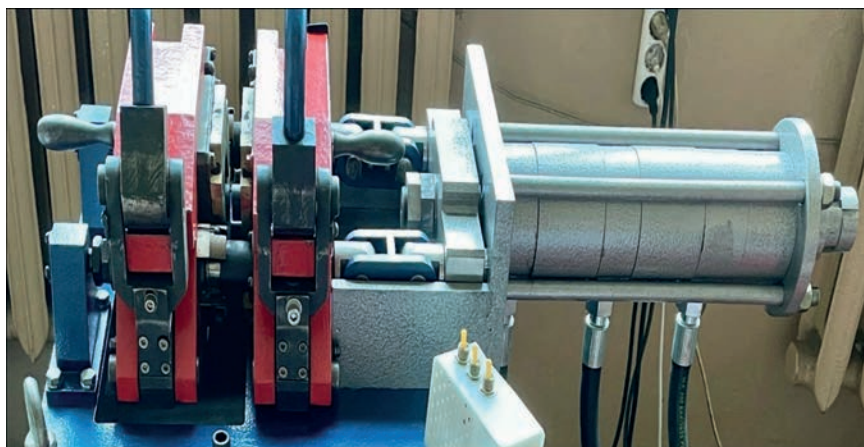


Рис. 3. Машина МД-101

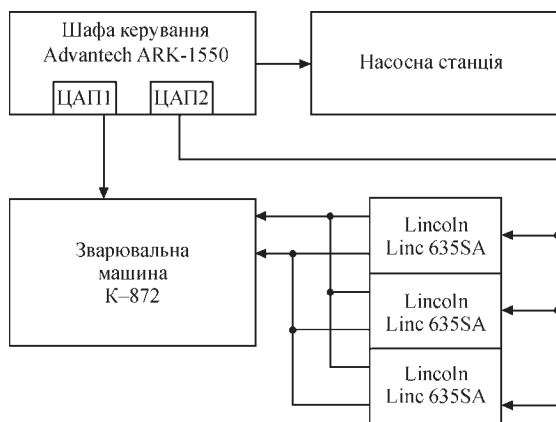


Рис. 4. Блок-схема зварювальної установки

виконання зварювального процесу здійснюється у такій послідовності:

1. увімкнення шафи керування, запуск програми керування та реєстрації параметрів;
2. увімкнення насосної станції та джерела живлення;
3. встановлення труб у стартову позицію для зварювання.

Процес зварювання труб відбувається в автоматичному режимі без використання захисних газів.

Розроблено алгоритм контролю якості зварювання на основі аналізу параметрів процесу, що складається з трьох ключових етапів:

1. нагрівання – період формування температурного поля на торцях труб, що зварюються;
2. імпульс зварювального струму – забезпечення захисного середовища в дуговому проміжку за рахунок інтенсивного оновлення поверхонь;
3. контрольована осадка – формування з’єднання у твердій фазі.

Висновок про якість отриманого зварного з’єднання з певним ступенем імовірності здійснюється на основі логічних правил, сформованих за результатами досліджень технологічних особливостей процесу ПЗМД. Розроблена система керування та реєстрації технологічних параметрів зварювального процесу значно розширює можливості персоналу під час експлуатації зварювального обладнання [18].

Можливим є автоматичний перехід на інший режим зварювання у разі зміни діаметра труб. Під час кожного запуску зварювального циклу система автоматично виконує наступні дії:

- створює файл даних технологічного процесу;
- формує діаграму перебігу зварювання;
- вносить відповідні зміни до файлу звіту (рапорту).

Ці операції виконуються незалежно від ходу зварювального процесу та завершуються після його закінчення. Документування параметрів зварювання здійснюється в автоматичному режимі, що дозволяє:

- оцінити рівень відхилення технологічних параметрів від заданих значень;
- виконати корекцію параметрів у разі необхідності.

Дослідження впливу основних технологічних параметрів на характер процесу зварювання труб. Дослідження процесів, що відбуваються в дуговому зазорі під час нагрівання торців труб електричною дугою, яка переміщується з високою швидкістю (до $V_d = 180$ м/с), проводилися на трубчастих деталях діаметром до 200 мм і товщиною стінки до $\delta = 10$ мм. Для спостереження за перебігом процесу використовувалася високошвидкісна відеозйомка.

Основні параметри процесу – індукція магнітного поля, зварювальний струм і напруга дуги – змінювалися в межах, характерних для режимів, застосовуваних при зварюванні труб зазначеного типу. Одночасно здійснювалася комп’ютерна реєстрація цих параметрів.

Дослідження, виконані в межах цієї роботи, були спрямовані на розробку технології стикового з’єднання труб зі сталей, адаптованих для експлуатації як в польових, так і в стаціонарних умовах. Зварювання здійснювали на зразках із різних марок сталей, зокрема: X60, X70, X80, St35, 09Г2С, JIS STPG410, ASTM A615 Grade 520. Хімічний склад сталей наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Хімічний склад сталей, застосовуваних у дослідженнях, %

Марка сталі	09Г2С	St35	API X70	DIN 17100 St52-3	ASTM A615 Grade 520	JIS STPG410	ASTM A106/API5L
C	0,11	0,39	0,030	0,18	0,159	0,25	0,28
Si	0,75	0,35	0,156	0,52	0,172	0,34	0,25
Mn	1,38	0,75	1,45	1,35	1,19	0,9	1,20
P	0,015	0,035	0,004	0,02	0,012	0,024	0,030
S	0,016	0,04	0,004	0,03	0,006	0,033	0,030
Cu	0,05	0,25	0,30	0,28	0,13	–	0,50
Ni	0,05	0,25	0,14	0,24	0,04	0,001	0,50
Cr	0,25	0,25	0,14	0,24	0,04	0,001	0,50
Mo	0,05	–	0,20	–	0,002	–	0,15
Ti	–	–	0,022	–	0,002	–	–
Nb	–	–	0,062	–	0,002	–	–
Al	0,01	–	–	–	0,03	–	–

Рівномірне нагрівання поверхонь труб, що зварюються, визначається стабільністю переміщення дуги під впливом зовнішнього керуючого магнітного поля (КМП). Швидкість переміщення дуги залежить від таких факторів:

- величини зварювального струму;
- індукції КМП;
- зазору між торцями труб;
- якості підготовки кромок.

Положення дуги на торцях зварювальних деталей визначається як розподілом індукції керуючого магнітного поля, так і впливом на дугу феромагнітних мас сталевих труб. Результати досліджень показали, що при зварюванні сталевих виробів, електрична дуга після збудження на зовнішніх кромках під впливом феромагнітних мас деталей та радіальної складової індукції КМП зміщується в дуговому зазорі на внутрішню область торців (рис. 5).

Установлено, що оптимальний зазор для зварювання труб діаметром 150 мм становить $\delta = 1,9 \pm 0,2$ мм. Результати досліджень показали, що при індукції КМП менше $B_p = 70$ мТл переміщення дуги є нестабільним. Недостатній рівень індукції призводить до коливань стовпа дуги, особливо при горизонтальному розміщенні труб, що викликає локальний перегрів і утворення розплаву металу в нижній частині зварювальної зони. Унаслідок цього формується вирва в зазорі між торцями труб (рис. 6).

Стойке переміщення дуги по торцях труб досягається при радіальній складовій індукції КМП у межах $B_p = 110...180$ мТл (рис. 7, а). За таких умов забезпечується відносно рівномірне нагрівання торців, що є необхідною умовою для пластичної деформації матеріалу під час осадки (рис. 7, б).

Час нагрівання при постійних інших параметрах знаходиться у вузькому діапазоні. Його величина залежить від струму та напруги дуги, причому зміна одного з цих параметрів впливає на зміну іншого. Надмірне нагрівання торців труб може призвести до утворення рідких перемичок між трубами, що порушує стабільне пересування дуги в зазорі.

Розмір дугового зазору значною мірою визначає якість зварних з'єднань. Цей параметр залежить від вимог до стійкості збудження дуги та її стабільного пересування. У досліджуваному діапазоні труб величина дугового зазору, як показали

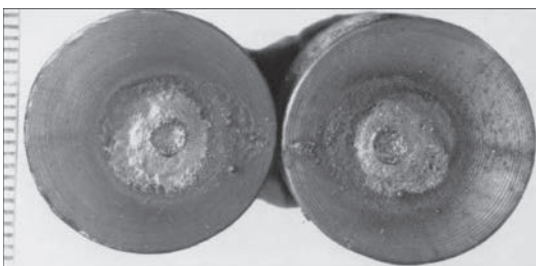


Рис. 5. Зміщення дуги на внутрішню область торців

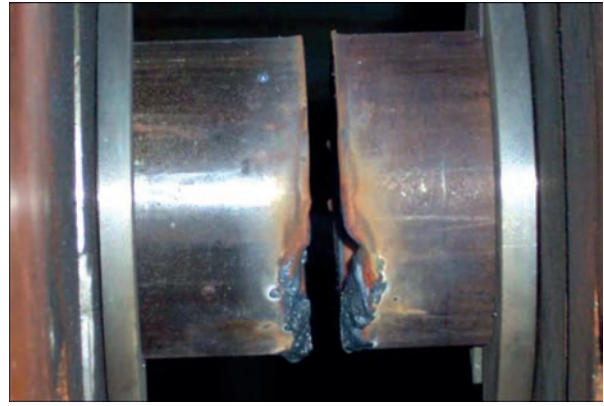


Рис. 6. Вирив розплавленого металу

експерименти, варіюється в межах $\delta = 1,7...2,1$ мм. На рис. 8 наведено фотографії, що ілюструють поведінку дуги в зазорі під час нагрівання торців на різних етапах зварювання труб.

Зварювальний струм дуги складає $I_d = 200...250$ А, напруга дуги $U_d = 25 \pm 2$ В. Після збудження дуги між торцями її швидкість руху під час нагрівання постійно збільшується від $V_d = 50$ м/с, досягаючи до $V_d = 240$ м/с у залежності від діаметра труб (рис. 8, а). У міру підвищення температури торців збільшується товщина розплаву (рис. 8, б), який утримується на поверхні торців силами поверхневого натягу. При досягненні певної товщини розплаву під впливом цих сил обертає дугу вздовж нагрітих торців (рис. 8, в), і починає рухатися в тому ж напрямку. Регульована швидкість цього руху за певних умов може досягати $V = 3$ м/с. Рух розплаву зумовлений дією електродинамічних сил і тиском газу в дуговому зазорі, що утворюється стовпом дуги. Це переміщення сприяє перемішуванню розплавленого шару металу. Перед осадкою шар розплаву рівномірно розподіляється по периметру труби та товщині її кромок (рис. 8, г). У початковий період осадки зазор між торцями зменшується і дуговий розряд припиняється на час закриття зазору (рис. 8, д); між торцями починає формуватися суцільний прошарок розплавленого металу (рис. 8, е), який під дією магнітного поля (подача струму через торці не припиняється) продовжує ру-

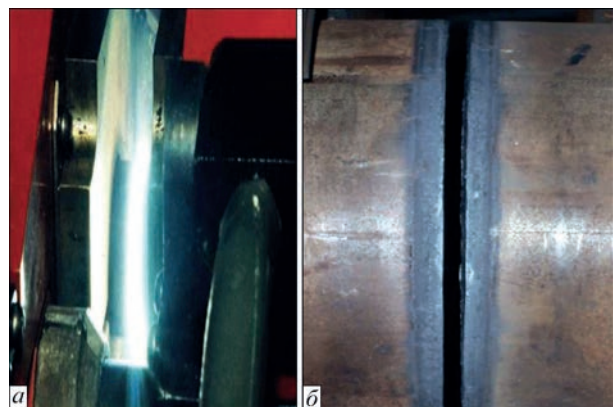


Рис. 7. Процес зварювання труб: а – ПЗМД труб; б – торці труб після нагрівання

хатися круговими траєкторіями. Це сприяє оновленню розплаву та формуванню суцільного прошарку по всьому перерізу труб, що зварюються. У момент закриття зазору розплави видавлюється зі стику, і відбувається деформація нагрітих шарів металу в твердому стані [19].

Значний вплив на характер зсуву активних плям зварювальної дуги мають величина та напрямок індукції КМП. Було встановлено, що в процесі зварювання під дією зовнішнього магнітного поля швидкість дуги при нагріванні досягає $V_d = 120 \dots 140$ м/с залежно від діаметра труб, при цьому спочатку відбувається зміщення катодного потоку плазми стовпа дуги відносно анодного (рис. 9). Дійшовши до анода, катодний потік плазми дуги утворює нову анодну пляму. Відбувається переміщення як анодної, так і катодної активних плям дуги.

З метою дослідження характеру змін лінійної швидкості руху дуги було проведено серію досліджень зі зварювання труб діаметром 121×8 мм, у ході яких варіювалися технологічні параметри перебігу процесу. Зокрема у широких межах змінювався імпульс зварювального струму перед етапом осадки.

На рис. 10 наведено графічний запис змін основних параметрів нагрівання. У прямокутнику на графіку виокремлено ділянку, що охоплює період від моменту початку імпульсного підвищення зварювального струму до початку виконання осадки під струмом. Цю ділянку детальніше представлено на рис. 11, що дало змогу проаналізувати форму імпульсу та характер змін зварювального струму як перед осадкою, так і безпосередньо під час її виконання.

При підвищенні зварювального струму дуги відбувається різке прискорення швидкості пересування дуги (до 240 м/с), що призводить до інтенсивного оновлення поверхонь зварювання та створює захисне середовище. Експерименти показали, що величина струму імпульсу перед осадкою повинна бути вищою за струм нагрівання. На оплавлених торцях залишається відносно рівномірний шар рідкого металу завтовшки до $\delta_p = 0,5$ мм, що сприяє формуванню зварних з'єднань. Встановлено оптимальний струм імпульсу для кожного розміру труб до діаметра 200 мм. Зміни струму імпульсу на $\pm 5\%$ від оптимального істотно не впливають на якість з'єднань.

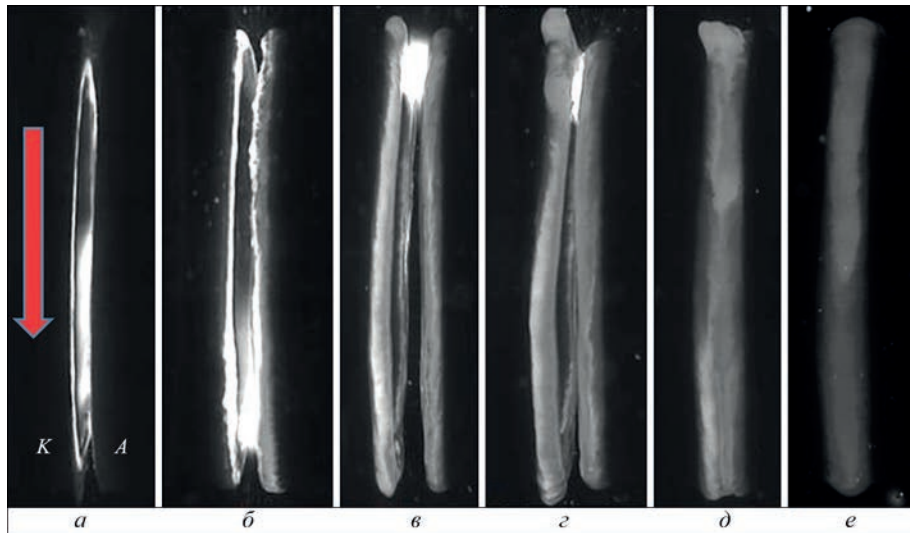


Рис. 8. Стадії зварювання труб: а – початок переміщення дуги під дією КМП; б – формування шару розплаву на торцях труб; в – переміщення розплаву в процесі нагрівання; г – оновлення розплаву перед осадкою; д – початок осадки; е – формування зварного з'єднання

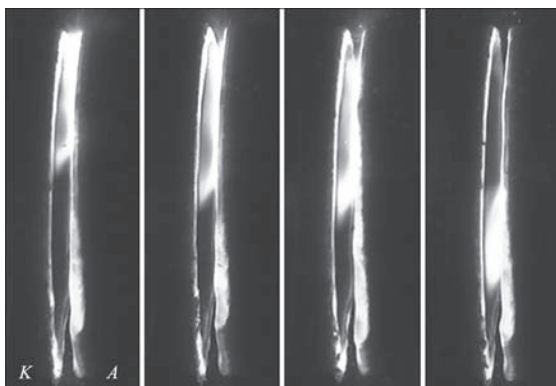


Рис. 9. Рух катодного та анодного потоку плазми стовпа дуги

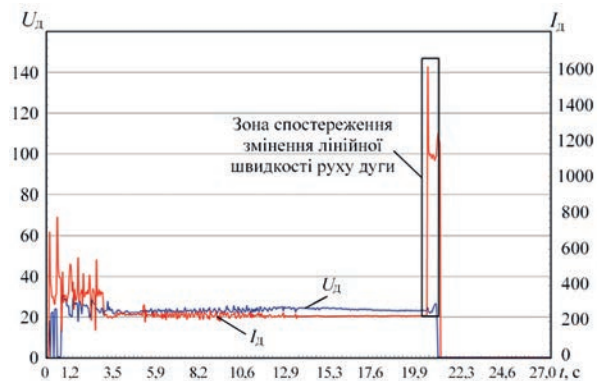


Рис. 10. Основні параметри процесу нагрівання труб

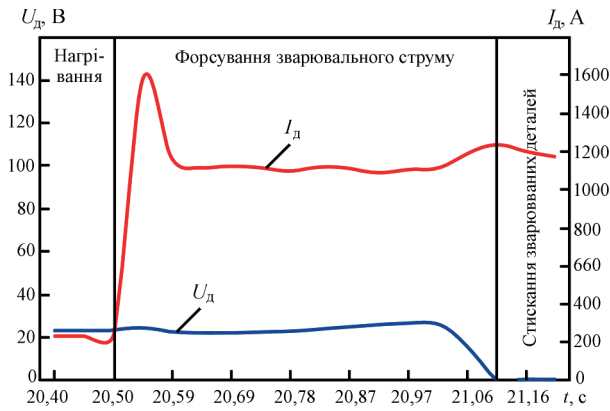


Рис. 11. Імпульс зварювального струму дуги перед осадкою труб

Тривалість імпульсу струму знаходиться в межах $t = 0,2 \dots 0,6$ с. При менших ($t < 0,2$ с) значеннях тривалості імпульсу струму дуга, що пересувається, повністю не встигає оновити з поверхонь торців насичений газами шар розплавленого металу. У цьому випадку якість зварних з'єднань низька. Витримка підвищеного значення струму більш ніж $t = 0,7$ с призводить до підвищених витрат нагрітого металу торців труб і зниження якості зварного з'єднання.

Осадка визначається швидкістю закриття дугового зазору поміж зварюваними торцями труб і формуванням зварного з'єднання. Для цього необхідно забезпечити умови, за яких зберігається рідкий шар металу на торцях і відбувається контрольована деформація зони термічного впливу згідно з заданим припуском. Час кристалізації шару металу на торцях залежить від багатьох факторів, які супроводжують охолодження, що для труб знаходяться в межах $t = 0,01 \dots 0,025$ с. Переривання струму на кінцевій стадії процесу нагрівання перед осадкою призводить до окислення торців і кристалізації рідкого шару на торцях труб.

Дослідним шляхом було визначено, що при значеннях швидкості осадки менше ніж $V_{oc} = 40$ мм/с у зварних з'єднаннях спостерігаються оксиди, що значно знижує пластичність і міцність з'єднань.

Наведений обсяг робіт дозволив зробити такі висновки:

- підтримка установчих і електричних параметрів зварювання в межах допустимих величин призводить до отримання якісних зварних з'єднань;
- дефекти по лінії з'єднання (оксиди й матові плями) розміром до 2 мм^2 належать до дефектів основного металу, які попадають у стик. Як показали випробування, ці дефекти не впливають на якість зварних з'єднань.

Технологія ПЗМД з імпульсним нагріванням і контрольованим припуском осадки для формування зварного з'єднання труб. У процесі виконання зварювання труб, наприкладі труб діаметром 140×8 мм, система дозволяє отримувати графічне уявлення про проходження процесу. Це дає можливість візуально оцінити перебіг процесу зварювання (рис. 12). Зварювальний струм можна розділити на три етапи, а час зварювання – на чотири етапи. Для зварювання труб струм I_1 використовується протягом приблизно $t_1 = 0,5$ с, за якого труби, що зварюються, короткочасно стискаються до короткого замикання та вмикається зварювальний випрямляч; t_2 – це проміжок часу, протягом якого короткозамкнені торці труб відводяться на дуговий зазор, після чого між ними збуджується дуга. На етапі часу t_2 дуга починає обертання в зазорі та нагрівання торців труб, струм дуги $I_2 = 490 \dots 510$ А. На етапі часу t_3 зварювальний струм підвищується до $I_3 = 580 \dots 600$ А, продовжується нагрівання торців труб. На етапі часу t_4 , струм дуги імпульсно підвищується до $I_4 = 1500$ А, дуга прискорюється та обертається з від-

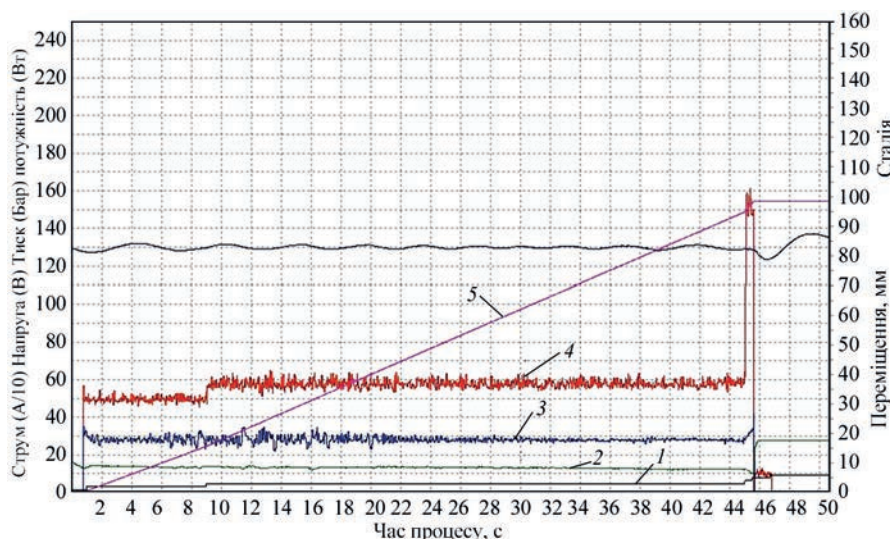


Рис. 12. Діаграма процесу зварювання труб: 1 – положення рухомої частини машини; 2 – ділянка керованої осадки; 3 – напруга дуги; 4 – зварювальний струм; 5 – енергія, накопичена в процесі нагрівання труб

носно високою швидкістю, оновлюючи поверхні нагрітих торців труб. Цикл зварювання завершується контрольованою осадкою з припуском $S = 6,2$ мм. Загальний час ПЗМД зварювання труб діаметром 140×8 мм становить $t = 46$ с.

Формування зварних з'єднань труб при ПЗМД, як і при інших пресових методах стикового зварювання, відбувається внаслідок спільної деформації нагрітих до пластичного стану торцевих поверхонь труб. Рівномірне нагрівання торців є необхідною, проте недостатньою умовою для утворення якісного з'єднання. Одним із ключових параметрів, що впливають на якість з'єднання, є швидкість обертання дуги та тривалість нагріву. Занадто низька частота обертання призводить до нерівномірного теплового поля, утворення локальних зон перегріву або, навпаки, недогріву, що негативно впливає

на структуру зварного шва. Оптимізація цього параметра дозволяє забезпечити стабільність процесу, рівномірний розподіл температури вздовж зони зварювання та знижує ймовірність виникнення внутрішніх дефектів. Якість зварного з'єднання можливо забезпечити навіть без застосування газового захисту за умови, що частота обертання дуги в момент перед осадкою є достатньою для постійного оновлення шару розплаву на всій поверхні торців. Це запобігає кристалізації металу в проміжках часу між проходженням дуги через окремі ділянки, що, у свою чергу, сприяє формуванню однорідного та міцного з'єднання.

Формування зварних з'єднань труб діаметром 140×8 мм, виконаних ПЗМД без контрольованого припуску на осадку, наведено на рис. 13, *а*. На рис. 13, *б* показано поперечний переріз зварного з'єднання. Висота зовнішнього та внутрішнього підсилення складає до 7 мм, що не задовольняє вимогам API стандартів.

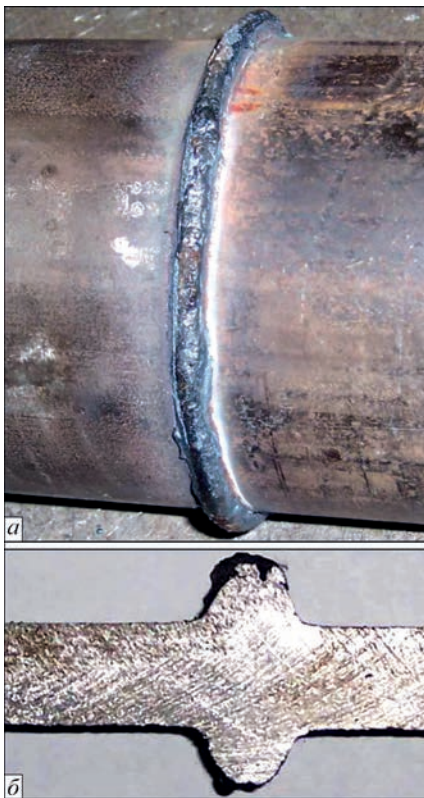


Рис. 13. Формування зварного з'єднання труб без припуску на осадку: *а* – загальний вигляд зварного з'єднання; *б* – поперечний переріз зварного з'єднання

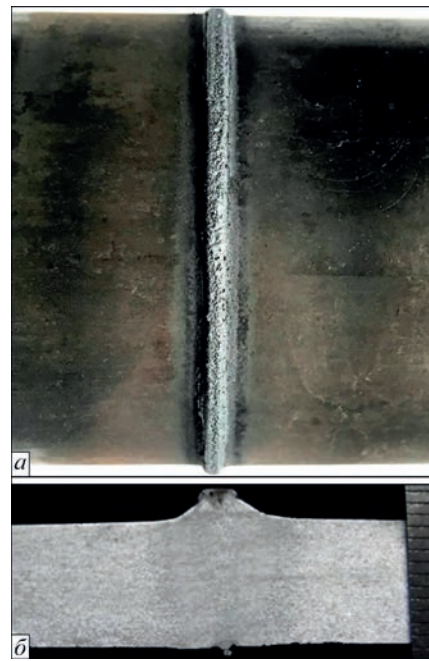


Рис. 14. Формування зварного з'єднання з контрольованою осадкою: *а* – загальний вигляд зварного з'єднання; *б* – поперечний переріз зварного з'єднання

Таблиця 3. Основні технологічні параметри зварювання

Марка сталі	Розмір труб, мм	Час зварювання, с	Зусилля осадки, кН	Величина осадки, мм
09G2S	42/4	14	40,6	3,6
JIS STPG410	60,5/5,5	19	80	4,8
St35	76/16	82	255	12,4
DIN 17100 St52-3	90/5	16	135	4,8
ASTM A615 Grade 520	121/7	27	200	6,7
ASTM A615 Grade 520	121/10	43	278	9,2
API X70	168/7	31	247	6,8
API X70	219/8	38	281	7,7
ASTM A106 API 5L	114,3/6	19**	140	5,7
ASTM A106 API 5L	148,3/6	28	171	5,6

Таблиця 4. Механічні властивості зварних з'єднань труб

Марка сталі	Розмір труб, мм	σ_B , МПа		KCV_{+20} , Дж/см ²		KCV_{-20} , Дж/см ²		KCV_{-40} , Дж/см ²
		Основний метал	Зварне з'єднання	Основний метал	Зварне з'єднання	Основний метал	Зварне з'єднання	Зварне з'єднання
09G2S	42/5	469 ± 10	465 ± 14	56 ± 5	68 ± 10	58 ± 3	69 ± 5	–
JIS STPG410	60/5,5	458 ± 10	456 ± 10	94 ± 4	87 ± 3	96 ± 3	91 ± 4	92 ± 3
St35	89/10	551 ± 14	541 ± 13	60 ± 3	70 ± 19	–	–	–
DIN 17100 St52-3	90/5	498 ± 11	486 ± 7	–	–	–	–	–
API X70	168,6/7,8	551 ± 19	540 ± 8	256 ± 10	189 ± 48	257 ± 9	197 ± 39	–
ASTM A615 Grade520	191/7	651 ± 14	656 ± 22	135 ± 14	119 ± 31	–	–	–
ASTM A106 API 5L	114,3/6	421 ± 14	418 ± 15	–	–	–	–	–
ASTM A106 API 5L	148,3/6	429 ± 12	437 ± 14	–	–	–	–	–

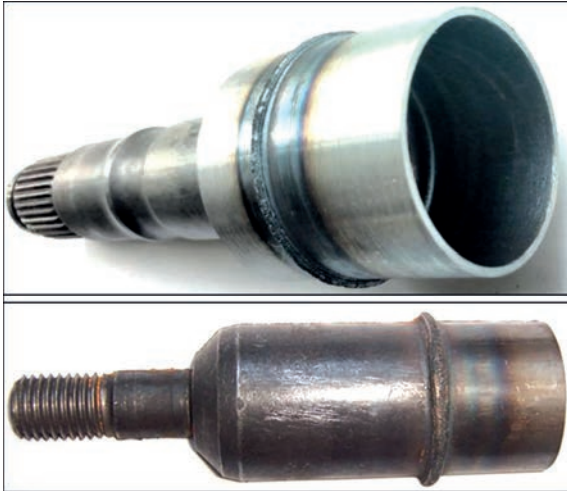


Рис. 15. Деталі автомобільного сортаменту



Рис. 16. Зварювання труб з фітингами для гідравлічних систем будівельних машин

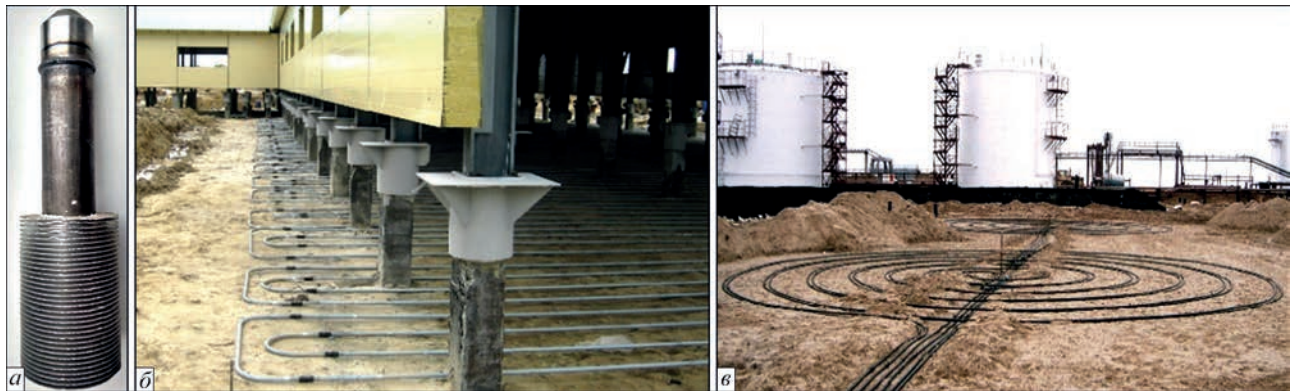


Рис. 17. Зварювання трубопроводів для систем термостабілізації ґрунту: а – зварне з'єднання труби з донцем; система для термостабілізації ґрунту фундаментів будівель (б) та нафтогазових сховищ (в)

Контроль припуску осадки труб після зварювання дозволяє значно зменшити висоту підсилення зварного з'єднання від 1 до 3 мм у залежності від діаметра труб (рис. 14).

У табл. 3 наведено основні технологічні параметри зварювання труб з контрольованою осадкою.

Механічні випробування трубних з'єднань проводились відповідно до вимог стандартів API [20] та DNV. Механічні властивості зварних з'єднань труб показані в табл. 4.

Усі з'єднання зазначених труб, зварених методом ПЗМД без подальшої термічної обробки, продемонстрували ударну в'язкість при температурах

випробувань + 20, – 20 та – 40 °С на рівні не нижче 80 % від відповідних показників основного металу.

Області застосування ПЗМД наведено на рис. 15–17.

Висновки

1. Досліджено вплив феромагнітних мас деталей та радіальної складової індукції КМП на зміщення дуги в зазорі на внутрішню область торців.

2. Визначено, що стійке переміщення дуги по торцях труб досягається при радіальній складовій індукції КМП у межах 110...180 мТл, яка забезпечує відносно рівномірне нагрівання торців труб,

що є необхідною умовою для пластичної деформації під час осадки.

3. Розроблено технологію ПЗМД з імпульсним підвищенням зварювального струму, яка забезпечує зменшення пікових навантажень на електричну мережу.

4. Розроблено та апробовано дослідне ПЗМД устаткування з виконанням контрольованої осадки труб, трубопроводів та порожнистих валів автомобілів.

5. Розроблено технологію ПЗМД з контрольованою прецизійною осадкою для формування підсилення зварного з'єднання до 1...3 мм у залежності від діаметра та товщини стінки труб і трубчастих деталей згідно з вимогами стандарту API 1104.

6. Розроблено комп'ютеризовану систему контролю та реєстрації основних технологічних параметрів ПЗМД у режимі реального часу.

Список літератури/References

- Ganovski, F.J. (1974) The magnetarc welding process. *Welding and Metal Fabrication*, **5**, 206–213.
- Johnson, K.I., Carter, A.W., Dinsdale, W.O., Threadgill, P.L., Wright, J.A. (1979) The magnetically impelled arc butt welding of mild steel tubing. *Weld. J.*, **59**, 17–27.
- Takagi, K., Aracida, F. (1982) Magnetically impelled arc butt welding of gas pipeline. *Metal Construction*, **10**, 542–548.
- Steffen, W. (1982) Pressure welding of tubes with a magnetically displaced arc. *Schweißen. Schneid.*, **4**, E70–E72.
- Edson, D.A. (1982) *Magnetically impelled arc faying surfaces welding of thick wall tubes*. IIW, IM-726–82.
- Kachinskiy, V.S., Krivenko, V.G., Ignatenko, V.Yu. (2002) Magnetically impelled arc butt welding of hollow and solid parts. *Welding in the World*, **46**, 49–56. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03263390>
- Leigh, F., Cec, S., Gabriel, S. (2003) *MIAB welding: Break-through technology for high productivity field welding of pipelines*. APIA National Convention Pipelines – Yesterday, Today and Tomorrow Convened by the Australian Pipeline Industry Association.
- Norrish, J., Cuiuri, D., Hossain, M. (2005) Modelling and simulation of the magnetically impelled arc butt (MIAB) process for transmission pipeline applications. In: *Proc. of the Intern. Pipeline Integrity Conf.*, Sydney, Australia, 7–9 March 2005.
- Iordachescu, D., Georgescu, B., Iordachescu, M., Lopez, R., Miranda, R.M., García-Beltrán, A. (2011) Characteristics of MIAB welding process and joints. *Weld World*, **55**, 25–31. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03263512>
- Vendan, S.A., Manoharan, S., Nagamani, C. (2012) MIAB welding of alloy steel tubes in pressure parts: Metallurgical characterization and non destructive testing. *JMP*, **14**(1), 82–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2011.09.006>
- Kachinskiy, V., Hiroshi Imaizumi (2012) Magnetically-impelled arc butt welding for manufacture of hollow parts of mass production. *Welding Technology J. Japan*, **60**, 68–73.
- Vendan, S.A., Manoharan, S., Buvanashakaran, G., Nagamani, C. (2012) Strength assessment using destructive testing on MIAB welded alloy steel tubes and subsequent techno-economical evaluation. *JMP*, **14**(3), 328–335. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2011.12.001>
- Vendan, S.A., Mundla, S., Buvanashakaran, G. (2012) Feasibility of magnetically impelled arc butt (MIAB) welding of high-thickness tubes for pressure parts. *Mater. Manuf.*, **27**, 573–579. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2011.585488>
- Hagan, D., Riley, N. (1979) MIAB welding. Pt 2: Fabrication of the Fiesta rear axle. *Metal Construction*, **12**, 625, 627–629.
- Hiller, F., Schmidt, M., Breiksch, J. (2003) *Use of the magnetarc welding process in the production of truck cab suspension systems*. ThyssenKrupp Techforum, 40–43.
- Kachinskiy, V.S., Kuchuk-Yatsenko, S.I., Ignatenko, V.Yu. (2010) Magnetically-impelled arc butt welding of automobile parts. *Australasian Welding J.*, **55**, 40–48.
- Kachynskiy, V.S., Allford, D., Drachenko, M.P., Ziakhor, I.V., Klymenko, V.I., Samotryasov, S.M. (2024) Development of the technology of pressure welding with a magnetically impelled arc of small-diameter pipes using supercapacitors. *The Paton Welding J.*, **10**, 3–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.10.01>
- Koval, M.P., Kuchuk-Yatsenko, S.I., Kachynskiy, V.S. (2020) System of control, registration of parameters and monitoring in the process of press welding of pipes using magnetically-impelled arc. *The Paton Welding J.*, **6**, 36–40. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.06.07>
- Kachinskiy, V.S., Kuchuk-Yatsenko, S.I. (2017) Joint formation in magnetically-impelled arc butt welding of thick-walled pipes from high-strength steels. *The Paton Welding J.*, **8**, 39–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.08.06>
- (2013) API Standard 1104. *Welding of pipelines and related facilities*. American Petroleum Institute.

PRESS MAGNETICALLY IMPELLED ARC BUTT WELDING TECHNOLOGY WITH PULSED HEATING AND CONTROLLED UPSET ALLOWANCE

V.S. Kachinskiy¹, D. Allford², V.I. Klymenko¹

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

E-mail: vskweld@gmail.com

²ARC SPECIALTIES, 1730 Stebbins Drive, Houston, TX 77043-2807 USA. E-mail: dan@arcspecialties.com

The article presents the results of the development of press magnetically impelled arc butt welding (MIAB) technology using pulsed welding current and controlled precision upset allowance for the formation of joints of pipe steels and automotive parts. The research is focused on reducing energy consumption while ensuring high-quality welded joints. During the welding process, the in-process monitoring of the main parameters was performed: welding current, voltage, displacement and force at the time of upset. High-speed video recording with a resolution of up to 4500 frames per second was used to study the processes taking place in the arc gap between the pipe ends, as well as recording the main parameters of the welding cycle. The produced welded joints were tested in accordance with the requirements of international standards for gas and oil pipelines (API, DNV), which made it possible to assess their mechanical characteristics, reliability and compliance with the requirements for industrial use. 20 Ref., 4 Tabl., 17 Fig.

Keywords: press magnetically impelled arc butt welding, pipe steels, pulsed welding current, upset, pulsed heating

Отримано 14.05.2025

Отримано у переглянутому вигляді 18.07.2026

Прийнято 11.09.2025

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ СТАЛЕЙ ВЕЛИКИХ ТОВЩИН

П.І. Онищенко, Т.Б. Майданчук

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: pwi_37@ukr.net

На сьогоднішній день у будівельній, гірничодобувній, металургійній, енергетичній та інших галузях промисловості широко використовуються зварні конструкції зі сталі великих товщин. Проведено аналіз існуючих технологій зварювання сталей, у тому числі із застосуванням висококонцентрованих джерел енергії. Показано, що застосування електронно-променевого, плазмового, лазерного зварювання та гібридних способів на сьогоднішній день потребує високої культури заготівельного виробництва, великих капіталовкладень у допоміжне та зварювальне обладнання. Застосування багатопрохідного електродугового зварювання покритими електродами та механізованого зварювання в захисних газах характеризуються низькою продуктивністю, негарантованою якістю сплавлення присадного матеріалу з основним, утворенням міжшарових дефектів у вигляді шлакових включень, пор. Встановлено, що для зварювання вертикальних швів перспективними технологіями є механізоване дугове зварювання з примусовим формуванням шва та електрошлакове зварювання, які характеризуються високою продуктивністю та стабільністю процесу при значно менших капіталовкладеннях у порівнянні із застосуванням висококонцентрованих джерел енергії. Бібліогр. 56, рис. 9.

Ключові слова: сталь великої товщини, електронно-променеве зварювання, лазерне зварювання, плазмове зварювання, гібридні способи зварювання, зварювання під флюсом, електродугове зварювання з примусовим формуванням шва, електрошлакове зварювання, механічні властивості, техніко-економічне обґрунтування

Вступ. Будівництво об'єктів важкої промисловості, заводів, фабрик, трубопроводів, шляхопроводів, а також цивільне будівництво вимагають виготовлення габаритних конструкцій шляхом з'єднання вузлів і деталей середніх і великих товщин (від 20 мм) як у виробничих цехах, так і в монтажних умовах.

Починаючи з 2023 р. в Україні зріс попит на металоконструкції внаслідок, насамперед, реалізації проєктів із захисту критичної інфраструктури, а також відновлення інфраструктурних і комерційних об'єктів. Необхідні обсяги закупівель товстостіклової сталі (від 40 мм) виявились настільки значними та раптовими, що на ринку Європи виник її дефіцит [1, 2]. У 2024 р. ця тенденція продовжилась.

При проєктуванні та виготовленні зварних конструкцій головним чинником оцінки виробленої продукції є співвідношення ціна–якість, яке можна комплексно охарактеризувати як ефективність. Продуктивність та ефективність праці при зварюванні багато в чому залежать від вірно обраного технологічного рішення й оптимального налаштування обладнання, що використовується.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом і предметом дослідження є способи зварювання, які застосовуються при з'єднанні металу великих товщин, їхні основні параметри, умови та обмеження щодо застосування.

У залежності від товщини матеріалів, що зварюються, можливості проведення робіт у цеху чи

в монтажних умовах; положення та геометрії стику (горизонтальна, вертикальна чи нахилена площина, прямий чи криволінійний стик); доступності до стику для застосування того чи іншого обладнання та оснастки; забезпечення необхідних параметрів якості, продуктивності та ефективності можуть використовуватися різні способи зварювання: ручне дугове зварювання (ММА); напівавтоматичне та автоматичне зварювання в захисних газах (MIG, MAG); електронно-променево (EBW), плазмово (PAW), лазерне (LBW) та їх поєднання; зварювання під флюсом (SAW) або його комбінації з використанням різних типів присадних елементів (суцільний чи порошковий дріт, стрічки, плавкі мундштуки); електрошлакове зварювання (ESW).

Мета та задачі дослідження. Мета дослідження полягає в аналізі існуючих технологій зварювання в різних просторових положеннях металу великих товщин для можливості вибору оптимального способу зварювання, який забезпечить отримання якісних зварних з'єднань та економічну ефективність зварювальних робіт при виготовленні різноманітних металоконструкцій.

Методи досліджень. Методи даного дослідження мають два рівні:

1. Емпіричний – пошук і накопичення наукової інформації за допомогою пошукових систем і баз даних, бібліографічний та ручний пошук даних за досліджуваною темою.

2. Теоретичний – вивчення, аналіз і співставлення існуючих сучасних високоефективних технологій зварювання металу великих товщин.

Результати досліджень. Розглянемо основні методи, які застосовуються для зварювання деталей великих товщин, їхні основні параметри, умови та обмеження щодо застосування.

Електронно-променеве зварювання (EBW). Одним із методів зварювання металу великих товщин є однопрохідне електронно-променеве зварювання (EBW). Даний спосіб застосовується, в основному, для зварювання тугоплавких і хімічно активних матеріалів [3]. Відомо про використання даного способу зварювання для жароміцних сталей 10X9MФБА та 10X12М завтовшки 30 мм [4], супердуплексної сталі марки 2507 завтовшки 20 мм [5]. При цьому якість зварного шва та можливу появу дефектів при EBW металів великих товщин пов'язують зі специфікою формування швів у різних просторових положеннях та особливостями конструкції з'єднань [3].

Слід зазначити, що висока концентрація енергії в промені призводить до утворення специфічної форми зварного шва при EBW (рис. 1) з характерними мінімальними розмірами зони термічного впливу, великим співвідношенням глибини до ширини проплавлення (до 20:1 та більше), а сам виріб має незначні термічні деформації [6].

Незважаючи на суттєві досягнення, повний потенціал процесу EBW не знайшов широкого застосування при зварюванні товстих секцій і великих конструкцій через обмеження, пов'язані з роботою у високому вакуумі, коли вся зварювана конструкція знаходиться у вакуумній камері [8].

В останні десятиліття розроблені нові технологічні можливості EBW без камери [9, 10]. На рис. 2 показано зварний шов, виконаний у нижньому положенні із низьколегованої сталі за допомогою імпульсного невакуумного електронного променя.

Слід зазначити, що зона з'єднання має майже паралельні сторони з добре закругленим закін-



Рис. 1. Макрошліф зварного з'єднання, отриманого електронно-променевим зварюванням у вакуумі [7]



Рис. 2. Зварний шов, виконаний у нижньому положенні, з низьколегованої сталі з імпульсним променем NVEB, глибина провару 22 мм [7]

ченням. За винятком дрібних пор, зона плавлення була задовільною. Зварювання проводилось при середній потужності 26,3 кВт при швидкості зварювання 480 мм/хв.

Незважаючи на переваги способу EBW (висока швидкість зварювання, малі витрати зварювального матеріалу), для отримання якісного зварного шва необхідною умовою є ретельна підготовка кромки і застосування коштовного обладнання, а також, у більшості випадків, необхідність використання вакуумної камери, що обмежує габарити зварюваної деталі. До того ж, зварювання може виконуватись лише в нижньому або в горизонтальному положенні на вертикальній площині, що обмежує застосування даного способу.

Лазерне зварювання (LBW). Лазерне зварювання, на відміну від EBW, не потребує вакууму та може застосовуватись при зварюванні на повітрі [11], а також має ряд явних переваг перед іншими процесами зварювання:

- мінімальна усадка та деформація;
- можливість автоматизації з високою швидкістю руху;
- високе співвідношення глибини до ширини (глибоке проникнення з вузькою шириною валика);
- мала зона теплового впливу;
- можна використовувати на вузлах неправильної форми або у важкодоступних місцях.

Як і всі зварювальні процеси, лазерне зварювання необхідно ретельно контролювати, щоб забезпечити якість. Погано контрольований процес призводить до утворення тріщин, пористості, недостатнього проникнення та відсутності плавлення – будь-що з них може призвести до руйнування зварного з'єднання. Впродовж останніх десяти

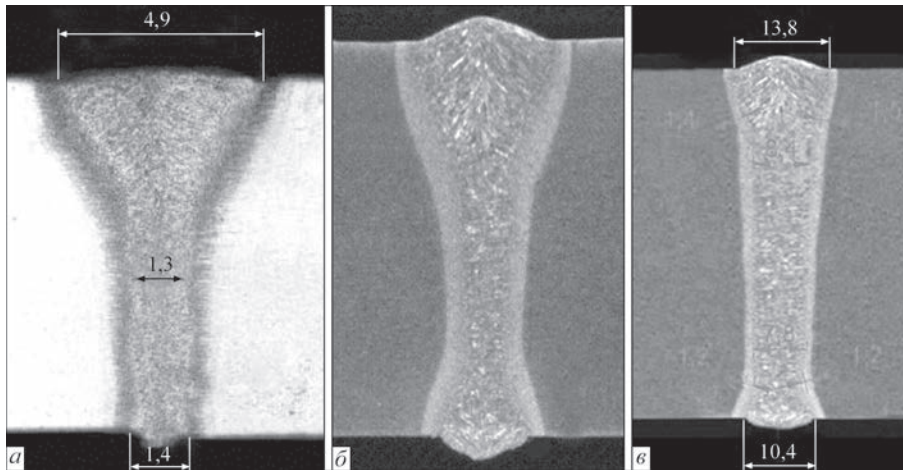


Рис. 3. Характер проплавлення при лазерному зварюванні сталей CO_2 -лазерами: *a* – сталь завтовшки 10 мм, $P_{\text{випр}} = 10$ кВт, $V_{\text{зв}} = 1$ м/хв.; *б* – сталь завтовшки 30 мм, $P_{\text{випр}} \approx 28$ кВт, $V_{\text{зв}} = 1$ м/хв; *в* – сталь завтовшки 50 мм, $P_{\text{випр}} \approx 55$ кВт, $V_{\text{зв}} = 1$ м/хв [14]

років стали доступними (сучасні) твердотільні та волоконні лазери, які дозволяють без короблення зварювати в один шар листи із низьколегованих і вуглецевих конструкційних сталей з товщиною стінки до 10 мм та більше, з високою швидкістю зварювання (на рівні 2 м/хв) [12].

У [13] автори наводять дані щодо зварювання з глибоким проплавленням конструкційної сталі S355 EN 10025 завтовшки 20 і 25 мм за допомогою волоконного лазера високої потужності (12...30 кВт).

У [14] показано, що при дотриманні оптимальних параметрів лазерного зварювання на CO_2 -лазерах успішно проводиться процес проплавлення металу різної товщини із задовільним формуванням зварного шва та заданих геометричних параметрів (рис. 3).

Авторами [13] зазначалося, що лазерне зварювання надвисокої потужності (UHPLW) з потужністю лазера 10 кВт та вище стикається з декількома проблемами зварювання товстолістової сталі (більше 10 мм), такими як: розбризкування, корінний горб, пористість і тріщини при охолодженні зварного з'єднання. Крім того, неоднорідна мікроструктура та низькі механічні властивості залишаються складними, не до кінця вирішеними проблемами, які перешкоджають широкому використанню лазерних технологій зварювання товстолістової сталі та вимагають пошуку шляхів для їхнього вирішення.

Плазмове зварювання (PAW). Плазмове зварювання має переваги перед зварюванням лазерним променем (LBW) та зварюванням електронним променем (EBW) за вартістю обладнання, меншими вимогами до підготовки з'єднань і зручністю експлуатації [15].

Для зварювання металу завтовшки більше 6 мм застосовують режим «keyhole» [16]. При цьому

основний метал частково розплавляється під дією високого теплового потоку від дуги, а поверхня зварювальної ванни поступово проштовхується вниз під дією тиску дуги, що призводить до утворення глухої замкової щілини в основному металі, а потім досягається повне проплавлення, що утворює відкриту замкову щілину [17]. У [15, 18, 19] наведено дані щодо отримання якісних зварних з'єднань сталі даним способом завтовшки до 12,7 мм, нержавкої сталі AISI 304HCu [20] до 9,0 мм, для зварювання сталі марки SS 304 Н завтовшки 6 мм [21] та марки 316 [22].

Різновидом зварювання в замкову щілину є розроблений фірмою Fronius процес TIG-зварювання, відомий як ArcTig. Суттєві відмінності між цим процесом і плазмовим зварюванням у замкову щілину полягають у наступному: замість використання плазмового газу технологія ArcTig використовує високоефективне охолодження широкою зоною для концентрації дуги. Це дозволило знизити температуру на вольфрамовому електроді, що призводить до висококонцентрованої і, отже, ефективної дуги з високою щільністю енергії. Процес використовується для однопрохідного зварювання [23]. Одним із позитивних факторів є відсутність потреби попередньої обробки кромки. Цей процес можна використовувати для зварювання матеріалів з товщиною листа до десяти міліметрів.

Незважаючи на те, що фундаментальні дослідження утворення та існування замкової щілини приведені в багатьох наукових публікаціях [24–26], проблема забезпечення стабільності утворення якісного зварного з'єднання остаточно не вирішена. Особливо це стосується зварювання в положеннях, відмінних від нижнього.

Гібридні способи зварювання. До прогресивних способів зварювання, які дозволяють в широких межах регулювати проплавлення сталі та за-

безпечувати високу продуктивність процесу, слід віднести гібридні способи зварювання, такі як лазерно-дугове зварювання [27, 28] та його різновиди: лазерно-дугове зварювання під флюсом [29]; лазерно-дугове зварювання плавким електродом у суміші МІХ [30], неплавким електродом [31].

Незважаючи на всі переваги та можливості гібридних способів зварювання, у своєму подальшому розвитку для даних технологій характерними є певні труднощі, пов'язані з недостатньою щільністю енергії і складністю здійснення процесу на великих швидкостях, коли відбувається обрив дуги та, як наслідок, отримання нестабільного проплавлення.

Більш практичними та економічно доцільними для зварювання сталей великих товщин, особливо у положення, відмінному від нижнього, є використання дугових та електрошлакових процесів зварювання.

Ручне дугове зварювання (ММА), напівавтоматичне та автоматичне зварювання в захисних газах (MIG, MAG). Незважаючи на широке застосування в промисловості, процес ручного дугового зварювання покритими електродами для сталей великої товщини застосовується переважно в ремонтних цілях, коли використання інших способів неможливе або буде менш раціональним. Це пов'язано з низькою продуктивністю та необхідністю проведення додаткових робіт (очищення металу шва після кожного проходу), підвищеною увагою до контролю якості з'єднання (металу шва та зони термічного впливу), вимагає високої кваліфікації зварника, особливо при зварюванні деталей відповідальних конструкцій та при виконанні швів у просторових положеннях, відмінних від нижнього.

Схожі проблеми є характерними для способів зварювання в середовищі захисних газів (MIG/MAG/TIG). Крім описаних вище недоліків, додатково необхідно забезпечити захист від вітру в монтажних умовах.

Зварювання під флюсом. Зварювання під флюсом – один з основних способів зварювання металу середніх і великих товщин. Даний спосіб дозволяє виконувати зварювання деталей завтовшки від 2 до 500...700 мм (одно- та багатопрохідне виконання) [32, 33]. Завдяки високому рівню механізації та автоматизації, якості отриманих зварних з'єднань, високій продуктивності він широко використовується при серійному виробництві для виконання швів великої довжини. Проте даний метод в основному застосовується при зварюванні в нижньому положенні. При необхідності зварюван-

ня вертикальних або відмінних від горизонтального положення швів необхідне застосування додаткового обладнання: формуючих пристроїв, систем корегування положення дроту та ін. Досить часто в якості зварювального дроту при зварюванні під флюсом використовують порошкові дроти.

Механізоване та автоматизоване зварювання порошковим самозахисним дротом або з додатковим захистом у вуглекислому газі дозволяє виконувати зварювання в різних просторових положеннях, забезпечує високу якість з'єднання, має підвищену продуктивність [34]. Спосіб широко застосовується для зварювання товщин в діапазоні 10...25 мм, особливо при роботі в монтажних умовах.

Основними технологічними недоліками є: можливість отримання дефектів при порушенні технології, підвищений рівень виділення аерозолів, обмежений візуальний контроль за ванною. Також одним з негативних факторів є висока вартість дротів, оскільки вони виготовляються в обмеженій кількості під конкретні задачі.

Методи електродугового зварювання в захисних газах і під флюсом з примусовим формуванням шва. В ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України Г.З. Волошкевичем був розроблений метод зварювання стиків великої товщини з примусовим формуванням металу шва [35], що забезпечує суттєве підвищення продуктивності зварювання вертикальних стиків [36]. Зварювання з примусовим формуванням шва здійснюється на установках автоматизо-

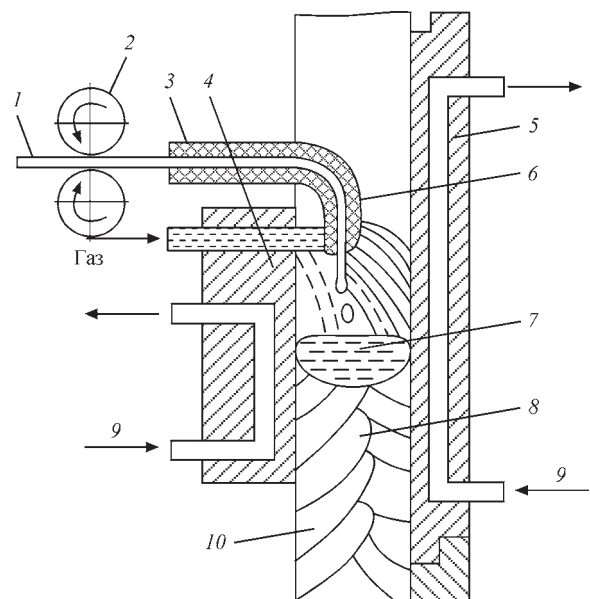


Рис. 4. Схема зварювання плавким електродом у захисному газі вертикального шва з примусовим формуванням шва [37]: 1 – зварювальний дріт; 2 – механізм подачі дроту; 3 – струмопідвідний мундштук; 4, 5 – водоохолоджувані мідні повзуни; 6 – сопло; 7 – зварювальна ванна; 8 – зварний шов, що закристалізувався; 9 – вода; 10 – виріб

ваного зварювання та можливе в усіх положеннях; розплавлений метал утримується та формується охолоджуваними повзунами (рис. 4).

Залежно від товщини металу зварювання проводять одним або декількома електродними дротами [37, 38]. Діапазон зварюваних товщин становить 8...40 мм. Метод знайшов своє застосування при спорудженні резервуарів, корпусів суден, шахтних кріплень, трубопроводів, двотаврових балок та ін.

У [38, 39] описано метод електродугового зварювання з примусовим формуванням шва порошковим дротом, як самозахисним, так і з додатковим газовим захистом. Спосіб не тільки забезпечує високу продуктивність розплавлення дроту, а й став безальтернативним для виконання швів за один/два проходи в різних просторових положеннях, як кільцевих на трубопроводах, газгольдерах, сферичних резервуарах, так і «на стелі» при зварюванні горизонтальних поясів конструкцій з металу завтовшки не менше 25 мм. Метод успішно застосовується в суднобудуванні. Корпуси суден зі сталі ВМСт.3сп. та 09Г2 зварюють на стапелі порошковим дротом ПП-АН5 за допомогою апаратів А-1150. Це дозволяє підвищити продуктивність монтажних робіт на корпусі судна, покращити зовнішній вигляд швів і зменшити залишкові деформації.

Зварювання металу завтовшки 50...70 мм виконують двома електродними дротами суцільного

перерізу або порошковими з коливаннями вздовж стику. В якості захисту зварювальної ванни використовують вуглекислий газ. Метод використовується при зварюванні бокових комінгсів люків (товщина листа 58 мм) великогабаритних контейнеровозів на верфі та машинобудівному заводі Mitsubishi Heavy Industries Limited у Кобе [40].

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено метод зварювання з примусовим формуванням вертикальних швів під тонким шаром розплавленого шлаку (рис. 5) дротами суцільного перерізу [41, 42]. Дослідження з відпрацювання техніки такого виконання швів показали перспективність способу, позаяк він поєднав у собі стабільний перебіг процесу та надійний захист зварювальної ванни.

У [43] запропоновано новий спосіб автоматичного однопрохідного електродугового зварювання закладним електродом зразків із низьковуглецевих (Ст3), низьколегованих (09Г2С, 10ХСНД, 16Г2АФ) і високолегованих корозійностійких (08Х18Н10Т, 08Х17Н13М2Т) сталей завтовшки 20...100 мм, яке виконується у вертикальному положенні деталей, що зварюються, і призначений в основному для зварювання коротких (до 1000 мм) стиків, у тому числі в монтажних умовах (рис. 6). Застосування пластинчастого електрода з ізолюючим покриттям дозволяє зменшити зазор між зварюваними кромками до 8...12 мм, завдяки чому, на думку авторів, значно покращуються техніко-економічні показники процесу зварювання металу.

Незважаючи на привабливу простоту здійснення зварювання та задовільні властивості зварних з'єднань лабораторних зразків, цей спосіб не знайшов широкого практичного застосування у зв'язку

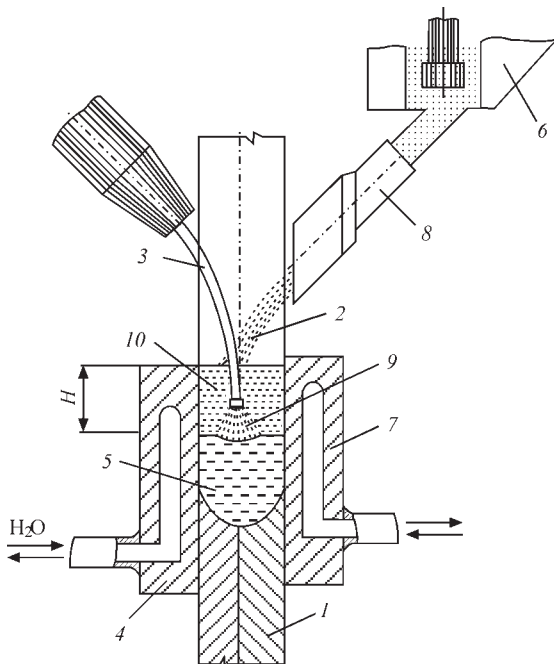


Рис. 5. Схема методу зварювання з примусовим формуванням вертикальних швів під тонким шаром розплавленого шлаку дротами суцільного перерізу: 1 – зварний шов; 2 – флюс; 3 – електродні дроти; 4 – передній повзун; 5 – зварювальна ванна; 6 – флюсобункер; 7 – задній формуючий повзун; 8 – мідне сопло; 9 – зварювальна дуга; 10 – рідкий шлак

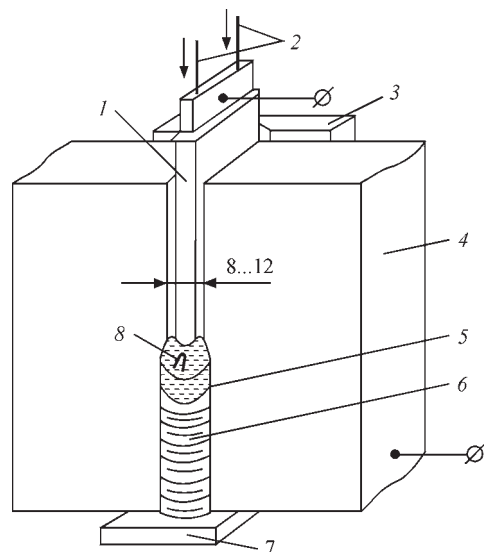


Рис. 6. Схема електродугового зварювання закладним електродом: 1 – закладний електрод; 2 – присадний дріт; 3 – формуючі накладки; 4 – зварюваний виріб; 5 – зварювальна ванна; 6 – зварний шов; 7 – підкладка; 8 – дуга

зі складністю управління процесом, що не дозволяє забезпечувати гарантоване сплавлення основного та присадного металу.

Описані методи знайшли своє використання у зварювальному виробництві, проте властиві їм певні недоліки не дозволяють істотно розширити області їхнього застосування.

Методи зварювання з примусовим формуванням вертикальних швів під тонким шаром розплавленого шлаку дротами суцільного перерізу та в захисному газі мають такі недоліки:

- відсутність для зварювання в монтажних умовах компактного механізму протяжки двох дротів, що забезпечував би надійну та стабільну їхню подачу в зварювальну ванну;
- відсутність механізму позиціонування дротів у щілині між зварюваними кромками;
- флюс АН-47, під яким виконувався процес, не забезпечував стабільність зварювання;
- значно погіршуються умови захисту зварювальної ванни під час виконання зварювальних робіт у монтажних умовах, особливо на висоті, за рахунок дії вітрового навантаження;
- відсутня можливість якісного формування зварних швів у разі бокового відхилення стику від вертикалі понад 30°;
- випромінювання дуги не дозволяє візуально спостерігати за позиціонуванням зварювального дроту між кромками.

Електрошлакове зварювання (ESW). У [44] описано, що для зварювання вертикальних стикових з'єднань кожухів доменних печей вперше у світовій практиці було розроблено та успішно ре-

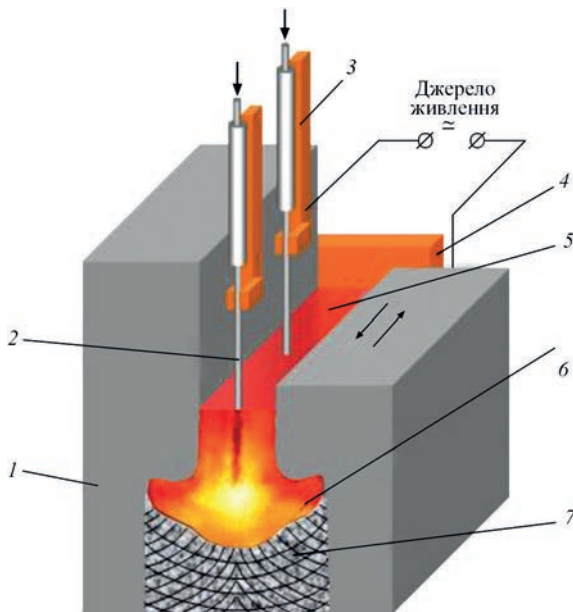


Рис. 7. Схема ESW електродними дротами: 1 – зварювана кромка; 2 – електродний дріт; 3 – струмопідвод; 4 – водоохолоджуваний повзун; 5 – шлакова ванна; 6 – металева ванна; 7 – зварний шов

алізовано новий спосіб електричного зварювання плавленням, який отримав назву – електрошлакове зварювання (ESW) (рис. 7). Цей спосіб відрізнявся цілим рядом технічних і технологічних переваг щодо існуючих промислових способів зварювання плавленням [45].

При виробництві обладнання важкого машинобудування, виготовленні великогабаритних зварних конструкцій у будівництві, суднобудуванні та інших галузях найбільше застосування отримали два способи: електрошлакове зварювання дротяним електродом (WEESW) і плавким мундштуком (FNESW). Цими способами виконуються основні види з'єднань (стикові, кутові, таврові) і типи швів (прямолінійні, кільцеві, змінного профілю) завтовшки 40...200 мм.

На ПАТ «НКМЗ» спільно з ІЕЗ ім. Є.О. Патона створено єдину в світі установку для FNESW (рис. 8) металу, зварюваний переріз шва якого може досягати розмірів 4000×6000 мм [46]. За останні майже 20 років на установці було зварено унікальні металоконструкції [47] станин прокатних станів та іншого обладнання важкого машинобудування (рис. 9).

Типові області застосування електрошлакового зварювання: з'єднання великих виливків; поздовжні зварні шви в циліндричних судинах під тиском; корпуси доменних і кисневих печей; ребра жорсткості верхньої палуби суден; виробництво великих морських контейнеровозів, завантажувальні люки яких необхідно виготовляти зі сталевих листів завтовшки 70...100 мм [48]; арматури зі зміцненої сталі марки 20MnSiV [49]; зварювання кільцевих стиків пресів, печей, корпусів двигунів, коліс для асфальтових машин, стиків суднових



Рис. 8. Зовнішній вигляд установки ESW плавким мундштуком для з'єднання металу, зварюваний переріз якого може досягати розміру 4000×6000 мм



Рис. 9. Зварна заготовка траверси гідравлічного пресу. Маса заготовки 150 т, переріз шва (показано стрілкою), виконаного ESW плавким мундштуком, 2490×3860 мм

пластин і виливків деталей завтовшки 13...400 мм на хімічних, нафтових, морських та енергетичних установках [50].

Спосіб ESW має ряд характерних переваг: високу продуктивність (за швидкістю плавлення присадного металу поза конкуренцією) і стійкість процесу; глибоку металургійну обробку металу зварного шва (відсутність дефектів у вигляді пор і шлакових включень); можливість зварювання металу надмірно великих товщин; економічність процесу; невисоку чутливість до якості підготовки кромки; порівняно низьку вартість зварювальних матеріалів.

Основним недоліком ESW є високе тепловкладення, що пов'язано з природою самого процесу, розмірами з'єднання та зварювальної ванни, застосуванням електродних дротів діаметром від 3 мм, необхідною високою потужністю джерела живлення для дотримання технологічних параметрів режимів. Це призводить до росту зерна металу шва та зони термічного впливу, внаслідок цього знижуються механічні характеристики з'єднання, особливо відчутно – ударна в'язкість при низьких температурах. Для їх підвищення застосовується високотемпературна обробка (ВТО), яка може бути обмеженою або взагалі неможливою, враховуючи габарити конструкцій або монтажні умови зварювання.

З метою розширення сфери застосування ESW проводяться дослідження методів і технологічних прийомів можливості зниження рівня тепловкладення.

Так, у [51] наведено та детально описано застосування способу ESW плавким мундштуком

у вузький зазор для виготовлення двадцяти зварних швів в опорній вежі моста, розташованого в Сан-Франциско/Окленд. Довжина кожного однопрохідного шва становила 10 м, товщина стиків – 100 та 60 мм. Згідно з матеріалами [52] AASHTO (Американська асоціація державних доріг та транспорту, США) визнала останній метод ESW у вузький зазор (ESWNG) придатним для зварювання звичайних типів мостових сталей та включила його в код зварювання мостів (AWS D1.5: 2010). Сучасні досягнення в області ESW, втілені в ESWNG, використовуються на будівельних майданчиках висотних будівель і спорудження мостів.

У [53] показано, що за рахунок використання біфілярної схеми живлення вдалося зменшити зазор, глибину проплавлення, покращити енергетичні показники процесу.

Розроблена авторами [54] схема живлення дозволила значно підвищити швидкість зварювання, у результаті чого вдалося досягти задовільних показників якості з'єднання без виконання ВТО.

У [55, 56] досліджено можливість виконання ESW у вузький зазор сталей завтовшки від 20 мм за рахунок використання дротів малого діаметра (1,6 і 2,0 мм) та сучасних інверторних джерел живлення та високошвидкісних механізмів подачі.

Висновки

1. Проведено аналіз існуючих технологій зварювання в різних просторових положеннях металу великих товщин для можливості вибору оптимального способу зварювання із забезпеченням отримання якісного зварного з'єднання та економічної ефективності робіт.

2. Розвиток науково-технічної бази дозволив розробити обладнання й технології зварювання сталей завтовшки 30...100 мм із застосуванням таких методів як: плазмове, лазерне та електронно-променеве зварювання. Однак застосування висококонцентрованих джерел енергії вимагає істотної перебудови всього виробництва: підвищення культури виробництва, заміни основного й допоміжного обладнання, перепідготовки персоналу, підвищення точності заготівельних і складальних операцій. Це призводить до додаткових витрат і зниження економічної ефективності процесів виробництва.

3. Такі електродугові способи як MMA та MIG/MAG/TIG, які характеризуються низькою продуктивністю, негарантованою якістю сплавлення присадного матеріалу з основним, можливістю утворення міжшарових дефектів у вигляді шлакових включень, пор, застосовуються переважно при ре-

монтному зварюванні, коли використання інших методів неможливе або нераціональне.

4. Механізовані електродугові та електрошлаковий способи займають лідируючі позиції за обсягом застосування для зварювання металів великих товщин, зокрема у вертикальному положенні, завдяки таким ключовим перевагам як: висока продуктивність і стійкість процесу ESW, а також технологічні можливості зварювання практично необмеженої товщини металу.

5. Враховуючи проведений аналіз, можна стверджувати про перспективність і необхідність подальших досліджень щодо розробки та вдосконалення технологій зварювання металу великих товщин як найбільш поширених способів EAW та ESW, так і з використанням висококонцентрованих джерел енергії (EBW, PAW, LBW).

Список літератури

1. Григоренко Ю. (2024) *Відновлення інфраструктури підтримало попит на сталь в Україні у 2023 році*. <https://gmk.center/ua/posts/vidnovlennia-infrastruktury-pidtrymalo-popyt-na-stal-v-ukraini-u-2023-rotsi/>
2. (2024) *Огляд ринку металокопонування 2022-2023*. Український центр сталевих будівництв (УЦСБ). Асоціація учасників ринку металокопонування. https://uscc.ua/uploads/page/images/publications/oglyad_rynku_2023.pdf
3. Кайдалов А. (2004) *Электронно-лучевая сварка и смежные технологии*. Киев, Экотехнология.
4. Нестеренков В.М., Кравчук Л.А., Архангельский Ю.А., Бондарев А.А. (2013) Формирование сварных швов при электронно-лучевой сварке жаропрочных сталей марок 10X9MФБА и 10X12М. *Автоматическая сварка*, **6**, 39–43. <https://patonpublishinghouse.com/rus/journals/as/2013/06/07>
5. Tóth, T., Hesse, A.-C., Kárpáti, V., Mertinger, V., Dilger, K. (2024) Microstructural and mechanical properties of electron beam welded super duplex stainless steel. *Welding in the World*, **68**, 1929–1940. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-024-01680-1>
6. Терещенко В.И., Либанов А.В. (1987) *Выбор и применение способов сварки при изготовлении конструкций*. Киев, Наукова думка.
7. Schubert, G. *Electron Beam Welding – Process, Applications and Equipment*. https://www.ptreb.com/sites/default/files/papers/Electron_Beam_Welding_Process_Applications_and_Equipment2.pdf
8. (2007) *EB welding of large components without a vacuum chamber (April 2007)*. TWI Ltd. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/eb-welding-of-large-components-without-a-vacuum-chamber-april-2007>
9. Бах Ф.В., Беньяш А., Лау К., Конья Р. (2009). Вневакуумная электронно-лучевая сварка конструкционных сталей. *Автоматическая сварка*, **5**, 29–34. <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/2009/05/05>
10. (2022) *Ebflow Reduces 200mm Steel Welding Time to 3 Hours*. Cambridge Vacuum Engineering. <https://camvaceng.com/ebflow-reduces-200mm-steel-welding-time-from-3-months-to-3-hours/>
11. Dawes, C. (1992) *Laser Welding. A Practical Guide: Chapter 2. Principles of laser welding and its characteristics*. Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, pp. 19–30. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845698843.16>
12. Бернацький А.В. (2022) *Огляд наукових праць, присвячених дослідженню впливу складових процесів лазерного та гібридного лазерно-дугового зварювання на формування структури та рівень механічних характеристик зварних з'єднань конструкційних сталей*. Baltija Publishing. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8-3>
13. Yuantai Li, Shaoning Geng, Leshi Shu, Yan Li, Ping Jiang (2023) Ultra-high-power laser welding of thick-section steel: Current research progress and future perspectives. *Optics & Laser Technology*, **167**, 109663. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109663>
14. Григорьянц А.Г., Грезев А.Н., Грезев Н.В. (2012) *Лазерная сварка сталей больших толщин с применением мощных оптоволоконных и CO₂-лазеров*. Машиностроение.
15. Zu Ming Liu, Shuang Lin Cui, Zhen Luo, Chang Zhen Zhang, Zheng Ming Wang, Yu Chen Zhang (2016) Plasma arc welding: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling. *J. of Manufacturing Processes*, **23**, 315–327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.04.004>
16. Weman, K. (2012) *Plasma welding Welding Processes Handbook (Second Edition)*. Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857095183.71>
17. Tashiro, S. (2024) Interaction mechanism of arc, keyhole, and weld pool in keyhole plasma arc welding: A review. *Materials*, **17**(6), 1348. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17061348>
18. Кривцун І.В., Квасницький В.В., Максимов С.Ю., Сролаєв Г.В. (2017) *Спеціальні способи зварювання. Підручник*. Патон Б.С. (Ред.). Миколаїв, НУК.
19. Sakuramoto, Y., Wada, K., Kanemaru, S., Kamei, T. (2013) Application of plasma welding process for manufacturing of stainless steel cylindrical vessel. In: *Taiyo Nippon Sanso Technical Report*, Taiyo Nippon Sanso, Tokyo, Japan, Volume 32, pp. 33–34. (In Japanese).
20. Sam Infant Jones, P.G., Rajakumar, S., Kavitha, S., Balasubramanian, V. (2022) Experimental studies on keyhole plasma arc welding process parameters of AISI 304 HCu stainless steel tube joints. *Welding International*, **36**(11), 655–667. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2022.2151386>
21. Harish, T.M., Jerome, S., Yadukrishna, B., Rishi, S., Kumar C. (2019) Midhun suresh and krishnakanth ramesh assessment of microstructure and mechanical properties of keyhole plasma arc welded similar butt joint of AISI 304 H austenitic stainless steel. *Materials Research Express (Online)*, **6**(11), 1165b2. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/ab4e04>
22. Emmanuel Sam Franklin, D., Vijay, S.J., Mohanasundaram, S., Kantharaj, I., Hiran Gabriel, D.J. (2021) A study on plasma keyhole welding of stainless steel grade 316. *Materials Today: Proceedings*, **47**(19), 6908–6912. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.187>
23. (2020) *Keyhole welding – definition and variants*. Fronius. Perfect Welding Blog. <https://blog.perfectwelding.fronius.com/en/keyhole-welding-plasma-tig-arctig/>
24. Li Yan, Yun Ze, Zhou Xiang, Wu Chuansong (2023) Fundamental understanding of open keyhole effect in plasma arc welding. *Physics of fluids*, **35**, 043316. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0144148>
25. Jia, C.B., Liu, X.F., Zhang, G.K., Zhang, Y., Yu, C.H., Wu, C.S. (2021) Penetration/keyhole status prediction and model visualization based on deep learning algorithm in plasma arc welding. *The International J. of Advanced Manufacturing Technology*, **117**, 3577–3597. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07903-9>
26. Li, Y., Wang, L., Wu, C. (2019) Simulation of keyhole plasma arc welding with electro-magneto-thermo-hydrodynamic interactions. *The International J. of Advanced Manufacturing Technology*, **101**, 2497–2507. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3067-6>
27. Кривцун І.В., Хаскин В.Ю., Коржик В.Н., Ло Цзыи (2015) Промышленное применение гибридной лазерно-дуговой сварки (Обзор). *Автоматическая сварка*, **7**, 44–50. <https://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2015/as201507all.pdf>
28. Acherjee, B. (2018) Hybrid laser arc welding: State-of-art review. *Optics & Laser Technology*, **99**, 60–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.09.038>
29. Райзген У., Ольшок С. (2009) Гибридная лазерно-дуговая сварка под флюсом. *Автоматическая сварка*, **4**, 46–51. <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/2009/04/08>

30. Üstündağ, Ö., Bakir, N., Gook, S., Gumenyuk, A., Rethmeier, M. (2022) Hybrid laser-arc welding of laser-and plasma-cut 20-mm-thick structural steels. *Welding in the World*, **66**(3), 507–514. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-022-01255-y>
31. Кривцун І.В., Крикент І.В., Демченко В.Ф., Райсген У., Забиров А.Ф., Мокров О.А. (2015) Взаимодействие излучения СО₂-лазера с плазмой аргоновой дуги при гибридной (лазер + ТИГ) сварке. *Автоматическая сварка*, **3-4**, 7–16. <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/2015/04/01>
32. Царюк А.К., Левченко С.В., Гришин М.М., Вавілов А.В., Кантор А.Г., Бивалькевич А.І. (2020) Зварювання в енергетичній промисловості України. *Автоматичне зварювання*, **3**, 29–34. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.03.03>
33. Царюк А.К., Скульський В.Ю., Єлагін В.П., Осипенко І.Г. (2025) Технологічна міцність з'єднань сталі 25ХН3МФА при зварюванні під флюсом. *Автоматичне зварювання*, **2**, 29–37. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2025.02.04>
34. Романюк В.С., Ковалев В.Д., Резник С.А., Семененко А.Н. (2011) Высокопродуктивная сварка неповоротных стыков труб порошковой проволокой с принудительным формированием шва. *Сварщик*, **2**, 23–25. <https://welder.stc-paton.com/pdf/welderua201102.pdf>
35. Волошкевич Г.З. (1949) Автоматическая сварка вертикальных швов. *Трубы по автоматической сварке под флюсом ИЭС им. Е.О. Патона*, **6**, 81–90.
36. Волошкевич Г.З. (1951) Метод принудительного формирования и его применение. *Автоматическая сварка*, **1**, 5–19.
37. (2006) *Машиностроение. Энциклопедия*. Патон Б.Е. (Ред.). Т.III. Машиностроение.
38. Походня І.К., Дубовецький В.Я., Шлепаков В.Н. и др. (1966) Дуговая сварка вертикальных швов с принудительным формированием. *Автоматическая сварка*, **11**, 67–70.
39. Походня І.К., Суптель А.М., Шлепаков В.Н. (1972) *Сварка порошковой проволокой*. Киев, Наукова думка.
40. Sasaki, K., Suda, K., Motomatsu, R., Hashiba, Y., Ohkita, S., Imai, S. (2004) Development of two-electrode electrogas arc welding process. *Nippon Steel Technical Report*, **90**, 67–74. <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9013.pdf>
41. Ющенко К.А., Яблонский Б.В., Крицкий М.В. (1993) *Способ вертикальной дуговой сварки под флюсом*. А.с. 927441 СССР. МКИ В23К 9/18.
42. Яблонский Б.В. (1988) Техника двухэлектродной сварки вертикальных стыков с принудительным формированием шва под слоем шлака. *Автоматическая сварка*, **5**, 56–59.
43. Кузьменко Г.В., Кузьменко В.Г., Галинич В.И., Отроков В.В., Лактионов М.А. (2006) Однопроходная электродуговая сварка закладным электродом металла большой толщины. *Автоматическая сварка*, **6**, 44–49. <https://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2006/as200606all.pdf>
44. Волошкевич Г.З. (1956) *Способ электрической сварки плавлением*. А.с. 104248 СССР. МПК 21 В29/13.
45. (1980) *Электрошлаковая сварка и наплавка*. Патон Б.Е. (Ред.). Машиностроение.
46. Невидомский В.А., Красильников С.Г., Панин А.Д., Гулида В.П. (2002) Новая установка для электрошлаковой сварки крупных элементов на АО Новокраматорский машиностроительный завод. *Автоматическая сварка*, **2**, 50–52. <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/2002/02>
47. Шаповалов К.П., Белинский В.А., Мерзляков А.Е., Косинов С.Н., Ющенко К.А., Лычко И.И., Козулин С.М. (2016) Электрошлаковая сварка крупногабаритной станины пресса. *Автоматическая сварка*, **8**, 43–46. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2016.08.07>
48. Uemori, R., Fujioka, M., Inoue, T., Minagawa, M., Ichikawa, K., Shirahata, H., Nose, T. (2012) Steels for marine transportation and construction. *Nippon Steel Technical Report*, **101**, 37–47. https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/NSTR101-08_tech_review-1-2.pdf
49. Патон Б.Е., Ющенко К.А., Козулин С.М., Лычко И.И. (2019) Электрошлаковый сварочный процесс. Анализ состояния и тенденции развития (Обзор). *Автоматическая сварка*, **10**, 36–46. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.10.05>
50. Kaluç, E., Taban, E., Dhooge, A. (2006) Elektrocüruf kayanak yöntemi ve endüstriyel uygulamaları (Electroslag welding process and industrial applications). *Met. Dünyası*, **152**, 100–105. <https://metaldunyasi.com.tr/>
51. Turpin, B., Danks, D., Callaghan, I., Wood, W. (2012) Narrow gap electroslag is process of choice for welding San Francisco-Oakland Bay Bridge. *Welding J.*, **91**(5), 24–31.
52. Janice, J., Chambers, Brett R. (2016) Manning. Electroslag welding: From Shop to Field. *Structure magazine, February*. <https://www.structuremag.org/article/electroslag-welding-from-shop-to-field/>
53. Ланкін Ю.М., Бондаренко О.П., Тюкалов В.Г., Соловійов В.Г., Романова І.Ю. (2022) Експериментальне дослідження біфілярного електрошлакового зварювання із зрівняльним дротом. *Автоматичне зварювання*, **3**, 34–37. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.03.04>
54. Бондаренко О.П., Москаленко В.Г., Тюкалов В.Г., Белецкий Ю.А. (1994) Новая технология электрошлаковой сварки толстолистовых сталей без последующей термобработки. *Автоматическая сварка*, **12**, 3–4.
55. Онищенко П.І., Козулін С.М. (2025) Электрошлаковое зварювання сталі 09Г2С малої товщини. *Автоматичне зварювання*, **4**, 47–53. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2025.04.07>
56. Onyshchenko, P.I., Kozulin, S.M., Marynenko, S.Y. et al. (2025) A study of the features of electroslag welding of 09G2 steel with two electrode wires. *Strength of Mater.*, **57**, 559–566. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-025-00788-z>

References

- Hryhorenko, Y. (2024) Infrastructure restoration supported steel demand in Ukraine in 2023 [in Ukrainian]. <https://gmk.center.ua/posts/vidnovlennia-infrastruktury-pidtrymalo-popyt-na-stal-v-ukraini-u-2023-rotsi/>
- (2024) *Metal Structures Market Review 2022-2023*. Ukrainian Center for Steel Construction (UCSC). Association of Metal Structures Market Participants [in Ukrainian]. https://uscc.ua/uploads/page/images/publications/oglyad_rynku_2023.pdf
- Kaidalov, A. (2004) *Electron-beam welding and adjacent technologies*. Kyiv, Ecotechnology [in Russian].
- Nesterenkov, V.M., Kravchuk, L.A., Arkhangelsky, Yu.A., Bondarev, A.A. (2013) Welds formation in ebow of heat-resistant steels of the grades 10Kh9MFBA and 10Kh12M. *The Paton Welding J.*, **6**, 38–42. <https://patonpublishinghouse.com/rus/journals/tpwj/2013/06/07>
- Tóth, T., Hesse, A.-C., Kárpáti, V., Mertinger, V., Dilger, K. (2024) Microstructural and mechanical properties of electron beam welded super duplex stainless steel. *Welding in the World*, **68**, 1929–1940. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-024-01680-1>
- Tereshchenko, V.I., Lybanov, A.V. (1987) *Selection and application of welding methods in the manufacture of structure*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
- Schubert, G. *Electron Beam Welding – Process, Applications and Equipment*. https://www.ptreb.com/sites/default/files/papers/Electron_Beam_Welding_Process_Applications_and_Equipment2.pdf
- (2007) *EB welding of large components without a vacuum chamber (April 2007)*. TWI Ltd. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/eb-welding-of-large-components-without-a-vacuum-chamber-april-2007>
- Bach, Fr.-W., Beniyash, A., Lau, K., Konya, R. (2009). Non-vacuum electron beam welding of structural steels. *The Paton Welding J.*, **5**, 22–26. <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tpwj/2009/05/05>
- (2022) *Ebflow Reduces 200mm Steel Welding Time to 3 Hours*. Cambridge Vacuum Engineering. <https://camvaceng.com/ebflow-reduces-200mm-steel-welding-time-from-3-months-to-3-hours/>
- Dawes, C. (1992) *Laser Welding. A Practical Guide: Chapt. 2. Principles of laser welding and its characteristics*. Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, 19–30. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845698843.16>
- Bernatsky, A.V. (2022) Review of scientific papers devoted to the study of the influence of the component processes of laser and hybrid laser-arc welding on the formation of the structure and the level of mechanical characteristics of weld-

- ed joints of structural steels [in Ukrainian]. Baltija Publishing. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8-3>
13. Yuantai Li, Shaoning Geng, Leshi Shu, Yan Li, Ping Jiang (2023) Ultra-high-power laser welding of thick-section steel: Current research progress and future perspectives. *Optics & Laser Technology*, **167**, 109663. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109663>
 14. Hryhoryants, A.G., Grezev, A.N., Grezev, N.V. (2012) *Laser welding of thick steels using powerful fiber optic and CO₂ lasers*. Mashinostroenie [in Russian].
 15. Zu Ming Liu, Shuang Lin Cui, Zhen Luo, Chang Zhen Zhang, Zheng Ming Wang, Yu Chen Zhang (2016) Plasma arc welding: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling. *J. of Manufacturing Processes*, **23**, 315–327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.04.004>
 16. Weman, K. (2012) *Plasma welding. Welding Processes. Handbook* (Second Edition). Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857095183.71>
 17. Tashiro, S. (2024) Interaction mechanism of arc, keyhole, and weld pool in keyhole plasma arc welding: A review. *Materials*, **17**(6), 1348. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17061348>
 18. Krivtsun, I.V., Kvasnitsky, V.V., Maksimov, S.Yu., Yermolaev, G.V. (2017) *Special welding methods. Textbook*. By Ed. B.E. Paton. Mykolaiv, NUK [in Ukrainian].
 19. Sakuramoto, Y., Wada, K., Kanemaru, S., Kamei, T. (2013) Application of plasma welding process for manufacturing of stainless steel cylindrical vessel. In: *Taiyo Nippon Sanso Technical Report*, Taiyo Nippon Sanso, Tokyo, Japan, Volume 32, 33–34 [in Japanese].
 20. Sam Infant Jones, P.G., Rajakumar, S., Kavitha, S., Balasubramanian, V. (2022) Experimental studies on key-hole plasma arc welding process parameters of AISI 304 HCU stainless steel tube joints. *Welding International*, **36**(11), 655–667. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2022.2151386>
 21. Harish, T.M., Jerome, S., Yadukrishna, B., Rishi, S., Kumar C. (2019) Midhun suresh and krishnakanth ramesh assessment of microstructure and mechanical properties of key-hole plasma arc welded similar butt joint of AISI 304 H austenitic stainless steel. *Materials Research Express (Online)*, **6**(11), 1165b2. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/ab4e04>
 22. Emmanuel Sam Franklin, D., Vijay, S.J., Mohanasundaram, S., Kantharaj, I., Hiran Gabriel, D.J. (2021) A study on plasma keyhole welding of stainless steel grade 316. *Materials Today: Proceedings*, **47**(19), 6908–6912. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.187>
 23. (2020) *Keyhole welding – definition and variants*. Fronius. Perfect Welding Blog. <https://blog.perfectwelding.fronius.com/en/keyhole-welding-plasma-tig-arctig/>
 24. Li Yan, Yun Ze, Zhou Xiang, Wu Chuansong (2023) Fundamental understanding of open keyhole effect in plasma arc welding. *Physics of Fluids*, **35**, 043316. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0144148>
 25. Jia, C.B., Liu, X.F., Zhang, G.K., Zhang, Y., Yu, C.H., Wu, C.S. (2021) Penetration/keyhole status prediction and model visualization based on deep learning algorithm in plasma arc welding. *The International J. of Advanced Manufacturing Technology*, **117**, 3577–3597. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07903-9>
 26. Li, Y., Wang, L., Wu, C. (2019) Simulation of keyhole plasma arc welding with electro-magneto-thermo-hydrodynamic interactions. *The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, **101**, 2497–2507. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3067-6>
 27. Krivtsun, I.V., Khaskin, V.Yu., Korzhik, V.N., Luo Ziyi (2015) Industrial application of hybrid laser-arc welding (Review). *The Paton Welding J.*, **7**, 41–46. DOI: <http://doi.org/10.15407/tpwj2015.07.07>
 28. Acherjee, B. (2018) Hybrid laser arc welding: State-of-art review. *Optics & Laser Technology*, **99**, 60–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.09.038>
 29. Reisgen, U., Olschok, S. (2009) Laser-submerged arc hybrid welding. *The Paton Welding J.*, **4**, 38–43. <https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/2009/04/08>
 30. Üstündağ, Ö., Bakir, N., Gook, S., Gumenyuk, A., Rethmeier, M. (2022) Hybrid laser-arc welding of laser-and plasma-cut 20-mm-thick structural steels. *Welding in the World*, **66**(3), 507–514. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-022-01255-y>
 31. Krivtsun, I.V., Krikent, I.V., Demchenko, V.F., Reisgen, U., Zabirow, A.F., Mokrov, O.A. (2015) Interaction of CO₂-laser radiation beam with electric arc plasma in hybrid (Laser + TIG) welding. *The Paton Welding J.*, **3-4**, 6–15. DOI: <http://doi.org/10.15407/tpwj2015.04.01>
 32. Tsaryuk, A.K., Levchenko, E.V., Grishin, M.M., Vavilov, A.V., Kantor, A.G., Bivalkevich, A.I. (2020) Welding in power engineering industry of Ukraine. *The Paton Welding J.*, **3**, 19–24. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.03.03>
 33. Tsaryuk, A.K., Skulskyi, V.Yu., Yelagin, V.P., Osipenko, I.G. (2025) Technological strength of 25KhN3MFA steel joints in submerged arc welding. *The Paton Welding J.*, **4**, 37–45. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj.2025.04.06>
 34. Romanyuk, V.S., Kovalev, V.D., Rezyuk, S.A., Semenenko, A.N. (2011) High-performance welding of non-rotating pipe joints with flux-cored wire with forced seam formation. *Svarshchik*, **2**, 23–25 [in Russian]. <https://welder.stc-paton.com/pdf/welderua201102.pdf>
 35. Voloshkevich, G.Z. (1949) Automatic welding of vertical seams. *Trudy PWI*, **6**, 81–90 [in Russian].
 36. Voloshkevich, G.Z. (1951) Method of forced formation and its application. *Avtomaticheskaya Svarka*, **1**, 5–19 [in Russian].
 37. (2006) *Mechanical engineering. Encyclopedia*. Dy Ed. B.E. Paton. Vol. III. Mashinostroenie [in Russian].
 38. Pokhodnya, I.K., Dubovetskyi, V.Ya., Shlepakov, V.N. et al. (1966) Arc welding of vertical seams with forced forming. *Avtomaticheskaya Svarka*, **11**, 67–70 [in Russian].
 39. Pokhodnya, I.K., Suptel, A.M., Shlepakov, V.N. (1972) *Welding with powder wire*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
 40. Sasaki, K., Suda, K., Motomatsu, R., Hashiba, Y., Ohkita, S., Imai, S. (2004) Development of two-electrode electrogas arc welding process. *Nippon Steel Technical Report*, **90**, 67–74. <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9013.pdf>
 41. Yushchenko, K.A., Yablonsky, B.V., Krytskyi, M.V. (1993) *Method of vertical arc welding under flux*. C.c. 927441 USSR. MKI B23K 9/18 [in Russian].
 42. Yablonsky, B.V. (1988) Technique of two-electrode welding of vertical joints with forced formation of a seam under a layer of slag. *Avtomaticheskaya Svarka*, **5**, 56–59 [in Russian].
 43. Kuzmenko, G.V., Kuzmenko, V.G., Galinich, V.I., Otrokov, V.V., Laktionov, M.A. (2006) Single-pass arc welding of thick metal using embedded electrode. *The Paton Welding J.*, **6**, 35–39. <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2006/tpwj200606all.pdf>
 44. Voloshkevich, G.Z. (1956) *The method of electric welding by melting*. C.c. 104248 USSR. MPK 21 B29/13 [in Russian].
 45. (1980) *Electroslag welding and surfacing*. By Ed. B.E. Paton. Mashinostroenie [in Russian].
 46. Nevidomsky, V.A., Krasilnikov, S.G., Panin, A.D., Gulida, V.P., Lychko, I.I. (2002) New machine for electroslag welding of large parts at JSC «NKMBF». *The Paton Welding J.*, **2**, 49–51.
 47. Shapovalov, K.P., Belinsky, V.A., Merzlyakov, A.E., Kosinov, S.N., Yushchenko, K.A., Lychko, I.I., Kozulin, S.M. (2016) Electroslag welding of large-sized press fram. *The Paton Welding J.*, **8**, 36–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.08.07>
 48. Uemori, R., Fujioka, M., Inoue, T., Minagawa, M., Ichikawa, K., Shirahata, H., Nose, T. (2012) Steels for marine transportation and construction. *Nippon Steel Technical Report*, **101**, 37–47. https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/NSTR101-08_tech_review-1-2.pdf
 49. Paton, B.E., Yushchenko, K.A., Kozulin, S.M., Lychko, I.I. (2019) Electroslag welding process. Analysis of the state and tendencies of development (Review). *The Paton Welding J.*, **10**, 33–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.10.05>
 50. Kaluç, E., Taban, E., Dhooge, A. (2006) Electroslag welding process and industrial applications. *Met. Dünyası*, **152**, 100–105. <https://metaldunyasi.com.tr/>

51. Turpin, B., Danks, D., Callaghan, I., Wood, W. (2012) Narrow gap electroslag is process of choice for welding San Francisco-Oakland Bay Bridge. *Welding J.*, 91(5), 24–31.
52. Janice, J., Chambers, Brett R. (2016) Manning. Electroslag welding: From Shop to Field. *Structure Magazine, February*. <https://www.structuremag.org/article/electroslag-welding-from-shop-to-field/>
53. Lankin, Yu.M., Bondarenko, O.P., Tyukalov, V.G., Soloviov, V.G., Romanova, I.Yu. (2022) Experimental studies of bifilar electroslag welding with an equalizing wire. *The Paton Welding J.*, 3, 41–44. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.03.05>
54. Bondarenko, O.P., Moskalenko, V.G., Tyukalov, V.G., Beletsky, Yu.A. (1994) New technology of electroslag welding of thick sheet steels without subsequent heat treatment. *Avtomaticheskaya Svarka*, 12, 3–4 [in Russian].
55. Onyshchenko, P.I., Kozulin, S.M. (2025) Electroslag welding of 09G2S steel of small thickness. *Avtomatychne Zvaryuvannya*, 4, 47–53 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2025.04.07>
56. Onyshchenko, P.I., Kozulin, S.M., Marynenko, S.Y. et al. (2025) A study of the features of electroslag welding of 09G2 steel with two electrode wires. *Strength of Mater.*, 57, 559–566. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-025-00788-z>

MODERN WELDING TECHNOLOGIES FOR THICK-SECTION STEELS

P.I. Onyshchenko, T.B. Maidanchuk

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

E-mail: pwj_37@ukr.net

At present, welded structures made of thick-section steel are extensively employed in the construction, mining, metallurgical, energy and other industrial sectors. An analysis of existing steel welding technologies, including those utilizing high-energy-density sources, has been conducted. The results indicate that the application of electron-beam, plasma, laser and hybrid welding methods currently requires a high level of preparation and production culture, as well as significant capital investment in auxiliary and welding equipment. Multi-pass arc welding with covered electrodes and mechanized welding in shielding gases are characterized by low productivity, inconsistent fusion quality between the filler and base materials, and the formation of interlayer defects such as slag inclusions and porosity. It has been established that for welding vertical seams, promising technologies are mechanized arc welding with forced seam formation and electroslag welding, which are characterized by high productivity and process stability with significantly lower capital investments compared to the use of highly concentrated energy sources. 56 Ref., 9 Fig.

Keywords: thick-section steel, electron-beam welding, laser welding, plasma welding, hybrid welding methods, submerged arc welding, arc welding with forced seam formation, electroslag welding, mechanical properties, techno-economic justification

Отримано 23.09.2025

Отримано у переглянутому вигляді 24.11.2025

Прийнято 12.01.2026



7th International Conference

«Fracture Mechanics of Materials and Structural Integrity»

March 3–5, 2026, Lviv, Ukraine

Traditionally, the Conference has been taking place in Lviv, and previous conferences of this series were also held in Lviv in 1999, 2004, 2009, 2014 and 2019. The conference aims to bring together leading scientists, researchers and research scholars to share their experience, research results and scientific ideas regarding key areas of fracture and damage mechanics, structural integrity assessment and maintenance. The conference is expected to become an interactive platform for discussion of recent advances, trends and practical challenges in the field of fracture mechanics and structural integrity.

This conference is dedicated to the 100th anniversary of the birth of the Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Professor Volodymyr Panasyuk (1926–2026). Professor Panasyuk has made a significant contribution to the development of various areas of fracture mechanics and strength of materials and structures, which was recognized by the international scientific community. We cordially invite you and your colleagues to participate in the conference!

<https://www.ipm.lviv.ua/fmsi2026/index.php>
conference.fmsi2026@gmail.com

ДИНАМІКА КОНТАКТУ МІЖ ДЕТАЛЯМИ, ЩО ЗВАРЮЮТЬСЯ, ПРИ КОНДЕНСАТОРНОМУ ПРИВАРЮВАННІ ШПИЛЬОК

Д.М. Калеко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, Україна, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: dk1718@gmail.com
 Обов'язковою умовою отримання міцного з'єднання при конденсаторному приварюванні шпильок є надійне збудження дугового розряду конденсаторів, для чого слугує тонкий виступ на кінці шпильки, що приварюється. Джерело його нагрівання, особливо початкова стадія, є предметом дискусії. Це стосується, головним чином, розуміння ролі контактної електричної опору між деталями та його трансформації. Результати експериментів, проведених на двох апаратах, що відрізняються електричними характеристиками розрядного контура, дозволили визначити роль енергетичних параметрів початкової стадії розряду конденсаторів і вплив хімічного складу матеріалу деталей, що зварюються, на зміну фізичного стану зони приварювання (контакту між деталями). Умови зварювання можуть спричинити два різні стани: утворення металевого зв'язку виступу на шпильці та листа або мікродугового проміжку. При малій індуктивності розрядного контура та пов'язаної з цим підвищеної швидкості наростання розрядного струму в усіх випадках контакт деталей переходить у мікродуговий проміжок. Таким чином, у залежності від характеристик розрядного контура подальше нагрівання виступу аж до локального його руйнування зі збудженням зварювальної дуги може відбуватися шляхом джоулевого нагрівання або нагрівання двома одночасно діючими джерелами – тепловиділенням у виступі від струму, що по ньому проходить, і теплопередачу від торця виступу, який нагрівається дугою. У другому режимі поверхня деталі, до якої приварюється шпилька, очищується від можливих забруднень і декоративних електропровідних покриттів, створюючи умови для отримання високоякісного зварного з'єднання. Бібліогр. 15, табл. 2, рис. 10.

Ключові слова: приварювання шпильок, розряд конденсаторів, збудження електричної дуги, мікродуговий розряд, контактний опір

Вступ. Дугоконтактне приварювання шпильок (ДПШ) у сучасній зварювальній літературі відноситься до окремого способу зварювання [1] (arc stud welding (SW), Lichtbogenbolzenschweißen) і визначається як «процес дугового зварювання, в якому використовується дуга між металевим стрижнем або аналогічною деталлю та іншою заготовкою з додатком тиску після того, як поверхні, що сполучаються, достатньо нагріті». Його відміна від інших поширених способів дугового зварювання в тому, що електродами зварювальної дуги в цьому випадку слугують самі деталі, що зварюються. Як правило, вони відрізняються площею поверхонь, що з'єднуються, хоча немає принципового утруднення в стиковому дугоконтактному зварюванні стрижнів рівного діаметра¹.

Процес ДПШ відрізняється від інших різновидів дугоконтактного зварювання (ударного конденсаторного та стикового зварювання дугою, що обертається магнітним полем) способом збудження дуги.

У залежності від джерела зварювального струму знайшли застосування два принципово відмінних методи: дугове приварювання шпильок (приварювання шпильок розтягнутою дугою) і конденсаторне приварювання шпильок (прива-

рювання шпильок зі збуджуючим виступом). У першому варіанті деталі, що зварюються, нагріваються енергією імпульсу постійного струму, а в другому – імпульсним розрядом конденсаторної батареї. Останнім часом з'явився й третій напрямок: в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України було запропоновано [2] та набуло апаратного розвитку (Pegasar 500 accu, фірма HBS Bolzenschweissen GmbH) зварювання розрядним струмом суперконденсаторів, з'єднаних з батареєю акумуляторів. Але за технологічними ознаками цей напрямок може вважатися особливою формою дугового приварювання шпильок.

Кожен із названих різновидів ДПШ має свою сферу застосування і, відповідно, характерні технологічні особливості [3].

Основною відмінністю цих варіантів ДПШ, крім джерела енергії, є методи збудження дуги. При зварюванні розрядом конденсаторів дуга збуджується, в основному, руйнуванням тонкого виступу на торці шпильки, що приварюється (рис. 1), а при ДПШ постійним струмом – використовується низькострумова допоміжна дуга, яка запалюється при розведенні деталей. Такий самий спосіб генерації дуги застосовується в деяких спеціальних умовах конденсаторної ДПШ [4]. В останньому

¹Відмінністю ДПШ від стикового зварювання оплавленням є присутність повноцінного, хоч і короткочасного, дугового розряду



Рис. 1. Сталева шпилька з мідним покриттям для конденсаторного дугоконтактного приварювання

варіанті, окрім позитиву, пов'язаного з можливістю керування при мілісекундному процесі зварювання, збудження дуги розведенням деталей замість підпалу виступом, що руйнується, дозволяє спростити форму шпильки та зменшити звуковий тиск при вибухоподібному випаровуванні частини виступу. Але цей метод ще не отримав достатнього розвитку.

Конденсаторна ДППШ має дві основні модифікації: зварювання «з контактом» і зварювання «із зазором». Як кажуть самі назви, у першому з них розрядний струм вмикається після того, як деталі, що зварюються, приводяться у стан електричного контакту. А в другому – спочатку створюється зазор між деталями, потім на них подається напруга заряду конденсаторів і, нарешті, деталі зближуються до контакту між ними. У статті розглядається перший з цих способів.

Увесь процес ДППШ «з контактом» можна розділити на три послідовні стадії, виходячи з об'єкта вкладення енергії: нагрівання виступу на торці шпильки до його руйнування та збудження дуги; горіння дуги та нагрівання поверхонь, що зварюються; осадка деталей і кристалізація металу в стику, що супроводжується остаточним розрядом конденсаторів. Оскільки енергія, необхідна для підготовки поверхонь, що повинні зваритися, виділяється в електричній дузі, збудження останньої є найважливішою умовою отримання якісного з'єднання. Тому перший етап процесу – нагрівання до руйнування виступу на торці шпильки – є визначальним для подальших етапів зварювання.

Нагрівання виступу на торці шпильки, що приварюється, прохідним струмом починається зі зміни стану перехідного контакту між кінчиком підпальною виступу шпильки та поверхнею деталі, до якої вона приварюється. Оскільки перехідний контактний опір має більшу величину, ніж електричний опір виступу, він може слугувати додатковим джерелом нагрівання виступу разом з його джоулевим нагріванням струмом, що проходить. Таке уявлення процесу збудження дуги має місце в роботах магдебурзької школи дослідників на чолі з Удо Францем [5]. Результати наших експериментів, наведені в цій статті, показали обмеженість такого підходу та необхідність вивчення динамічно-

го стану перехідного опору в контакті деталей, що зварюються, для подальшого визначення нагріву виступу та збудження дуги.

Метою роботи було визначення залежності динаміки початкового контакту від енергетичних і механічних параметрів процесу конденсаторного приварювання шпильок і його фазового стану в результаті нагрівання розрядним струмом.

Методика роботи. Електричний опір зони приварювання шпильки, основна складова якого на початку процесу – це опір у контакті деталей, що зварюються, розраховувався за результатами осцилографічного вимірювання величин струму та напруги. Зона приварювання, на якій вимірювалося падіння напруги, складалася з ділянки цангового затиску шпильки, частини шпильки завдовжки 3 мм, що виступає з нього, і ділянки пластини 50×3 мм завдовжки 20 мм від осі шпильки, до якої приварювалася шпилька.

Експерименти проводили на двох установках для конденсаторного приварювання шпильок: KES-110 та CD-1600 фірми HBS Bolzenschweiss-Systeme GmbH & Co KG (Німеччина), що відрізняються не тільки енергетичними характеристиками (апарат CD-1600 має батарею з постійною ємністю 66 мФ, у той час як KES-110 дозволяє змінювати ємність робочої батареї конденсаторів трьома ступенями 44, 66 і 110 мФ), але й параметрами розрядного контура. При зварюванні за методом «з попереднім контактом» опір розрядного контура та його індуктивність, включаючи елементи апарату та зовнішнього ланцюга, розраховані за осцилограмами розрядного струму [6] (табл. 1).

Експериментальну перевірку впливу індуктивності розрядного контура при збереженні інших параметрів на стан інтерфейсу зварюваних зразків було додатково проведено на апараті CD-1600. З цією метою зварювальний кабель був 6 разів обгорнутий навколо сталевої конструкції. Розрахована індуктивність зросла з 3,2 до 6,1 мкГн.

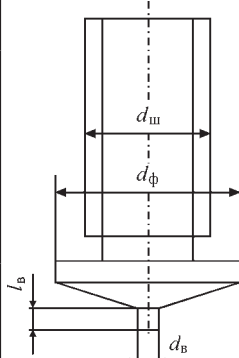
Для аналізу динамічного опору контактної зони були обрані шпильки М3, М6 і М8, що відрізняються за розмірами виступу (табл. 2) зі сталі S235 (Ст3) і латуні CuZn37 (Л63).

Від геометричних розмірів виступу на шпильці, серед іншого, залежать надійність збудження дуги, тривалість її горіння та, відповідно, тепловнесення. Тому розміри виступу суворо визначені між-

Таблиця 1. Параметри розрядного кола конденсаторів апаратів, що використані в дослідженнях

Параметр	KES-1100			CD-1600
	44 мФ	66 мФ	110 мФ	66 мФ
Електричний опір, мОм	14,8	12,8	12,7	13,4
Індуктивність, мкГн	6,5	6,6	6,9	3,2

Таблиця 2. Геометричні розміри експериментальних зразків

	Діаметр шпильки $d_{ш}$	Діаметр фланця $d_{ф}$, мм	Діаметр виступу $d_{в}$, мм	Довжина виступу $l_{в}$, мм
	M3	4,5	0,60	0,55
	M6	7,5	0,75	0,80
	M8	9		0,85

народним стандартом і стандартами різних країн [7]. При цьому допуск на діаметр виступу складає $\pm 0,08$ мм, а на його довжину $\pm 0,05$ мм. Стандарт не робить різниці між матеріалами шпильок, а багаторічний досвід дозволяє зберігати таку зручність для виробників кріплення.

Шпильки із низьковуглецевої сталі для запобігання корозії покриваються міддю. Відповідно до ISO 4042-2015 (ДСТУ 4042:2004) це покриття має товщину 5...15 мкм залежно від поля допуску різьблення.

З метою визначення можливої ролі покриття на динамічну зміну початкового контакту крім чистих пластин використовувалися також пластини з оцинкованою поверхнею та пластини, на яких штучно створювалася іржава, волога або масляна поверхня, або наносилася крапля води або олії. Сталеві шпильки, як сказано вище, у всіх дослідах мали мідне покриття. Для з'ясування його ролі покриття з торця виступу знімалося наждачним папером. Ці експерименти проводилися на CD-1600.

Для аналізу зміни фізичного стану області зварювання найпростішим і водночас наочним є метод резистометрії [8]. Електричний опір зони приварювання визначається обробкою осцилограм розрядного струму та падіння напруги в цій зоні. Розрядний струм і напруга реєструвалися осцилографами Yokagava моделі DL 1520 із частотою 2 МГц (апарат CD-1600) та Textronix TDS2000B із частотою 0,5 МГц (апарат KES-110). Для визначення величини розрядного струму використовувався безіндуктивний шунт з опором 1,5 МОм. Різниця в частотах дискретизації вимірювань визначалася можливостями осцилографів різного типу записувати вимірювані величини із тривалістю всього зварювального процесу.

На рис. 2 показано типовий графік зміни розрядного струму та електричного опору при ДПШ, на якому форма кривої електричного опору добре ілюструє перелічені вище стадії процесу і, отже, є найінформативнішою для аналізу теплофізичних ха-

рактеристик цих стадій. Графік зміни електричного опору та залежність останнього від настановних параметрів режиму дозволяє оцінити динаміку процесу зварювання. Графік $R = f(t)$ показує електричний опір зони приварювання та містить перехідний опір струмопідведення від цанги зварювального інструменту до шпильки та частини тіла шпильки, що виступає з цанги. До цього переліку входить також динамічний перехідний опір у контакті з пластиною (деталлю-партнером). У порівнянні з електричним опором виступу та перехідним опором електричний опір інших ділянок області зварювання дуже малий.

Результати експериментів та їх аналіз. Технологія виробництва шпильок холодною висадкою призводить до невизначеності рельєфу торця запалюючого виступу через анізотропність локальної твердості матеріалу. Це створює невизначеність початкового перехідного опору між деталями, які мають бути зварені. Початковий опір зони приварювання, зафіксований у момент вмикання струму (рис. 2), має величину, що помітно перевищує опір холодного контакту [9].

Зварювання на установках CD-1600 та KES-110 показало зовсім різний початок процесу. При зниженні індуктивності розрядного контура (установ-

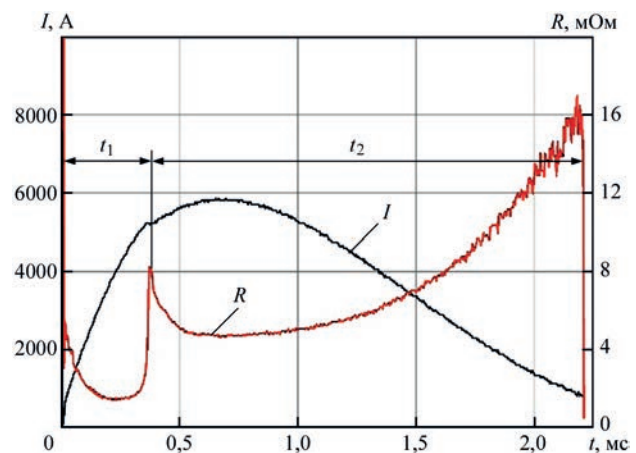


Рис. 2. Струм та електричний опір зони приварювання сталеві шпильки діаметром М8 ($C = 66$ мФ, $U = 150$ В, $P = 70$ Н): t_1 – стадія нагрівання та руйнування виступу, що збуджує дугу; t_2 – дугова стадія процесу ДПШ

ка CD-1600) та відповідному збільшенні швидкості зростання зварювального струму на кривих у початковий момент зазначається гостре зростання опору (рис. 3). До цієї особливості зміни контактної опору призводить миттєве нагрівання та фазові перетворення (плавлення, випаровування) вершин контактуючих мікрошорсткостей на пластині та виступі шпильки. У результаті швидкого нагрівання малого об'єму контактуючих мікронерівностей на межі між виступом шпильки та пластинною з'являються несучільності (пори), зменшується площа контакту та зростає електричний опір.

Після цього, як і при збільшеній індуктивності розрядного контура (KES-110), в контактні між деталями з'являється шар розплавленого металу, що заповнює поверхню зіткнення. Вирівнювання поверхні контакту при незначному обсязі розплавленого металу призводить до зниження опору. Прискорення нагрівання металу в перехідній зоні між шпилькою та листом при зварюванні на апараті CD-1600 призводить до підвищення температури плавлення [10] та перегріву металу. Тому, як показано на рис. 3, у сталевій парі електричний опір виявляється вище в подібні інтервали часу за більш високої швидкості нагрівання.

Електричний опір виступу на шпильках у холодному стані становить у шпильок діаметром М3, М6 та М8 зі сталі 3 (St 235) 0,29; 0,27 та 0,29 мОм, фланця – 0,013; 0,005 та 0,003 мОм, а вільного вильоту шпильки з цанги – 0,11; 0,03 та 0,015 мОм відповідно. З цього випливає, що електричний опір деталей, що зварюються, не відбивається на наведених вище графіках до тих пір, поки він при нагріванні не досягне помітної величини, а зміна опору зони приварювання обумовлена виключно ефектами в інтерфейсі «торець виступу на шпильці – лист».

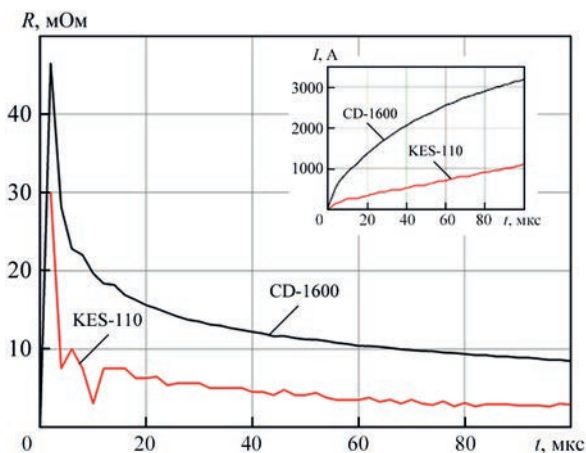


Рис. 3. Електричний опір зони приварювання сталевій шпильки М6, 66 мФ, 150 В. На врізці – розрядний струм у тому ж інтервалі часу

При приварюванні сталевих шпильок у первинний контакт з листом вступає мідне покриття, яке плавиться, захоплюється поверхневим натягом у западини на поверхневій шорсткості торця виступу та збільшує площу контакту. При цьому обсяг мідного покриття вдвічі зростає при переході в рідкий стан. Роль мідного покриття добре видно на рис. 4, де показано зміну перехідного покриття при ДПШ М8. На перших мікросекундах мідне покриття нагрівається швидше за сталеву основу та демонструє підвищення опору, а потім, після вирівнювання поверхні, роль покриття зводиться нанівець, бо різниця в опорах зразків з покриттям та без нього знаходиться в рамках похибки вимірювання.

Середня висота шорсткості Ra у холоднокатаного металу з матовою поверхнею, з якими проводилися експерименти, відповідно до ДСТУ 2834-94 становила $\leq 1,6$ мкм. Для плавлення шару міді завтовшки $5 \cdot 10^{-3}$ мм і площею $0,28$ мм² (М3) або $0,44$ мм² (М6 і М8) потрібна максимальна енергія приблизно $20,2$ мДж, яка реально виділяється протягом близько 20 мкс при зварюванні на апараті KES-110 і за 5 мкс при зварюванні на апараті CD-1600 в умовах, визначених на рис. 3. Цей час близький до зареєстрованого нами часу зниження перехідного опору сталевих шпильок до мінімуму при заповненні простору між початковими верхівками контактуючих шорсткостей та утворенні контактної поверхні, близької до плоскої форми.

Зниження перехідного електричного опору помічено раніше [11]. При цьому передбачалося, що таке зниження пов'язане зі зміною площі контакту внаслідок підвищення пластичності матеріалу при нагріванні та його осадження під впливом пружини зварювального інструменту. Проте, оскільки інерція рухомої частини зварювального інстру-

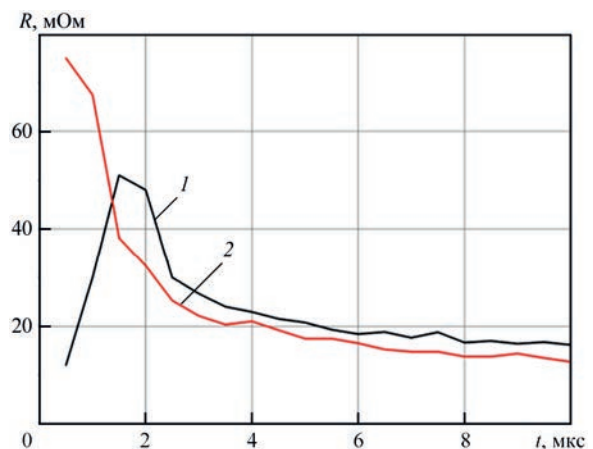


Рис. 4. Опір зони приварювання шпильки М8 з мідним покриттям (1) на торці підпалюючого виступу та без нього (2). Зварювання на апараті CD-1600, $C = 66$ мФ, $U = 150$ В, $P = 70$ Н

менту масою близько 300 г є досить великою та можливе її переміщення зі шпилькою за $t = 10$ мкс ($s = (70 \text{ Н}/0,3 \text{ кг}) \cdot t^2/2 \approx 0,1$ мкм) значно менше, ніж висота шорсткості ~ 5 мкм, треба від цього припущення відмовитися. Про це також свідчить відсутність впливу зусилля стиснення контактуючих деталей на величину контактної опору, що встановилася, при проходженні розрядного струму (рис. 5) з урахуванням точності вимірювань.

Зниження контактної опору може бути також викликане термічним збільшенням об'єму мікрошорсткостей. При нерухомій шпильці це означає зростання площі контакту. Однак, приймаючи температуру втрати пружності 600 °С і коефіцієнт термічного розширення сталі $\alpha = 1,66 \cdot 10^{-6}$ [12], збільшення об'єму і, отже, при незмінній товщині ділянки площі контакту, що нагрівається, не перевищує 3 %.

З урахуванням вищесказаного, можна прийняти гіпотезу про головну роль при нагріванні контактуючих шорсткостей зникнення поверхневих абсорбованих плівок і плавлення матеріалу в контакті деталей при одночасному збільшенні його об'єму та заповненні, таким чином, проміжків між виступами шорсткостей. Це призводить до мінімізації перехідного опору між пластиною та шпилькою, а оскільки товщина цього шару розплаву є невеликою, знижується сумарний електричний опір зони приварювання. Підтвердженням запропонованої гіпотези також є зменшення тривалості зниження електричного опору цієї зони у разі підвищення напруги заряду конденсаторів, тобто зварювального струму, та швидкості нагрівання (рис. 6). Розрахунок показує, що енергія, виділена при розряді за зазначений час зниження електричного

опору зони приварювання, яка обчислена обробкою осцилограм струму та напруги, є достатньою для створення перехідної області між виступом на шпильці та пластиною шару рідкого металу завтовшки більше 5 мкм, що покриває всю контактну поверхню.

На користь сказаного про головний вплив розплавлення поверхневих мікрорізступів на стан контакту між запалюючим виступом і пластиною говорять і коливання величини опору, викликані локальними змінами площі контакту при переміщеннях рідких об'ємів поверхневого шару металу. Амплітуда цих коливань згасає зі збільшенням часу нагрівання та вкладеної енергії, тобто обсягу розплаву. Оскільки вирівнювання перехідного контакту між запалюючим виступом і листом відбувається в квазістатичному стані деталей, вплив початкового зусилля притискання, як було зазначено раніше, непомітний (рис. 5).

Подібний сценарій еволюції контакту між шорсткими поверхнями був запропонований С.І. Кучком-Яценком [13], який висловив твердження, що розплавлений метал мікронерівностей заповнює простір між ними, утворюючи ділянки зварювання.

Оскільки дискретність вимірювань струму – 53 А, а напруги – 0,4 В, точність розрахунку електричного опору дорівнює $\pm 3,75$ мОм. Тому зниження опору на графіках до нуля означає фактичний опір контактної зони менше ніж 3 мОм.

Діаметр виступу на торці шпильки в межах точності вимірювань не впливає на показники зміни перехідного опору (рис. 7), незважаючи на те, що площа контактування при заміні шпильки М3 шпильками М6 і М8 збільшується в 1,5 рази. Це пояснюється тепловідведенням у лист, що зростає

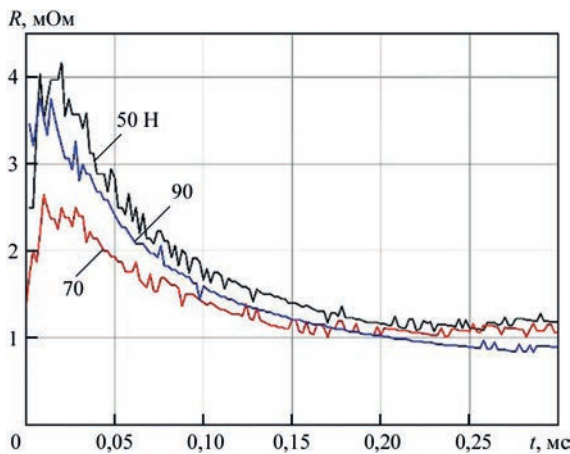


Рис. 5. Вплив початкового зусилля притискання деталей, що з'єднуються, на зміну перехідного опору при зварюванні сталеві шпильки М6 ($C = 44$ мФ, $U = 150$ В)

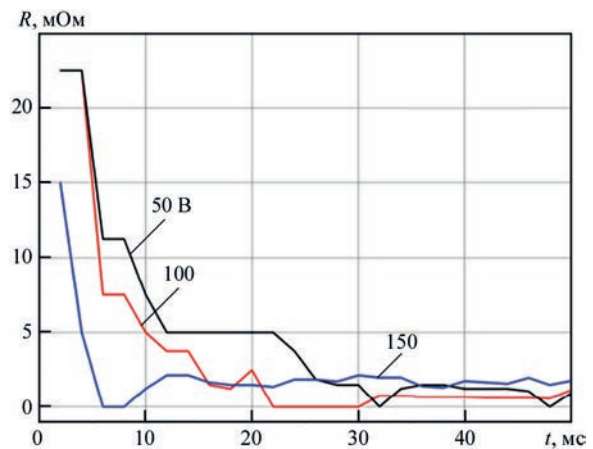


Рис. 6. Зміна перехідного опору в контакті сталеві шпильки М3 та смуги в залежності від напруги зарядження конденсаторів ($C = 44$ мФ, $P = 70$ Н)²

² Злами кривих на графіках є наслідком дискретності вимірювання та відповідають величинам, що вимірюються в момент їх фіксації.

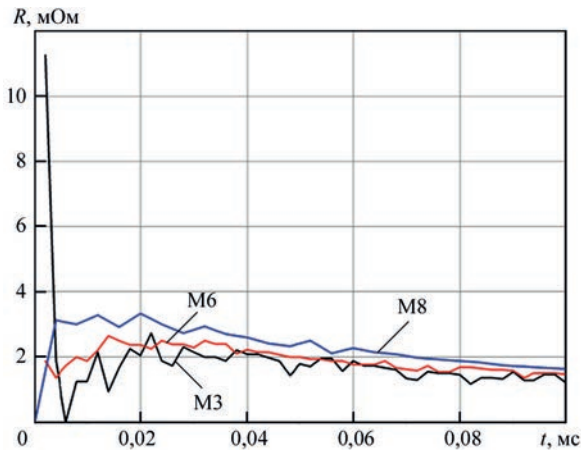


Рис. 7. Електричний опір зони приварювання при ДПШ сталевих шпильок (66 мФ, 150 В, 70 Н)

разом з площею контакту і, відповідно, вирівнюється електропровідність шару рідкого металу в контакті з пластиною шпильок різного діаметра.

Розрахунок відповідно до закону Фур'є енергії, що відводиться від перехідного опору, $q = \lambda(\Delta t_0 \cdot F \cdot t) / l$, де λ – коефіцієнт теплопровідності, Δt_0 – різниця температур, F – площа, l – довжина, t – тривалість тепловідводу відповідно, показує, що при зростанні площі контактування в результаті розтікання рідкої сталі поверхнею пластини розплав охолоджується нижче лінії солідуса, тобто кристалізується. За цей час тіло виступу, рельєф на торці якого плавиться, нагрівається струмом, що проходить, не більше за 3 °С, що також викликає відповідне тепловідведення від розплавленого шару.

Приймаючи на початку процесу різницю температур розплавленого шару в контакті деталей, що сполучаються, рівною 1500 °С, а коефіцієнт теплопровідності рідкої сталі 30 Дж/м·К, отримаємо, що для кристалізації рідкого шару сталі на торці виступу шпильки М3 потрібно 9 мкс, а на торці шпильки М6 і М8 – 8 мкс. Таким чином, метал у контакті шпильки з листом твердне відразу ж після розплавлення, замінюючи контактний електричний опір перехідним, який враховує різницю щільності струму в пластині й тонкому виступі на шпильці. Це подібно до відомого «примержання» електрода при дуговому зварюванні.

Теплове вирівнювання в останньому випадку дозволяє при аналізі нагрівання запалюючого виступу на шпильці прийняти з невеликою похибкою початкову температуру кімнатною, а єдиним джерелом нагрівання виступу – джоулеве нагрівання.

На відміну від сталевих опір зони приварювання латунних зразків до вмикання струму зазначається відсутністю вимірюваної величини електричного опору внаслідок деформації пластичної латуні під дією початкового зусилля притискання

(рис. 8). Після вмикання струму перехідний опір сталевих зразків різко знижується, а латунних, навпаки, зростає. При цьому збільшення опору останніх помітно залежить від стискаючого зусилля, прикладеного до зразків.

Збільшення перехідного електричного опору при нагріванні латунних зразків викликане випаровуванням цинку із розплавленого металу та утворенням, внаслідок цього, пор у контакті латунних деталей. У міру нагрівання та збіднення контактної зони від пари опір знижується, але все ж таки залишається більшим, ніж у сталевих зразків.

Розрахункові величини енергії, отримані за даними осцилографування струму та напруги в зоні приварювання, показують, що фазове перетворення шару латуні завтовшки 5 мкм збігається з областю максимуму електричного опору на графіках, представлених на рис. 8. А величина розрядного струму більша при зварюванні сталевих зразків при рівних настановних параметрах режиму. Слід зазначити в той же час, що амплітудні величини струму при зварюванні тих самих зразків менше різняться між собою (від 3600 до 4000 А). При цьому показники у сталі вищі, що також свідчить про збільшення середнього електричного опору при зварюванні латунних зразків внаслідок порушення суцільності через википання цинку при плавленні металу.

При зниженні індуктивності розрядного контуру (при зварюванні на апараті CD-1600) швидкість наростання струму така, що в контакті шпильки та листа на самому початку процесу мікроставупи на контактних поверхнях не тільки плавляться, але й випаровуються з утворенням розрядного проміжку дуже малої довжини, що фіксується підвищенням напруги на електродах близько до 10 В (рис. 9). Енергетичний розрахунок показує, що товщина металу, що випарувалася, в експериментах, показана

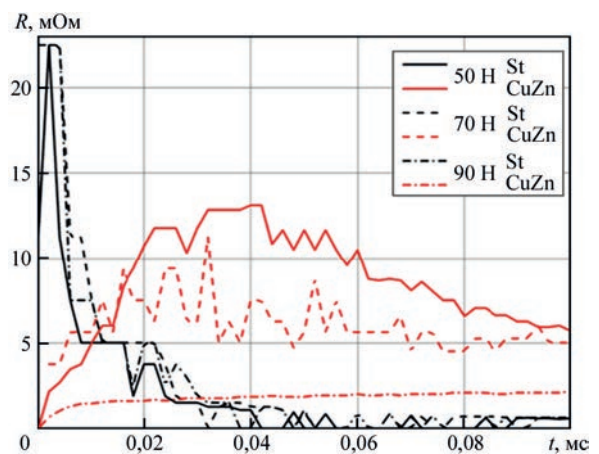


Рис. 8. Порівняння опору зони приварювання сталевих (St) та латунних (CuZn) шпильок М3 (44 мФ, 50 В)

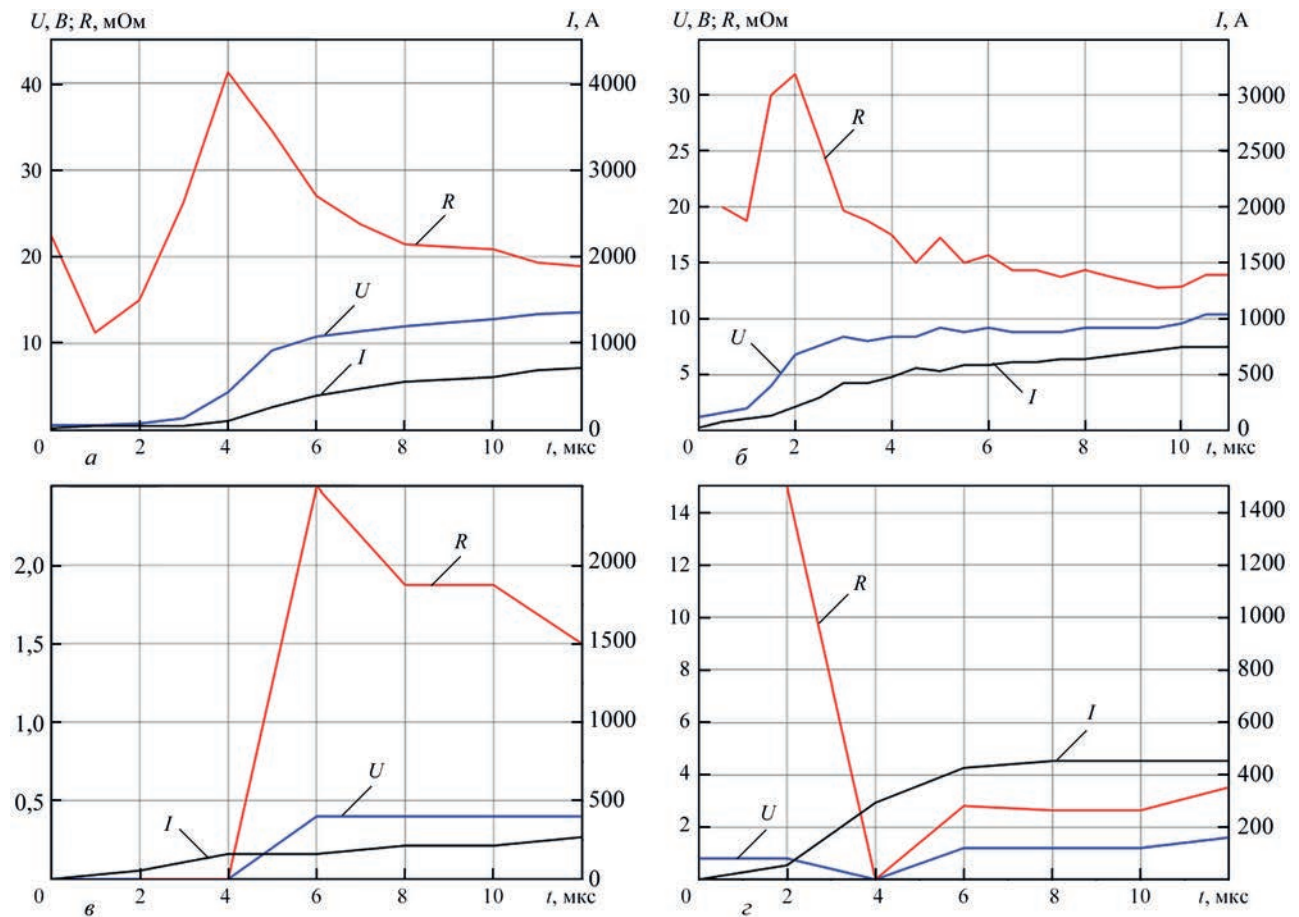


Рис. 9. Струм, напруга та електричний опір зони приварювання шпильок М6 та пластин зі сталі St 235 (а, в) та латуні CuZn37 (б, г) на установці CD-1600 (а, б) та KES-110 ($C = 66$ мФ, $U = 100$ В)

них на рис. 9, не перевищує 3 мкм. Внаслідок інерції механізму осадки замикання електродів немає, і розряд продовжується в парах металу, що випарувався. Диспергування матеріалу призводить до імпульсного підвищення опору розрядного проміжку, який зменшується в міру розширення провідної області. Товщина цієї області мала, і розряд переходить у повну дугову стадію пізніше, після втрати металевої провідності на деякій ділянці виступу на шпильці, яка випаровується в результаті нагрівання двома джерелами – розрядом на проміжку, що замінив початковий контакт між деталями, і нагріванням на електричному опорі запалюючого виступу.

Порівняння графіків на рис. 9 показує, що утворення розрядного проміжку між шпилькою та чистою пластиною в результаті випаровування контактуючих шорсткостей відбувається тільки при зварюванні на апаратах з малою індуктивністю розрядного контура. В іншому випадку спостерігається стабілізація перехідного опору внаслідок розплавлення та кристалізації початкової поверхневої структури.

При зварюванні на апараті CD-1600 збудження мікродугового розряду між шпилькою та ли-

стом спостерігається при зварюванні всіх матеріалів, з яких масово виготовляються шпильки, а саме: низьковуглецевої сталі St 235, нержавкої сталі 1.4301, латуні CuZn 37 та алюмінієвого сплаву AlMg3 (рис. 10). Збудження цього розряду зазначається різким зростанням напруги понад 10 В. У всіх випадках, крім зварювання легкого сплаву AlMg3, у цей момент з’являється пік опору, викликаний високим тиском парів матеріалу первинного рельєфу контактної поверхні листа та шпильки.

Осцилографічне спостереження зміни падіння напруги в зоні зварювання при різному стані поверхні пластини показало, що при забрудненнях будь-якого сорту (іржа, жир, волога, масло або вода) або цинковому покритті при зварюванні на апараті з малою індуктивністю процес починається зі збудження мікродугового розряду, а забруднення випаровуються в перші мікросекунди й далі процес не відрізняється від зварювання по чистій поверхні. При покритті металом з низькою температурою кипіння (цинк) істотно підвищується початковий опір розрядного проміжку через підвищений тиск парів покриття. Далі, після витoku цих парів, опір дуги стає таким самим, як і при зварюванні металу без покриття по чистій поверхні.

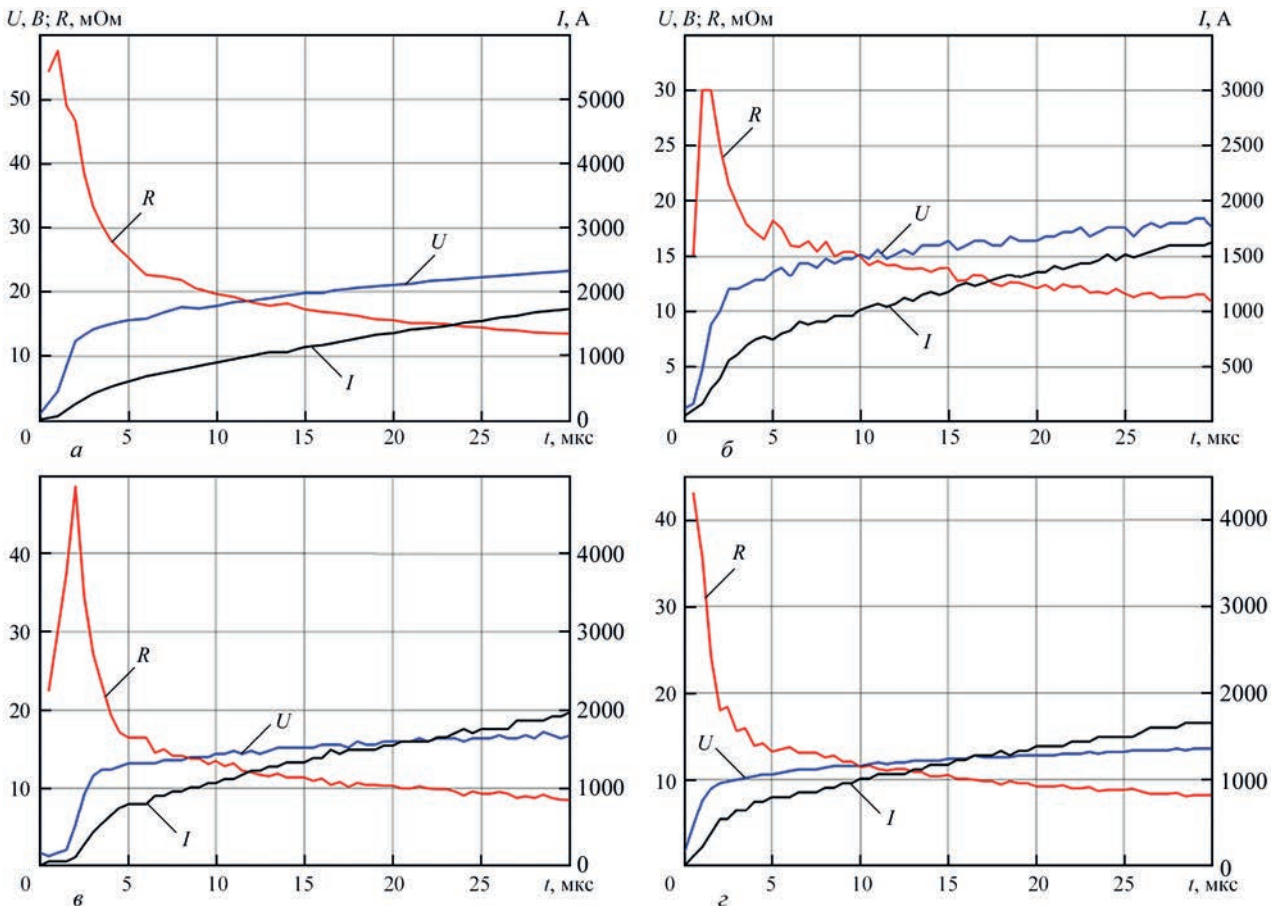


Рис. 10. Характеристики розряду конденсаторів ($C = 66$ мФ) при зварюванні шпильок М6 із різних металів на апараті CD-1600: а – сталь 235, $U = 145$ В, $P = 60$ Н; б – сталь 1.4301, $U = 150$ В, $P = 80$ Н; в – латунь CuZn 37, $U = 160$ В, $P = 80$ Н; г – алюмінієвий сплав AlMg3 $U = 160$ В, $P = 60$ Н

Цинкове покриття призвело до збудження газового розряду також в експериментах зі штучним підвищенням індуктивності розрядного контура. Внаслідок відносно низької температури випаровування цинку ($906,2$ °С) між поверхнями деталей, що зварюються, з'являється зазор, що має відповідно до стандарту [14] середню ширину 70 мкм, в якому починається газовий розряд.

Раніше Карстин Штахе [15] шляхом швидкісної кінозйомки визначила, що дугова стадія розряду починається через кілька сотень мікросекунд після вмикання розрядного струму. Це відповідає сказаному вище, оскільки вона працювала на апараті з високою індуктивністю розрядного контура (шпилька St 235, M8, 66 мФ, 174 В, електричний опір і індуктивність контуру 12 мОм і 10 мкГн відповідно).

При зниженій індуктивності розрядного контуру і, що визначається цим, підвищенні швидкості зростання величини зварювального струму (див. вірзку на рис. 3) у контакті шпильки з листом, як показано вище, виникає мікродуговий розряд. Опорні поверхні цієї мікродуги на електроді значно менше від перерізу шпильки, що приварюється, і необхідна міцність з'єднання не може бути

забезпечена без розвитку повноцінного дугового розряду, що діє протягом часу, достатнього для отримання розплавленого металу на всій поверхні з'єднання деталей. Тому зменшення індуктивності розрядного контура не усуває доцільність виготовлення на торці шпильки тонкого виступу, що «вибухає» внаслідок струму з високою щільністю.

Проведені дослідження показали, що можливі два варіанти стану перехідного опору між деталями, що зварюються, у залежності від електричних характеристик зварювальних апаратів, хімічного складу металу, що зварюється, та покриття поверхні деталі, до якої приварюється шпилька, а саме: зникнення перехідного опору зі створенням або цільної системи зі звуженим переходом між шпилькою та листом, або виникнення між ними мікродугового проміжку. Це далі викликає різний шлях термічного руйнування запалюючого виступу на шпильці, витрату накопиченої в конденсаторах енергії до запалювання повноцінної зварювальної дуги та зміну стану поверхонь, що з'єднуються. Таким чином, проведені дослідження дають можливість вибору з наведених варіантів за допомогою зміни електричних параметрів зварювального апарата в залежності від конкретних технологічних умов.

Висновки

Зародком процесу нагрівання ініціюючого виступу є перехідний опір, який зникає через кілька десятків мікросекунд після вмикання розрядного струму.

Стан контакту між шпилькою та листом, до якого вона повинна бути приварена, і перехідний опір між ними суттєво залежать від величини розрядного струму та швидкості його зростання. Залежно від індуктивності розрядного ланцюга в контактні місця може створюватися шар розплавленого металу, що охолоджується тепловідведенням в деталі, які зварюються, або мікродуговий проміжок при випаровуванні рельєфу контактуючих поверхонь. Покриття листа металом з низькою температурою кипіння (цинк) призводить до утворення мікродугового проміжку незалежно від індуктивності розрядного контура.

Якщо в контактних зварюваних деталях створюється шар розплавленого металу, вплив його складу проявляється або в згладжуванні контактної поверхні, як при зварюванні шпильок із низьковуглецевої сталі з мідним покриттям, або в появі несучільностей внаслідок випаровування низькотемпературної складової сплаву, наприклад, цинку при приварюванні латунних шпильок або магнію при приварюванні алюмінієво-магнієвих шпильок. Електричний опір знижується після виходу пари низькотемпературної фракції із зони зварювання внаслідок її підвищеного тиску.

При зварюванні з малою індуктивністю розрядного контура поверхневі забруднення або декоративні покриття випаровуються в перші мікросекунди розряду та не впливають на процес зварювання. Покриття з металу з низькою температурою кипіння викликають збільшення опору дуги й тим самим призводять до зниження зварювального струму та уповільнення «інкубаційного» періоду збудження зварювальної дуги.

Для визначення доцільності включення регульованої індуктивності в розрядний ланцюг апаратів для конденсаторного приварювання шпильок, беручи до уваги встановлену раніше [6] позитивну роль індуктивності у підвищенні ККД приварювання шпильок і зниження пористості зварних з'єднань, слід оцінити втрати енергії опору між деталями, що зварюються.

Список літератури

1. (2004) *Welding Handbook, Ninth Edition*. Volume 2. Welding Processes. Part 1. American Welding Society.
2. Патон Б.Є., Жихарев А.М., Калеко Д.М., Слезін О.О. (2013) *Апарат для приварювання шпильок*. Патент України №100828, оп.25.01.2013.

3. Trillmich, R., Welz, W. (1997) *Bolzenschweißen, Grundlagen und Anwendung, Fachbuchreihe Schweißtechnik*. B.133, DVS Verlag, Düsseldorf.
4. Kaleko, D.M., Lebedev, V.K., Chvertko, N.A. (1999) *Processes of welding using the arc discharge of the capacitors. Welding and surfacing reviews*. Harwood academic publishers.
5. Weiss, D., Franz, U., Mahrle, A., Schmidt, J. (1999) *Prozessführung und Qualität beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung*. Schweißen und Schneiden '99: Vorträge der gleichnamigen Großen Schweißtechnischen Tagung in Weimar 15–17 September 1999. DVS-Berichte, Band 204, DVS Verlag, Düsseldorf.
6. Kaleko, D., Klier, R. (2025) Einfluss der Induktivität des Entladungskreises von Kondensatoren beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung. *Schweißen und Schneiden*, 7-8, 52–59. DOI: <https://doi.org/10.53192/SUS20250852>
7. ДСТУ ISO 13918:2014 (ISO 13918:2008, IDT). *Зварювання. Шпильки і керамічні втулки для дугового приварювання шпильок*.
8. Холявко В.В., Владимирський І.А., Жабинська О.О. (2016) *Фізичні властивості та методи дослідження матеріалів*. Київ, Центр учбової літератури.
9. Калеко Д.М. (2019) К вопросу о контактном электрическом сопротивлении разновеликих поверхностей. *Автоматическая сварка*, 1, 11–17. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.01.01>
10. Яковлев Е.Б., Свирина В.В., Сергеева О.Н. (2010) Особенности плавления металлов при действии ультракоротких лазерных импульсов. *Известия вузов, Приборостроение*, 53(4), 57–62.
11. Lauenroth, T. (2002) *Prozessanalyse zum Kondensatorenentladung-Bolzenschweißen mit Spitzenzündung*. Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs. Technischen Universität Clausthal.
12. (1993) ASM Handbook v1. *Properties and selection irons steels and high-performance alloys*.
13. Кучук-Яценко С.И. (1992) Контактная стыковая сварка оплавлением. Киев, Наукова думка.
14. EN ISO 1461:2024 *Hot dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles – Specifications and test methods*.
15. Stache, K. (1998) *Prozessanalyse und Maßnahmen zur Qualitätssicherung beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung*. Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs. Technischen Universität Clausthal.

References

1. (2004) *Welding Handbook, Ninth Ed.* Vol. 2. Welding Processes. Pt 1. AWS.
2. Paton, B.E., Zhikharev, A.M., Kaleko, D.M., Slezin, O.O. (2013) *Apparatus for welding studs*. Patent of Ukraine 100828, op. 01/25/2013 [in Ukrainian].
3. Trillmich, R., Welz, W. (1997) *Bolzenschweißen, Grundlagen und Anwendung, Fachbuchreihe Schweißtechnik*. B.133, DVS Verlag, Düsseldorf.
4. Kaleko, D.M., Lebedev, V.K., Chvertko, N.A. (1999) *Processes of welding using the arc discharge of the capacitors. Welding and surfacing reviews*. Harwood academic publishers.
5. Weiss, D., Franz, U., Mahrle, A., Schmidt, J. (1999) *Prozessführung und Qualität beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung*. Schweißen und Schneiden '99: Vorträge der gleichnamigen Großen Schweißtechnischen Tagung in Weimar 15–17 September 1999. DVS-Berichte, Band 204, DVS Verlag, Düsseldorf.
6. Kaleko, D., Klier, R. (2025) Einfluss der Induktivität des Entladungskreises von Kondensatoren beim Bolzenschweißen mit Spitzenzündung. *Schweißen und Schneiden*, 7-8, 52–59. DOI: <https://doi.org/10.53192/SUS20250852>
7. DSTU ISO 13918:2014 (ISO 13918:2008, IDT). *Welding. Studs and ceramic bushings for arc welding of studs* [in Ukrainian].
8. Kholiyavko, V.V., Vladimirsky, I.A., Zhabinska, O.O. (2016) *Physical properties and methods research materials*. Kyiv, Tsentru uchbovoi literatury [in Ukrainian].

9. Kaleko, D.M (2019) On the problem of contact electric resistance of different-sized surfaces. *The Paton Welding J.*, **1**, 2–6. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.01.01>
10. Yakovlev, E.B., Svirina, V.V., Sergeeva, O.N. (2010) Features of metal melting during action of ultrashort laser pulses. *Isv. Vusov. Priborostroenie*, **53(4)**, 57–62 [in Russian].
11. Lauenroth, T. (2002) *Prozessanalyse zum Kondensatorenentladungs-Bolzenschweißen mit Spitzezündung*. Dissertation zur Erlangung des Grades eines Dr.-Ing. Technischen Universität Clausthal.
12. (1993) ASM Handbook v1. *Properties and selection iron steels and high-performance alloys*.
13. Kuchuk-Yatsenko, S.I. (1992) *Flash-butt contact welding*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
14. EN ISO 1461:2024 *Hot dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles. Specifications and test methods*.
15. Stache, K. (1998) *Prozessanalyse und Maßnahmen zur Qualitätssicherung beim Bolzenschweißen mit Spitzezündung*. Dissertation zur Erlangung des Grades eines Dr.-Ing. Technischen Universität Clausthal.

DYNAMICS OF CONTACT BETWEEN PARTS BEING WELDED DURING CAPACITOR WELDING OF STUDS

D.M. Kaleko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: dk1718@gmail.com

A prerequisite for obtaining a strong connection in capacitor welding of studs is reliable excitation of the arc discharge of the capacitors, for which a thin protrusion at the end of the stud being welded serves. The source of its heating, especially the initial stage, is the subject of discussion. This mainly concerns understanding of the role of the contact electrical resistance between the parts and its transformation. The results of experiments conducted in two units that differ in the electrical characteristics of the discharge circuit made it possible to determine the role of energy parameters at the capacitor discharge initial stage and the influence of the chemical composition of the material of the parts being welded on changing the physical state of the welding zone (contact between the parts). Welding conditions can cause two different states: formation of a metallic bond of the protrusion on the stud and the sheet or a microarc gap. With a small inductance of the discharge circuit, and the associated higher rate of increase in the discharge current, the contact of the parts passes into a microarc gap in all the cases. Thus, depending on the characteristics of the discharge circuit, further heating of the protrusion up to its local destruction with excitation of the welding arc can be achieved due to Joule heating, or heating by two simultaneously acting sources - heat release in the protrusion from the current passing through it, and heat transfer from the end of the protrusion, which is heated by the arc. In the second mode, the surface of the part to which the stud is welded is cleaned of possible contaminants and decorative conductive coatings, creating conditions for producing a high-quality welded joint. 15 Ref., 2 Tabl., 10 Fig.

Keywords: stud welding, capacitor discharge, electric arc excitation, microarc discharge, contact resistance

Отримано 09.06.2025

Отримано у переглянутому вигляді 27.11.2025

Прийнято 15.01.2025

НОВА КНИГА

УДК 621.791.75:537.636:620.187.3

Максимов С.Ю., Винничук С.Д., Прилипко О.О. «Розробка технологічних основ та устаткування при застосуванні зовнішнього електромагнітного впливу при зварюванні під водою» — Київ: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2025. — 127 с.

У монографії розглянуто технологічні особливості реалізації процесу зварювання із застосуванням зовнішнього електромагнітного впливу (ЗЕВ) при зварюванні під водою. Наведено математичні моделі для обчислення електродинамічних сил і вихрових струмів у рідкометалевій ванні. Розроблені моделі можуть бути застосовані для зварювання під водою та на повітрі. З урахуванням теоретичних положень зроблено вибір технологічних режимів. Запропоновано оригінальні конструкції індукторів з різними конфігураціями електромагнітних полів. Зварювання з ЗЕВ призводить до зменшення розмірів пор, які утворюються в металі швів, що покращує їх фізико-механічні характеристики. Структура матеріалу наплавлення вирізняється рівновісними зернами невисокої дисперсності. При застосуванні ЗЕВ середні значення мікротвердості в зонах наплавлення та термічного впливу зменшуються, що свідчить про покращення пластичності. Проведені дослідження підтверджують, що при зварюванні з ЗЕВ у металі зони термічного впливу не спостерігаються гартівні структури й тріщини. ЗЕВ при підводному зварюванні допомагає гомогенізувати структуру, зменшити різницю фізико-механічних властивостей як між зонами зварного з'єднання, так і між зварним з'єднанням і основним металом.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, а також для студентів металургійних спеціальностей.

Бібліогр. 125, табл. 6, рис. 56.



ПІДВИЩЕННЯ ЯКІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВАРНОГО З'ЄДНАННЯ КОМБІНОВАНОГО РОТОРА

В.В. Дмитрик¹, Чень Сінлей¹, І.В. Касьяненко¹, О.С. Гаращенко¹, О.Л. Платухін²

¹Національний технічний університет «Харківський Політехнічний Інститут». 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.
E-mail: dmitrikvitali@gmail.com

²АТ «Українські енергетичні машини». 61037, м. Харків, просп. Героїв Харкова, 199.

Наводяться особливості структури зварного з'єднання комбінованого ротора середнього тиску зі сталей 20Х3МВФА і 25Х2НМФА. Процес виготовлення ротора передбачав автоматичне зварювання на параметрах режиму, які оптимізували з використанням моделювання зварювального нагрівання. Реалізація запропонованого процесу автоматичного зварювання забезпечила отримання зварного з'єднання ротора з покращеними показниками його вихідної структури та підвищеними механічними властивостями. Виконано аналіз мікроструктури металу шва та ділянок зони термічного впливу комбінованого зварного з'єднання, а також визначено його механічні властивості. Встановлено, що наведені показники є вищими за аналогічні показники, отримані з використанням штатної технології, яка не передбачала моделювання зварювального нагрівання. Бібліогр. 11, табл. 7, рис. 8.

Ключові слова: комбіноване зварне з'єднання, ротор, турбіна, тріщина, структура, зона термічного впливу, параметри режиму, механічні властивості, зварювальні матеріали, термічна обробка, хімічний склад

Вступ. Проблема підвищення надійності експлуатації та збільшення ресурсу напрацювання енергоблоків теплових електростанцій з турбінами К-325-23,5 високого, середнього та низького тиску зі зварними комбінованими роторами набуває особливої актуальності. Наведені комбіновані ротори виготовляють зі сталей 20Х3МВФА (ЄІ 415) і 25Х2НМФА (табл. 1, 2).

Основний внесок у розробку та вдосконалення зварювальної технології виготовлення комбінованих роторів внесли фахівці АТ «Українські енергетичні машини» (колишній АТ «Турбоатом»), ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України, ІПМаш ім. А.М. Підгорного НАН України та НТУ «ХП».

Ротор є особливо відповідальним вузлом парової турбіни, що містить: вал, облопачені диски, втулки, масляні та кінцеві ущільнювачі, а також інші деталі. На валу розташовані опорні шийки під вкладиші підшипників і посадочні поверхні для насадки дисків, напівмуфт, втулок та ущільнювачів.

Умови експлуатації комбінованого ротора відрізняються високою швидкістю його обертання,

значними навантаженнями, які надають відцентрові сили, робочим температурним режимом і корозійно-ерозійним впливом.

До дефектів, які виявляються в роторах при планових зупинках турбін високого та середнього тиску, відносять тріщини в осьових каналах роторів, що знаходяться у високотемпературних зонах. Утворення тріщин у металі комбінованих зварних з'єднань, а також в ободах дисків і в переддисківних гантелях значною мірою обумовлено відповідним структурно-фазовим станом [1–3]. Отже, необхідно підвищити якісні показники структури роторів для збільшення надійності їхньої роботи.

Метою роботи є отримання зварного з'єднання комбінованого ротора з підвищеними якісними характеристиками його вихідної структури.

Методи та методики. Для дослідження структурно-фазового стану, визначення хімічного складу та властивостей, з урахування результатів моделювання, зі сталей 20Х3МВФА і 25Х2НМФА виготовляли зразок-свідок комбінованого ротора. Хімічний склад, термічна обробка, структура,

Таблиця 1. Хімічний склад сталі 20Х3МВФА

Масова частка елементів, % за ТУ 108-995-81										
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	V	W	Cu
0,15...0,23	0,17...0,37	0,25...0,5	<0,02	<0,02	2,8...2,3	<0,3	0,35...0,55	0,6...0,85	0,3...0,5	<0,2

Таблиця 2. Хімічний склад сталі 25Х2НМФА, мас. %

Масова частка елементів, % за ТУ 108-995-81										
C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	V	W	Cu
0,23...0,27	0,17...0,35	0,40...0,70	≤0,015	≤0,015	1,80...2,20	1,30...1,60	0,40...0,60	0,05		0,25

Примітка. Вміст сірки та фосфору в наведених сталях не перевищував 0,02 %.

В.В. Дмитрик – <https://orcid.org/0000-0002-1085-3811>, Чень Сінлей – <https://orcid.org/0000-0003-2755-7725>,
І.В. Касьяненко – <https://orcid.org/0000-0003-1375-3522>, О.С. Гаращенко – <https://orcid.org/0000-0002-9572-6095>,
© В.В. Дмитрик, Чень Сінлей, І.В. Касьяненко, О.С. Гаращенко, О.Л. Платухін, 2025

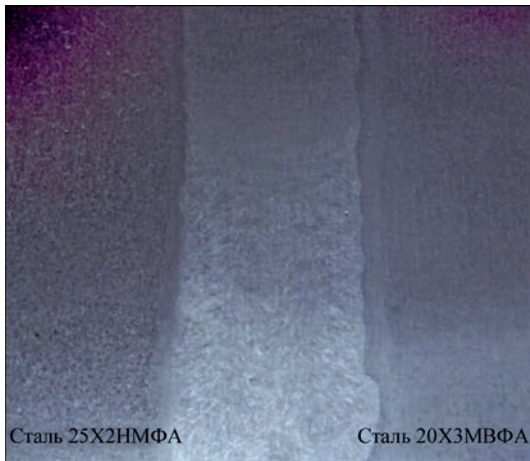


Рис. 1. Макроструктура зварного з'єднання дослідного зразка комбінованого ротора ($\times 1,2$)

форма й розміри зразка-свідка відповідали аналогічним показникам реального зварного з'єднання ротора та відповідним нормативним положенням [1, 2]. Виготовлення зразка-свідка проводили на оптимізованих параметрах режиму зварювання, які отримали шляхом моделювання його температурного режиму [3–6]. Показники температур співставляли з термодинамічними діаграмами сталей 20X3MBFA і 25X2HMFA [7]. Таким чином оптимізували параметри температурного режиму автоматичного зварювання (силу струму, напругу дуги, швидкість зварювання, температуру підігріву та швидкість охолодження). При моделюванні також враховували технологічні особливості зварювання, встановлені раніше [8–11].

З отриманого зварного з'єднання (рис. 1) відповідно до схеми (рис. 2), а також до схем [9] виріза-

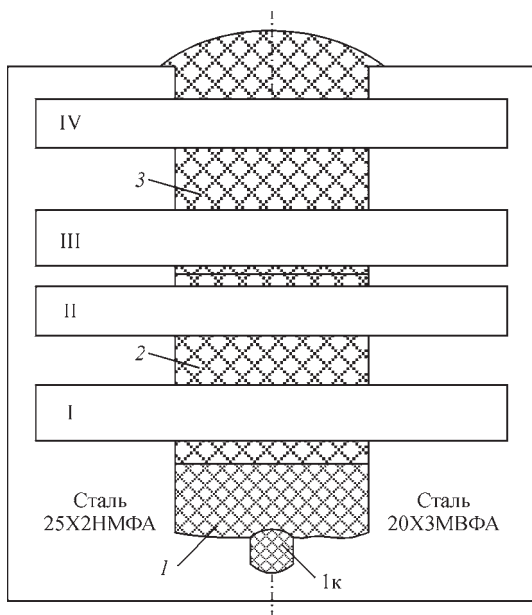


Рис. 2. Схема вирізки з комбінованого зварного з'єднання зразків I–IV для вивчення структури I–3 зони зварного з'єднання: I – коренева; 2 – середня; 3 – верхня; Iк – нижня ділянка кореневої зони I

ли зразки для дослідження структури й визначення хімічного складу та механічних властивостей.

Дослідження структурно-фазового стану металу зварних з'єднань проводили з використанням оптичного металографічного мікроскопа Meiji Techno (Японія), а також скануючого електронного мікроскопа JSM-820 з системою рентгенівського мікроаналізатора Link AN 10185S. Визначали короточасні механічні властивості: умовну границю текучості – $\sigma_{0,2}$, границю міцності – σ_B , відносне видовження – δ , відносне звуження – Ψ . Також визначали твердість за Віккерсом і мікротвердість (прилад ПМТ-3), а також ударну в'язкість КС. Загалом дослідження структурно-фазового стану, визначення властивостей і хімічного складу виконували згідно з чинними нормативними положеннями [1, 2].

Результати досліджень і їхнє обговорення.

Вихідна структура сталі 20X3MBFA, хімічний склад – табл. 1, складалася з нижнього бейніту відпуску (рис. 3, а) і невеликої кількості ферито-карбідної суміші. До складу вихідної структури сталі 25X2HMFA (рис. 3, б), хімічний склад – табл. 2, входили переважно верхній бейніт відпуску, відносно невелика кількість ферито-карбідної суміші як продукту відпущеного мартенситу.

У зварному з'єднанні зі сталей 20X3MBFA і 25X2HMFA можуть утворюватися структури, які можна віднести до бракувальних [10, 11]. Наприклад, великі аустенітні зерна (бал 3–4, ДСТУ8972:2019) на ділянках сплавлення, перегріву та нормалізації зони термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань. Також до бракувальних структур можна віднести нові продукти розпаду аустеніту на ділянці неповної перекристалізації ЗТВ,

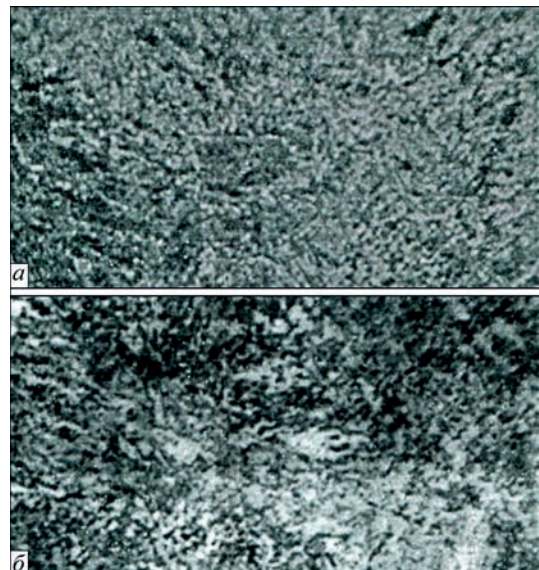


Рис. 3. Вихідна структура основного металу комбінованого зварного з'єднання сталей: а – 20X3MBFA; б – 25X2HMFA

які у вихідній структурі зварних з'єднань представляють глобуляризований перліт.

Отримані шляхом моделювання дані, що визначають температурний режим металу шва, який кристалізується, а також температурний режим нагріву ділянок ЗТВ зіставляли з відповідними термомікнетичними діаграмами сталей 20X3МВФА і 25X2НМФА [7]. Таке зіставлення допомогло оптимізувати параметри режиму зварювання комбінованого зварного з'єднання, що виготовляється, а також дозволило визначити напрям подальшого уточнення математичної моделі зварювального нагрівання таких з'єднань.

Процес зварювання передбачав розбивку дослідного зварного з'єднання (рис. 1) на зони (рис. 2). Зварювання нижньої ділянки Ік кореневої зони І (1-й шар) виконували в середовищі аргону вольфрамовим електродом без присадного дроту. Параметри режиму становили: зварювальний струм $I_{зв} = 140$ А; напруга дуги $U_d = 15...20$ В; температура підігріву $T_{під} = 230$ °С; швидкість зварювання 20 м/год; довжина дуги $l_g = 2,5$ мм. Потім при виконанні 2-го і 3-го шарів застосували присадний дріт марки СВ-08Г2С діаметром 1,6 мм. Виконання 4-го шару проводили під флюсом АН-17М з використанням електродного дроту СВ-08Г2С діаметром 2 мм. Параметри режиму зварювання становили $I_{зв} = 190$ А; напруга дуги $U_d = 20$ В; температура підігріву $T_{під} = 200$ °С. Виконання наступного 5-го шару проводили на близьких до 4-го шару параметрах режиму: $I_{зв} = 200$ А; напруга дуги $U_d = 23$ В. Потім після зварювання нижньої ділянки кореневої зони Ік проводили подальше зварювання 1-ї зони з'єднання (рис. 1, 2) з використанням електродного дроту S3NiMoCr діаметром 2 мм під флюсом UV420TT (Bohler). Параметри режиму становили: $I_{зв} = 340$ А, $U_d = 39$ В, $T_{під} = 340$ °С, $V_{зв} = 20$ м/год. Потім проводили зварювання 2-ї зони. Параметри режиму становили: $I_{зв} = 390$ А, $U_d = 39$ В, $T_{під} = 340$ °С, $V_{зв} = 20$ м/год. Зварювальні матеріали використовували ті ж, що і для зварювання 1-ї зони. Далі з використанням зварювальних матеріалів проводили зварювання 3-ї зони. Застосували параметри режиму $I_{зв} = 390$ А, $U_d = 37$ В, $T_{під} = 300$ °С, $V_{зв} = 20$ м/год. Відразу після закінчення зварювання зварне з'єднання піддавали високому відпуску ($T_{від} = 630...650$ °С) тривалістю 100 год. З отриманого зварного з'єднання вирізали зразки (темплети) (рис. 2) для вивчення структурного стану, хімічного складу, а також механічних властивостей.

У зразку-свідку виявили ширину ділянок ЗТВ (табл. 3, 4). Таке виявлення дозволило внести від-

Таблиця 3. Ширина ділянок ЗТВ комбінованого зварного з'єднання (рис. 1, 2), сталь 25X2НМФА

Номер зразка	Ділянка сплавлення, мм	Ділянка нормалізації, мм	Ділянка неповної перекристалізації, мм
I	0,10	2,1	2,4
II	0,14	2,7	3,0
III	0,13	2,9	2,7
IV	0,12	2,8	2,4

Таблиця 4. Ширина ділянок ЗТВ комбінованого зварного з'єднання (рис. 1, 2), сталь 20X3МВФА

Номер зразка	Ділянка сплавлення, мм	Ділянка нормалізації, мм	Ділянка неповної перекристалізації, мм
I	0,10	2,3	2,4
II	0,11	2,8	2,5
III	0,12	3,0	2,6
IV	0,11	2,9	2,4

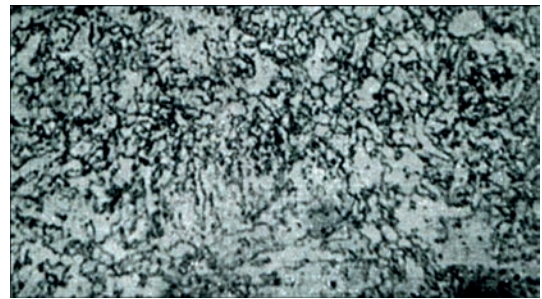


Рис. 4. Структура металу шва ділянки Ік кореневої зони І (рис. 2) (× 400)

повідні уточнення в математичну модель, що було доцільним для подальшого її корегування стосовно вирішення наступних теплових задач.

Структура металу шва кореневої зони І (рис. 2) складалася з бейніту відпуску, який мав зернисту форму, та фериту (рис. 4).

Структура металу шва зразка II 2-ї зони також складалася з бейніту відпуску та фериту (рис. 5).

Будова зразка I зони 2 складалася з бейніту відпуску та фериту. На зернах фериту спостерігали виділення других фаз. Структура зразка II 2-ї зони складалася з бейнітно-грозитної і феритної складових (рис. 5). Структура зразка III 3-ї зони характеризувалася наявністю сорбіту і структурно-вільного фериту, зерна якого мали збільшені розміри і видовжену форму (рис. 5).

Враховували, що формування структури металу шва забезпечується відповідним температурним режимом, який враховує його перебування в області температур вище за A_3 і швидкість охолодження. Структура зразка III близька за будовою до структури зразка II. Структура зразка IV також складалася з бейніту та фериту.

Встановили (штатний режим зварювання), що тривала витримка ділянки сплавлення в області температур $T_L - T_S$ і подальше повільне охолоджен-

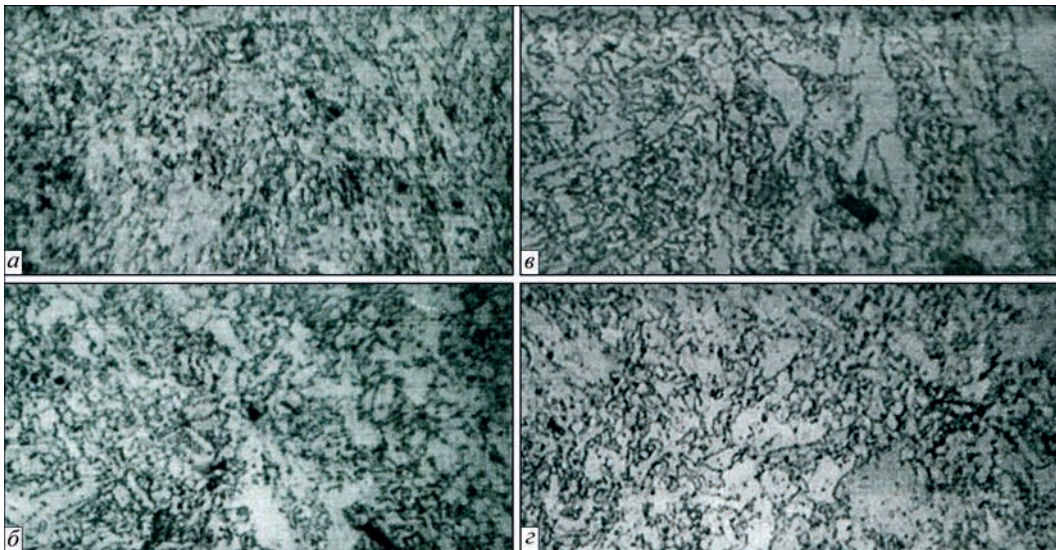


Рис. 5. Структура металу шва комбінованого зварного з'єднання (рис. 2): а – зразок I зони 2; б – зразок II зони 2; в – зразок III зони 3; г – зразок IV зони 3 (×400)

ня (0,5...1,5 °C/c) забезпечило формування на ділянці сплавлення ЗТВ (сталь 20X3МВФА) відносно великих феритних зерен (рис. 6). Такі зерна можуть локально групуватися в ланцюжки з елементами суцільності симетрично металу шва [11]. На ділянці сплавлення ЗТВ (сталь 25X2НМФА) отримали плавний перехід між структурами металу шва та основного металу.

У структурі, що сформувалася під впливом зварювального нагріву, який оптимізували шляхом моделювання [3–6] (рис. 6, а), на ділянці сплавлення відсутні крупні феритні зерна та ланцюжки із таких зерен. Структура ділянки сплавлення є дрібнозернистою, з виділенням карбідів M_3C , M_7C_3 , $M_{23}C_6$, а також Mo_2C . На ділянці сплавлення (рис. 6, б) (сталь 20X3МВФА) також спостерігається плавний перехід між структурами металу

шва та основного металу. Встановили, що оптимізація температурного режиму зварювання забезпечила: 1. Зменшення часу перебування металу ділянки сплавлення в аустенітному стані; 2. Дозволила збільшити швидкість охолодження до 3...7 °C/c, що призвело до формування відносно менших за величиною феритних зерен. 3. Надалося можливим запобігти формуванню локально сконцентрованих феритних зерен, а також утворенню ланцюжків із феритних зерен. 4. Виявили, що структура ділянок сплавлення зразків I, III, IV (рис. 2) має незначні відмінності від структури ділянки сплавлення зразка II (рис. 6).

Оптимізований зварювальний нагрів дозволив зменшити час перебування металу ділянок сплавлення, перегріву та нормалізації ЗТВ в області інтенсивного зростання аустенітних зерен ($T_s - 950$ °C). Величина аустенітних зерен на даних ділянках відповідала 6–8 балам (ДСТУ 8972:2019). Таким чином, процес зварювання на оптимізованих параметрах режиму вперше дозволив зменшити бал аустенітного зерна на ділянках сплавлення, перегріву та нормалізації ЗТВ у порівнянні з балом зерна, який отримували при зварюванні на штатних режимах.

При зварюванні ротора на оптимізованих режимах дотримувалися вимоги не допускати утворення дефектів типу несплавлення по стінках зазору та несплавлення між валиками, а також присутності шлакових включень.

Ділянки неповної перекристалізації ЗТВ сталей 20X3МВФА і 25X2НМФА (штатна технологія) відрізняються наявністю нових продуктів розпаду аустеніту у вигляді глобуляризованого перліту, згрупованого в переривчасті ланцюжки з елементами суцільності. Встановили, що розташування

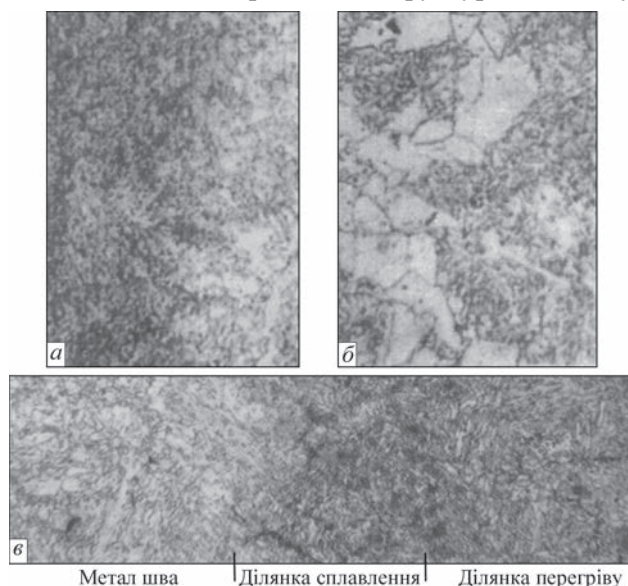


Рис. 6. Структура ділянки сплавлення ЗТВ (зразок II, рис. 2): а – сталь 25X2НМФА; б – сталь 20X3МВФА (штатний режим); в – сталь 20X3МВФА (оптимізований режим) (×400)

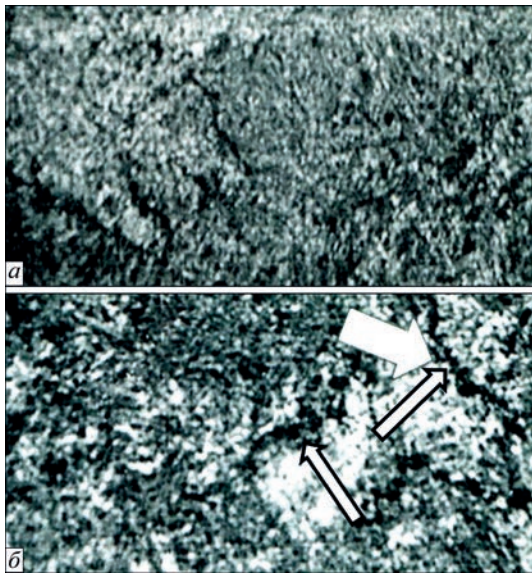


Рис. 7. Структура ділянки неповної перекристалізації ЗТВ (зразок III, рис. 2): а – сталь 25X2НМФА; б – сталь 20X3МВФА. Глобуляризовані сорбітні зерна, згруповані у ланцюжки позначені стрілками (×400)

перлітних складових узгоджується з границями аустенітних зерен. Моделювання зварювального нагріву дозволило істотно зменшити в структурі ділянки неповної перекристалізації загальну кількість перекристалізованих структур (рис. 7), зокрема, попередити утворення перліту, а також ланцюжків із перлітних зерен. Отримали на даній ділянці нові продукти розпаду аустеніту у вигляді сорбітної і трооститної складових. У структурі зразків I–IV (сталь 25X2НМФА) отримали нові продукти розпаду аустеніту у вигляді сорбіту (близько 90 %), троостит – залишкове. У зразках зі сталі 20X3МВФА кількість трооститу також складала приблизно 7...10 %, сорбіт – залишкове.

Заміри мікротвердості (рис. 8) зразків I–IV (рис. 2) підтвердили наявність виявлених у комбінованому зварному з’єднанні наведених структур.

Встановили, що короточасні механічні властивості зразка-свідка (рис. 1, 2) повною мірою відповідають нормативним вимогам, а також є вищими

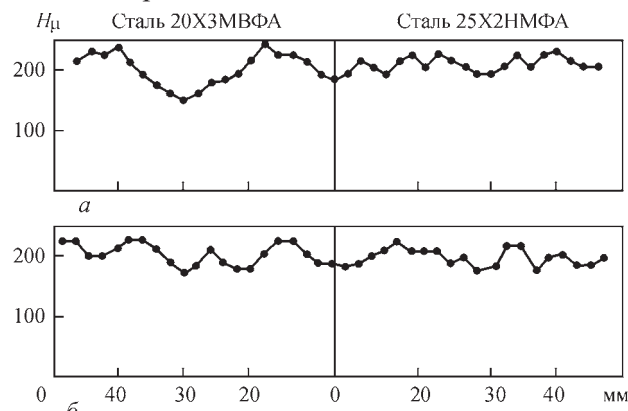


Рис. 8. Розподіл мікротвердості в комбінованому зварному з’єднанні (рис. 2): а – зразок II; б – зразок IV

Таблиця 5. Механічні властивості зразка I (рис. 2)

σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Ψ , %	KCV, Дж/см ²	HV
615	505	26	67	112	185

Таблиця 6. Механічні властивості зразка II (рис. 2)

σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Ψ , %	KCV, Дж/см ²	HV
620	515	23	65	111	191

Таблиця 7. Механічні властивості зразка III (рис. 2)

σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	Ψ , %	KCV, Дж/см ²	HV
625	512	24	64	110	190

(табл. 5–7). Руїнування зразків, що випробувалися на розтяг, переважно відбувалося по їхній зоні термічного впливу.

У цілому запропонована технологія виготовлення зварного ротора з використанням оптимізованих параметрів режиму забезпечила підвищення надійності його експлуатації і збільшення на 15...20 % терміну напрацювання ротора [3].

Для подальшого збільшення надійності та експлуатаційних характеристик досліджуваного зварного з’єднання комбінованого ротора доцільно провести додаткові випробування на втому, що необхідно для підвищення його фізико-механічних властивостей. Також необхідним є подальше вдосконалення математичної моделі температурного режиму зварювання ротора, що виготовляється.

Висновки

1. Встановлено, що моделювання температурного режиму процесу зварювання стосовно зразка-свідка комбінованого ротора дозволило отримати зварне з’єднання із різнорідних сталей 20X3МВФА і 25X2НМФА з підвищеними якісними характеристиками його вихідної структури.

2. Виявлено, що у вихідній структурі зварного з’єднання дослідного зразка комбінованого ротора розміри аустенітних зерен на ділянках сплавлення, перегріву та нормалізації ЗТВ є меншими, ніж в аналогічній структурі зразка, виготовленого за штатною технологією.

3. Встановлено, що процес зварювання на оптимізованих параметрах режиму дозволяє усунути формування на ділянці сплавлення ЗТВ (сталь 20X3МВФА) крупних феритних зерен, а також ланцюжків із феритних зерен.

4. Встановлено, що нові продукти розпаду аустеніту на ділянці неповної перекристалізації ЗТВ комбінованого зварного з’єднання (сталь 20X3МВФА), являють собою сорбіт і невелику кількість трооститу ($\leq 10\%$), а в сталі 25X2НМФА нові продукти розпаду аустеніту являють собою троостит і сорбіт ($\leq 8\%$). Виявлено, що моделювання температурного режиму дозволило попере-

дити формування перліту в структурі даної ділянки, який утворюється при проведенні штатного процесу зварювання.

Список літератури

1. СОУ-Н МПЕ 40.1.17.401:2004. *Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. Типова інструкція.*
2. ГКД 34.17.401-95. *Контроль та продовження строку служби металу устаткування теплових електростанцій. Типова інструкція. Ч. 1. Котли, турбіни та трубопроводи з тиском 9МПа і вище.*
3. Морачковський О.К., Дмитрик В.В., Усатий О.П., Зайцев Б.П., Скульський В.Ю., Гришин М.М., Пашенко Ю.Г., Кантор О.Г., Коноваленко О.В. (2019) *Створення роторів турбін великої потужності.* Харків, ФОП Панов А.М.
4. Balitskee, A.I., Dmitrik, V.V., Ivaskevich, L.M. et al. (2022) Improvement of the mechanical characteristics, hydrogen crack resistance and durability of turbine rotor steels welded joints. *Energies*, 15(16), 6006. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15166006>
5. Dmitrik, V.V., Skulsky, V.Y., Kasyanenko, I.V., Vavilov, O.V., Kantor, O.G. (2022) Improving the quality condition of the structure of welded joints made of rotor steel. *Problems of atomic science and technology*, 1(137), 212–216. DOI: <https://doi.org/10.46813/2022-137-212>
6. Dmitrik, V.V., Chen Xinlei, Kasianenko, I.V., Ustyuzhyn, I.B. (2025) Improving the output quality of steam turbine welded rotors for nuclear power plants. *Problems of atomic science and technology*, 2(156), 91–96. DOI: <https://doi.org/10.46813/2025-156-091>
7. Попова Л.Е., Попов А.А. (1991) *Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана: Справочник термиста.* Москва, Металлургия.
8. Царюк А.К., Иваненко В.Д., Бреднев В.И. (1997) *Технология сварки под флюсом соединений стали 20Х3МВФА со сталью 25Х2НМФА применительно к изготовлению ротора паровых турбин.* *Автоматическая сварка*, 8, 28–31.
9. Царюк А.К., Муравецкий С.И., Скульский В.Ю., Гришин Н.Н., Вавилов А.В., Кантор А.Г., Гринченко Е.Д. (2012) *Создание сварного комбинированного ротора среднего давления паровой турбины мощностью 325 МВт.* *Автоматическая сварка*, 8, 39–44.
10. Дмитрик В.В., Соболев О.В., Погребной Н.А., Гордиенко В.П. (2015) *Структура и свойства комбинированного сварного соединения ротора паровой турбины.* *Энергетика та електрифікація*, 6, 12–18.
11. Дмитрик В.В., Конкин В.Н., Гордиенко В.П. (2017) *К улучшению исходной структуры сварного соединения из разнородных сталей.* *Энергетика та електрифікація*, 3, 2–7.

References

1. SOU-N MPE 40.1.17.401:2004. *Control of metal and extension of service life of main elements of boilers, turbines and piping of thermal power plants. Typical instruction* [in Ukrainian].
2. GKD 34.17.401-95. *Control and extension of metal service life of thermal power plants equipment. Typical instruction. Pt. 1. Boilers, turbines and piping under pressure of 9MPa and higher* [in Ukrainian].
3. Morachkovskyi, O.K., Dmitrik, V.V., Usatyi, O.P. et al. (2019) *Development of high power turbine rotors.* Kharkiv, IE Panov, A.M. [in Ukrainian].
4. Balitskee, A.I., Dmitrik, V.V., Ivaskevich, L.M. et al. (2022) Improvement of the mechanical characteristics, hydrogen crack resistance and durability of turbine rotor steels welded joints. *Energija*, 15(16), 6006. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15166006>
5. Dmitrik, V.V., Skulsky, V.Y., Kasyanenko, I.V., Vavilov, O.V., Kantor, O.G. (2022) Improving the quality condition of the structure of welded joints made of rotor steel. *Problems of Atomic Science and Technology*, 1(137), 212–216. DOI: <https://doi.org/10.46813/2022-137-212>
6. Dmitrik, V.V., Chen Xinlei, Kasianenko, I.V., Ustyuzhyn, I.B. (2025) Improving the output quality of steam turbine welded rotors for nuclear power plants. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2(156), 91–96. DOI: <https://doi.org/10.46813/2025-156-091>
7. Popova, L.E., Popov, A.A. (1991) *Diagrams of austenite transformation in steels and β -solution in titanium alloy: Refer. Book of heat-treater.* Moscow, Metallurgiya [in Russian].
8. Tsaryuk, A.K., Ivanenko, V.D., Brednev, V.I. (1997) *Submerged arc welding technology of joints of 20Kh3MVFA steel with 25Kh2NMFA steel for manufacturing of steam turbines rotor.* *Avtomaticheskaya Svarka*, 8, 28–31 [in Russian].
9. Tsaryuk, A.K., Muravetsky, S.I., Skulsky, V.Yu. et al. (2012) *Development of forge-welded combined medium-pressure rotor for 325 MW steam turbine.* *Avtomaticheskaya Svarka*, 8, 39–44 [in Russian].
10. Dmytryk, V.V., Sobol, O.V., Pogrebnoy, N.A. Gordienko, V.P. (2015) *Structure and properties of combined welded joint of steam turbine rotor.* *Energetyka ta Elektrifikatsiya*, 6, 12–18 [in Russian].
11. Dmytryk, V.V., Konkin, V.N., Gordienko, V.P. (2017) *On improvement of initial structure of welded joints from dissimilar steels.* *Energetyka ta Elektrifikatsiya*, 3, 2–7 [in Russian].

IMPROVEMENT OF QUALITY CHARACTERISTICS OF A WELDED JOINT OF A COMBINED ROTOR

V.V Dmitrik¹, Chen Xinlei¹, I.V Kasianenko¹, O.S. Harashchenko¹, O.L. Platuhi²

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute». 2 Kyrpychova Str., 61002, Kharkiv, Ukraine.

E-mail: dmitrikvitali@gmail.com

²JSC «Ukrainian Energy Machines». 199 Heroiv Kharkova Ave., 61037, Kharkiv, Ukraine.

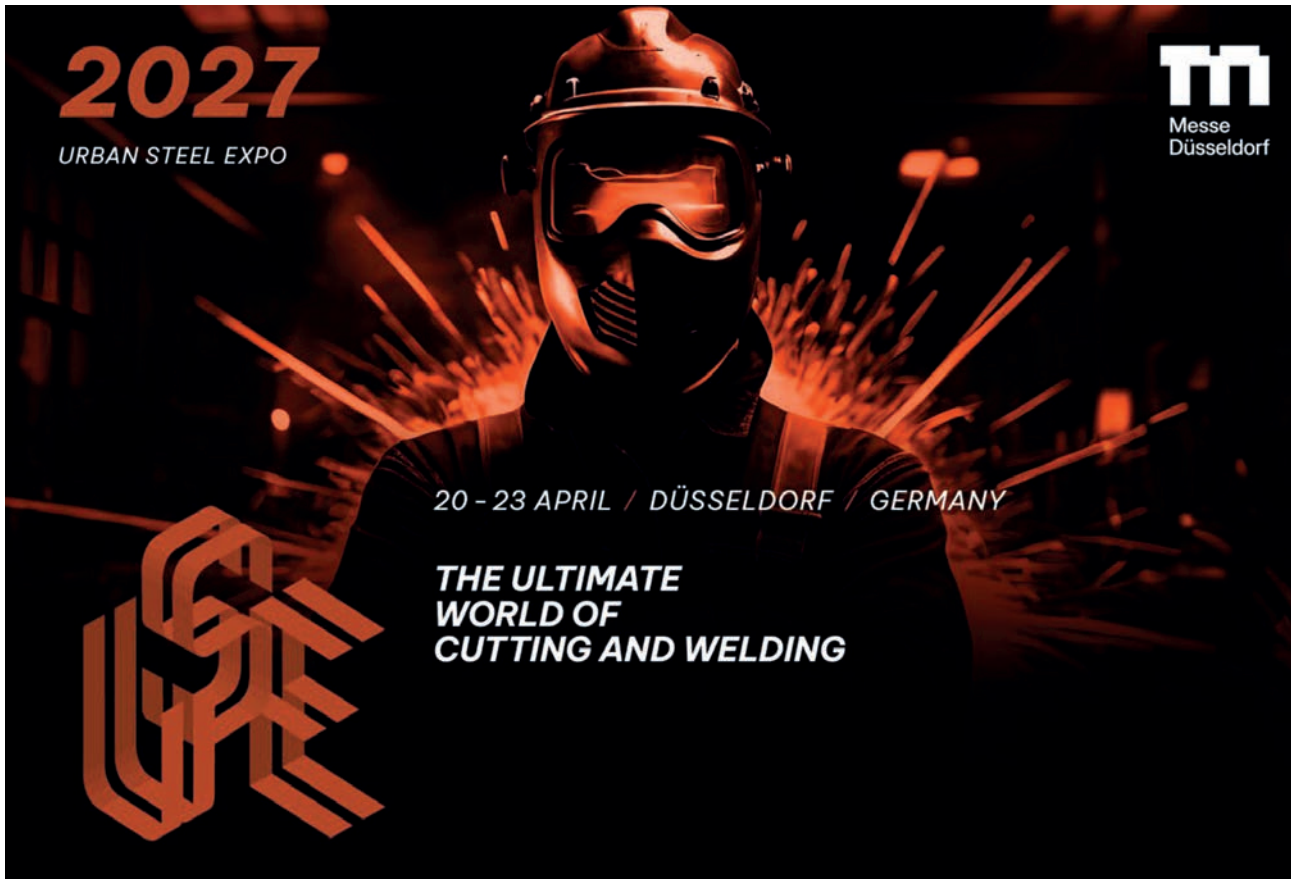
The features of the structure of a welded joint of a combined medium-pressure rotor made of 20Kh3MVFA and 25Kh2NMFA steels are presented. The rotor manufacturing process involved automatic welding using mode parameters that were optimized by welding heat simulation. The implementation of the proposed automatic welding process ensured producing of a rotor welded joint with improved indices of its initial structure and increased mechanical properties. An analysis of the microstructure of the weld metal and the heat-affected zone of the combined welded joint was performed, and its mechanical properties were determined. It was found that these indices are higher than similar characteristics obtained using standard technology, which did not involve welding heat simulation. 11 Ref., 7 Tabl., 8 Fig.

Keywords: combined welded joint, rotor, turbine, crack, structure, heat-affected zone, parameters of the mode, mechanical properties, welding materials, heat treatment, chemical composition

Отримано 15.12.2024

Отримано у переглянутому вигляді 13.11.2025

Прийнято 14.01.2026



2027
URBAN STEEL EXPO

Messe Düsseldorf

20 - 23 APRIL / DÜSSELDORF / GERMANY

**THE ULTIMATE
WORLD OF
CUTTING AND WELDING**



AIPnD

JUNE 15TH/19TH
VERONA (ITALY)

14th
MECNDT 2026

EUROPEAN CONFERENCE ON NON-DESTRUCTIVE TESTING

ПАМ'ЯТІ В.М. ІЛЮШЕНКА



Дирекція та колектив Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України з великим сумом сповіщають, що 15 січня 2026 р. на 88 році життя не стало Валентина Михайловича Ілюшенка – кандидата технічних наук, визначного вченого в галузі технології та металургії зварювання та наплавлення конструкційних сталей й важких кольорових металів і сплавів.

Валентин Михайлович народився 01.07.1938 р. у смт. Макарів Київської обл. Після закінчення з відзнакою Київського політехнічного інституту (1959 р.) за спеціальністю «Устаткування та технологія зварювального виробництва» і до останнього працював в ІЕЗ ім. Є.О. Патона, де пройшов шлях від інженера до заступника директора ДКТБ Інституту, а згодом – завідувача наукового відділу. У 1971 р. захистив кандидатську дисертацію на тему «Металлургические и технологические особенности механизированной дуговой наплавки бронзы».

Основними напрямками його наукової та інженерної діяльності було дослідження в галузі металургії та технології зварювання та наплавлення кольорових металів і сплавів; розробка технологічних процесів та обладнання для автоматичного дугового зварювання у різних просторових положеннях; механізація зварювальних процесів.

Вагомий внесок В.М. Ілюшенко вніс у створення високоефективних технологічних процесів зварювання міді та її низьколегованих сплавів великих товщин для виготовлення відповідальних зварних конструкцій – кристалізаторів печей ЕШП та ВДН, фурм металургійного виробництва, мідних вузлів великих електричних машин та інших

розробок інституту з комплексної механізації зварювального виробництва у найважливіших галузях промисловості.

Маючи хороші професійну підготовку та організаційні здібності, В.М. Ілюшенко успішно поєднував науково-дослідну роботу на доручених йому напрямках з широким впровадженням нових розробок у виробництво. У 1980–1987 рр. будучи заступником начальника ДКТБ ІЕЗ ім. Є.О. Патона, він брав безпосередню участь у впровадженні нових розробок Інституту з комплексної механізації зварювального виробництва в різних галузях промисловості.

У 1987 р. В.М. Ілюшенко очолив науковий відділ проблем техніки та технології дугового зварювання, який і до тепер займається комплексними дослідженнями з розвитку технологічних процесів автоматизованого дугового зварювання, створенням дослідних зразків нової техніки для дугових процесів, вивченням зварювально-технологічних властивостей джерел живлення нового покоління, а також розробкою зварювальних матеріалів для мідних сплавів.

У 1992 р. В.М. Ілюшенка обрано академіком Української академії наук національного прогресу (з 2004 р. – Українська академія наук).

Починаючи з 1998 р. був членом редакційної колегії журналу «Сварщик».

Будучи впродовж багатьох років вченим секретарем, віце-президентом і виконавчим директором Товариства зварювальників України, Валентин Михайлович багато сил та енергії віддав організаційній роботі в Товаристві. Щире визнання колег і співробітників він заслужив своїм професіоналізмом, невичерпною діловою та творчою енергією, працьовитістю та доброзичливістю.

В.М. Ілюшенко – автор та співавтор понад 250 наукових праць і винаходів.

Нагороджений Почесною грамотою Президії Верховної Ради УРСР (1984 р.), Почесною грамотою Кабінету міністрів України (2009 р.), відзнакою НАН України «За професійні здобутки» (2008 р.), почесною відзнакою Товариства зварників України «За особистий внесок у розвиток зварювального виробництва» (2010 р.).

Валентин Михайлович був не тільки висококваліфікованим фахівцем у галузі зварювання та споріднених технологій, а й прекрасною людиною, який завжди знаходив можливість вислухати, дати цінні поради та допомогти в будь-якій життєвій ситуації. Вічна пам'ять, Валентине Михайловичу.

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України
Редколегія журналу

МІЖНАРОДНИЙ КОНКУРС ЗВАРНИКІВ ЕССЕН – 2025



Під час проведення Міжнародного ярмарку зварювання та різання «Schweissen & Schneiden 2025», який проходив у місті Ессен (Німеччина) з 17 по 19 вересня 2025 р., відбувся Міжнародний конкурс зварників серед молоді до 22 років – «International Welding Competition 2025». Організатором конкурсу виступило Німецьке Зварювальне Товариство – DVS. Формування команди України, відбір кандидатів, їх підготовку, матеріальне забезпечення та відрядження здійснило Товариство зварників України (ТЗУ). Цього року у конкурсі взяли участь представники з 13 країн світу: Німеччини, Швейцарії, Болгарії, Чехії, Румунії, Греції, України, Боснії та Герцеговини, Іспанії, Словенії, Італії, Індії та Китаю. Кожна команда складалася з 4-х зварників, які виконували завдання за своїм методом зварювання, а також тренера та керівника команди.

Міжнародний конкурс складався з двох завдань: одного індивідуального та одного командного. Обидва завдання мали бути виконані протягом дев'яти годин: одна година відводилася на індивідуальне завдання і вісім годин – на командне.

У індивідуальному завданні учасники зварювали один тестовий зразок:

- у номінаціях 111 та 135 – кутове з'єднання пластин в стельовому положенні;
- у номінаціях 141 та 311 – стикове з'єднання труб у вертикально-неповоротному положенні.



Команда України разом з Президентом ТЗУ Сергієм Максимовим (третій ліворуч)

Командне завдання передбачало виконання стикових і кутових зварних швів на листах і трубах у всіх положеннях зварювання на конструкції, що являла собою посудину під тиском. Для цього застосовувалися процеси зварювання 111, 141, 311 і 135.

Склад команди України:

Василь Даукуліс, випускник ДНЗ «Ковельський центр професійно-технічної освіти» за професією «Електрогазозварник», переможець конкурсу «EdUP welding 2024» у номінації 111;

Микола Кокотко, майстер виробничого навчання ТНЗ «Міжрегіональне вище професійне училище автомобільного транспорту та будівництва», найкращий зварник віком до 22 років конкурсу «Paton Welding Cup 2025» у номінації 135;

Євгеній Панченко, здобувач освіти Комунального закладу «Дніпровське вище професійне училище будівництва» Дніпровської міської ради, переможець конкурсу «EdUP welding 2024» у номінації 141;

Остан Гаврис, випускник Івано-Франківського професійного будівельного ліцею за професією «Електрогазозварник», переможець конкурсу «EdUP welding 2024» у номінації 311;

Олександр Попов – тренер команди, заступник директора з виробничої роботи Вищого професійного училища №7 м. Кременчук;

Олександр Воробйов – керівник команди, керівник зварювальних робіт АТ «Одеський припортовий завод», виконавчий директор Одеського обласного ТЗУ.

Оцінювання якості зварних швів в індивідуальному та командному зварюванні проводилося між-



Виконане командне завдання



Загальна командна фотографія

народним журі, сформованим із представників команд. Контроль здійснювався візуальним методом за методикою, визначеною програмою конкурсу, відповідно до стандарту EN ISO 5817. Для стикових з'єднань труб індивідуального завдання також проводився рентгенографічний контроль, а для кутових швів – випробування руйнуванням на згин. В індивідуальному конкурсі загальний бал складався з результатів оцінки індивідуального завдання та оцінки якості двох швів конструкції командного завдання. У командному конкурсі зварна конструкція додатково випробовувалася тиском тривалістю дві хвилини на кожному етапі.

Результати конкурсу: Василь Даукуліс (номінація 111) – 2/3 місце (поділено з представником Китаю); Микола Кокотко (номінація 135) – 6 місце; Євгеній Панченко (номінація 141) – 5 місце; Остап Гаврис (номінація 311) – 4 місце.

У командному конкурсі переможцем стала команда Швейцарії, друге місце посіла команда Боснії та Герцеговини, а третє місце – команда Румунії.

Зварники України посіли шосте командне місце, що є за якістю зварних швів третім командним результатом. На превеликий жаль, зварна конструкція нашої команди не витримала випробування тиском та дала течу, що вплинуло на загальний результат.

Товариство зварників України висловлює щирі подяку всім, хто підтримував команду та надавав

допомогу в забезпеченні, підготовці та участі команди у конкурсі: ТОВ «ІНСАЙТ», м. Чернігів, ПП ТОВ «БІНЦЕЛЬ УКРАЇНА ГМБХ», м. Київ, ТОВ «Інтерхім-БТВ», м. Київ, ТОВ «ПАТОН ІНТЕРНЕСНЛ», м. Київ, ВАТ «САММІТ», м. Дніпро, «Міжрегіональне вище професійне училище автомобільного транспорту та будівництва», м. Львів, Швейцарська фундація технічного співробітництва України з розвитку «Свісконтакт», а також проєкту «Публічно-приватне партнерство для поліпшення професійної освіти в Україні» (EdUP), м. Київ.

Українська команда вперше взяла участь у Міжнародному конкурсі зварників серед молоді до 22 років «International Welding Competition 2025» і гідно представила Україну на міжнародній арені. Молоді зварники продемонстрували високий рівень професійної підготовки та здатність конкурувати на міжнародному рівні.

Такий результат став можливим завдяки тісній співпраці, що триває вже два роки, між Товариства зварників України та Проєктом EdUP, одним із напрямів діяльності якого є розвиток і вдосконалення професійної освіти в навчальних закладах України за зварювальними спеціальностями.

Участь у такому масштабному конкурсі стала важливим етапом у розвитку фахових навичок та підтвердила конкурентоспроможність українських спеціалістів на світовому рівні.

Олександр Воробйов,
виконавчий директор Одеського обласного ТЗУ.

ВИСОКОЕФЕКТИВНИЙ ПРОЦЕС MIG-ЗВАРЮВАННЯ ПОДВІЙНИМ ДРОТОМ. РІШЕННЯ AOTAI

З поступовим розвитком технології виробництва великогабаритних конструкційних деталей товсті та дуже товсті листи широко застосовуються в суднобудуванні, сталевих конструкціях, будівництві мостів, будівельному машинобудуванні та інших галузях. Вимоги до ефективності та якості зварювання також стають все вищими. Традиційні процеси зварювання більше не здатні задовольнити вимоги високоякісного та ефективного зварювання середніх та товстих листів.

Вимоги до високоєфективного зварювання

Висока ефективність: зменшена площа фаски; менша кількість проходів зварювання; зменшена деформація від зварювання.

Висока якість: покращене проплавлення; усунення дефекту неповного проплавлення кореня; кращі механічні властивості.

Висока швидкість наплавлення: менше шарів зварювання; економія часу; підвищена продуктивність.

Збільшення діаметра дроту: збільшений струм, підвищене тепловкладення, «пальцеподібне» проплавлення поперечного перерізу зварного шва, погані механічні властивості.

Використання подвійних джерел живлення та подвійного дроту з подвійною дугою: додатково додане джерело живлення та зварювальний пальник призводять до високої вартості; конструкція спеціального зварювального пальника є складною, а головка пальника має великі розміри; доступна лише обмежена кількість зварювальних положень, і його не можна застосовувати при ручному зварюванні.

Інноваційна технологія подвійного дроту

Використовується одне джерело живлення для зварювання, один механізм подачі дроту та один

спеціально виготовлений пальник для зварювання подвійним дротом, розмір якого такий же, як у звичайного пальника для одного дроту. Використовуються два дроти малого діаметра для створення більших зварювальних крапель та ширшого конуса дуги, що може підвищити швидкість наплавлення приблизно на 40% порівняно з традиційним процесом одного дроту.

Переваги: одне джерело живлення для зварювання; один механізм подачі дроту; один зварювальний пальник; один контактний наконечник.

Рішення AOTAI для GMAW подвійним дротом перевизначає діапазон застосування GMAW подвійним дротом. Воно використовує електромагнітну силу, що виникає між подвійними дротами, щоб подолати обертальну силу, що безумовно реалізує підвищення продуктивності.

Підвищення ефективності: розширення струму GMAW до 600–700 А; метал переноситься стабільно та нормально при високих струмах; швидкість наплавлення на 50% вища при кутовому зварюванні листів товщиною 8 мм. Рекомендовані стандарти: плоске кутове зварювання, 8 мм катети шва.

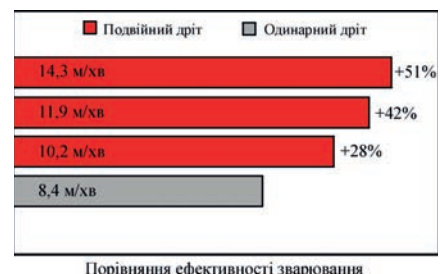
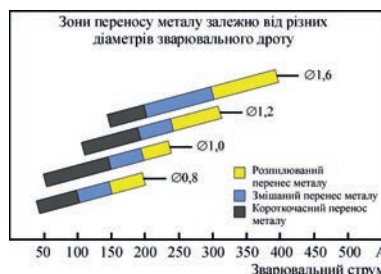
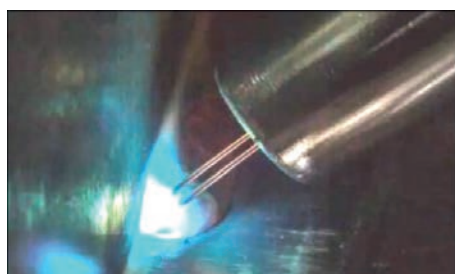
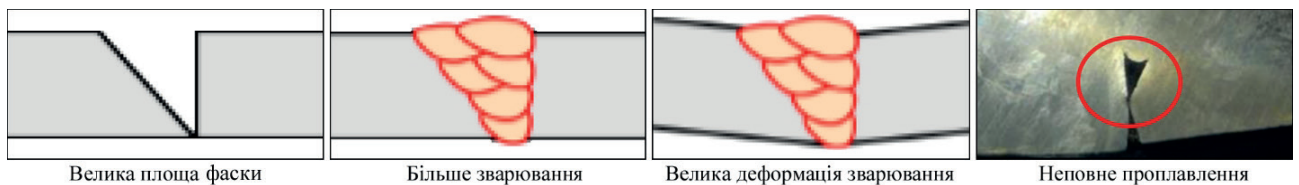
Порівняння швидкості наплавлення: один дріт – 6 кг/год; напівавтоматичний подвійний дріт – 10 кг/год; автоматичний подвійний дріт – 12 кг/год.

Порівняння діапазону застосовуваного струму

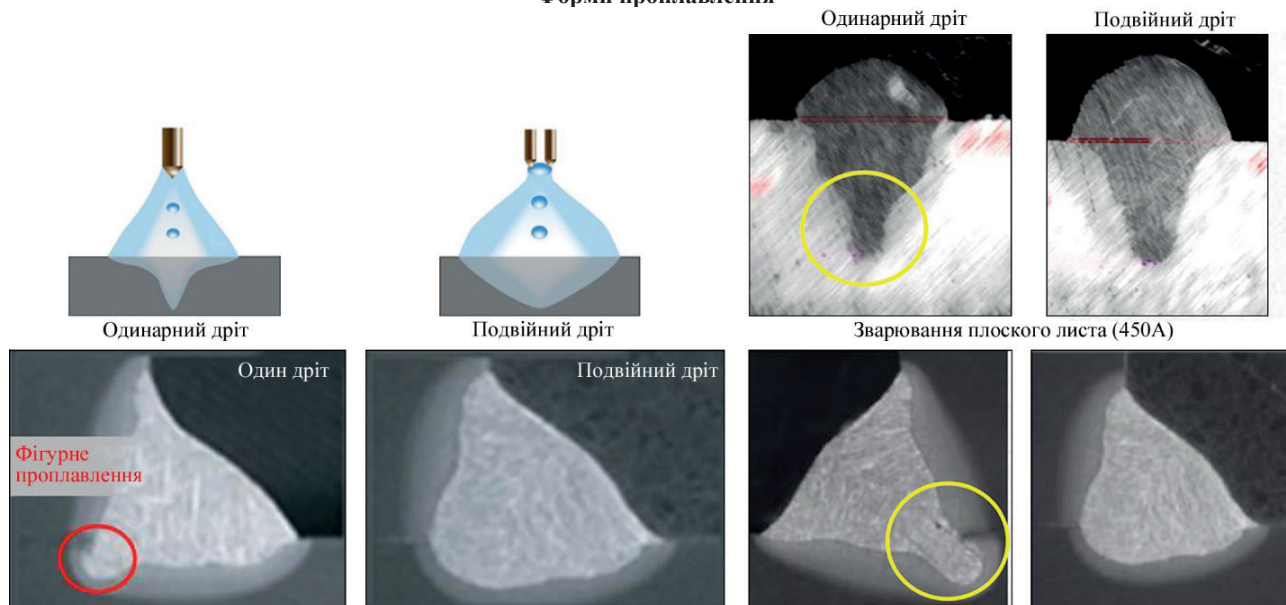
Тип	Діапазон струму	СТАБІЛЬНІСТЬ
Один дріт Ø 1.2	350А – 650 А	Обмежена
Подвійний дріт Ø 1.0	350 А – 750 А	Стабільне зварювання
Подвійний дріт Ø 1.2	400 А – 800 А	Найвища продуктивність

Діапазон застосовуваного струму

Нижня межа струму: глобулярне перенесення зі формуванням великої краплі, високі бризки, не-



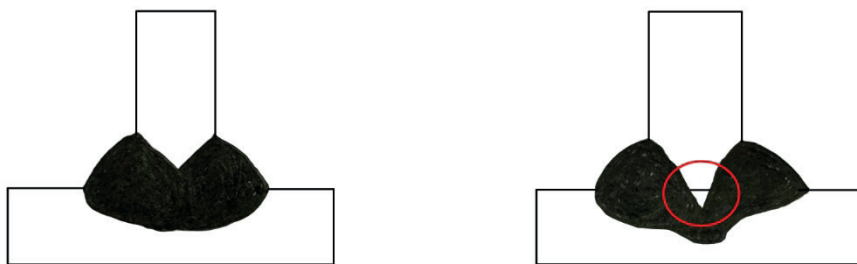
Форми проплавлення



Порівняння форми та зовнішнього вигляду зварювальних швів

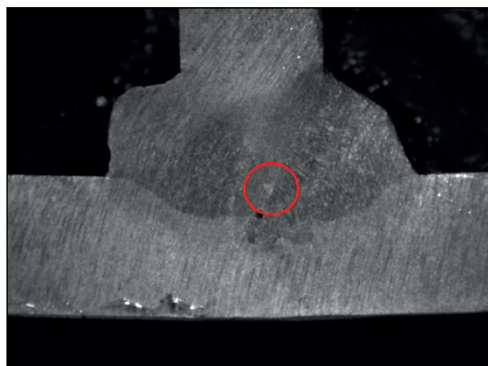
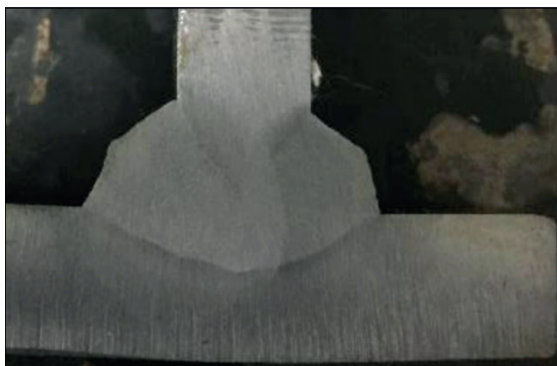
Плоске кутове зварювання (400A)

Зварювання з повним проплавленням з двох сторін для Т-подібного куткового шва



«Чашоподібне» проплавлення (традиційне зварювання)

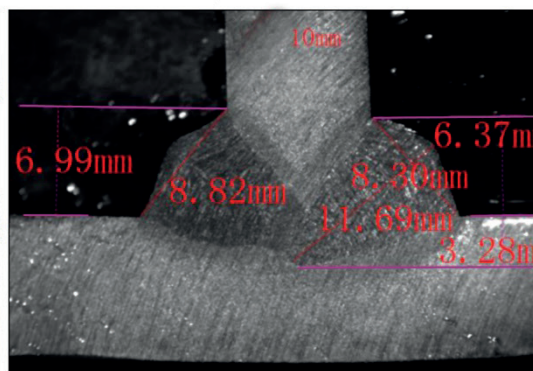
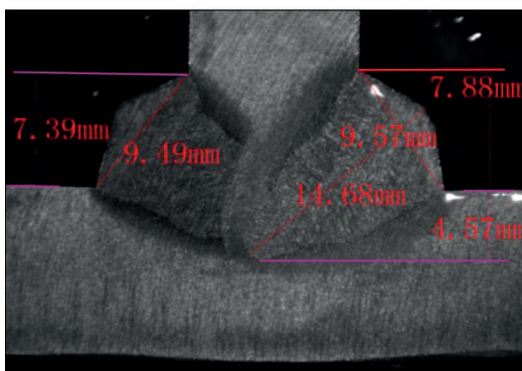
«Пальцеподібне» проплавлення (подвійний дріт)



Повне проплавлення Т-подібних швів з обох сторін при зварюванні подвійним дротом

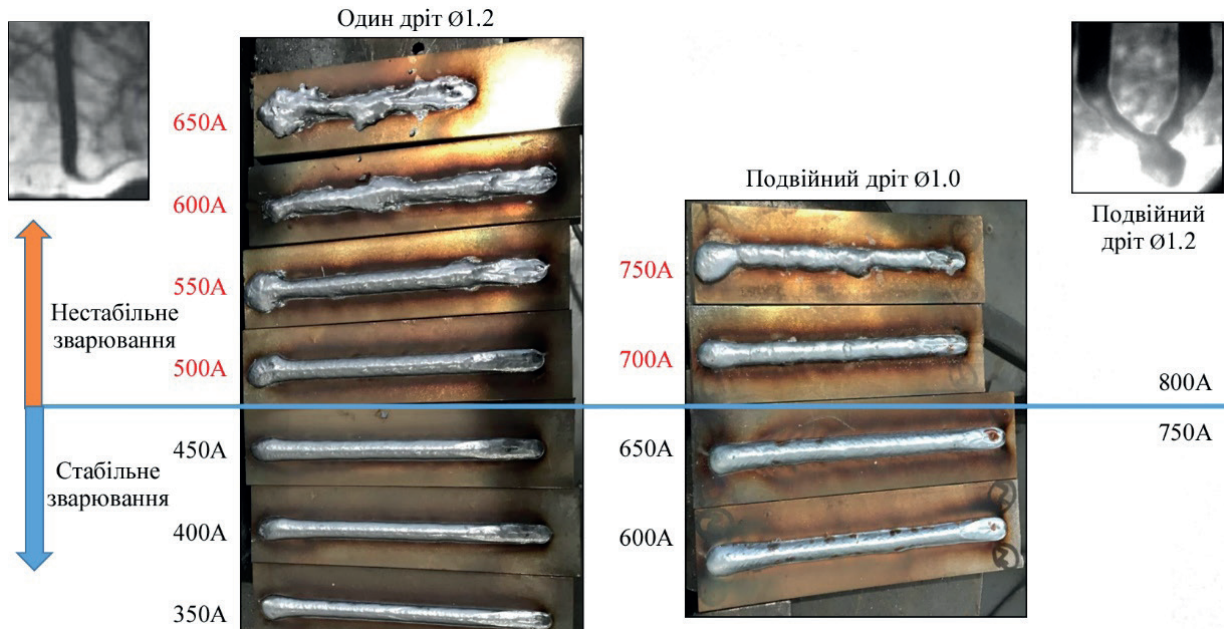
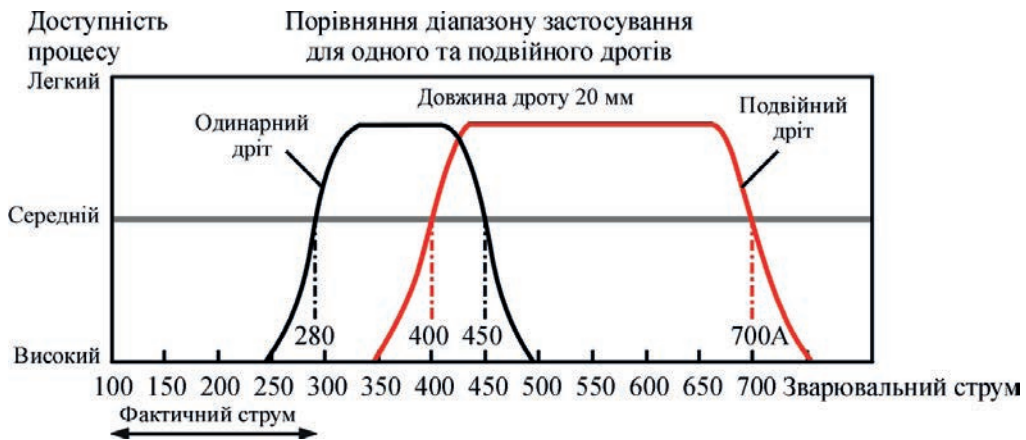
Товщина пластини 12 мм

Товщина пластини 10 мм



Зварювання з повним проплавленням 550–580 А
60–65 см/хв

Зварювання з повним проплавленням 450–500 А
60–65 см/хв



стабільний процес. *Верхня межа струму:* обертання дуги, розплавлений метал викидається з ванни розплаву, і зварний шов має погане формування. *Оптимальний діапазон:* подвійний дріт забезпечує стабільне зварювання в широкому діапазоні струмів.

Високошвидкісне зварювання Т-подібного кутового шва

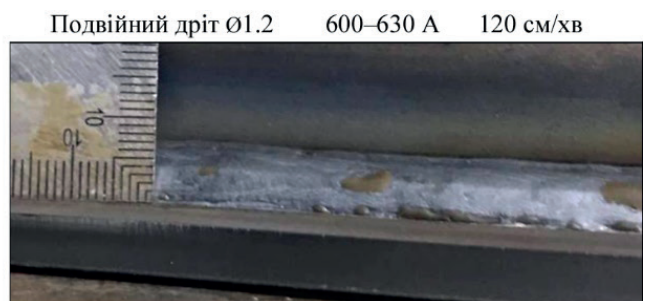
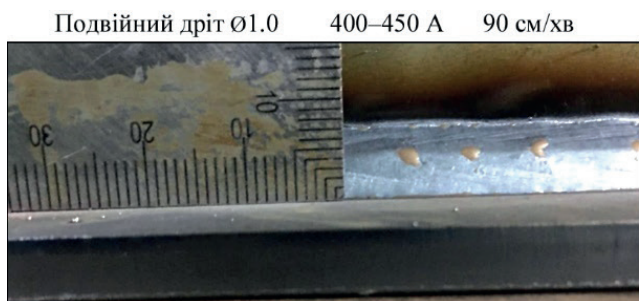
Параметри: товщина листа 6 мм, катет кутового шва 6–7 мм.

Подвійний дріт Ø 1.0 400-450 А 90 см/хв	Подвійний дріт Ø 1.2 600-630 А 120 см/хв	Один дріт (порівняння) Стандартний режим 40-50 см/хв
--	---	--

Порівняння ефективності зварювання: один дріт Ø1.2, 50 см/хв; подвійний дріт Ø 1.0, 90 см/хв (+80% покращення); подвійний дріт Ø 1.2, 120 см/хв (+140% покращення).

Покращення якості проплавлення

При збільшенні швидкості зварювання також покращується форма проплавлення зварного шва



(пальцеподібне проплавлення) та зменшуються пористість шва та інші дефекти, спричинені «пальцеподібним» проплавленням.

Один дріт: пальцеподібне проплавлення; можливі дефекти; неоптимальна форма.

Подвійний дріт: покращена форма; менша пористість; вища якість.

Результат випробувань: покращена форма проплавлення при наплавленні плоского листа (450 А) та плоскому кутовому зварюванні (400 А).

Переваги системи з одним джерелом живлення: легке збирання, низька вартість обладнання, компактна конструкція, просте керування.

Стабільність дуги

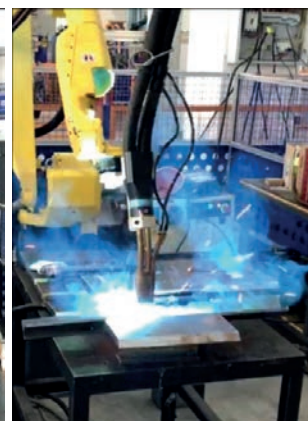
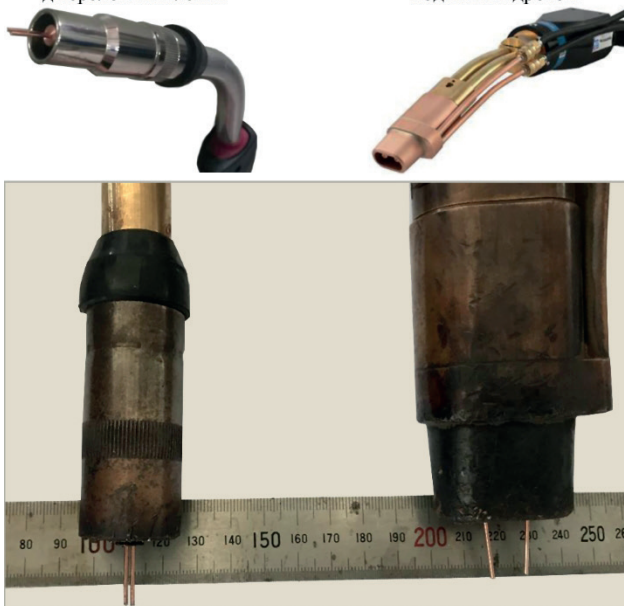
Переваги одної дуги: розташування двох дротів не впливає на зварювальну дугу; дуга не зазнає втручання, бризки нижчі, а ванна розплаву мала та легко контролюється.

Одна дуга (подвійний дріт з одним джерелом): без інтерференції дуги.

Компактність пальника

Пальник для зварювання подвійним дротом з одним джерелом живлення

Тандемний пальник для зварювання подвійним дротом



Зварювання подвійним дротом з одним джерелом живлення може застосовуватися при ручному, напівавтоматичному, та автоматичному зварюванні

Тандемне зварювання подвійним дротом може застосовуватися лише при автоматичному зварюванні

Система з одним джерелом

Тандемна система



- Одне джерело живлення для зварювання
- Один механізм подачі дроту
- Один зварювальний пальник
- Один контактний наконечник

- Два джерела живлення для зварювання
- Два механізми подачі дроту
- Один великий зварювальний пальник
- Два контактні наконечники

Подвійна дводротова дуга (тандемний подвійний дріт): можлива інтерференція між дугами.

Практичні приклади застосування. Галузі застосування

Спеціальні транспортні засоби – кутові шви, ефективність підвищена на 50%.

Вуглевидобувне машинобудування – зменшення кількості проходів, ефективність підвищена на 30%.

Виробництво сталевих конструкцій – К-подібні фаски, економія часу близько 40%.

Виробництво конструкційних деталей суден – кількість проходів зменшена з 2 до 1, ефективність підвищена на 50%.

Виробництво електричних веж – Т-подібні кутові зварні шви, високошвидкісне зварювання з двох сторін, повне проплавлення.

Просування технології

Ручне зварювання. Застосування конфігурації подвійного дроту з діаметром 1.0/1.2 мм; нижня межа застосовуваного струму становить 350 А; Зварювальний пальник з водяним охолодженням довжиною 3 м.

Автоматичне зварювання. Застосовуються обидві конфігурації подвійного дроту з діаметром 1.0 мм та 1.2мм. Нижня межа придатного струму коливається від 450 А до 500 А. Зварювальний пальник з водяним охолодженням.

Застосування методу. Зварювання подвійним дротом застосовується для кутового зварювання та заповнювального зварювання фасок, але не для зварювання у всіх положеннях

Перемикання між режимами. Можливе перемикання між зварюванням одним дротом та подвійним дротом (достатньо замінити контактний наконечник для зварювання одним дротом та витягти один зварювальний дріт).

Ключові переваги технології

Ефективність. Підвищення швидкості на 40–140%.

Якість. Покращене проплавлення зварних швів.

Вартість. Використання одного джерела живлення.

Універсальність. Підходить для ручного та автоматичного зварювання.

XXIV МІЖНАРОДНИЙ ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ-2026

МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ



МЕТАЛОБРОБКА



УКРЗВАРЮВАННЯ



УКРВТОРТЕХ



ГІДРАВЛІКА ПНЕВМАТИКА



ПІДШИПНИКИ



УКРЛИТВО



АВТОМАТИЗАЦІЯ І РОБОТОТЕХНІКА



БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА



ЗРАЗКИ, СТАНДАРТИ ЕТАЛОНИ, ПРИЛАДИ



ПІДЙОМНО-ТРАНСПОРТНЕ СКЛАДСЬКЕ ОБЛАДНАННЯ



ІНДУСТРІАЛЬНІ ПАРКИ

Генеральний інформаційний партнер:
ОБЛАДНАННЯ ІСТРУМЕНТИ



26-28 травня

Місце проведення:
МВЦ, м. Київ,
Броварський пр-т, 15,
станція метро «Лівобережна»



+38 (095) 268-05-85,
+38 (096) 505-52-66

plast@iec-expo.com.ua

www.iec-expo.com.ua

