

З А В Т О М А Т И Ч Н Е 2 0 2 3 С В А Р Ю В А Н Н Я

Автоматическая сварка

Видається 12 разів на рік з 1948 р.

Automatic Welding

Published 12 times per year since 1948

ЗМІСТ

МЕТАЛОЗНАВСТВО

Лобанов Л.М., Сизоненко О.М., Рябцев І.О., Пащин М.О.,
Бабінець А.А., Лентюгов І.П., Торпаков А.С., Міходуй О.Л.,
Соломійчук Т.Г. Удосконалення технології виготовлення
модифікаторів системи Ti-TiC та дослідження їх впливу на
структуру наплавленого металу типу 25X5ФМС3

Покляцький А.Г., Мотруніч С.І., Федорчук В.Є., Клочков І.М.
Міцність та структура стикових, напускних і кутових
з'єднань сплаву АМг6М, отриманих зварюванням тертям з
перемішуванням 10

ЗВАРЮВАННЯ ПОЛІМЕРІВ

Кораб М.Г., Юрженко М.В., Ковальчук М.О., Паршутіна Л.С.,
Чукашкін О.М. Дослідження структури зварних з'єднань
полімерів з використанням ефекту Ребіндера 18

ЗАХИСНІ ПОКРИТТЯ

Борисова А.Л., Кільдій А.І., Цимбаліста Т.В., Васильківська
М.А. Детонаційні покриття на основі інтерметаліду TiAl з
добавками неметалевих тугоплавких сполук24

ЗВАРЮВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ

Ланкін Ю.М., Байштрук Є.М., Семікін В.Ф., Романова І.Ю.
Машина для контактного точкового мікрозварювання34

СЕРТИФІКАЦІЯ

Костін О.М. Рекомендації щодо випробувань зварюваності
при сертифікації виробництва суднобудівних сталей40

ОХОРОНА ПРАЦІ

Левченко О.Г., Полукаров Ю.О., Гончарова О.М.,
Безушко О.М. Гігієнічна характеристика магнітних полів
при різних способах дугового зварювання46

ІНФОРМАЦІЯ

Чинні патенти ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ на корисні моделі53

Доклади 75-ї щорічної асамблеї МІЗ 59

Жінки ІЕЗ ім. Є.О. Патона в науці61

CONTENT

METAL SCIENCE

Lobanov L.M., Syzonenko O.M., Ryabtsev I.O., Pashchyn M.O.,
Babinets A.A., Lentugov I.P., Torpakov A.S., Mikhoduj O.L.,
Solomiichuk T.G. Improvement of technology of producing
Ti-TiC modifiers and studying their impact on the structure of
deposited metal of type 25Kh5FMS3

Poklyatskyi A.G., Motrunich S.I., Fedorchuk V.E.,
Klochkov I.M. Strength and structure of butt, overlap and fillet
joints of AMg6M alloy produced by friction stir welding 10

WELDING POLYMERS

Korab M.G., Yurzenko M.V., Kovalchuk M.O.,
Parshutina L.S., Chukashkin O.M. Investigations of the
structure of welded joints of polymers using the Rebinder effect 18

PROTECTIVE COATINGS

Borysova A.L., Kildii A.I., Tsybalyista T.V., Vasylykivska M.A.
Detonation coatings based on TiAl intermetallics with additions
of non-metallic refractory compounds24

WELDING EQUIPMENT

Lankin Yu.M., Bayshtuk E.M., Semikin V.F., Romanova I.Yu.
Machine for resistance spot microwelding34

SERTIFICATION

Kostin O.M. Recommendations on weldability testing at
certification of shipbuilding steel production40

OCCUPATIONAL HEALTH

Levchenko O.G., Polukarov Yu.O., Goncharova O.M.,
Bezushko O.M. Hygienic characteristic of magnetic fields at
different arc welding methods46

INFORMATION

Current patents of E.O. Paton Electric Welding Institute for
useful models53

Proceedings of 75th annual assembly of IIW 59

Women of E.O. Paton Electric Welding Institute in science61



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



Автоматичне зварювання Автоматическая сварка Automatic Welding

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

Засновники

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

Адреса

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ
03150, Україна, Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11
Тел./факс: (38044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/ukr/journal/as

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

Рекомендовано до друку
редакційною колегією журналу

Свідоцтво про державну
реєстрацію KB 4788 від 09.01.2001

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

Передплата 2023

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

За зміст рекламних матеріалів
видавець відповідальності не несе.

EDITORIAL BOARD

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

Founders

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

Address

E.O. Paton Electric Welding Institute of NASU
03150, Ukraine, Kyiv-150, 11 Kazymyr Malevych Str.
Tel./fax: (38044) 205-23-90
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com/eng/journal/as

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

Order of the MES of Ukraine № 409 of 17.03.2020.

Recommended for printing Editorial Board of the Journal

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

Subscription 2023

Subscription index 70031.
12 issues per year (issued monthly), back issues available.
\$384, subscriptions for the printed (hard copy) version,
air postage and packaging included.
\$312, subscriptions for the electronic version
(sending issues of Journal in pdf format
or providing access to IP addresses).
Subscription is possible for previous issues for any year.
Articles from «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.

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИПРОБУВАНЬ ЗВАРЮВАНOSTI ПРИ СЕРТИФІКАЦІЇ ВИРОБНИЦТВА СУДНОБУДІВНИХ СТАЛЕЙ

О.М. Костін

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова. 54025, м. Миколаїв, просп. Героїв України, 9.
E-mail: kostin.weld@gmail.com

Сформульовано рекомендації щодо вибору зварювальних матеріалів для випробувань зварюваності при сертифікації виробництва листового прокату зі суднобудівних сталей підвищеної міцності. Показано, що сертифіковані зварювальні матеріали не забезпечують заявлені категорійні показники ударної в'язкості металу шва при збільшенні погонної енергії зварювання до 5,0 кДж/мм, що пов'язане з критичним, залежним від термічного впливу, ростом дендритів. У цьому зв'язку, для отримання гарантованого позитивного результату, контрольні зварні з'єднання слід розглядати як особливо відповідальні конструкції, що надає можливість, відповідно до Правил Класифікаційних Товариств (Регістр Ллойда – LR, Бюро Верітас – BV тощо), призначати до використання комбінації зварювальних матеріалів, які мають на одну категорію вище оптимальної, наприклад, 4Y замість 3Y або 5Y40 замість 4Y40. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: сертифікація виробництва, суднобудівні сталі, зварні з'єднання, зварювальні матеріали, випробування зварюваності

Вступ. Сучасне виробництво корпусів кораблів, стаціонарних нафтових та газових бурових платформ, вітроенергетичних установок та інших металоконструкцій прибережної зони морського виконання широко використовує листовий прокат із суднобудівних сталей підвищеної міцності. Основним технологічним процесом їх виготовлення є зварювання, якість якого залежить від багатьох факторів, у тому числі від здатності сталей витримувати термічні цикли нагріву при зварюванні. Відомо, що властивості зони термічного впливу (ЗТВ) в значній мірі залежать від фазових перетворень, характер яких визначається інтенсивністю та ступенем розвитку дифузійних процесів перерозподілу вуглецю та інших легуючих елементів і домішок в умовах впливу зварювального термічного циклу [1, 2]. Виконати аналітичну оцінку механічних властивостей високотемпературних ділянок ЗТВ за хімічним складом, особливо показників ударної в'язкості при від'ємних температурах, з урахуванням впливу багаторазового термічного навантаження, з достатньою для виробничої практики точністю, не представляється можливим [3, 4]. У цьому зв'язку, при сертифікації виробництва суднобудівних сталей, здатність листового прокату до зварювання визначають експериментальними методами. Найбільш достовірним способом оцінки є комплексні випробування контрольних зварних з'єднань у відповідності до вимог нормативних документів Класифікаційних Товариств (LR, BV тощо), які достатньо мірою синхронізовані в рамках участі останніх в міжнародних об'єднаннях IAKS та IMO [5, 6]. В цьому

Костін О.М. – <http://orcid.org/0000-0002-4739-660X>
© О.М. Костін, 2023

випадку, вимоги до технології контрольного зварювання для оцінки зварюваності сталей багато в чому збігаються з основними положеннями міжнародного стандарту ДСТУ EN ISO 15614-1, рівень 2. Суттєвою відмінністю є необхідність обов'язкової сертифікації зварювальних матеріалів мінімум одним із Класифікаційних Товариств (КТ) та чітка регламентація щодо призначення, відповідно до категорії зварювальних матеріалів. Технологія контрольного зварювання не поширюється на виробництво суднокорпусних та офшорних конструкцій [5, 6].

Контрольне зварювання повинно виконуватись обов'язково автоматичним способом, на погонних енергіях $1,5 \pm 0,1$ та $5,0 \pm 0,2$ кДж/мм [5, 6], що повністю перекриває діапазони мінімальної та максимальної погонної енергії, які використовуються у виробничих умовах. Зварювання на погонних енергіях більше 5,0 кДж/мм є предметом спеціального розгляду КТ. Перевагу рекомендовано надавати дуговому зварюванню під флюсом (код 121 за ДСТУ EN ISO 4063), що, на нашу думку, пов'язане з широкими можливостями даного способу щодо забезпечення високої стабільності погонної енергії при зварюванні в указаному діапазоні значень, а також наявністю ефективної можливості управління геометрією та якістю формування швів.

Важливим етапом робіт при підготовці до контрольного зварювання є вибір комбінації зварювальних матеріалів дріт–флюс, відповідно до категорії суднобудівної сталі, що зварюється. На перший погляд задача виглядає доволі простою, оскільки Правила КТ дають однозначні рекомен-

дації [7, 8]. Наприклад, для сталей категорій D32 – D40 оптимальними категоріями зварювальних матеріалів відповідно є 3Y – 3Y40, а для сталей E32 – E40 є 4Y – 4Y40. Однак, в даному конкретному випадку, на практиці відбувається конфлікт інтересів виробників листового прокату та зварювальних матеріалів. З однієї сторони, виробники суднобудівної сталі для сертифікаційних випробувань використовують плавку з максимально високими властивостями, щоб гарантовано забезпечити позитивний результат. З іншої сторони, сертифіковані зварювальні матеріали, як правило, мають незначний запас за заявленими характеристиками міцності та пластичності, що забезпечує їм конкурентну позицію на ринку зварювальних матеріалів. Важливим, також, являється той факт, що сертифікація комбінацій зварювальних матеріалів відбувається в інтервалі погонної енергії 1,8...2,2 кДж/мм, що регламентовано стандартом ДСТУ EN ISO 14171 з класифікацією А на їх виробництво, основні положення якого враховано в Правилах КТ. Таким чином, не може бути повної впевненості в тому, що при зварюванні з погонною енергією 5,0 кДж/мм наплавлений метал гарантовано вийде на заявлені показники своєї категорії. Адже відомо, що збільшення погонної енергії зварювання, особливо до критичних максимальних величин, може суттєво впливати на механічні властивості металу шва, насамперед на показники його ударної в'язкості при від'ємних температурах [3, 9]. У цьому зв'язку, в роботі було поставлено за мету дослідити вплив погонної енергії зварювання на ударну в'язкість наплавленого металу, та, залежно від отриманих результатів, сформулювати рекомендації щодо вибору зварювальних матеріалів для контрольного зварювання при сертифікації виробництва листового прокату зі суднобудівних сталей підвищеної міцності.

Методика досліджень. В основу сертифікаційних випробувань закладено жорсткі вимоги стосовно забезпечення стабільності погонної енергії при зварюванні, що реалізується за рахунок поточного контролю та підтримки основних параметрів технологічного процесу: зварювального струму ($I_{зв}$), напруги дуги (U_d) та швидкості зварювання ($V_{зв}$). Швидкість автоматичного зварювання на практиці підтримується з високою стабільністю. Основні труднощі пов'язані з кількісною оцінкою та підтримкою стабільності зварювального струму та напруги дуги, які є динамічними характеристиками процесу горіння дуги та перенесення електродного матеріалу. У цьому зв'язку, для автоматичного зварювання під флюсом було обрано інверторний комплекс АСТ 1000, виробництва ТОВ «АМІТІ» (м. Миколаїв), з ори-

гінальною авторською системою автоматичного регулювання. Для оцінки коректності розрахунків погонної енергії на підставі показань приладів, було виконано експериментальне осцилографування параметрів процесу зварювання ($I_{зв}$ та U_d), з їх подальшою статистичною обробкою системою IMS v3.1. Коректність розрахунків оцінювалась як похибка між даними приладів та даними осцилограм. Стабільність погонної енергії зварювання у часі оцінювали значеннями коефіцієнтів варіації $I_{зв}$ та U_d .

Калібрування приладів показало, що для погонної енергії 1,5 кДж/мм похибка розрахунку погонної енергії не перевищує 4,2 %, коефіцієнт варіації стабілізації струму 0,022, коефіцієнт варіації стабілізації напруги 0,079; для погонної енергії 5,0 кДж/мм похибка розрахунку не перевищує 3,1 %, коефіцієнт варіації стабілізації струму 0,017, коефіцієнт варіації стабілізації напруги 0,06. Отриманий результат задовольняє найбільш жорстким вимогам нормативних документів КТ, які встановлюють похибку для мінімальної розрахункової погонної енергії не більше $\pm 6,5$ %, а для максимальної не більше ± 4 % [6].

В якості основного матеріалу для випробувань було взято сертифікований листовий прокат із сталей категорії D36 та E36. Відповідно до вимог нормативних документів КТ [5, 6], габаритні розміри контрольних зварних з'єднань становили 2000×400 мм, завтовшки 50 мм для сталі D36 та 30 мм для сталі E36. Для товщини 50 мм виконували К-подібну підготовку кромки (2.5.5 за ДСТУ EN ISO 9692-2), а для 30 мм – 1/2V (2.4.9 за ДСТУ EN ISO 9692-2), таким чином, щоб одна сторона залишалася перпендикулярною до поверхні прокату. Для зварювання сталі D36 використовували сертифіковану комбінацію зварювальних матеріалів – дріт OK Autrod 12.20 (S)/флюс OK Flux 10.71, для сталі E36 – дріт OK Autrod 12.22 (S)/флюс OK Flux 10.71, виробництва ESAB SP. Z.O.O, які мають відповідно категорії 3YM та 4Y40M, індекс водню H5 [10].

Погонну енергію при тестовому зварюванні умовно поділяють на два діапазони: мінімальної (1,5...3,0 кДж/мм) та максимальної (4,0...5,0 кДж/мм) погонної енергії [5, 6]. У цьому зв'язку, для отримання інформації щодо механічних властивостей зварних з'єднань в усьому діапазоні значень, в роботі виконували зварювання на погонних енергіях ($Q_{зв}$) 1,5; 2,5; 4,2 та 5,0 кДж/мм. Для погонної енергії 1,5 кДж/мм використовували дріт діаметром 3 мм, решта – 4 мм. Погонну енергію обчислювали відповідно до настанов ДСТУ ISO/TR 18491, номер формули (1), термічний коефіцієнт $k=1$ (ДСТУ ISO/TR 17671-1) та регулювали зміною параметрів режимів зварю-

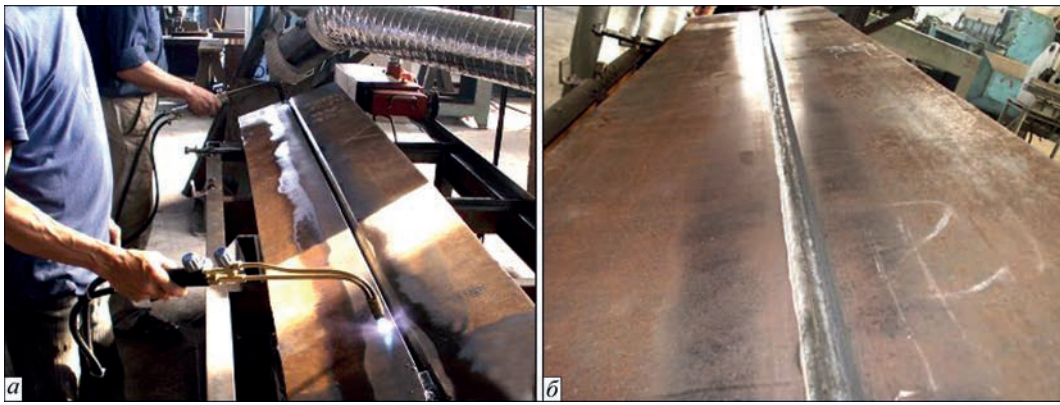


Рис. 1. Зовнішній вигляд контрольних зварних з'єднань до (а) та після (б) зварювання

вання в межах: $I_{зв} = 400...800$ А; $U_d = 26...34$ В; $V_{зв} = 41,5...31,0$ см/хв. Попередній підігрів, залежно від хімічного складу та товщини прокату, що підлягав зварюванню, був до $70...100$ °С. Зварювання виконували в нижньому просторовому положенні (РА за ДСТУ ISO 6947). Міжвалікова температура у всіх випадках не перевищувала 150 °С. Зовнішній вигляд контрольних зварних з'єднань до та після зварювання показано на рис. 1.

Після зварювання контрольні з'єднання проходили неруйнівний контроль відповідно вимог стандартів ДСТУ EN ISO 17637 (ДСТУ EN ISO 5817, рівень якості В), ДСТУ EN ISO 11666, рівень прийнятності 2, ДСТУ EN ISO 3452-1 та Правил КТ [7, 8]. Програму механічних випробувань складали відповідно до вимог нормативних документів КТ, які регламентують порядок сертифікації виробництва листового прокату зі суднобудівних сталей підвищеної міцності [5, 6]. В цьому зв'язку, із кожного зварного з'єднання відбиралися зразки для наступних випробувань: поперечний розтяг (повна товщина) – 1 шт. (ДСТУ EN ISO 4136), поперечний згин (повна товщина бокової поверхні) – 4 шт. (ДСТУ EN ISO 5173), макроструктура – 1 шт. (ДСТУ EN ISO 17639), твердість за Віккерсом – 1 шт. (ДСТУ EN ISO 9015-1), ударний згин – 12 шт. (ДСТУ EN ISO 9016). На рис. 2, на прикладі макроструктури зварних з'єднань сталі E36 за товшки 30 мм, позначена зона А, з якої відбирались зразки для випробувань на

ударний згин. Відбір зразків здійснювали з лицьової сторони шва, з зони максимального термічного навантаження, таким чином, щоб відстань від поверхні не перевищувала 2 мм. Виготовлялось чотири комплекти, по три зразки в кожному. Гострі надрізи бокової поверхні – V по Шарпі, виконувались із сторони прямої кромки по металу шва, лінії сплавлення та в ЗТВ на відстані 2 та 5 мм від лінії сплавлення. Надріз по металу шва виконували таким чином, щоб він проходив по центру наплавленого металу останнього лицьового проходу. Випробування проводили в лабораторії Об'єднання «Суднобудівний учбовий центр зварювальної техніки» (м. Миколаїв), яка акредитована Bureau Veritas та має сертифікат відповідності SMS. LAB.320/134467/02/A.0.

Результати експериментів та їх аналіз. Зразки виготовлялись безпосередньо після зварювання контрольних зварних з'єднань відповідно програми випробувань. Результати досліджень, що визначали міцність на розрив зварних з'єднань сталі D36 та E36, з використанням зварювальних матеріалів категорії 3Y та 4Y40 відповідно, наведено в таблиці. Аналіз отриманих результатів показав, що міцність зварних з'єднань, у всіх випадках, знаходилась на рівні базових показників основного металу (руйнування за основним металом). Прямими методами досліджень міцність наплавленого металу не визначалась, однак, опосередковано, через заміри твердості за Віккерсом,

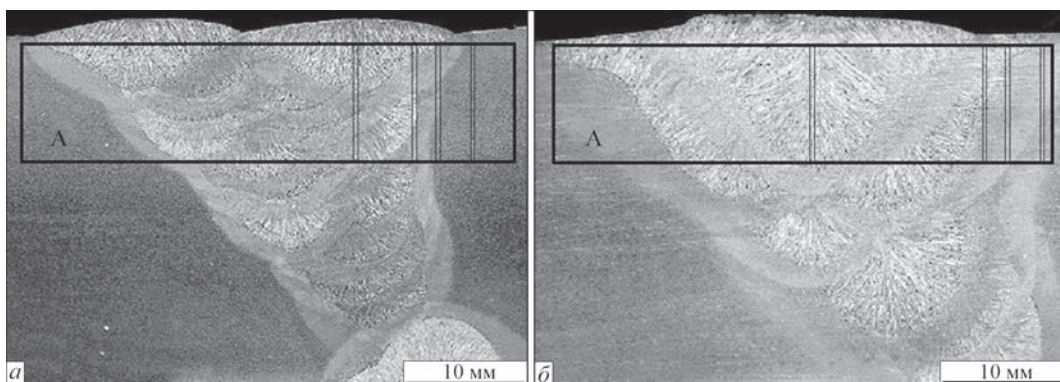


Рис. 2. Макроструктура зварних з'єднань сталі E36: а – $Q_{36} = 1,5$ кДж/мм; б – 5,0

Таблиця. Механічні властивості зварних з’єднань

Категорія сталі (товщина, мм)	Категорія зварювальних матеріалів	Погонна енергія зварювання ($Q_{зв}$), кДж/мм	Міцність на розрив (R_m), Н/мм ²	Середні значення роботи удару KV , Дж				
				Температура випробувань, °С	Метал шва	Лінія сплавлення (Л.С.)	Л.С. 2 мм	Л.С. 5 мм
D36 (50)	3Y	1,5	514	-20	67	141	166	172
E36 (30)	4Y40	1,5	507	-40	87	173	195	170
D36 (50)	3Y	2,5	513	-20	49	121	189	144
E36 (30)	4Y40	2,5	508	-40	51	143	201	155
D36 (50)	3Y	4,2	516	-20	34	87	176	162
E36 (30)	4Y40	4,2	505	-40	36	92	165	203
D36 (50)	3Y	5,0	515	-20	21	98	156	190
E36 (30)	4Y40	5,0	509	-40	16	68	188	175

встановлено, що твердість наплавленого металу категорії 3Y, в усьому діапазоні значень погонних енергій, залишалась практично постійною та складала 191...201 HV5, а для наплавленого металу категорії 4Y40 – 196...204 HV5. Таким чином, було підтверджено стабільність характеристик міцності зварних з’єднань та наплавленого металу у наведених комбінаціях в діапазоні погонних енергій 1,5...5,0 кДж/мм [3, 4].

Випробування поперечних зразків на згин бокової поверхні шва, по два зразки вздовж та проти напрямку зварювання для кожного контрольного з’єднання, при співвідношенні діаметру оправки до товщини 4:1, показало, що всі зразки витримують згин на 180° без руйнування та утворення неприпустимих дефектів. Таким чином, було підтверджено, що збільшення погонної енергії від 1,5 до 5,0 кДж/мм не впливає на пластичність зварних з’єднань суднобудівних сталей підвищеної міцності в межах нормативних вимог [3, 7].

Протилежний вплив надає збільшення погонної енергії на ударну в’язкість наплавленого металу та ЗТВ, особливо її високотемпературної складової. В таблиці наведено середні показники роботи удару різних ділянок зварних з’єднань, а на рис. 3 проілюстровано залежність середньої роботи удару металу шва від погонної енергії зварювання. Аналіз отриманих результатів показав, що погонна енергія зварювання суттєво впливає на роботу удару металу, що наплавляється. В інтервалі мінімальних погонних енергій, при переході від 1,5 та 2,5 кДж/мм середні показники роботи удару зменшуються, але впевнено перевищують мінімальні вимоги Правил КТ до наплавленого металу, які складають 34 Дж при -20 °С для категорії 3Y та 39 Дж при -40 °С для категорії 4Y40 [7, 8]. В інтервалі максимальних погонних енергій, при 4,2 кДж/мм спостерігається досягнення (категорія 3Y) або незначне зменшення (категорія 4Y40) середньої роботи удару від нормативних показників, а при 5,0 кДж/мм обидві категорії зварювальних матеріалів демонструють показники ударної в’язкості значно нижче нормативних. Таким чином, було підтверджено,

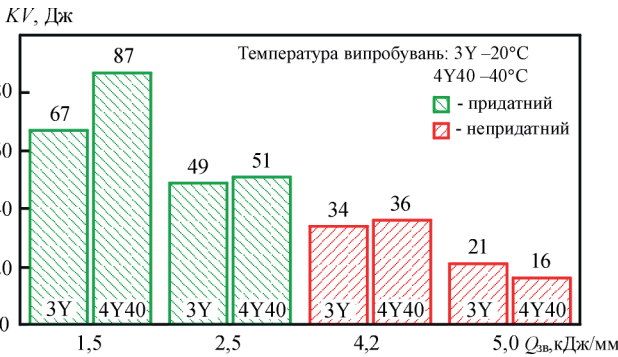


Рис. 3. Залежність середньої роботи удару металу шва (KV) від погонної енергії зварювання ($Q_{зв}$); температура випробувань: 3Y -20 °С; 4Y40 -40 °С

що збільшення погонної енергії зварювання до 5,0 кДж/мм супроводжується суттєвим зменшенням ударної в’язкості наплавленого металу [11].

При зварюванні під флюсом суднобудівних сталей підвищеної міцності існує велика кількість металургійних та технологічних факторів, за допомогою яких можна регулювати структуру та властивості металу, що наплавляється. Але основним чинником, який впливає на ударну в’язкість металу шва сталого хімічного складу, є його макро-мікроструктура, яка напряму залежить від погонної енергії (геометрії швів) [11]. У нашому випадку, при збільшенні погонної енергії до максимальних величин, висота зварювальних проходів збільшується в середньому в 2,6 рази, ширина – в 1,6 рази. Це призводить до того, що надріз на зразках для визначення роботи удару металу шва виконується в межах одного зварювального проходу (див. рис. 2, б), що є негативним чинником.

На рис. 4 показана макроструктура металу швів залежно від впливу погонної енергії. Аналіз макроструктури показав, що при збільшенні погонної енергії відбуваються класичні процеси: зменшується кількість проходів на умовну одиницю об’єму шва та кількість дрібнозернистої структури повторного нагріву, збільшується довжина дендритів та їх міжосьова відстань, змінюється розмір, склад, локальна концентрація включень тощо [11]. Наведені процеси призводять до утворення грубої структури кристалізації при зварюванні на

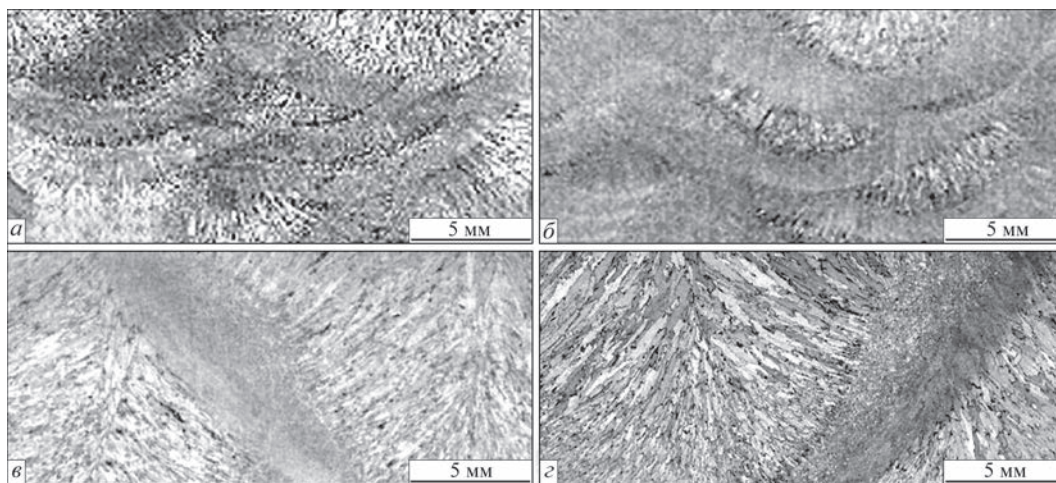


Рис. 4. Макроструктура наплавленого металу (рис. 2, зона А): а – $Q_{\text{зв}} = 1,5$ кДж/мм; б – 2,5; в – 4,2; з – 5,0

максимальних погонних енергіях, що викликає значну анізотропію властивостей в межах одного зварювального проходу та негативно впливає на ударну в'язкість металу шва.

При сертифікаційних випробуваннях зварюваності сталей робота удару металу шва має факультативне значення [5]. Вирішальними є показники лінії сплавлення та ЗТВ. Зрозуміло, що показники лінії сплавлення складаються з властивостей високотемпературної ділянки ЗТВ та металу шва. У цьому зв'язку, незадовільні властивості металу шва, при зварюванні на максимальних погонних енергіях, негативно впливають на показники лінії сплавлення (див. таблицю), що, в окремих випадках, може призвести до розширення обсягу сертифікаційних випробувань або їх повної зупинки. Ситуація стає складнішою, якщо потрібно виконувати випробування високотемпературної ділянки ЗТВ сталі на тріщиностійкість (в'язкість руйнування) при статичному навантаженні (CTOD-тест). У такому випадку бажано, щоб зварювальні матеріали гарантовано забезпечували нормативні показники роботи удару металу шва та додатково проходили випробування на тріщиностійкість, хоча остання вимога, на жаль, не є обов'язковою при їх сертифікації. У цьому зв'язку, такі дослідження потрібно виконувати при підготовці до сертифікаційних випробувань в рамках схвалення технологічних процесів зварювання представниками КТ.

Оптимальним варіантом, який гарантовано підвищує властивості металу шва, при фіксованій погонній енергії, є заміна його хімічного складу, що можливо за рахунок призначення зварювальних матеріалів більш високої категорії за температурою експлуатації. Правила КТ в цілому обмежують цю можливість, але, за умови надання конструкції статусу особливо відповідальної, дозволяється призначати категорію на одну вище за оптимальну [7, 8]. В нашому випадку 4Y замість 3Y та 5Y40 замість 4Y40.

У цьому зв'язку, було виконане зварювання контрольних з'єднань на максимальних погонних енергіях, з використанням комбінації дрiт Union S 2 Ni 2,5/флюс UV 421 TT, виробництва Voestalpine Böhler Welding, які мають категорію 5Y40M, індекс водню H10 [10]. Метал шва гарантовано перевищив мінімальні нормативні показники роботи удару (39 Дж), які належні для сертифікаційних випробувань сталі відповідного класу міцності, категорійна температура експлуатації якої складає -40°C , що підтвердило ефективність такого підходу.

Висновки

1. Міцність на розрив зварних з'єднань (R_m) суднобудівних сталей підвищеної міцності та їх пластичність, а також твердість металу шва ($HV5$) не залежать від погонної енергії зварювання в інтервалі значень $1,5 \dots 5,0$ кДж/мм.

2. Робота удару (KV) металу шва, при збільшенні погонної енергії зварювання в інтервалі $1,5 \dots 5,0$ кДж/мм зменшується, що пов'язано з утворенням грубої структури кристалізації. На максимальній погонній енергії сертифіковані зварювальні матеріали категорій 3Y та 4Y40 не забезпечують заявлені категорійні показники роботи удару.

3. Підвищення показників роботи удару металу шва можливе за рахунок призначення більш високої категорії зварювальних матеріалів за температурою експлуатації, наприклад, 4Y замість 3Y або 5Y40 замість 4Y40.

Список літератури/References

1. Zhu, H. (2019) Effect of Heat Input on Weld Structure and Mechanical Properties of Marine Engineering Steel. *Journal of Coastal Research*, 94, 352–356.
2. Liu, D., Yang, J., Zhang, Y. et al. (2021) Effect of Welding Heat Input on the Microstructure and Impact Toughness of HAZ in 420 MPa-Grade Offshore Engineering Steel. *Frontiers in Materials*, 8, 1–14. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.694586>
3. Kostin, A.M., Martynenko, V.A. (2017) Analytical and Practical Assessment of Higher Strength Hot-rolled Plate Weldability. *The Annals of «Dunarea de Jos» University of Galati, Fascicle XII Welding Equipment and Technology*, 28, 45–50.

4. Kostin, O., Martynenko, V., Vakhonina, L. (2022) Integrated Assessment of Weldability of Steel with Increased Strength. *Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science*, 26(2), 9–15.
5. *Approval of the Manufacturing Process of Metallic Materials, January 2021*. <https://marine-offshore.bureauveritas.com/nr480-approval-manufacturing-process-metallic-materials>
6. *Guidelines for Qualification of Welding Procedures, Welders and Weldability, December 2020*. <https://www.lr.org/en/materials-and-qualification-procedures-for-ships/book-a/>
7. *Rules for the Manufacture, Testing and Certification of Materials, July 2022*. <https://www.lr.org/en/rules-for-the-manufacture-testing-and-certification-of-materials/>
8. *Rules on Materials and Welding for the Classification of Marine Units – Edition, July 2022*. <https://marine-offshore.bureauveritas.com/nr216-rules-materials-and-welding-classification-marine-units>
9. Zhiqiang, S., Yanchang, Q., Hongjun, X. et al. (2015) Effects of Large Heat Input on Microstructure and Toughness of E36 Steel Weld Metals with Submerged Arc Welding. *Materials Science and Technology*, 6, 7–11.
10. Approved welding consumables for use in ship construction / *AWCD 03 Submerged arc welding, January 2023*. <https://www.lr.org/en/materials-equipment-components-product-certification/welding-certification-services/>
11. Ali Rizvi, S., Ahamad, M. (2018) Effect of Heat Input on the Microstructure and Mechanical Properties of a Welded joint-A Review. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(6), 184–188.

RECOMMENDATIONS ON WELDABILITY TESTING AT CERTIFICATION OF SHIPBUILDING STEEL PRODUCTION

O.M. Kostin

Admiral Makarov National University of Shipbuilding. 9 Heroiv Ukrainy Ave. 54025, Mykolaiv, Ukraine.

E-mail: kostin.weld@gmail.com

Recommendations on selection of welding consumables for weldability tests at certification of production of rolled sheets from higher-strength shipbuilding steels were elaborated. It is shown that the certified welding consumables do not ensure the claimed category impact toughness values of weld metal at increase of welding heat input up to 5.0 kJ/mm which is related to critical dendrite growth, dependent on thermal impact. In this connection, in order to obtain guaranteed positive results, the control welded joints should be regarded as particularly critical structures, which allows, in keeping with the Classification Society Rules (Lloyd Register – LR, Veritas Bureau – BV, etc.), specifying the use of combinations of welding consumables, being one category higher than the optimal one, for instance, 4Y instead of 3Y or 5Y40 instead of 4Y40. 11 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

Keywords: production certification, shipbuilding steels, welded joints, welding consumables, weldability tests

Надійшла до редакції 02.01.2023

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

SCHWEISSEN & SCHNEIDEN
No.1 IN THE WORLD

LET'S JOIN THE WORLD!
11. – 15. September, 2023

REGISTER NOW!

www.schweissen-schneiden.com

DVS GERMAN WELDING SOCIETY

MESSE ESSEN