

УДК 621.791.753.014

Олександр Костін, к.т.н., доц.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Україна

ВПЛИВ ПОГОННОЇ ЕНЕРГІЇ НА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ КАТЕГОРІЇ E36

Анотація. Показано, що при збільшенні погонної енергії зварювання до 4,2 кДж/мм наплавлений метал категорії 4Y40 не забезпечує заявлені показники ударної в'язкості, що пов'язане з критичним, залежним від термічного впливу ростом дендритів. Інші показники міцності зварних з'єднань сталі категорії E36 залишаються прийнятними. У зв'язку з цим погонну енергію при автоматичному зварюванні під флюсом потрібно обмежувати до 3,0...3,5 кДж/мм.

Ключові слова: зварне з'єднання, погонна енергія, ударна в'язкість.

Oleksandr Kostin, Ph.D., Assoc. Prof.

IMPACT OF HEAT INPUT ON THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF STEEL (E36) WELDED JOINTS

Abstract. Article shows that during the increase of heat input to 4.2 kJ/mm the weld metal of category 4Y40 does not meet the declared characteristics of impact toughness. In this regard, the heat input during the welding should be limited to 3,0...3,5 kJ/mm.

Keywords: welded joints, heat input, impact toughness.

Підвищення ефективності суднобудівного виробництва супроводжується впровадженням автоматичних способів зварювання та збільшенням погонних енергій при зварюванні, що не завжди є доцільним з точки зору забезпечення заявлених механічних характеристик зварних з'єднань [1].

Атестація технологічних процесів зварювання є обов'язковою в сучасному виробництві та регламентована стандартом ДСТУ EN ISO 15614-1, рівень 2. Призначення зварювальних матеріалів регламентоване Правилами Класифікаційних Товариств (LR, BV тощо) залежно від категорії сталі. Наприклад, для автоматичного зварювання під флюсом сталі категорії E36 оптимальною є комбінація дрiт-флюс категорії 4Y40, виробництво якої регламентовано стандартом ДСТУ EN ISO 14171 з класифікацією А. Останній стандарт обмежує погонну енергію при сертифікації зварювальних матеріалів інтервалом 1,8...2,2 кДж/мм, що зазвичай не враховується фахівцями зварювального виробництва при розробці технологічних процесів для виготовлення суднобудівних конструкцій.

У зв'язку з цим нами було визначено за мету – дослідити вплив погонної енергії зварювання на механічні характеристики зварного з'єднання сталі категорії E36, з використанням комбінації дрiт-флюс категорії 4Y40 (дрiт ОК Autrod 12.22 (S) / флюс ОК Flux 10.71), в інтервалі погонної енергії 1,5...5,0 кДж/мм. Підготовка кромки відповідала з'єднанню 1/2V (2.4.9 за ДСТУ EN ISO 9692-2). 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 зварювання в межах: $I_{зв} = 400...800$ А; $U_{д} = 26...34$ В; $V_{зв} = 41,5...31,0$ см/хв. Міжвалікова температура у всіх випадках не перевищувала 150 °С. Зразки довжиною один метр зварювали за допомогою автоматичного комплексу АСТ 1000. Після зварювання виконували неруйнівні та механічні випробування відповідно вимог стандарту ДСТУ EN ISO 15614-1, рівень 2. Роботу 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 досліджень наведено в таблиці 1. Аналіз отриманих результатів показав, що міцність зварних з'єднань, у всіх випадках, знаходилась на рівні базових показників основного металу (руйнування за основним металом). Таким чином, було підтверджено стабільність характеристик міцності зварних з'єднань та наплавленого металу у наведеній комбінації в діапазоні погонних енергій 1,5...5,0 кДж/мм [2]. 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, що є задовільним результатом.

Таблиця 1. 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
E36 (30)	4Y40	1,5	507	-40	87	173	195	170
E36 (30)	4Y40	2,5	508	-40	51	143	201	155
E36 (30)	4Y40	4,2	505	-40	36	92	165	203
E36 (30)	4Y40	5,0	509	-40	16	68	188	175

Протилежний вплив надає збільшення погонної енергії на ударну в'язкість металу шва та ЗТВ, особливо її високотемпературної складової. В інтервалі погонних енергій до 2,5 кДж/мм середні показники роботи удару металу шва задовольняють категорійним вимогам, які складають 39 Дж при -40 °С, а при збільшенні погонної енергії демонструють показники ударної в'язкості значно нижче нормативних. Це пояснюється тим, що основним чинником, який впливає на показники ударної в'язкості металу шва, є його макро-мікроструктура, яка напряму залежить від погонної енергії (геометрії швів). На рис. 1 показана макроструктура металу швів залежно від впливу погонної енергії. 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 (див. рис. 1, зона А).

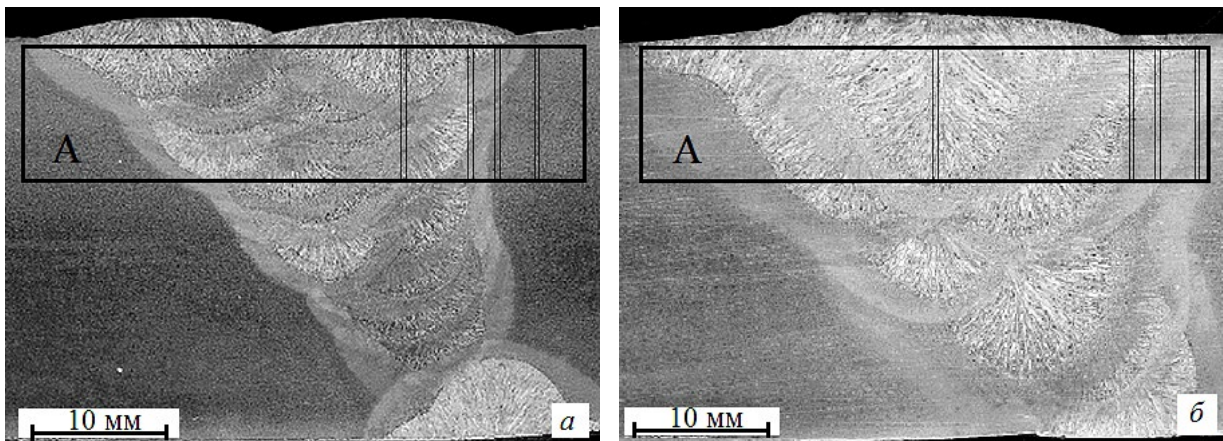


Рис. 1. Макроструктура зварних з'єднань: а – $Q_{зв} = 1,5$ кДж/мм; б – $Q_{зв} = 5,0$ кДж/мм

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. Наведені процеси призводять до утворення грубої структури кристалізації, що викликає значну анізотропію властивостей в межах одного зварювального проходу та негативно впливає на ударну в'язкість металу шва. Незадовільні властивості металу шва також зменшують показники ударної в'язкості лінії сплавлення, але цей вплив не є критичним (див. табл. 1) [3].

Висновки

В результаті виконаних досліджень встановлено:

1. Міцність на розрив та пластичність зварних з'єднань суднобудівної сталі E36 не залежать від погонної енергії зварювання в інтервалі 1,5...5,0 кДж/мм.
2. Робота удару металу шва, при збільшенні погонної енергії зварювання в інтервалі 1,5...5,0 кДж/мм, зменшується, що пов'язане з утворенням грубої структури кристалізації. При погонній енергії більше 4,2 кДж/мм зварювальні матеріали категорії 4Y40 не забезпечують заявлені показники роботи удару.
3. Для забезпечення належної ударної в'язкості металу шва потрібно обмежувати погонну енергію при автоматичному зварюванні під флюсом до 3,0...3,5 кДж/мм.

Перелік посилань

1. Костін О.М. Рекомендації щодо випробувань зварюваності при сертифікації виробництва суднобудівних сталей. / «Автоматичне зварювання», № 2, 2023, с. 40-45.
2. Kostin A.M., Martynenko V.A. Analytical and practical assessment of higher strength hot-rolled plate weldability. / Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Fascicle XII, Welding Equipment and Technology [this link is disabled](#), 2017, 28, pp. 45–50.
3. Kostin A.M., Martynenko V.O., Vakhonina L.V. Integrated assessment of weldability of steel with increased strength. / Ukrainian Black Sea Region Agrarian Science, Vol. 26, No. 2, 2022, p.9-15.