



**Anton O.
Ryazantsev**
Рязанцев Антон
Олександрович

УДК 669.14:621.791.07

ASSESSMENT OF THE SUITABILITY OF WELDING CONSUMABLES FOR SHIP HULL CONSTRUCTION UNDER MULTILAYER WELDING CONDITIONS

ОЦІНЮВАННЯ ПРИДАТНОСТІ ЗВАРЮВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ КОРПУСНОГО СУДНОБУДУВАННЯ В УМОВАХ БАГАТОШАРОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2026.1\(22\).05](https://doi.org/10.15589/smi2026.1(22).05)



Vasyl P. Nechaev
Нечаєв Василь
Павлович

Anton O. Ryazantsev Рязанцев Антон Олександрович, канд. техн. наук
ryazantsev.ao@knu.edu.ua
ORCID: 0000-0001-6202-6511

Vasyl P. Nechaev Нечаєв Василь Павлович, канд. техн. наук, доц.
nechaev.vp@knu.edu.ua
ORCID: 0000-0001-8817-8636

Svitlana V. Rebrova Реброва Світлана Валеріївна, старший викладач
rebrova.sv@knu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-8420-5411

Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih
Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг



**Svitlana V.
Rebrova**
Реброва
Світлана
Валеріївна

Abstract. This study investigates the influence of «Revix 70S-6» welding wire on the microstructure, physico-mechanical properties, and service reliability of welded joints in ship hull structures and marine infrastructure elements. The relevance of this research is determined by the complex operating conditions of ships in marine environments, where welds are subjected to combined loading, including static and variable stresses, wave-induced vibrations, and temperature fluctuations. Special attention is paid to multi-pass welding of thick hull components, which generates repeated thermal cycles affecting the weld microstructure, residual stress distribution, and fatigue performance.

The aim of this study is a comprehensive assessment of the influence of «Revix 70S-6» welding wire on the formation of microstructure, physico-mechanical properties, and service reliability of welded joints in ship hull structures and marine infrastructure elements under production-relevant conditions.

To achieve this aim, a combination of experimental and analytical methods was applied: metallographic analysis of the macro- and microstructure of the weld and heat-affected zone, determination of the chemical composition of the deposited metal, hardness measurements across the weld cross-section, mechanical testing of specimens according to relevant standards, evaluation of welding process parameters, and engineering analysis of the results.

It was found that multi-pass welding using Revix 70S-6 produces a predominantly fine-grained ferrite-pearlite microstructure without hardened or brittle phases. Uniform hardness distribution across the weld and a partial thermal tempering effect of previous layers were observed, reducing residual stresses and enhancing crack resistance. The welding process demonstrated stable arc behavior, uniform bead formation, and high reproducibility of results.

For the first time, a comprehensive relationship between the chemical composition of the wire, multi-pass welding, and the resulting structural and mechanical state of welds in shipbuilding applications has been established. It was shown that repeated thermal cycles during multi-pass deposition contribute to partial tempering, optimizing residual stress distribution and mechanical properties of the weld metal.

The findings provide an engineering basis for the application of Revix 70S-6 wire in serial shipbuilding and marine infrastructure fabrication, enhancing the reliability of welded structures, stabilizing the welding process, and increasing the service life of hull components without additional heat treatment.

Key words: shipbuilding; welded joints; multi-pass welding; microstructure; weld metal hardness; gas-shielded arc welding.

Анотація. У статті досліджується вплив зварювального дроту «Revix 70S-6» на формування структури, фізико-механічних властивостей та експлуатаційну надійність металу зварних швів корпусних конструкцій суден і елементів морської інфраструктури. Актуальність роботи зумовлена складними умовами експлуатації суден у морському середовищі, де зварні шви піддаються комбінованому навантаженню: статичним і змінним, впливу хвильових коливань, вібрацій та температурних перепадів. Особлива увага приділяється багатошаровому зварюванню товстостістових елементів, що формує повторні термічні цикли і впливає на структуру шва, залишкові напруження та втомну міцність.

Метою дослідження є комплексна оцінка впливу зварювального дроту Revix 70S-6 на формування структури, фізико-механічних властивостей та експлуатаційну надійність металу зварних швів корпусних конструкцій суден і елементів морської інфраструктури у режимах, наближених до реально-го виробництва.

Для досягнення мети застосовано комплекс експериментальних та аналітичних методів: металографічний аналіз мікро- та макроструктури шва та зони термічного впливу, визначення хімічного складу наплавленого металу, вимірювання твердості по перерізу шва, механічні випробування зразків відповідно до нормативних вимог, аналіз технологічних характеристик зварювального процесу та інженерна оцінка отриманих даних.

Встановлено, що багатошарове зварювання з використанням дроту «Revix 70S-6» формує переважно дрібнодисперсну феритно-перлітну структуру металу шва без загартованих або крихких фаз. Виявлено рівномірний розподіл твердості по перерізу шва та ефект часткового термічного відпуску поперечних шарів, що знижує залишкові напруження і підвищує тріщиностійкість. Технологічний процес характеризується стабільною дугою, рівномірним валиком шва та високою повторюваністю результатів.

Вперше встановлено комплексний взаємозв'язок між хімічним складом дроту, багатошаровим режимом наплавлення та формуванням структурно-механічного стану шва для корпусного суднобудування. Показано, що повторні термічні цикли багатошарового наплавлення сприяють частковому відпуску, що оптимізує залишкові напруження та механічні властивості металу шва.

Результати дослідження дозволяють обґрунтовано застосовувати дріт «Revix 70S-6» у серійному суднобудівному виробництві та морській інфраструктурі, підвищуючи надійність зварних конструкцій, стабільність технологічного процесу та довговічність корпусних елементів без додаткової термічної обробки.

Ключові слова: корпусне суднобудування; зварні шви; багатошарове наплавлення; мікроструктура; твердість металу; експлуатаційна надійність; механізоване дугове зварювання.

References

- [1] Fricke, W. (2003). Fatigue analysis of welded joints: state of development. *Marine Structures*, 16(3), 185–200. [https://doi.org/10.1016/s0951-8339\(02\)00075-8](https://doi.org/10.1016/s0951-8339(02)00075-8)
- [2] Radaj, D., Sonsino, C. M., & Fricke, W. (2006). *Fatigue assessment of welded joints by local approaches*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9781845691882>
- [3] Berto, F., Campagnolo, A., Chebat, F., Cincera, M., & Santini, M. (2016). Fatigue strength of steel rollers with failure occurring at the weld root based on the local strain energy values: modelling and fatigue assessment. *International Journal of Fatigue*, 82, 643–657. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.09.023>
- [4] Nguyen, T. N., & Wahab, M. A. (1998). The effect of weld geometry and residual stresses on the fatigue of welded joints under combined loading. *Journal of Materials Processing Technology*, 77(1-3), 201–208. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(97\)00418-4](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(97)00418-4)

- [5] Amirafshari, P., Barltrop, N., Wright, M., & Kolios, A. (2021). Weld defect frequency, size statistics and probabilistic models for ship structures. *International Journal of Fatigue*, 145, 106069. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106069>
- [6] Ahola, A., Lipiäinen, K., Lindroos, J., Koskimäki, M., Laukia, K., & Björk, T. (2023). On the Fatigue Strength of Welded High-Strength Steel Joints in the As-Welded, Post-Weld-Treated and Repaired Conditions in a Typical Ship Structural Detail. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(3), 644. <https://doi.org/10.3390/jmse11030644>
- [7] Kvasnitsky, V., Bugaenko, B., Goloborodko, Z., Ilyushenko, V., Romanchuk, N., Solonichenko, Y., & Shamraj, A. (2009). Status of welding production at shipbuilding plants of Ukraine. *International Scientific-Technical and Production Journal*, (8), 2–6.
- [8] Kostin, O. M. (2023). Recommendations on weldability testing at certification of shipbuilding steel production. *Avtomatičeskaâ svarka (Kiev)*, 2023(2), 40–45. <https://doi.org/10.37434/as2023.02.06>
- [9] Ivaniv, V. B. (2022). *Research of welding processes of medium-alloy high-strength steels for special equipment* (Master's thesis). Ternopil Ivan Puluj National Technical University.
- [10] Hobbacher, A. F. (2016). *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23757-2>
- [11] Khomenko, N. (Ред.). (2020). *The Paton welding journal* (3-тє вид.). International Association «Welding». <http://dx.doi.org/10.37434/tpwj>
- [12] Fricke, W. (2014). Recent developments and future challenges in fatigue strength assessment of welded joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 229(7), 1224–1239. <https://doi.org/10.1177/0954406214550015>
- [13] Jonsson, B., Samuelsson, J., & Marquis, G. B. (2011). Development of Weld Quality Criteria Based on Fatigue Performance. *Welding in the World*, 55(11-12), 79–88. <https://doi.org/10.1007/bf03321545>

Постановка задачі. Аналіз наукових публікацій та стану зварювального виробництва у суднобудуванні свідчить, що забезпечення надійності корпусних конструкцій суден значною мірою визначається властивостями металу зварних з'єднань. За умов експлуатації суден у морському середовищі зварні шви зазнають дії складного напруженого стану, який формується внаслідок поєднання статичних навантажень, змінних хвильових впливів, вібрацій та температурних коливань. Особливістю корпусних конструкцій є наявність великої кількості протяжних стикових і кутових зварних з'єднань, які виконуються у багатошаровому режимі. У процесі такого зварювання метал шва піддається багаторазовим термічним циклам, що істотно впливають на формування його структури, рівень залишкових напружень та експлуатаційні характеристики.

Разом з тим, більшість нормативних документів і технологічних рекомендацій орієнтовані переважно на забезпечення мінімально допустимих показників міцності зварних з'єднань і недостатньо враховують структурний стан металу шва та його поведінку в умо-

вах багатоциклової втоми. У результаті виникає розрив між формальним виконанням нормативних вимог і реальними умовами експлуатації корпусів суден. В сучасних умовах суднобудівні підприємства дедалі частіше використовують зварювальні матеріали, які позиціонуються як аналоги імпортової продукції. Однак відсутність комплексної інженерної оцінки їх властивостей з урахуванням специфіки суднобудівного виробництва ускладнює обґрунтований вибір таких матеріалів та підвищує технологічні ризики.

У зв'язку з цим виникає науково-технічна задача визначення закономірностей формування структури та властивостей металу шва при застосуванні конкретних зварювальних матеріалів у режимах, характерних для корпусного суднобудування, а також оцінювання їх впливу на експлуатаційну надійність зварних конструкцій. З огляду на зазначене, у даній роботі необхідно:

- встановити особливості формування хімічного складу наплавленого металу при механізованому зварюванні;
- дослідити структурний стан металу шва після багатошарового наплавлення;

оцінити зміну твердості як індикатора рівня залишкових напружень;

- проаналізувати зварювально-технологічні характеристики процесу;
- виконати інженерне обґрунтування можливості застосування досліджуваного зварювального матеріалу у корпусному суднобудуванні та при спорудженні об'єктів морської інфраструктури.

Таким чином, постановка задачі полягає у комплексному дослідженні впливу зварювального матеріалу на формування структури, властивостей та експлуатаційної надійності зварних з'єднань корпусних конструкцій суден з урахуванням реальних умов виробництва та експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасне суднобудування є однією з найбільш металомістких галузей промисловості, у якій експлуатаційна надійність виробів безпосередньо пов'язана з якістю зварних з'єднань. Корпуси суден та об'єкти морської інфраструктури працюють в умовах дії змінних хвильових навантажень, вібрацій, температурних коливань і корозійного впливу морського середовища, що обумовлює підвищені вимоги до втомної міцності та тріщиностійкості зварних конструкцій [1, 2, 12].

За результатами галузевих досліджень встановлено, що більшість експлуатаційних пошкоджень корпусів суден пов'язані саме зі зварними швами, які є зонами концентрації напружень і структурної неоднорідності [3, 13]. У зв'язку з цим удосконалення технології зварювання та обґрунтований вибір зварювальних матеріалів є ключовими завданнями сучасного суднобудування.

У наукових публікаціях останніх років значну увагу приділено питанням втомної міцності зварних з'єднань судових конструкцій. Дослідження показують, що геометрія шва, рівень залишкових напружень та структурний стан металу істотно впливають на довговічність корпусних елементів [4, 11, 13]. У міжнародній публікації, присвяченій втомній проблематиці, досліджуються частота появи дефектів та ймовірнісні моделі їх розподілу у зварних з'єднаннях судових структур, що працюють під циклічним навантаженням. Автори встано-

вили, що процеси HLAW (High-Low-Angle Welding) мають нижчу частоту дефектів порівняно з іншими технологіями, що вказує на значення вибору процесу зварювання для якісних корпусних швів [5].

У роботах [1, 10, 11, 12] підкреслюється, що традиційні підходи до оцінювання міцності зварних з'єднань не завжди адекватно відображають реальні умови експлуатації суден, а тому потребують доповнення матеріалознавчим аналізом металу шва. Дослідження в галузі морської інженерії свідчать, що постзварювальна обробка та контроль термічних циклів істотно впливають на втомну поведінку з'єднань [6]. Водночас такі заходи не завжди є технологічно можливими у серійному суднобудівному виробництві.

Вітчизняні науковці зазначають, що для суднобудівних підприємств України актуальним залишається питання використання зварювальних матеріалів-аналогів, властивості яких мають бути підтверджені експериментально [7, 8, 9, 11].

Аналіз сучасних досліджень показує, що, незважаючи на значну кількість робіт, присвячених міцності зварних з'єднань, питання впливу конкретних зварювальних матеріалів на формування структури металу шва в умовах багатошарового наплавлення залишається недостатньо вивченим [1, 6]. Особливо це стосується умов суднобудівного виробництва, де метал шва піддається багаторазовим термічним циклам, що істотно змінюють його мікроструктуру та рівень залишкових напружень [2]. Таким чином, виникає необхідність комплексного дослідження властивостей наплавленого металу із застосуванням сучасних зварювальних матеріалів з урахуванням реальних виробничих умов.

Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми. Проведений аналіз наукових досліджень і публікацій свідчить, що проблема забезпечення надійності зварних з'єднань корпусних конструкцій суден є багатокомпонентною та включає матеріалознавчі, технологічні й експлуатаційні аспекти. Значна кількість робіт присвячена оцінюванню міцності та втомної довговіч-

ності зварних з'єднань, однак переважна частина цих досліджень має узагальнений характер і не враховує специфіку реальних умов суднобудівного виробництва. У більшості наукових публікацій основна увага зосереджена на вивченні поведінки зварних з'єднань у лабораторних умовах або після застосування спеціальних постзварювальних методів обробки. Водночас у серійному корпусному суднобудуванні такі методи часто є технологічно або економічно недоцільними, що обмежує можливість безпосереднього перенесення отриманих результатів у виробничу практику. Недостатньо вивченими залишаються питання формування структури та властивостей металу шва при багатошаровому наплавленні, яке є характерним саме для зварювання товстолистових корпусних елементів. У більшості робіт багатошаровість розглядається лише як технологічна необхідність, без глибокого аналізу її впливу на повторні термічні цикли, рівень залишкових напружень і подальшу експлуатаційну поведінку зварних з'єднань.

Окремою невирішеною частиною проблеми є відсутність комплексної інженерної оцінки зварювальних матеріалів-аналогів, які все ширше застосовуються на суднобудівних підприємствах. Як правило, їх придатність визначається відповідністю мінімальним нормативним показникам міцності, тоді як структурний стан металу шва, рівномірність розподілу твердості та стабільність технологічного процесу залишаються поза детальним аналізом. Також у літературі недостатньо систематизовано вплив хімічного складу наплавленого металу на формування феритно-перлітної структури та її роль у забезпеченні втомної тріщиностійкості корпусних зварних з'єднань. У багатьох роботах ці питання розглядаються фрагментарно, без чіткого зв'язку з умовами морської експлуатації.

Таким чином, до невирішених раніше частин загальної проблеми слід віднести: відсутність комплексних досліджень зварювальних матеріалів у режимах, характерних саме для корпусного суднобудування; недостатнє вивчення впливу багатошарового наплавлення на структурний стан і залишкові

напруження металу шва; обмеженість даних щодо експлуатаційної надійності зварних з'єднань, сформованих без спеціальної постзварювальної обробки; нестача практичних рекомендацій, адаптованих до реальних умов роботи суднобудівних підприємств. Виявлені невирішені аспекти зумовлюють необхідність проведення комплексних досліджень, спрямованих на встановлення закономірностей формування структури та властивостей металу шва з урахуванням технологічних і експлуатаційних факторів, що й визначає актуальність даної роботи.

Мета дослідження. Метою даного дослідження є комплексне науково-технічне обґрунтування можливості застосування зварювального дроту «Revix 70S-6» у корпусному суднобудуванні та при виготовленні елементів морської інфраструктури шляхом встановлення закономірностей формування структури, фізико-механічних і зварювально-технологічних властивостей металу шва в умовах, наближених до реального суднобудівного виробництва.

Досягнення поставленої мети передбачає оцінювання впливу хімічного складу зварювального матеріалу та багатошарового наплавлення на структурний стан металу шва, рівень залишкових напружень і потенційну експлуатаційну надійність зварних з'єднань корпусних конструкцій суден, що працюють під дією змінних навантажень і в умовах морського середовища. Реалізація зазначеної мети спрямована на формування інженерно обґрунтованих підходів до вибору зварювальних матеріалів суднобудівного призначення та підвищення надійності й технологічної стабільності процесів зварювання у практиці суднобудівних підприємств.

Методи, об'єкт та предмет дослідження. Об'єктом дослідження є процес формування зварних з'єднань корпусних конструкцій суден і елементів морської інфраструктури при механізованому дуговому зварюванні в захисних газах. Об'єкт включає технологічні процеси наплавлення, термічні цикли багатошарового зварювання, а також структурно-механічний стан металу шва та зони термічного впливу, які визначають експлуатаційну надійність зварних конструкцій.

Предметом дослідження є закономірності впливу хімічного складу та зварювально-технологічних параметрів дроту «Revix 70S-6» на формування структури, твердості та фізико-механічних властивостей металу зварного шва при багатошаровому наплавленні, характерному для корпусного суднобудування. Предмет дослідження охоплює особливості структуроутворення металу шва, розподіл твердості по перерізу з'єднання та їхній потенційний вплив на втомну міцність і тріщиностійкість зварних з'єднань у процесі експлуатації суден.

Для досягнення поставленої мети у роботі застосовано комплекс експериментальних, аналітичних та інженерно-оцінювальних методів дослідження. Основними методами дослідження є: металографічний аналіз, що застосовувався для дослідження макро- та мікроструктури металу шва і зони термічного впливу з використанням оптичної мікроскопії після відповідної підготовки шліфів та травлення; визначення хімічного складу наплавленого металу, яке проводилось з метою оцінювання відповідності складу вимогам стандартів та встановлення його впливу на структуроутворення; вимірювання твердості металу шва та зони термічного впливу, що дозволило оцінити рівномірність механічних властивостей і непрямо визначити рівень залишкових напружень після багатошарового наплавлення; аналіз зварювально-технологічних параметрів процесу, включаючи стабільність горіння дуги, формування валика шва та характер переносу металу; порівняльний інженерний аналіз, який застосовувався для зіставлення отриманих експериментальних результатів з вимогами нормативної документації та даними сучасних наукових досліджень.

Застосування сукупності зазначених методів забезпечило комплексну оцінку властивостей зварного з'єднання та дозволило встановити взаємозв'язок між зварювальним матеріалом, режимами зварювання та експлуатаційною надійністю корпусних конструкцій.

Основний матеріал. У корпусному суднобудуванні зварювальний матеріал формує метал, який працює в умовах складного на-

пруженого стану. На відміну від основного металу, метал шва піддається багаторазовим термічним циклам і знаходиться в зоні концентрації напружень, що зумовлює підвищені вимоги до його структури та властивостей. Раціональний вибір зварювального матеріалу дозволяє не лише підвищити міцність конструкцій, а й знизити рівень залишкових напружень та ризик утворення втомних тріщин у процесі експлуатації судна. Зварювальні матеріали для корпусних конструкцій суден повинні забезпечувати: формування металу шва з однорідною структурою; відсутність схильності до холодних і гарячих тріщин; достатній рівень пластичності та ударної в'язкості; стабільність горіння дуги; формування рівномірного шва; мінімальне розбризкування металу; стабільність властивостей при багатошаровому наплавленні. Важливим є контроль вмісту вуглецю та легувальних елементів, оскільки їх надлишок може призводити до підвищення твердості та зниження тріщиностійкості зварних з'єднань.

Дане дослідження спрямоване на експериментальне та аналітичне вивчення властивостей металу зварного шва, сформованого при механізованому дуговому зварюванні в захисних газах із застосуванням зварювального дроту «Revix 70S-6», з урахуванням умов, що характерні для корпусного суднобудування. Дріт розглядався як аналог імпортного матеріалу «SG-Draht Arctron 2». Зварювальний дріт «Revix 70S-6» належить до низьковуглецевих мідьовмісних зварювальних матеріалів, призначених для механізованого зварювання конструкцій з вуглецевих і низьколегованих сталей. Наявність підвищеного вмісту марганцю та кремнію сприяє активному розкисленню зварювальної ванни, стабілізації дугового процесу та зниженню схильності до утворення пор і неметалевих включень у металі шва. Зазначені особливості є особливо важливими для корпусного суднобудування, де значна кількість зварювальних робіт виконується у складних просторових положеннях та за умов змінної якості поверхневої підготовки металу.

За результатами спектрального аналізу, який було проведено у відповіднос-

ті до ДСТУ 8919:2019 на спектрометрі «SPEKTROMAXxM», встановлено, що наплавлений метал дроту «Revix 70S-6» містить 0,10% С, 1,31% Mn та 0,55% Si, а вміст шкідливих домішок фосфору та сірки не перевищує допустимих значень (табл. 1). Отриманий склад забезпечує достатню міцність і пластичність металу шва. Така комбінація елементів є типовою для зварювальних матеріалів, орієнтованих на багат шарове зварювання корпусних сталей.

З інженерної точки зору це має декілька ключових наслідків: низький вміст вуглецю обмежує формування загартованих структур у зоні термічного впливу, що є критично важливим при зварюванні товстолистових корпусних елементів; марганець підвищує стійкість металу до гарячих тріщин, які можуть виникати при зварюванні протяжних швів пазів і стиків зовнішньої обшивки; кремній діє як активний розкислювач, стабілізуючи дуговий процес та сприяючи формуванню рівномірного валика шва. Для суднобудівної практики це означає підвищення технологічної надійності процесу, особливо під час зварювання великих секцій, де зупинка процесу або повторне виконання шва призводить до значних економічних втрат.

Зварювання зразків виконувалося у багат шаровому режимі (рис. 1), що відповідає реальним технологічним схемам зварювання товстолистових корпусних елементів. Кожен наступний шар наплавлявся після охолодження попереднього до температури, близької до температури навколишнього середовища, що забезпечувало формування повторних термічних циклів. Такі термічні цикли відіграють визначальну роль у формуванні структури металу шва та зони термічного впливу. Повторний нагрів призводить до часткового відпуску попередньо сформованих структур, зменшення внутрішніх напружень і вирівнювання механічних властивостей по перерізу з'єднання.

Металографічні дослідження показали, що метал шва має переважно дрібнодисперсну феритно-перлітну структуру з рівномірним розподілом фаз (рис. 2). Такий тип структури є характерним для низьковуглецевих зварних металів і вважається оптимальним для конструкцій, що працюють під дією змінних навантажень. Макроструктура металу задовільна, дефектів не виявлено. Мікродослідженням встановлено, що сплавлення основного металу з наплавленим щільне, бездефектне. В окремих ділянках спостерігалось формування фериту з елементами голчастої морфології,



Рис. 1. Особливості формування зварного з'єднання: а – 1 шар наплавлення; б – 2 шари наплавлення; в – 3 шари наплавлення

Таблиця 1. Хімічний склад металу, наплавленого на зразок

Зразок	Хімічний склад, %							
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
«Revix 70S-6»	0,1	1,31	0,55	0,014	0,006	0,029	0,027	0,140

що свідчить про локальні відмінності швидкості охолодження в різних зонах багатошарового наплавлення. При цьому небезпечні загартовані структури мартенситного типу не були виявлені, що є позитивним фактором з точки зору тріщиностійкості зварного з'єднання. Зона термічного впливу характеризувалася поступовим переходом структури від основного металу до металу шва без різких структурних меж, що знижує концентрацію напружень у перехідній області.

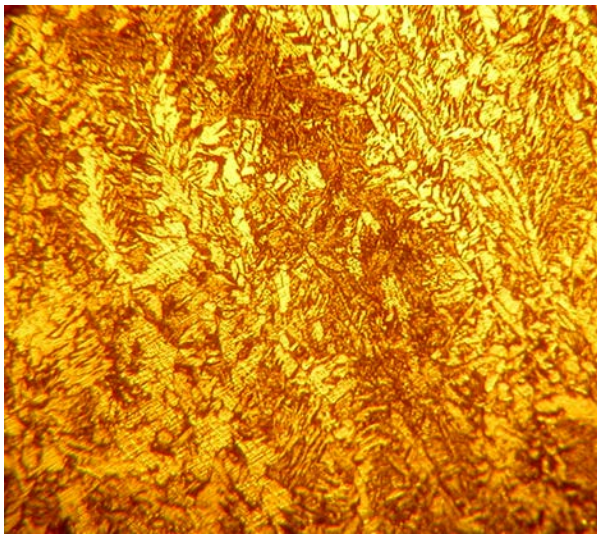


Рис. 2. Структура металу за перерізом наплавлення – ферит та ділянки перліту, 100^x

Результати вимірювань твердості по перерізу зварного з'єднання свідчать про її відносну рівномірність (табл. 2). Максимальні значення твердості спостерігалися у центральній частині першого шару наплавлення, що пояснюється більш інтенсивним охолодженням цього шару через тепловідвід у масив основного металу. У верхніх шарах відмічалось зниження твердості, обумовлене повторним термічним впливом наступних проходів. Така тенденція є характерною для багатошарового зварювання та свідчить про частковий ефект відпуску, який сприяє зменшенню залишкових напружень.

Рівномірний характер зміни твердості по перерізу з'єднання підтверджує стабільність технологічного процесу та відсутність локальних зон крихкості. Для суднобудування це означає можливість виконання довгих багатошарових швів без проміжної термообробки, що особливо актуально при складанні блоків корпусу на стапелі.

Таблиця 2. Результати випробувань твердості металу методом Брінелля

№ з/п	Найменування об'єкта контролю	Характеристики випробувальних зразків
1	Зразок №1 «Revix70S-6» – 1 шар	HB 170
2	Зразок №1 «Revix70S-6» – 2 шари	HB 149
3	Зразок №1 «Revix70S-6» – 3 шари	HB 137

У процесі виконання зварювання відзначалася стабільна робота дуги, рівномірне формування валика шва та відсутність значного розбризкування металу. Зварювальний матеріал забезпечував добру формоутворювальну здатність та сприяв утворенню рівного поверхневого рельєфу шва.

Комплексний аналіз структурних, механічних і технологічних характеристик дозволяє зробити висновок, що досліджуваний зварювальний матеріал формує метал шва з оптимальним поєднанням міцності та пластичності. Отриманий структурний стан сприятливий для експлуатації зварних з'єднань у корпусах суден, де вирішальну роль відіграє не гранична міцність, а опір втомному руйнуванню та стабільність властивостей у часі. З технологічної точки зору застосування дроту «Revix 70S-6» характеризується високою повторюваністю результатів, що є важливою умовою для серійного суднобудівного виробництва. Порівняння отриманих результатів із даними для імпортного дроту «SG-Draht Arctron 2» показує, що основні експлуатаційні характеристики наплавленого металу перебувають у близьких інтервалах. При цьому застосування «Revix 70S-6» має низку потенційних переваг: скорочення логістичних ризиків; можливість оперативного контролю якості партій; зниження вартості зварювальних матеріалів; підвищення технологічної незалежності верфей. Для підприємств суднобудування та морської інфраструктури це створює передумови для стабільного виробничого планування, особливо в умовах нестабільних зовнішніх поставок. Даний дріт може бути ефективно використаний: при виготовленні плоских та напівоб'ємних секцій; при зварюванні набору та елементів силового каркаса; у ремонтних роботах

корпусів суден та портових конструкцій; у виробництві допоміжного обладнання морської інфраструктури.

Обговорення отриманих результатів.

Отримані експериментальні дані свідчать про закономірний взаємозв'язок між хімічним складом зварювального матеріалу, умовами багатошарового наплавлення та формуванням структурно-механічного стану металу шва, який визначає експлуатаційну надійність зварних з'єднань корпусних конструкцій суден. Встановлено, що застосування зварювального дроту «Revix 70S-6» забезпечує формування переважно феритно-перлітної структури металу шва без наявності загартованих або крихких фаз. Такий характер структури є принципово важливим для суднобудівних конструкцій, оскільки саме феритно-перлітний метал характеризується підвищеною здатністю до пластичної деформації та високою опірністю зародженню втомних тріщин.

Отримані результати узгоджуються з сучасними уявленнями про механізми втомного руйнування зварних конструкцій, згідно з якими підвищена твердість і наявність структурної неоднорідності є основними чинниками ініціювання тріщин у зоні шва. Відсутність різких перепадів твердості по перерізу зварного з'єднання свідчить про сприятливий напружено-деформований стан після зварювання. Особливо важливим є виявлений ефект часткового термічного відпуску попередніх шарів наплавлення внаслідок дії повторних термічних циклів. Цей ефект приводить до зменшення залишкових напружень і вирівнювання механічних властивостей металу шва. У контексті корпусного суднобудування такий результат має суттєве практичне значення, оскільки зниження залишкових напружень без застосування додаткової термічної обробки є технологічно та економічно доцільним.

Аналіз розподілу твердості показує, що максимальні значення локалізуються в першому шарі наплавлення, де тепловідвід у масив основного металу є найбільш інтенсивним. Проте подальше наплавлення наступних шарів призводить до стабілізації структури та зменшення твердості до рівня, який є безпечним з точки зору утворення холодних тріщин. Це підтверджує доцільність застосування багатошарових схем

зварювання для корпусних конструкцій значної товщини. З технологічної точки зору отримані результати свідчать про достатню стабільність дугового процесу при використанні досліджуваного дроту. Формування рівного валика шва та відсутність технологічних дефектів дозволяють розглядати даний матеріал як придатний для механізованого зварювання в умовах серійного виробництва, де важливу роль відіграє повторюваність технологічних параметрів.

Важливо підкреслити, що у більшості попередніх досліджень основна увага приділялася досягненню граничних показників міцності зварного з'єднання. Проте в умовах морської експлуатації визначальними є не стільки максимальні значення міцності, скільки стабільність структури, рівномірність властивостей і здатність матеріалу протидіяти втомному руйнуванню. У цьому аспекті отримані результати мають принципову інженерну значущість. Зіставлення експериментальних даних із сучасними теоретичними положеннями дозволяє стверджувати, що досліджуваний зварювальний матеріал забезпечує формування металу шва з оптимальним співвідношенням міцності та пластичності, яке є характерним для надійних корпусних зварних з'єднань.

Таким чином, результати дослідження підтверджують доцільність комплексного підходу до оцінювання зварювальних матеріалів, який має включати не лише перевірку відповідності нормативним показникам, а й аналіз структурного стану та особливостей термічного впливу при реальних режимах зварювання. Саме такий підхід дозволяє підвищити довговічність корпусних конструкцій суден і зменшити ризик експлуатаційних пошкоджень.

Висновки

1. Аналіз сучасного стану зварювального виробництва у суднобудуванні показав, що експлуатаційна надійність корпусних конструкцій визначається структурно-механічним станом металу зварних з'єднань, сформованих у процесі багатошарового наплавлення, тому оцінювання зварювальних матеріалів має базуватися не лише на нормативних показниках міцності, а й на комплексному аналізі структури та умов формування шва в реальному виробництві.

2. Експериментально встановлено, що застосування дроту «Revix 70S-6» при механізованому дуговому зварюванні в захисних газах забезпечує стабільне горіння дуги, якісне формування шва та утворення переважно феритно-перлітної структури без загартованих і крихких фаз.

3. Багатошарове наплавлення реалізує ефект повторного термічного відпуску, що сприяє зниженню залишкових напружень,

вирівнюванню механічних властивостей по перерізу з'єднання та відсутності локальних максимумів твердості, підвищуючи тріщиностійкість і втому довговічність.

4. Отримані результати дозволяють рекомендувати зварювальний дріт «Revix 70S-6» для виготовлення корпусних конструкцій суден і елементів морської інфраструктури за умови дотримання регламентованих режимів механізованого зварювання.

Список літератури

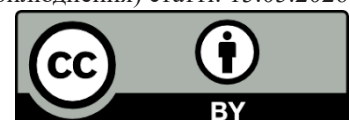
- [1] Fricke, W. (2003). Fatigue analysis of welded joints: state of development. *Marine Structures*, 16(3), 185–200. [https://doi.org/10.1016/s0951-8339\(02\)00075-8](https://doi.org/10.1016/s0951-8339(02)00075-8)
- [2] Radaj, D., Sonsino, C. M., & Fricke, W. (2006). *Fatigue assessment of welded joints by local approaches*. Woodhead Publishing Limited. <https://doi.org/10.1533/9781845691882>
- [3] Berto, F., Campagnolo, A., Chebat, F., Cincera, M., & Santini, M. (2016). Fatigue strength of steel rollers with failure occurring at the weld root based on the local strain energy values: modelling and fatigue assessment. *International Journal of Fatigue*, 82, 643–657. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.09.023>
- [4] Nguyen, T. N., & Wahab, M. A. (1998). The effect of weld geometry and residual stresses on the fatigue of welded joints under combined loading. *Journal of Materials Processing Technology*, 77(1-3), 201–208. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(97\)00418-4](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(97)00418-4)
- [5] Amirafshari, P., Barltrop, N., Wright, M., & Kolios, A. (2021). Weld defect frequency, size statistics and probabilistic models for ship structures. *International Journal of Fatigue*, 145, 106069. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106069>
- [6] Ahola, A., Lipiäinen, K., Lindroos, J., Koskimäki, M., Laukia, K., & Björk, T. (2023). On the Fatigue Strength of Welded High-Strength Steel Joints in the As-Welded, Post-Weld-Treated and Repaired Conditions in a Typical Ship Structural Detail. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(3), 644. <https://doi.org/10.3390/jmse11030644>
- [7] Kvasnitsky, V., Bugaenko, B., Goloborodko, Z., Ilyushenko, V., Romanchuk, N., Solonichenko, Y., & Shamraj, A. (2009). Status of welding production at shipbuilding plants of Ukraine. *International Scientific-Technical and Production Journal*, (8), 2–6.
- [8] Kostin, O. M. (2023). Recommendations on weldability testing at certification of shipbuilding steel production. *Avtomatičeskaâ svarka (Kiev)*, 2023(2), 40–45. <https://doi.org/10.37434/as2023.02.06>
- [9] Ivaniv, V. B. (2022). *Research of welding processes of medium-alloy high-strength steels for special equipment* (Master's thesis). Ternopil Ivan Puluj National Technical University.
- [10] Hobbacher, A. F. (2016). *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23757-2>
- [11] Khomenko, N. (Ред.). (2020). *The Paton welding journal* (3-тє вид.). International Association «Welding». <http://dx.doi.org/10.37434/tpwj>
- [12] Fricke, W. (2014). Recent developments and future challenges in fatigue strength assessment of welded joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 229(7), 1224–1239. <https://doi.org/10.1177/0954406214550015>
- [13] Jonsson, B., Samuelsson, J., & Marquis, G. B. (2011). Development of Weld Quality Criteria Based on Fatigue Performance. *Welding in the World*, 55(11-12), 79–88. <https://doi.org/10.1007/bf03321545>

© Рязанцев А. О., Нечаев В. П., Реброва С. В.

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 15.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0