

## ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 621.791:620.178.3

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2026.2.1>

А. В. БЕРНАЦЬКИЙ

кандидат технічних наук, старший дослідник,  
завідувач відділу спеціалізованої високовольтної техніки  
та лазерного зварювання  
Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона  
Національної академії наук України  
ORCID: 0000-0002-8050-5580

## ВПЛИВ ГІБРИДНОГО ЛАЗЕРНО-ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НА ОПІР ВТОМНОМУ РУЙНУВАННЮ СТИКОВИХ З'ЄДНАНЬ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕЙ

У статті наведено результати експериментальних досліджень впливу гібридного лазерно-дугового зварювання на опір втомному руйнуванню стикових з'єднань високоміцних сталей у порівнянні з традиційним автоматичним дуговим зварюванням. Актуальність роботи зумовлена зростанням застосування гібридних зварювальних технологій у виробництві відповідальних металокопункцій, що працюють в умовах тривалих циклічних навантажень, а також недостатньою вивченістю їх впливу на стадії ініціювання та розвитку втомних тріщин. Метою дослідження є встановлення закономірностей формування втомної довговічності стикових з'єднань сталей 14ХГН2МД та S460M, виконаних гібридним лазерно-дуговим і автоматичним дуговим способами, з урахуванням впливу швидкості зварювання та геометрії кромок. Випробування проводили на зразках стикових з'єднань при циклічному навантаженні на вигин із частотою 14 Гц за напружень симетричного циклу 40 та 60 МПа до досягнення  $2 \cdot 10^6$  циклів або до появи тріщини втомної довжиною 3 мм. Додатково виконано фрактографічний аналіз поверхні зламу для визначення характеру руйнування та особливостей розвитку тріщини. Встановлено, що при значенні напруження  $\sigma_1 = 40$  МПа з'єднання зі сталі S460M, виконані обома способами, не руйнуються при  $N = 2 \cdot 10^6$  циклів. При  $\sigma_1 = 60$  МПа зварні з'єднання, виконані автоматичним дуговим зварюванням, демонструють вищу втомну довговічність порівняно з гібридними. Для гібридних з'єднань фіксується поява тріщин втомної довжини  $N \approx (0,8 - 1,54) \cdot 10^6$  циклів. Показано, що характер руйнування включає стадію повільного розвитку тріщини з квазікрихким механізмом та стадію магістрального руйнування з в'язким ямковим механізмом. Встановлено вплив структурного стану металу шва та геометрії стикового з'єднання на показники втомної міцності. Отримані результати свідчать про визначальну роль геометрії шва і структурних перетворень, сформованих у процесі гібридного лазерно-дугового зварювання, у формуванні втомної довговічності зварних з'єднань. Практичне значення роботи полягає в обґрунтуванні технологічних рекомендацій щодо підвищення опору втомному руйнуванню конструкцій із високоміцних сталей, що експлуатуються в умовах змінних навантажень.

**Ключові слова:** гібридне лазерно-дугове зварювання, високоміцна сталь, втомна міцність, розвиток тріщини, фрактографічний аналіз, структурні перетворення.

A. V. BERNATSKYI

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,  
Head of the Department of Specialised High-Voltage Equipment  
and Laser Welding  
E. O. Paton Electric Welding Institute  
of the National Academy of Sciences of Ukraine  
ORCID: 0000-0002-8050-5580

## INFLUENCE OF HYBRID LASER-ARC WELDING ON THE FATIGUE RESISTANCE OF BUTT JOINTS IN HIGH-STRENGTH STEELS

The paper presents the results of an experimental study on the influence of hybrid laser-arc welding on the fatigue resistance of butt joints in high-strength steels compared with conventional automatic arc welding. The relevance of the study is determined by the growing industrial implementation of hybrid welding technologies in load-bearing structures subjected to long-term cyclic loading, as well as by the insufficient understanding of their effect on both crack initiation



© А. В. Бернацький, 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

ISSN 2078-4481

and crack propagation stages of fatigue failure. The aim of the study is to establish the regularities governing the fatigue performance of butt joints made of 14KhGN2MD and S460M steels produced by hybrid laser-arc and automatic arc welding, taking into account the influence of welding speed and joint edge geometry. Fatigue tests were carried out under cyclic bending at a frequency of 14 Hz with stress amplitudes corresponding to a fully reversed cycle of 40 and 60 MPa. The tests were continued up to  $2 \times 10^6$  cycles or until the formation of a 3 mm fatigue crack. Fractographic analysis of fracture surfaces was performed to identify the mechanisms of crack initiation and propagation. It was established that at a stress amplitude of  $\sigma_{-1} = 4$  MPa, S460M joints produced by both welding methods withstood  $2 \times 10^6$  cycles without failure. At  $\sigma_{-1} = 60$  MPa, joints produced by automatic arc welding demonstrated higher fatigue durability compared with hybrid laser-arc welded joints. In hybrid joints, fatigue cracks were detected after approximately  $(0.8-1.54) \times 10^6$  cycles. The fracture surface analysis revealed a two-stage failure mechanism consisting of a crack initiation zone characterized by a quasi-brittle fracture mode and a main crack propagation zone dominated by ductile dimple fracture. The influence of weld metal microstructure, particularly the formation of lower bainite, and joint geometry on fatigue performance was identified. The obtained results demonstrate that the fatigue resistance of hybrid laser-arc welded joints is governed not only by process parameters but also by the geometric configuration of the joint and the structural transformations occurring in the weld metal. The findings provide a basis for technological recommendations aimed at improving the fatigue performance of high-strength steel structures operating under cyclic loading conditions.

**Key words:** hybrid laser-arc welding, high-strength steel, fatigue strength, crack propagation, fractography, microstructural transformations.

### Постановка проблеми

У сучасному машинобудуванні, транспортному та мостобудівному виробництві спостерігається стійка тенденція до застосування високоміцних сталей з межею текучості 400–960 МПа з метою зниження маси конструкцій при одночасному збереженні або підвищенні їх несучої здатності. За таких умов визначальним критерієм працездатності зварних з'єднань стає їх опір втомному руйнуванню, оскільки саме циклічні навантаження є характерними для більшості експлуатаційних режимів відповідальних металоконструкцій. Разом із тим підвищення міцності сталі не гарантує пропорційного зростання втомної довговічності зварних вузлів, що обумовлено структурною та геометричною неоднорідністю зони шва, наявністю залишкових напружень і концентрацією напружень у місцях переходу шва до основного металу.

Упродовж тривалого часу основним промисловим методом виготовлення стикових з'єднань залишалося автоматичне дугове зварювання в захисних газах або під флюсом [1-3]. Його вплив на формування структури металу шва, зони термічного впливу та на втомну міцність досліджено достатньо повно. Натомість упродовж останніх двох десятиліть активно впроваджується відносно новий високопродуктивний процес – гібридне лазерно-дугове зварювання, який поєднує концентроване лазерне джерело тепла з дуговим процесом у спільній зварювальній ванні. Такий підхід забезпечує глибоке проплавлення, можливість зварювання без розробки кромки або з мінімальним їх розкриттям, підвищення швидкості зварювання та зменшення сумарного тепловкладення [4-6].

Разом із технологічними перевагами гібридний процес принципово змінює умови формування металу шва: змінюється характер кристалізації, швидкість охолодження, співвідношення фазових складових, а також рівень і розподіл залишкових напружень. Для високоміцних сталей це може призводити до формування різних структурних станів (верхній або нижній бейніт, мартенситні складові), що по-різному впливають на тріщиностійкість та опір розвитку втомних тріщин [7-9]. Крім того, відмова від розробки кромки або зміна геометрії стикового з'єднання змінює локальні концентратори напружень, які часто відіграють вирішальну роль у стадії ініціювання тріщини.

Аналіз наявних публікацій свідчить, що більшість досліджень гібридного лазерно-дугового зварювання зосереджені на питаннях продуктивності, формування шва, дефектності та статичної міцності. Питання ж втомної довговічності, особливо з урахуванням розмежування стадій зародження і розвитку тріщини, досліджені недостатньо та часто обмежуються оцінкою кількості циклів до появи тріщини фіксованої довжини. При цьому вплив геометрії стикового з'єднання, швидкості зварювання та структурних перетворень на співвідношення між стадіями ініціювання і магістрального розвитку тріщини залишається дискусійним.

Таким чином, на сучасному етапі існує наукова та практична проблема комплексної оцінки впливу гібридного лазерно-дугового зварювання на опір втомному руйнуванню стикових з'єднань високоміцних сталей у порівнянні з традиційним автоматичним дуговим зварюванням. Особливої уваги потребує встановлення того, як технологічні параметри гібридного процесу та геометрія кромки впливають не лише на момент ініціювання втомної тріщини, але й на закономірності її подальшого розвитку до повного руйнування. Розв'язання цієї проблеми є необхідним для обґрунтованого вибору технології зварювання при проектуванні відповідальних конструкцій, що працюють в умовах тривалих циклічних навантажень.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наукові дослідження гібридного лазерно-дугового зварювання за останні роки продемонстрували суттєве зростання інтересу з боку міжнародної наукової спільноти, зокрема щодо механічних властивостей швів і потенційного впливу цього процесу на втомну довговічність конструкцій.

Гібридне лазерно-дугове зварювання поєднує лазерний промінь та електричний дуговий процес у спільній ванні розплаву, що дозволяє досягати більшої глибини проплавлення, підвищеної швидкості зварювання та поліпшеної здатності перекривати зазори порівняно з окремим використанням лазера чи дуги. Цей синергетичний ефект підтверджено численними оглядовими роботами, які розглядають принципи функціонування та технічні характеристики гібридного зварювання і демонструють переваги технології для товстостінних сталевих з'єднань та інших матеріалів [4, 6, 8].

Дослідження впливу гібридного лазерно-дугового зварювання на структуру й механічні властивості високоякісних сталей показали, що гібридне зварювання сприяє формуванню суцільного шва з високою міцністю і задовільними пластичними властивостями. Наприклад, дослідження гібридного зварювання високоміцної сталі S960QL показало, що отримані з'єднання мають належну механічну якість без дефектів, характеристичну для з'єднань, виконаних стандартними методами зварювання, а також добру ударну в'язкість і подібну до основного металу міцність на розрив [10].

Попри активне впровадження гібридного лазерно-дугового зварювання у виробництво, досліджень саме втомних властивостей таких швів наразі відносно мало, особливо щодо співвідношення стадій ініціювання та росту тріщини. Одним із сучасних внесків є дослідження, що порівнює поведінку гібридних з'єднань з традиційними дуговими в умовах циклічного навантаження для високолегованої сталі з високим вмістом марганцю, яке показало підвищену втомну стійкість гібридних з'єднань порівняно з дуговими аналогами, включаючи аналіз розповсюдження тріщини в цих з'єднаннях [11].

Попри наявні роботи, більшість публікацій про гібридне лазерно-дугове зварювання досі зосереджені на формуванні шва, мікроструктурі та статичних властивостях, а не на систематичному аналізі втомної довговічності зокрема в аспектах розділення стадій зародження тріщини і її подальшого росту. Така ситуація підкреслює наукову прогалину щодо комплексної оцінки втомної міцності гібридних з'єднань високоміцних сталей, особливо з урахуванням впливу технологічних параметрів зварювання, геометрії кромок та структурних змін на основні механізми втомного руйнування.

#### Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є встановлення закономірностей впливу гібридного лазерно-дугового зварювання на опір втомному руйнуванню стикових з'єднань високоміцних сталей у порівнянні з традиційним автоматичним дуговим зварюванням з урахуванням особливостей формування мікроструктури, геометрії шва та умов циклічного навантаження.

#### Викладення основного матеріалу дослідження

З метою вивчення впливу технологічних процесів зварювання на опір втомному руйнуванню зварних з'єднань високоміцних сталей провели дослідження з використанням зразків стикових з'єднань (рис. 1) довжиною 400 мм і шириною 120 мм.

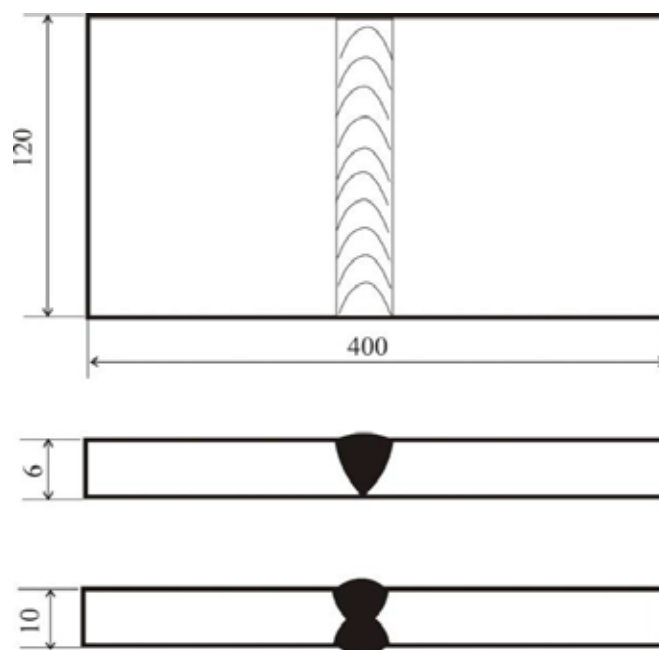


Рис. 1. Схематичне зображення стикового зразка для випробувань на втому:  
 $\delta=6$  мм – сталь 14ХГН2МД,  $\delta=10$  мм сталь S460М

Одностороннє однопрохідне автоматичне дугове в суміші газів  $\text{Ar}+18\%\text{CO}_2$  та гібридне лазерно-дугове зварювання стикових з'єднань сталі 14ХГН2МД  $\delta=6$  мм виконували з використанням дроту суцільного перерізу Св-10ХН2ГСМФТЮ діаметром 1,2 мм. Швидкість зварювання при автоматичному дуговому способі становила  $V_{\text{зв}}=30$  м/год, а при гібридному лазерно-дуговому –  $V_{\text{зв}}=72$  м/год. Дугове зварювання виконували на з'єднаннях з V – подібним розкриттям кромки ( $\alpha=40^\circ$ ), а гібридне лазерно-дугове без розробки кромки.

Двостороннє однопрохідне як автоматичне дугове, так і гібридне лазерно-дугове зварювання стикових з'єднань сталі S460M  $\delta=10$  мм без розробки кромки виконували порошковим дротом Megafil 821R діаметром 1,2 мм з такими ж швидкостями, як і при односторонньому зварюванні.

Після зварювання стикових з'єднань механічним способом вирізали зразки згідно рис. 1, які на машині УНП-02 піддавали циклічному навантаженню на вигин з частотою 14 Гц при напруженнях симетричного циклу 40 та 60 МПа. Випробування тривали до кількості  $N=2 \times 10^6$  циклів навантаження, коли руйнування зразків не відбулось, або до появи в зразках тріщини втомі довжиною 3 мм чи повного руйнування з фіксацією при цьому кількості циклів навантаження.

В результаті проведених досліджень встановлено, що втомне руйнування зварних з'єднань сталі 14ХГН2МД, що виконували гібридним лазерно-дуговим способом спостерігалось після 1780000 циклів навантаження при напруженні симетричного циклу  $\sigma_{-1}=40$  МПа та після 800000 циклів навантаження при  $\sigma_{-1}=60$  МПа. Натомість зразки стикових з'єднань зазначеної сталі, що виконували дуговим автоматичним зварюванням не руйнувались і після 2100000 циклів навантаження при напруженні циклу  $\sigma_{-1}=40$  МПа.

Підвищити опір втомі зварних з'єднань, виконаних гібридним лазерно-дуговим способом до рівня з'єднань, виконаних дуговим способом, можливо за рахунок зварювання стикових з'єднань товщиною 6 мм з невеликим до  $10^\circ$  розкриттям кромки і притупленням 2 мм. При цьому встановлено, що на показники втомної міцності впливають не параметри дугового, лазерного та гібридного лазерно-дугового зварювання, а геометрія стикових з'єднань високоміцних сталей з границею текучості до 960 МПа. Певно, зазначений підхід, що до формування розкриття кромки ( $\alpha=10^\circ$ ) в стикових з'єднаннях менш міцних сталей з  $\sigma_{0,2}=400\dots 700$  МПа при їх гібридному лазерно-дуговому зварюванні, може призвести до приблизно однакового опору втомному руйнуванню, як і при дуговому зварюванні.

Фрактографічний аналіз зламу зразка зварного з'єднання сталі 14ХГН2МД, що виконували гібридним лазерно-дуговим способом після циклічного навантаження на вигин при напруженні циклу  $\sigma_{-1}=60$  МПа до повного руйнування при кількості циклів навантаження  $N=800000$  показав наступне. За макробудовою зламу (рис. 2) можливо позначити дві зони: I – зона повільного розвитку тріщини в напрямку від зовнішньої (бічної) поверхні зламу; II – зона прискороного (магістрального) розвитку тріщини, напрямку руйнування показано стрілкою.

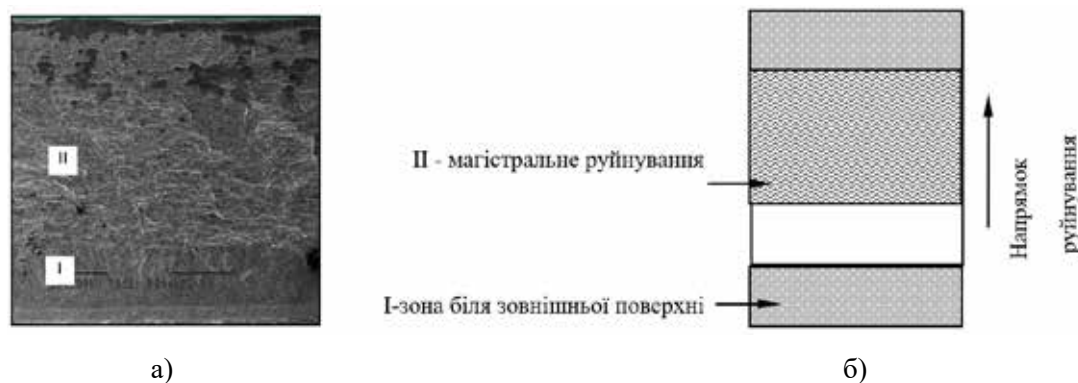
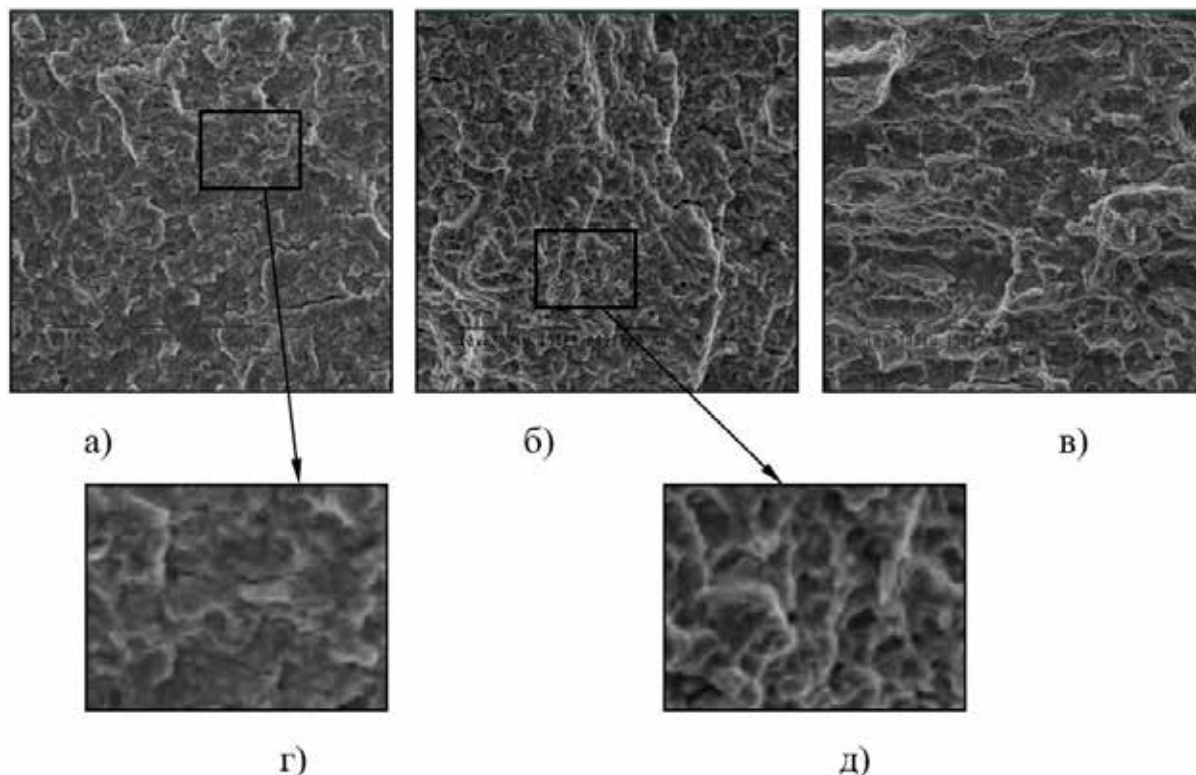


Рис. 2. Загальний вигляд (а) ( $\times 16$ ) і схема (б) поверхні зламу по зонам руйнування

Зона I має заглажену поверхню, що свідчить про першій стадії – стадії зародження руйнування (повільного розвитку тріщини). Розмір зони I становить близько  $\sim 180\dots 230$  мкм. Ця стадія характеризується зародженням тріщин і їх розповсюдженням по площинах ковзання.

Наявність першої стадії свідчить про деяку протяжність стадії зародження руйнування, і відповідно тривалості процесу поширення втомної тріщини в стадії зародження, тобто зварне з'єднання в даних умовах зовнішнього циклічного навантаження має опір розвитку тріщини.

Характер руйнування в зоні I – квазікрихкий з розміром фасеток  $d_f \sim 10\dots 20$  мкм (рис. 3.а), і локальними ділянками в'язкого руйнування ( $d_n=2\dots 4$  мкм). При цьому ширина ( $\delta$ ) смуг ковзання становить  $\delta \sim 1\dots 2$  мкм (проглядається нечітко через наявність оксидної плівки), рис. 3.г.



**Рис. 3. Поверхня руйнування зварного з'єднання ( $V_{зв} = 72$  м/год) після циклічного навантаження вигином ( $\sigma_1 = 60$  МПа,  $N = 800000$ ) за зонами зламу: а – зона осередку руйнування; б – область переходу від осередку руйнування до магістральної тріщини; в – магістральне руйнування, ( $\times 1550$ ); г, д – фрагменти поверхні руйнування (укрупнення в 4 рази)**

Перехід до зони магістрального руйнування (від I до II зони) характеризується зміною характеру руйнування – на в'язкий ямковий тип, розмір дисперсних ямок становить  $d_n \sim 0,5 \dots 3$  мкм, рис. 3.б та рис. 3.д.

Детальними дослідженнями поверхні руйнування зони II (магістрального руйнування) встановлено, що характер руйнування головним чином – в'язкий: дрібні ямки розміром  $d_n \sim 1 \dots 3$  мкм, великі –  $d_n \sim 10 \dots 15$  мкм, рис. 3.в.

При режимах гібридного лазерно – дугового зварювання зі швидкістю  $V_{зв} = 72$  м/год структурні зміни з точки зору характеру руйнування зварних з'єднань в умовах зовнішнього циклічного навантаження вигином при величині напруження ( $\sigma_1 = 60$  МПа) певно, забезпечать найкращі властивості міцності і тріщиностійкості металу за рахунок формування структури бейніту нижнього, ніж при більших до  $V_{зв} = 110$  м/год швидкостях зварювання, коли утворюється структура бейніту верхнього.

В результаті порівняльних досліджень опору втомному руйнуванню двосторонніх однопрохідних зварних з'єднань сталі S460M меншої категорії міцності ( $\sigma_r = 440$  МПа) встановлено, що при напруженні циклу 40 МПа тріщини втомі не з'являються в зразках при  $N = 2 \times 10^6$  циклів навантаження як при дуговому автоматичному, так і при гібридному лазерно-дуговому зварюванні стикових з'єднань.

З підвищенням значення напруження циклу до 60 МПа кращій опір втомному руйнуванню мають зварні з'єднання сталі S460M, що виконувались дуговим способом. В даному випадку тріщини в зразках не спостерігались і при  $N = 2 \times 10^6$  циклів навантаження, натомість в зразках з'єднань, що виконувались гібридним лазерно-дуговим зварюванням тріщина втомі по лінії сплавлення довжиною приблизно 40 мм з'являлась після 1540400 циклів навантаження.

### Висновки

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що спосіб зварювання суттєво впливає на опір втомному руйнуванню стикових з'єднань високоміцних сталей. Порівняльна оцінка показала, що при однакових умовах циклічного навантаження зварні з'єднання, виконані автоматичним дуговим зварюванням, характеризуються вищою втомною довговічністю порівняно з гібридними лазерно-дуговими з'єднаннями, особливо при напруженнях симетричного циклу  $\sigma_1 = 60$  МПа.

Встановлено, що при напруженнях  $\sigma_1 = 40$  МПа для сталі S460M тріщини втомі не виникали при досягненні  $N = 2 \times 10^6$  циклів як у дугових, так і у гібридних з'єднаннях, що свідчить про достатній рівень витривалості за зниженого навантаження. При підвищенні напруження до  $\sigma_1 = 60$  МПа з'єднання, виконані гібридним лазерно-дуговим

способом, виявили меншу довговічність, що проявилось у появі тріщин втомі при  $N \approx (0,8-1,54) \times 10^6$  циклів, тоді як дугові з'єднання зберігали цілісність до  $2 \times 10^6$  циклів.

Фрактографічний аналіз поверхні руйнування дозволив виділити дві характерні зони: зону повільного розвитку тріщини (стадія зародження) та зону магістрального руйнування. У зоні ініціювання спостерігався переважно квазікрихкий механізм із формуванням фасеток, тоді як у зоні магістрального розвитку тріщини домінував в'язкий ямковий характер руйнування. Встановлено, що структурний стан металу шва, сформований при швидкості гібридного зварювання  $V_{зв} = 72$  м/год, характеризується утворенням нижнього бейніту, що забезпечує кращі показники тріщиностійкості порівняно з режимами підвищеної швидкості зварювання.

Показано, що вирішальний вплив на втомну довговічність має не лише спосіб зварювання як такий, а й геометрія стикового з'єднання. Використання розробки кромки з кутом розкриття близько  $10^\circ$  при гібридному лазерно-дуговому зварюванні може підвищити опір втомному руйнуванню до рівня, співставного з дуговими з'єднаннями.

Отримані результати підтверджують необхідність комплексної оцінки втомної міцності зварних з'єднань з урахуванням стадій ініціювання та розвитку тріщини, а також структурних та геометричних чинників, що формуються в процесі гібридного лазерно-дугового зварювання. Практичне значення роботи полягає в обґрунтуванні технологічних рекомендацій щодо підвищення надійності зварних конструкцій із високоміцних сталей, що експлуатуються в умовах тривалих циклічних навантажень.

### Список використаної літератури

1. Davila-Iniesta E. M., López-Islas J. A., Villuendas-Rey Y., Camacho-Nieto O. Automatic segmentation of gas metal arc welding for cleaner productions. *Applied Sciences*. 2025. Vol.15. Iss. 6. Id. 3280. <https://doi.org/10.3390/app15063280>
2. Biber A., Sharma R., Reisinger U. Robotic welding system for adaptive process control in gas metal arc welding. *Welding in the World*. 2024. Vol. 68. Iss. 9. P. 2311-2320. <https://doi.org/10.1007/s40194-024-01756-y>
3. Jawad M., Sana M., Ali M. A., Tlija M., Jahanzaib M., Farooq M. U. Machine learning-driven optimization of mechanical properties in gas tungsten arc welding of preheated AISI 1045 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2025. Vol. 138. Iss. 9. P. 4099-4119. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15762-x>
4. Bernatskiy A. Hybrid laser-arc welding of low-alloy steels: From scientific concept to industrial technology (1970s–2020s). *History of Science and Technology*. 2025. Vol. 15. Iss. 2. P. 358-395. <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2024-15-2-358-395>
5. Shelyagin V., Khaskin V., Bernatskiy A., Siora A., Sydorets V., Chinakhov D. Multi-pass laser and hybrid laser-arc narrow-gap welding of steel butt joints. *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 927. P. 64–71. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.927.64>
6. He Y., Song X., Yang Z., Duan R., Xu J., Wang W., Chen S. Research and development progress of laser-arc hybrid welding: A review. *Metals*. 2025. Vol. 15. Iss. 3. Id. 326. <https://doi.org/10.3390/met15030326>
7. Berdnikova O., Poznyakov V., Bernatskiy A., Alekseienco T., Sydorets V. Effect of the structure on the mechanical properties and cracking resistance of welded joints of low-alloyed high-strength steels. *Procedia Structural Integrity*. 2019. Vol. 16. P. 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.026>
8. Acherjee B. Hybrid laser arc welding: State-of-art review. *Optics & Laser Technology*. 2018. Vol. 99. P. 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.09.038>
9. Poznyakov V., Markashova L., Shelyagin V., Zhdanov S., Bernatskiy A., Berdnikova O., Sydorets V. Cold cracking resistance of butt joints in high-strength steels with different welding techniques. *Strength of Materials*. 2019. Vol. 51. P. 843–851. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00132-7>
10. Urbańczyk M., Adamiec J. Hybrid welding (laser-electric arc MAG) of high yield point steel S960QL. *Materials*. 2021. Vol. 14. Iss. 18. Id. 5447. <https://doi.org/10.3390/ma14185447>
11. Kim J. H., Jeong W. C., Choi I., Lee K. H., Kim M. H. Fatigue performance of hybrid laser arc welded joints with high manganese steel. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2025. Vol. 17. Id. 100660. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2025.100660>

### References

1. Davila-Iniesta, E. M., López-Islas, J. A., Villuendas-Rey, Y., & Camacho-Nieto, O. (2025). Automatic segmentation of gas metal arc welding for cleaner productions. *Applied Sciences*, 15(6), 3280. <https://doi.org/10.3390/app15063280>
2. Biber, A., Sharma, R., & Reisinger, U. (2024). Robotic welding system for adaptive process control in gas metal arc welding. *Welding in the World*, 68(9), 2311-2320. <https://doi.org/10.1007/s40194-024-01756-y>
3. Jawad, M., Sana, M., Ali, M. A., Tlija, M., Jahanzaib, M., & Farooq, M. U. (2025). Machine learning-driven optimization of mechanical properties in gas tungsten arc welding of preheated AISI 1045 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 138(9), 4099-4119. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15762-x>

4. Bernatskiy, A. (2025). Hybrid laser-arc welding of low-alloy steels: From scientific concept to industrial technology (1970s–2020s). *History of Science and Technology*, 15(2), 358-395. <https://doi.org/10.32703/2415-7422-2024-15-2-358-395>
5. Shelyagin, V., Khaskin, V., Bernatskiy, A., Siora, A., Sydorets, V., & Chinakhov, D. (2018). Multi-pass laser and hybrid laser-arc narrow-gap welding of steel butt joints. *Materials Science Forum*, 927, 64–71. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.927.64>
6. He, Y., Song, X., Yang, Z., Duan, R., Xu, J., Wang, W., Chen, S. (2025). Research and development progress of laser-arc hybrid welding: A review. *Metals*, 15(3), 326. <https://doi.org/10.3390/met15030326>
7. Berdnikova, O., Poznyakov, V., Bernatskiy, A., Alekseenko, T., & Sydorets, V. (2019). Effect of the structure on the mechanical properties and cracking resistance of welded joints of low-alloyed high-strength steels. *Procedia Structural Integrity*, 16, 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.026>
8. Acherjee, B. (2018). Hybrid laser arc welding: State-of-art review. *Optics & Laser Technology*, 99, 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.09.038>
9. Poznyakov, V., Markashova, L., Shelyagin, V., Zhdanov, S., Bernatskiy, A., Berdnikova, O., & Sydorets, V. (2019). Cold cracking resistance of butt joints in high-strength steels with different welding techniques. *Strength of Materials*, 51, 843–851. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00132-7>
10. Urbańczyk, M., & Adamiec, J. (2021). Hybrid welding (laser-electric arc MAG) of high yield point steel S960QL. *Materials*, 14(18), 5447. <https://doi.org/10.3390/ma14185447>
11. Kim, J. H., Jeong, W. C., Choi, I., Lee, K. H., & Kim, M. H. (2025). Fatigue performance of hybrid laser arc welded joints with high manganese steel. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 17, 100660. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2025.100660>

Дата першого надходження статті до видання: 22.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 27.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 07.05.2026