

# АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОСТІННИХ ВИРОБІВ ІЗ КОРОЗІЙНОСТІЙКИХ ВИСОКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ (Огляд)

Ю.В. Юрченко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [yurchenko@paton.kiev.ua](mailto:yurchenko@paton.kiev.ua)

У роботі проведено огляд сучасних наукових досліджень, присвячених лазерному зварюванню тонкостінних виробів із високолегованих корозійностійких сталей. Особливу увагу приділено проблемам, що впливають на якість зварних з'єднань у виробках з малою товщиною стінки. Однією з таких проблем є утворення кратерів у кінці зварного шва, що часто спостерігається при виготовленні кільцевих зварних з'єднань. Встановлено, що ефективним підходом до зменшення цього дефекту є застосування плавного регулювання потужності лазерного випромінювання на початку та в кінці процесу зварювання з використанням різних типів модуляції, а також перекриття шва та виконання додаткового загладжувального проходу. Наступним важливим аспектом є забезпечення стабільного газового захисту під час зварювання у вузькому зазорі між притискними елементами. Розглянуто конструктивні рішення, що сприяють формуванню ламінарного потоку захисного газу, зокрема застосування газорозподільних елементів зі спечених пористих матеріалів або металевих сіток, які знижують турбулентність і покращують ефективність захисту зони зварювання від атмосферного впливу. Окремо проаналізовано проблему деформацій і залишкових напружень, що виникають через локальний вплив джерела тепла. Встановлено, що використання мідних підкладок, оптимальне розташування притискних елементів та оптимізація параметрів лазерного зварювання можуть істотно знизити рівень термічних деформацій і забезпечити високу геометричну точність з'єднань. За результатами огляду визначено основні проблеми лазерного зварювання тонкостінних виробів із корозійностійких високолегованих сталей, розглянуто варіанти їх вирішення, а також окреслено перспективи подальших досліджень у цих напрямках. Бібліогр. 65, табл. 1, рис. 9.

*Ключові слова:* лазерне зварювання, високолеговані корозійностійкі сталі, тонкостінні вироби, проблеми зварювання, кратери, газовий захист, деформації

**Вступ.** Використання тонколистових металів дає можливість зменшити масу та габарити зварних конструкцій, а також знизити їх собівартість. На сучасному етапі розвитку зварювальних технологій велика увага приділяється зварюванню металу з товщиною стінки менше 2 мм у різноманітних конструкціях [1]. Тонколистовий метал традиційно застосовується в таких галузях, як авіаційна, хімічна, харчова та ін. В авіації це – трубопроводи, елементи турбін, фюзеляжів тощо [2, 3]. У хімічній промисловості це – трубопроводи, резервуари, цистерни, баки [4]. Ці вироби зазвичай мають значну протяжність зварних з'єднань і підвищені вимоги до їх якості. У легкій промисловості, зокрема в харчовій, більшість металевих виробів є тонкостінними: холодильні установки, трубопроводи, посудини, баки, ємності для цукрових і молочних заводів [5].

Серед матеріалів, які найчастіше застосовуються в перелічених галузях, найпоширенішими є аустенітні корозійностійкі сталі. Вони становлять близько двох третин світового виробництва корозійностійких сталей [6]. Їхня структура залишається аустенітною в усьому діапазоні температур – від криогенних до температур плавлення – зав-

дяки легуванню нікелем, а також азотом і марганцем. Вони мають чудову здатність до формування й зварювання, не є магнітними та зберігають пластичність при дуже низьких температурах [7, 8]. До найпоширеніших належить серія 300 – хромонікелеві сплави, де аустенітна структура досягається головним чином за рахунок додавання нікелю [6].

Найпоширенішими сталями аустенітного класу є AISI 304, AISI 316, AISI 321 (вітчизняні аналоги 08X18H10, 03X17H14M3, 12X18H10T відповідно). Хімічний склад цих сталей за ГОСТ 5632-72 наведено в таблиці.

Корозійностійкі сталі AISI 304, AISI 316 і AISI 321 широко застосовуються в промисловості завдяки своїй корозійній стійкості та високим механічним властивостям. AISI 304 – найпоширеніша марка, що використовується в харчовій промисловості, побутовій техніці, архітектурі та машинобудуванні. AISI 316 містить молібден, що підвищує її стійкість до агресивних середовищ, зокрема хлорвмісних, тому її обирають для морської, хімічної та медичної сфер. AISI 321 легувана титаном і відрізняється високою термостійкістю та опором міжкристалітній корозії, що робить її придатною для використання у високотемпературному обладнанні, авіації та інших галузях, в яких наявні високі температури робочого середовища [6–8].

Хімічний склад сталей, мас. % [9]

Марка	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Ti	Mo	Fe
AISI 304	≤0,08	≤0,8	≤2	9...11	≤0,02	≤0,035	17...19	≤0,3	–	–	Осн.
AISI 316	≤0,03	≤0,4	≤1...2	13...15	≤0,02	≤0,035	16...18	–	–	2,5...3,1	Осн.
AISI 321	≤0,12	≤0,8	≤2	9...11	≤0,02	≤0,035	17...19	≤0,3	0,4...1	–	Осн.

Враховуючи вищезазначені властивості, саме аустенітні сталі найчастіше використовуються для виготовлення тонкостінних конструкцій. Для їх з'єднання необхідно застосовувати процеси зварювання, які забезпечують мінімальний тепловий вплив і високу якість зварного з'єднання. Основними видами зварних з'єднань тонколистових виробів є стикове з'єднання для плоских виробів і кільцеве – для циліндричних (рис. 1).

На сьогодні найпоширенішими методами зварювання тонкостінних виробів у світі є плазмове, електронно-промене, TIG- та MIG-зварювання [10–12].

Незважаючи на різноманітність процесів зварювання, вище перелічені способи мають свої недоліки. Плазмове зварювання має високу вартість зварювального обладнання та витратних матеріалів. Це може значно збільшити витрати на реалізацію технології [13].

Електронно-промене зварювання, хоча й є ефективним, але також не позбавлене недоліків. Зварювальне обладнання для цієї технології є складним і коштовним, що робить його менш доступним для широкого використання. Окрім того, для проведення зварювальних робіт необхідні вакуумні камери, що обмежує можливості обробки великогабаритних чи важких виробів. Оскільки електронно-промене зварювання проводиться в закритих вакуумних камерах, для точного позиціонування електронного променя та пошуку місця зварювання необхідні складні системи наведення. Також сам процес супроводжується рентгенівським випромінюванням, що вимагає спеціальних заходів захисту персоналу [13].

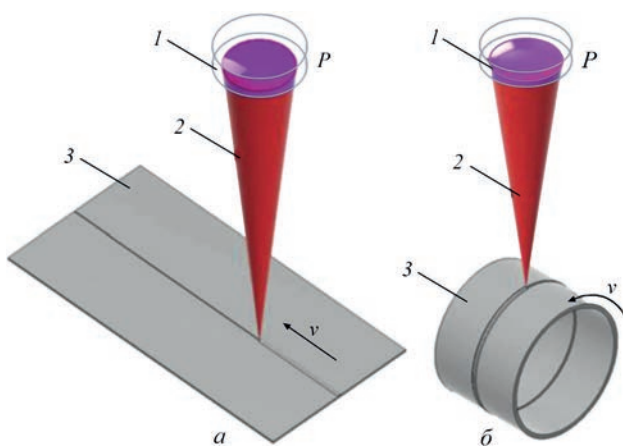


Рис. 1. Схеми лазерного зварювання: стикових зварних з'єднань (а), кільцевих зварних з'єднань (б): 1 – лінза, 2 – лазерний промінь, 3 – зварювані деталі

TIG-зварювання також має свої слабкі сторони. Зокрема надмірний зварювальний струм може призвести до розплавлення вольфрамового електрода, що впливає на якість зварювання, утворюючи крихкий вольфрам у зварювальній ванні. Крім того, цей процес зварювання має низьку швидкість, що обмежує його продуктивність при зварюванні великогабаритних виробів [14].

Серед недоліків MIG-зварювання можна зазначити менш стабільну зварювальну дугу, що може призвести до нерівномірного процесу зварювання. Іншою проблемою є зворотній зв'язок зі зварювальним дротом, який інколи може бути нерівномірним, що ускладнює контроль за процесом зварювання. Під час зварювання також утворюється велика кількість диму та шкідливих парів, що вимагає використання відповідних засобів вентиляції та захисту персоналу [12].

Водночас з вище переліченими способами зварювання тонкостінних конструкцій все більшого розвитку та впровадження набуває лазерне зварювання. За останні 10 років відбувся стрімкий розвиток лазерних технологій, що дозволило знизити вартість використаного кіловату потужності лазерного випромінювання приблизно у 10 разів, що зробило лазерне зварювання ще більш конкурентоспроможним по відношенню до традиційних видів зварювання [15]. Це підтверджується даними різних консалтингових агентств, які вказують, що обсяг глобального ринку обладнання для лазерного зварювання у 2022–2023 рр. становив 2,5...2,9 млрд доларів США [16–18]. Очікується, що до 2032 р. цей ринок досягне приблизно 4 млрд доларів США, з середньорічним темпом приросту (CAGR) 5,5 % протягом прогнозованого періоду [18]. Швидкий розвиток лазерних технологій також підтверджується значним збільшенням кількості наукових публікацій, що стосуються лазерної обробки, зокрема лазерного зварювання.

Основними перевагами лазерного зварювання є: відсутність потреби використання складних вакуумних камер, найбільш локалізований термічний вплив, малі розміри зони термічного впливу та мінімальні залишкові деформації.

Незважаючи на стрімкий розвиток лазерного зварювання як високопродуктивної технології з глибоким проплавленням, мінімальними деформаціями та високою швидкістю процесу, низка технічних задач і проблем залишається актуальною та досі не

має остаточного вирішення. Серед них – утворення кратерів на початку та в кінці зварного з'єднання, забезпечення надійного газового захисту, ефективний тепловідвід, контроль зварювальних напружень і деформацій, а також надійне притискання зварюваних крайок тонколистових деталей.

**Метою** даної роботи є аналіз наукових робіт стосовно лазерного зварювання тонкостінних виробів; визначення поширених проблем, які виникають при зварюванні таких виробів та пошук можливих шляхів їх вирішення.

**Аналіз проблеми утворення кратера у зварному з'єднанні.** Утворення кратерів у кінці зварного з'єднання під час лазерного зварювання є добре вивченою, але досі актуальною темою при виготовленні кільцевих зварних з'єднань тонкостінних конструкцій. Її актуальність зберігається через зміну умов зварювання, зокрема товщини та типу матеріалу, конструкції з'єднання, типу та характеристик джерела лазерного випромінювання, а також особливостей геометрії виробу. Через це проблема має переважно технологічний характер і потребує індивідуального підходу. Для ефективного усунення кратерів необхідно шукати технічні рішення з урахуванням конкретних особливостей виробу, параметрів зварювання та властивостей матеріалу.

Згідно зі стандартом ДСТУ 3761.3-98 [19], кратер – це заглиблення, яке утворюється в кінці зварного з'єднання під дією тиску електричної дуги і (або) струменя газів та об'ємної усадки металу в процесі його кристалізації. У міжнародній термінології цей дефект позначається як «crater» (рис. 2). Проблема утворення кратера в кінці зварного з'єднання давно відома, однак із розвитком зварювальних технологій, тонкостінних або замкнених з'єднань, де неможливо використати традиційні вивідні планки, вона набуває актуальності [20].

Попри зовнішню простоту, зона кратеру є вкрай складною з точки зору термодинаміки, гідродинаміки, металургії та напружено-деформованого стану. Саме тут найчастіше виникають гарячі тріщини, пори, усадкові раковини, мікротріщини,

які погіршують механічні властивості з'єднання, знижують герметичність і, за несприятливих умов, можуть призвести до передчасного руйнування зварного з'єднання під дією навантажень [21, 22].

Особливо складним є керування процесом завершення процесу зварювання. У той час як більшість технологічних рішень спрямовані на забезпечення стабільної зварювальної ванни в стаціонарному режимі, зона завершення є нестійкою за своєю природою: після припинення дії джерела тепла змінюється характер теплових потоків, розподіл температури, швидкість кристалізації, що веде до локальної втрати балансу фазових і гідродинамічних процесів. Як наслідок, кратер стає концентратором залишкових напружень і джерелом ініціації тріщин. Окрім холодних тріщин, залишається проблема утворення також і гарячих тріщин під час лазерного зварювання аустенітних корозійностійких сталей [23, 24]. Основною причиною їхнього виникнення є наявність у мікροструктурі металу зварного з'єднання залишкових розплавлених плівок зниженої температури плавлення, які утворюються внаслідок мікросегрегації легкоплавких елементів, таких як сірка, фосфор, мідь, кремній, або утворення евтектик на основі  $Ni_3S_2$ ,  $Fe_3P$  тощо [23]. Під дією усадкових напружень, що виникають під час охолодження, або внаслідок різкої зміни теплових потоків у зоні завершення зварного з'єднання ці плівки втрачають цілісність, утворюючи гарячі тріщини.

Уникнення утворення кратерів на початку та в кінці зварного з'єднання є важливою умовою забезпечення високої якості та герметичності зварних з'єднань, особливо під час лазерного зварювання. Одним із ключових підходів до мінімізації кратерів при лазерному зварюванні є корегування теплового балансу на початку та в кінці зварного з'єднання.

Найбільш розповсюдженою та ефективною стратегією уникнення формування кратерів є зниження потужності лазерного випромінювання в кінці зварного з'єднання (ramp-down) [20]. Метод зменшення потужності лазерного випромінювання

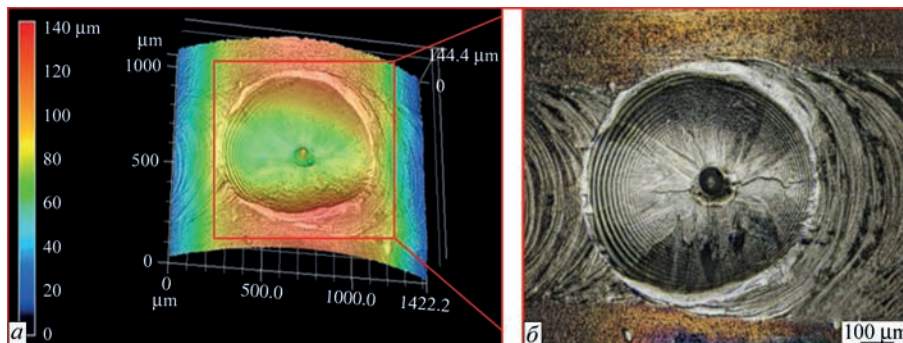


Рис. 2. Кратер з тріщинами в кінці зварного з'єднання під час лазерного зварювання: 3D сканування кратера (а), вид зверху на кратер (б) [20]

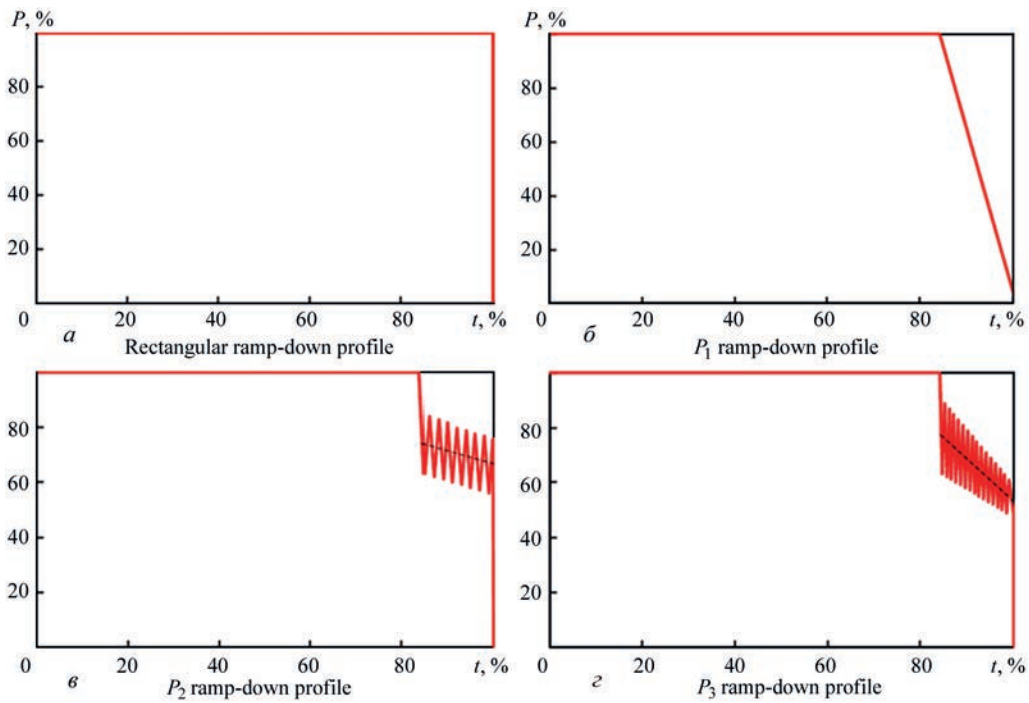


Рис. 3. Профілі зниження потужності лазера: прямокутний (а),  $P_1$  (б),  $P_2$  (в),  $P_3$  (г) [20]

в кінці зварного з'єднання дозволяє знизити температуру в зварювальній ванні, сприяючи рівномірній кристалізації. Завдяки зменшенню градієнтів температур і швидкості охолодження досягається зниження усадкових напружень, зменшується схильність до гарячих тріщин і мінімізується ризик формування усадкової раковини в кратері [20]. У своєму дослідженні Kenda та ін. [20] використовували три варіанти профілів зниження потужності лазерного випромінювання (RD) (рис. 3).

Профіль  $P_1$  – класичний режим із лінійним зниженням потужності на  $-1,5$  Вт/мс для переходу від глибокого проплавлення до теплопровідного режиму. Профіль  $P_2$  – новий підхід із зигзагоподібним спадом: спочатку до 73 % потужності, далі модуляція 53 Гц з нахилом  $-0,15$  Вт/мс. Профіль  $P_3$  подібний до  $P_2$ , але з частотою 106 Гц і нахилом  $-0,25$  Вт/мс. На рис. 4 наведено вигляд згори трьох типових завершень зварних з'єднань, виконаних за RD-профілями  $P_1, P_2, P_3$ , зображеними на рис. 3 [22]. При зварюванні з профілем  $P_1$  поверхня зварного з'єднання є гладкою, але має кілька довгих осьових тріщин, які зазвичай виникають у таких умовах (рис. 4, а). Ці тріщини починаються з моменту зниження потужності та в певній зоні зварного з'єднання спостерігається їх паралельне існування по ширині. Поверхня завершення зварного з'єднання при використанні зигзагоподібних профілів  $P_2$  і  $P_3$  (рис. 4, б і 4, в) має дугоподібну структуру, тобто містить виражені зони кристалізації. Кількість таких зон відповідає числу циклів модуляції потужності, закладених у відповід-

ний RD-профіль. Із зображень рис. 4, б і 4, в також видно, що при використанні зигзагоподібних профілів утворюються лише короткі поверхневі тріщини. Це пояснюється тим, що потужна модуляція лазерного променя формує зони кристалізації, які діють як бар'єри для поширення тріщин [20].

Існує ще декілька методів уникнення утворення кратерів, а саме: розфокусування лазерного випромінювання, зварювання з перекриттям шва та використання «заглажувального» шва [25]. Недоліком методу розфокусування лазерного випромінювання є необхідність використання складних оптичних систем у зварювальних головках, які забезпечують контрольовану зміну фокусної відстані. Метод «заглажувального» шва вимагає додаткового проходу, що також збільшує час обробки та додаткові внутрішні напруження за рахунок повторного теплового впливу.

За результатами огляду наукових робіт, присвячених дослідженню формування кратерів в кінці зварного з'єднання, можна зробити наступний висновок. Попри наявність певної кількості наукових робіт за цим напрямком, все ще залишається не розкритою тема утворення кратера при лазерному зварюванні саме тонкостінних зварних з'єднань із корозійностійких сталей. Тому подальші дослідження за цим напрямком залишаються актуальними.

**Аналіз проблеми забезпечення газового захисту зони зварювання.** Тема газового захисту під час зварювання концентрованими джерелами енергії є актуальною через те, що більшість способів передбачають зварювання на відкритому по-

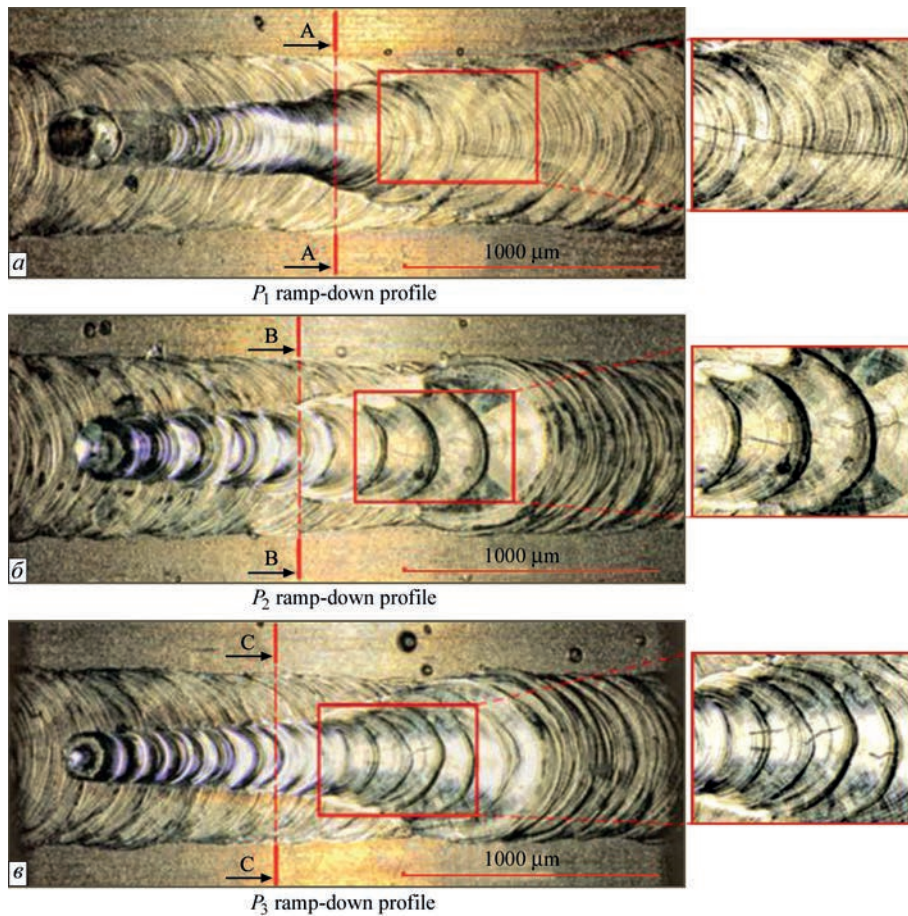


Рис. 4. Порівняння морфології тріщин на поверхні зварного з'єднання при різних профілях зниження потужності лазера:  $P_1$  (а);  $P_2$  (б);  $P_3$  (в) [20]

вітрі без використання вакуумних камер. Газовий захист у таких випадках відіграє одну з ключових ролей. Через високу температуру та локалізовану дію теплового джерела навіть незначне потрапляння повітря в зону зварювання може призвести до утворення оксидних плівок, пор, тріщин та інших дефектів. Це погіршує структуру металу, знижує міцність і довговічність зварних з'єднань [26–29]. Одним із головних чинників, що знижують ефективність газового захисту під час зварювання, є турбулентність потоку. При переході від ламінарного до турбулентного режиму відбувається інтенсивне змішування захисного газу з навколишнім повітрям, внаслідок чого концентрація кисню в зоні зварювання стрімко зростає (рис. 5) [30, 31]. Унаслідок обміну імпульсом на перехідному шарі з навколишнім середовищем або зі стінкою (тобто металевою поверхнею), профіль швидкості зазнає асиметричних змін зі збільшенням довжини поширення [32]. Тому аналіз приповерхневого та вільного струменів [33] дає змогу оцінити ефективність подачі захисного газу через плоскі або трубчасті сопла.

Приповерхневі струмені демонструють суттєво довшу ламінарну ділянку потоку та меншу

турбулентність за того самого числа Рейнольдса [34], що свідчить про перевагу плоских сопел порівняно з іншими формами. Швидкість потоку захисного газу є одним із найбільш детально досліджених параметрів завдяки зручності його регулювання. Blackburn та ін. [35] встановили, що зменшення швидкості потоку покращує зовнішній вигляд зварного шва, оскільки надто велика швидкість спричиняє турбулентність у газовому потоці. Vyskoč [36] дослідив вплив швидкості потоку на форму зварного шва та з'ясував, що її підвищення зменшує енергію, яку поглинає плазмовий факел, і водночас збільшує ширину шва. У роботі проаналізовано взаємозв'язок між відстанню подачі захисного газу та пористістю зварного шва. Оптимальна відстань подачі дозволила стабілізувати парогазовий канал і зменшити утворення пор. Крім витрати газу, увагу дослідників привернуло й положення сопла газового захисту [37]. Samrana та ін. [38] дійшли висновку, що для ефективного захисту газ треба подавати під прямим кутом до поверхні заготовки, а висоту сопла необхідно мінімізувати, щоб забезпечити надійний захист парогазового каналу та високотемпературної зони зварювання. Wang та ін. [39] дослідили вплив кута

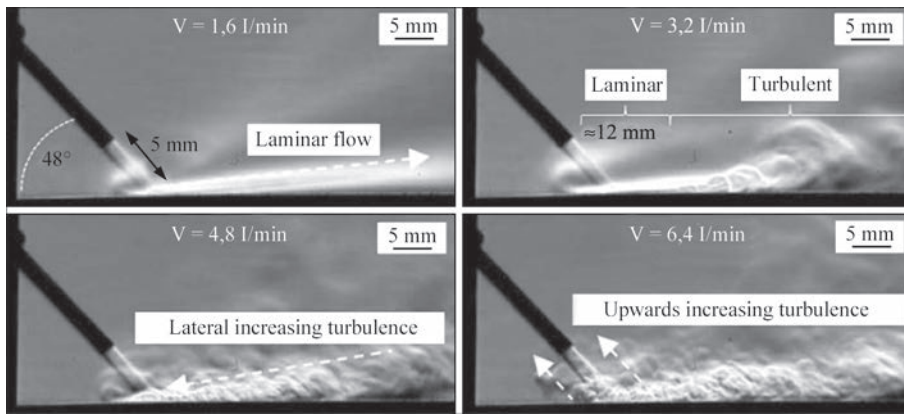


Рис. 5. Характер потоку гелію в залежності від швидкості подачі газу, візуалізований за допомогою шлірен-зображення [31]

нахилу сопла та встановили, що зі зменшенням кута збільшується розмір зони газового захисту.

Найхарактернішим проявом недостатнього газового захисту зони зварювання є утворення оксидних плівок на поверхні металу, так званих кольорів мінливості. На корозійностійких сталях такі оксидні плівки формуються при температурах понад 300 °С. Їхня товщина залежить від температурного режиму, тривалості нагріву та вмісту кисню у зоні зварювання (рис. 6). Області з оксидними плівками мають нижчу корозійну стійкість порівняно з основним металом, що може спричинити розвиток локальної корозії [27, 40].

Колір оксидних плівок, які утворюються під час зварювання, змінюється від світло-солом'яного до темно-синього залежно від температури. Це пов'язано з формуванням оксидних плівок, у скла-

ді яких переважають хром і залізо. Під час окиснення легуючі елементи, зокрема хром, можуть дифундувати до поверхні, оскільки окислюються легше, ніж залізо [26]. Унаслідок цього під плівкою утворюється зона зі зниженим вмістом хрому, що негативно впливає на корозійну стійкість цієї ділянки порівняно з рештою об'єму сталі [42]. Швидкість окислення та ступінь виснаження легуючих елементів у зоні під плівкою визначаються не загальним хімічним складом сталі, а властивостями самої оксидної плівки, зокрема її здатністю до дифузії [43]. На поверхні формуються неоднорідні оксиди, які складаються переважно з хрому та заліза. Через свою неоднорідну структуру, наявність дефектів і внутрішніх напружень така оксидна плівка не забезпечує надійного захисту від корозії. У відповідних середовищах це може при-

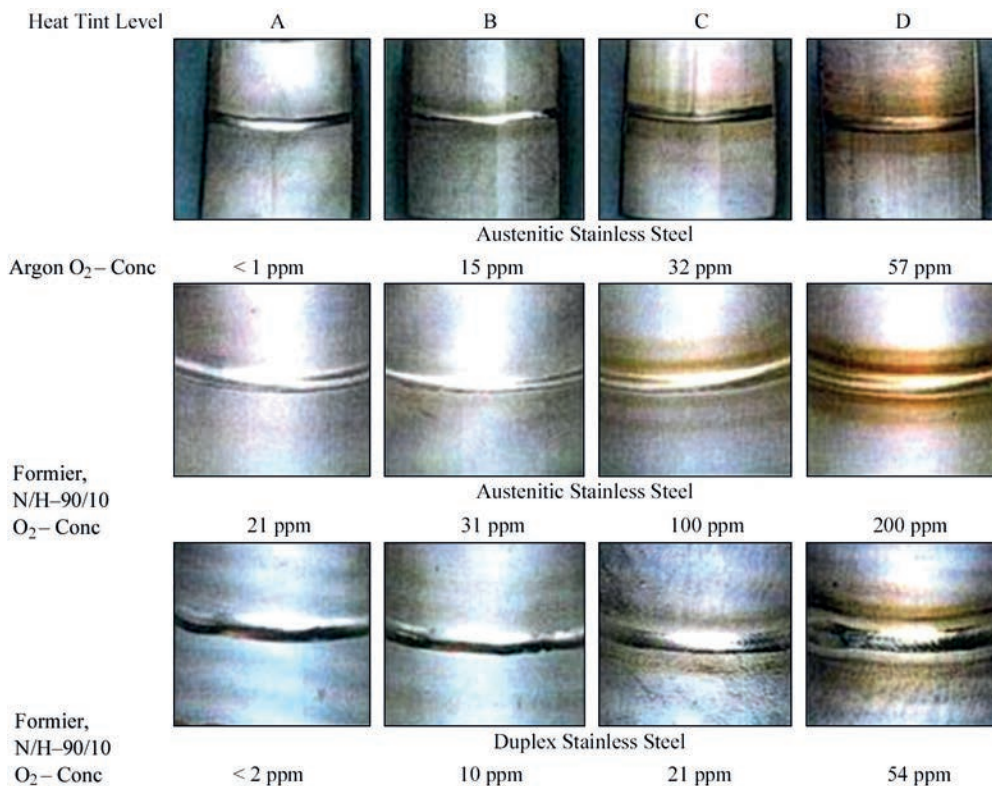


Рис. 6. Кольори оксидних плівок на поверхні корозійностійких сталей залежно від концентрації кисню в зоні зварювання [41]

зводити до локальної корозії у зоні зі зниженим вмістом хрому, розташованій під плівкою [44].

Під час експлуатації зварні з'єднання із корозійностійких сталей можуть піддаватися різним видам корозії, а саме: точковій, щілинній, міжкристалітній та стрес-корозії [27, 45–49]. Захисна пасивна плівка на поверхні корозійностійкої сталі забезпечує високу стійкість до рівномірної корозії у типових окисних середовищах. Однак за наявності агресивних чинників можливе локальне руйнування цієї плівки, що призводить до розвитку точкової корозії [47, 50]. Вплив підвищених температур у межах 500...800 °С (так звані «критичні температури») під час зварювання з подальшим повільним охолодженням на повітрі робить аустенітну корозійностійку сталь AISI 304 завтовшки 2 мм вразливою до міжкристалітної корозії [48, 51, 52]. У цих умовах уздовж границь зерен випадають карбіди хрому, що знижує вміст хрому в прилеглій зоні.

Якщо концентрація хрому зменшується нижче за критичний рівень для пасивації (приблизно 11,5 %), ця зона стає анодною по відношенню до решти зерна, що призводить до сенсibiлізації матеріалу та його схильності до міжкристалітної корозії [52]. Зони, збіднені на хром, також можуть стати шляхами переважного розвитку інших видів локальної корозії або розповсюдження тріщин за наявності напружень розтягу [53].

Для запобігання утворенню оксидних плівок на поверхні металу під час зварювання та зниженню ймовірності корозійних руйнувань використовують спеціальні системи газового захисту. Вони забезпечують подачу захисного газу в зону зварювання з метою ізоляції розплавленого металу та прилеглих ділянок від контакту з киснем, азотом і вологою з навколишнього середовища. Розробка ефективних пристроїв газового захисту є актуальним напрямом досліджень, адже якість зварного з'єднання значною мірою залежить від стабільності та рівномірності газового потоку. У низці наукових праць запропоновано технічні рішення, спрямовані на формування ламінарного потоку захисного газу, що дозволяє підвищити ефективність захисту та мінімізувати утворення дефектів у зварному з'єднанні [30, 54, 55].

Один із ключових прийомів забезпечення надійного газового захисту полягає в поетапному формуванні рівномірного ламінарного потоку. Для початкового вирівнювання швидкості газу використовують дифузори зі спеченого металу або металевої піни, які значно знижують турбулентність і забезпечують однорідніший розподіл газу [30]. Залежно від вимог до якості захисту та конструкції

сопла, можливе використання як окремих елементів, так і їх комбінації. Наприклад, після дифузора може бути встановлена стільникова структура, яка спрямовує потік уздовж осі сопла, ефективно зменшуючи поперечні коливання швидкості. При цьому для досягнення достатньої стабілізації обирається співвідношення довжини до діаметра комірок не менше ніж 5:1, що забезпечує пригнічення турбулентності та сприяє формуванню ламінарного потоку [54]. Важливу роль відіграє конструктивне уникнення різких змін у формі та перерізі внутрішніх каналів сопла. Перехідні ділянки між секціями виконуються з радіусами, що зменшує ймовірність зриву потоку та утворення нових зон турбулентності. Таке плавне спрямування забезпечує рівномірний ламінарний потік, особливо якщо довжина каналу є достатньою для формування повноцінного параболічного профілю швидкості [30]. Ще одним поширеним прийомом є використання кількох напрямків подачі захисного газу [55]. Газ подається як безпосередньо в зону зварювання, так і в навколишній простір. Це реалізується через окремі канали: один спрямований прямо на зону зварювання, інший – під кутом або протилежно до напрямку руху променя для запобігання потрапляння повітря, а третій – через центральну камеру з подальшим розподілом через стільникову структуру. Окрім цього, у пристроях передбачають системи відведення зварювального диму, які не порушують основного потоку захисного газу. Для цього застосовуються витяжні сопла, що забирають газ лише з периферії, залишаючи центральну зону з чистим інертним середовищем [55].

За результатами огляду наукових робіт за темою газового захисту видно, що наразі існують роботи, присвячені загальним закономірностям формування ламінарного потоку при зварюванні з відносно великим зазором між притискними планками. Проте розробка пристроїв, здатних забезпечити ефективний ламінарний газовий потік у вузькому зазорі між близько розташованими притискними планками кондуктора залишається поза полем досліджень. Це підтверджує актуальність створення пристроїв газового захисту для таких умов зварювання.

**Аналіз проблеми виникнення зварювальних напружень і деформацій.** Зварювання високонцентрованими джерелами енергії неминуче призводить до утворення залишкових напружень і деформацій після охолодження зони зварювання. Унаслідок локального теплового впливу та подальшого нерівномірного охолодження виникають вну-

трішні напруження та деформації, які можуть суттєво впливати на геометричну точність і міцність конструкцій [56]. На рис. 7 наведено типові форми деформацій, що виникають під час зварювання плоских деталей. Поперечна та поздовжня усадка, а також кутова деформація є трьома основними типами зварювальних деформацій, які зазвичай поєднуються в реальних зварних конструкціях [57].

У разі зварювання тонколистового металу з великим тепловим впливом щодо товщини матеріалу, можливе утворення деформацій типу вигину [57]. Такі деформації є однією з головних причин виникнення розмірних похибок і призводять до зменшення жорсткості та несучої здатності зварних конструкцій із тонколистової сталі. Рис. 8 ілюструє розподіл залишкових напружень у стиковому зварному з'єднанні. Зокрема на рис. 8, а показано розподіл поздовжніх залишкових напружень (у напрямку зварювання) як вздовж шва, так і на поперечному перерізі в його центрі. У зоні навколо лінії зварювання фіксуються максимальні розтягувальні залишкові напруження. У віддалених від зони шва ділянках для збереження рівноваги формуються стискальні напруження. Уздовж лінії зварювання залишкові напруження на її кінцях зменшуються до нуля через вільні межі. Аналогічно на рис. 8, б наведено розподіл поперечних залишкових напружень: вони є розтягувальними у центрі та стискальними на початку й кінці шва, а на краях пластини – наближаються до нуля [57].

Рівень зварювальних деформацій і залишкових напружень значною мірою визначається величиною теплового впливу. Як правило, зі збільшенням тепловкладення підвищуються як залишкові напруження, так і ступінь деформації [58]. У цьо-

му сенсі лазерне зварювання, яке характеризується високою щільністю енергії, є вигідним, оскільки вимагає меншого тепловкладення порівняно з іншими методами зварювання [59].

Розвиток залишкових напружень під час зварювання пов'язаний із взаємодією металургійних змін і морфології мікроструктури. Залишкові напруження розтягу негативно впливають на структурну цілісність, тоді як залишкові напруження стиску зазвичай чинять позитивний вплив, зокрема підвищують втомну міцність [60, 61]. Зміна напружень, зумовлена розміром зерен, може бути наслідком варіації властивостей аустенітної й феритної фаз, зокрема пружної деформації, термічної та пластичної невідповідності. Водночас параметр кристалічної решітки, що є функцією вмісту інтерстиціальних атомів, має вирішальне значення для інтерпретації бажаних залишкових напружень у розширеному аустеніті сталі AISI 316 [62]. З іншого боку, доведено, що твердофазне перетворення певною мірою впливає на розподіл залишкових напружень у корозійностійкій сталі AISI 304, однак цей вплив не є суттєвим [63].

У дослідженні [60] вивчали вплив мікроструктури та тепловкладення на залишкові напруження після лазерного зварювання корозійностійкої сталі AISI 304 завтовшки 1 мм. У ході досліджень проводилось лазерне зварювання зі сталюю потужністю лазерного випромінювання 750 Вт, при цьому змінювалась швидкість зварювання в діапазоні 0,6...1 м/хв, а також величина розфокусування 0...-1 мм. Встановлено, що співвідношення еквівалентів хрому до нікелю близько 1,69 підтверджує режим кристалізації типу ферит-аустеніт, при якому мікроструктура складається з комбінованої фази голчастого та пластинчастого  $\delta$ -фе-

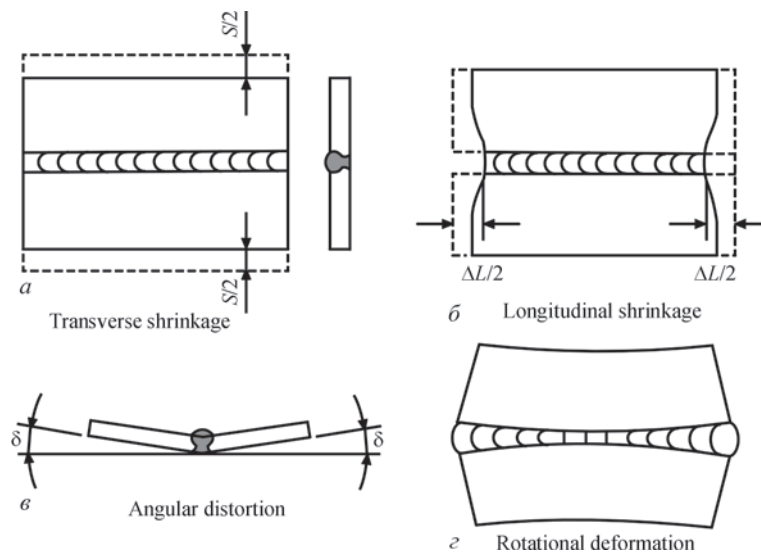


Рис. 7. Типові деформації при зварюванні: поперечна усадка (а); поздовжня усадка (б); кутова деформація (в); обертальна деформація (г) [57]

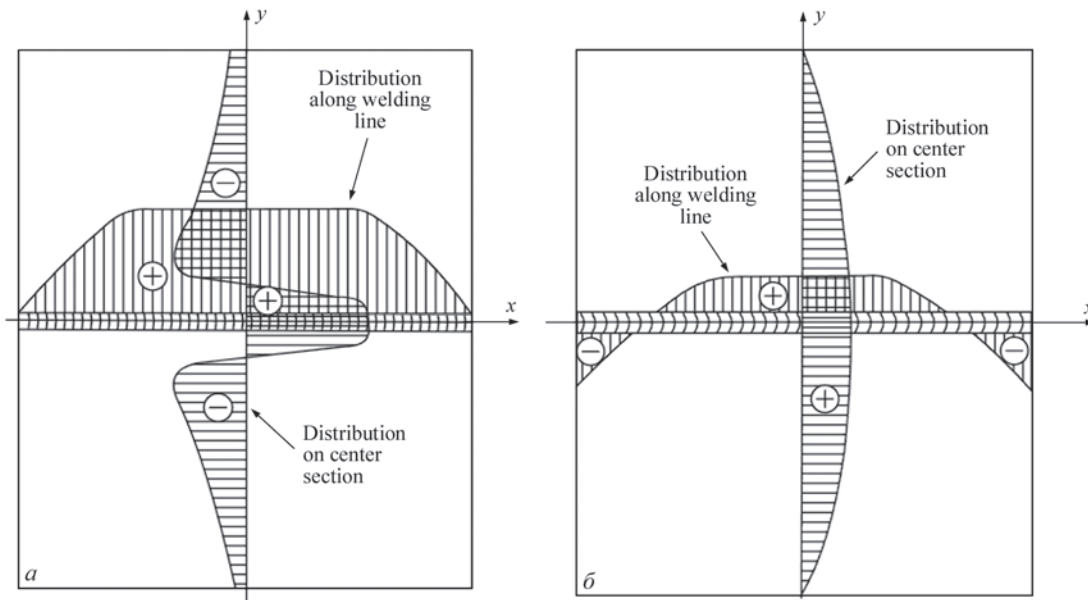


Рис. 8. Схема розподілу залишкових напружень зварювання: напруження в напрямку зварювання (а), напруження в поперечному напрямку (б) [57]

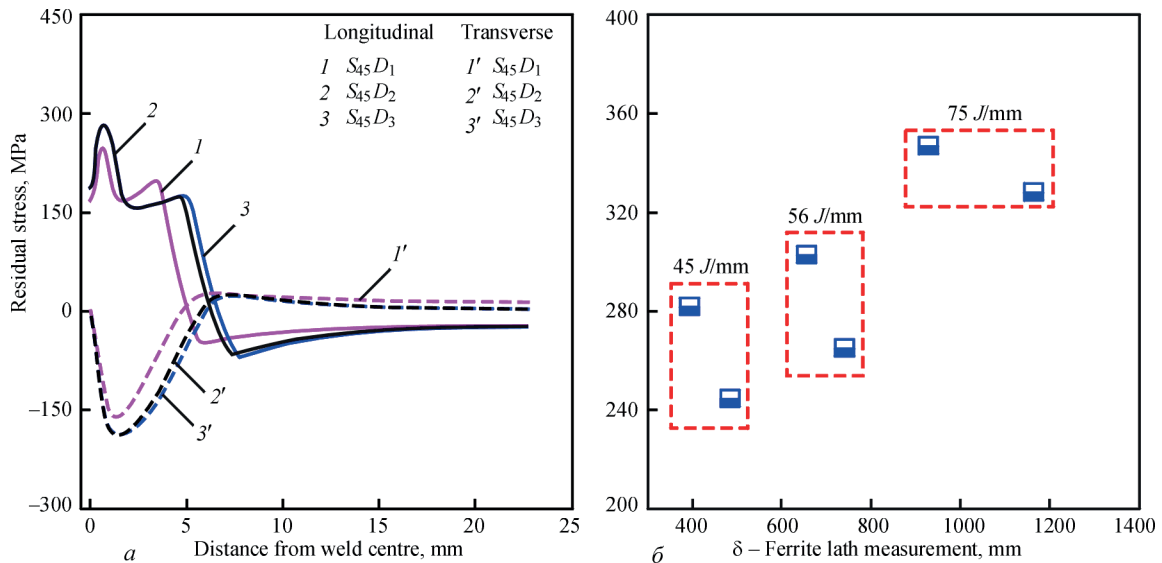


Рис. 9. Розподіл залишкових напружень при найнижчому тепловкладенні 45 Дж/мм (а), зміна розміру первинних дендритів δ-фериту в залежності від залишкових напружень (б) [60]

риту в аустенітній матриці. Максимальний вміст δ-фериту (12 %) досягається при найнижчому тепловкладенні 45 Дж/мм, тоді як при підвищенні до 75 Дж/мм його кількість зменшується до 7...8 %. З ростом тепловкладення збільшується товщина дендритів з 484 до 927 нм, а міждендритний інтервал подвоюється з 3 до 6 мкм, при цьому відбувається зменшення пластинчастого δ-фериту на користь голчастого.

Найвища якість зварного з'єднання спостерігається при мінімальному тепловкладенні, що пояснюється дуже дрібною дендритною структурою та мінімальним міждендритним інтервалом. Вищий коефіцієнт термічного розширення нікелю порівняно з хромом викликає напруження розтягу в γ-аустенітній фазі та напруження стиску в δ-феритній ден-

дритній. При низькому тепловкладенні, що збільшує вміст хрому та зменшує – нікелю, виникають напруження стиску, які сприяють зниженню залишкових напружень. Також зменшення тепловкладення з 75 до 45 Дж/мм знижує поздовжні напруження розтягу до 245 МПа, що нижче границі плинності, а поперечні залишкові напруження змінюються з розтягвальних на стискальні (рис. 9) [60].

Для зменшення рівнів напружень і деформацій можливе використання декількох підходів, наприклад, використання близько розташованих зовнішніх притискних планок кондуктора при зварюванні прямошовних зварних з'єднань труб. Зовнішні притискні планки суттєво знижують залишкові напруження та зварювальні деформації більш ніж на 30 % у порівнянні варіантом без використан-

ня притискних планок [64]. Використання мідних підкладок зі зворотної сторони зварного з'єднання також суттєво знижує залишкові напруження та деформації [65].

**Аналіз результатів розглянутих робіт.** За результатами літературного огляду сучасних наукових робіт на тему лазерного зварювання тонкостінних деталей встановлено наступне:

1. Утворення кратерів у кінці зварного з'єднання під час лазерного зварювання є добре вивченою, але досі актуальною темою при виготовленні кільцевих з'єднань тонкостінних конструкцій. Актуальність цього питання зумовлена зміною умов зварювання, таких як товщина та тип матеріалу, конструкція з'єднання, характеристики джерела лазерного випромінювання, геометрія зварюваної деталі тощо. Проблема має технологічний характер і потребує індивідуального підходу для конкретного виробу. Попри наявність досліджень, основна увага в них приділяється зварюванню різнорідних металів або вуглецевих сталей [20, 25]. Робіт, що стосуються саме зварювання тонкостінних елементів із аустенітної корозійностійкої сталі, залишається обмежена кількість. Це створює запит на подальші дослідження в напрямку уникнення утворення кратерів при зварюванні тонкостінних виробів з віссю обертання, виготовлених із корозійностійких сталей. Одним із найперспективніших підходів для усунення формування кратерів є використання плавного підвищення та зниження потужності лазерного випромінювання на початку та в кінці процесу зварювання відповідно. Застосування зигзагоподібної модуляції потужності дозволяє зменшити довжину кристалізаційних тріщин в кратері та обмежити їх проникнення вглиб зварного з'єднання [20]. Крім того, зварювання з перекриттям шва та заглажувального шва також сприяють зниженню ризику формування кратерів і кристалізаційних тріщин [25]. Подальші перспективи досліджень полягають в оптимізації профілів підвищення та зниження потужності лазерного випромінювання в процесі зварювання з урахуванням конкретної геометрії з'єднання та властивостей матеріалу.

2. Газовий захист при лазерному зварюванні тонкостінних виробів у вузькому зазорі між притискними планками є важливим для запобігання утворенню оксидних плівок, пор і зниження корозійної стійкості з'єднань. Наразі існують роботи, присвячені загальним закономірностям формування ламінарного потоку при зварюванні з відносно великим зазором між притискними планками [30, 54, 55]. Проте розробка пристроїв, здатних забезпечити ефективний ламінарний газовий потік у

вузькому зазорі між близько розташованими притискними планками кондуктора, залишається поза полем досліджень. Це підтверджує актуальність створення пристроїв газового захисту для таких умов зварювання. Для зменшення турбулентності в потоці, забезпечення стабільного та постійного газового захисту в зоні зварювання перспективним є використання додаткових газорозподільних елементів у конструкції пристрою газового захисту на основі металевих сіток або зпеченого пористого металу, що дозволяють стабілізувати швидкість і зменшити інтенсивність змішування з атмосферним повітрям [30, 54]. Важливу роль також відіграє співвідношення діаметра до довжини каналу вихідних отворів, яке має бути не менше ніж 1:5 для забезпечення стабільності ламінарного потоку [54, 55]. Подальші дослідження доцільно зосередити на розробці пристрою газового захисту для зварювання в умовах вузького зазору між притискними планками кондуктора, який би забезпечував стабільний ламінарний потік захисного газу.

3. Проблема деформацій і залишкових напружень у тонкостінних зварних конструкціях є особливо критичною через малу жорсткість елементів і високу чутливість до теплового впливу. Навіть при використанні лазерного зварювання з меншим рівнем тепловкладення в порівнянні з іншими методами зварювання, деформації, викликані концентрованим джерелом тепла, можуть призводити до втрати геометричної точності та міцності виробів і зварних з'єднань відповідно [56, 57]. Серед відомих рішень найбільш ефективними є застосування мідних підкладок, які за рахунок високої теплопровідності забезпечують ефективне тепловідведення та зменшують розміри зони термічного впливу, а також оптимізація режимів лазерного зварювання, що знижують рівні напружень і деформацій зварених виробів [60, 64, 65]. Важливою умовою ефективності цих рішень є оптимальне розміщення притискних планок кондуктора та забезпечення повного прилягання деталей до мідної підкладки. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вивчення напружень і деформацій у звареній деталі при різних відстанях притискних планок кондуктора.

## Висновки

Аналіз наукових робіт з лазерного зварювання тонкостінних виробів дозволив встановити, що:

1. Ефективним підходом до усунення кратерів у кінці зварного шва є застосування спеціальних профілів модуляції потужності лазера на завершення процесу зварювання. Використання зигзагоподібної модуляції з частотою 53...106 Гц і на-

хилом зниження потужності  $-0,15 \dots -0,25$  Вт/мс дозволяє значно зменшити довжину кристалізаційних тріщин, які утворюються в кратері, та знизити ризик їх проникнення вглиб зварного з'єднання, що підвищує надійність і герметичність конструкції. Крім того, зварювання з перекриттям шва та загладжувального шва зі зменшеною потужністю лазерного випромінювання також сприяють зниженню ризику формування кратерів і кристалізаційних тріщин.

2. Для забезпечення стабільного ламінарного потоку захисного газу доцільно застосовувати пристрої з дифузорами зі спеченого металу та каналами з конструктивним співвідношенням довжини до діаметра не менше ніж 5:1. Такі технічні рішення сприяють зниженню турбулентності, обмежують потрапляння атмосферного повітря до зони зварювання та запобігають утворенню оксидних плівок, що знижують корозійну стійкість з'єднання.

3. Для сталі AISI 304 завтовшки 1 мм оптимізація режимів лазерного зварювання, зокрема зменшення тепловкладення до 45 Дж/мм, дозволяє знизити рівень поздовжніх залишкових напружень до 245 МПа, що нижче границі плинності, та перевести поперечні напруження з розтягувальних до стискальних. Додаткове використання мідних підкладок і притискних елементів забезпечує ефективне тепловідведення та дозволяє зменшити деформації на понад 30 %, що важливо для забезпечення геометричної точності та надійності тонкостінних конструкцій.

## Список літератури/References

- Azanaw, G.M. (2025) Thin-walled structures in structural engineering: A comprehensive review of design innovations, stability challenges, and sustainable frontiers. *American J. of Materials Synthesis and Processing*, 10(1), 18–26. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.ajmsp.20251001.13>
- Trzepieciński, T., Najm, S.M., Sbayti, M., Belhadjsalah, H., Szpunar, M., Lemu, H.G. (2021) New advances and future possibilities in forming technology of hybrid Metal–Polymer composites used in aerospace applications. *J. of Composites Science*, 5(8), 217. DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs5080217>
- Zhou, B., Liu, B., Zhang, S. (2021) The advancement of 7XXX series aluminum alloys for aircraft structures: A review. *Metals*, 11(5), 718. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11050718>
- Manfredi, J. (2019) Stainless steel application and fabrication in the biotech industry. In: *Filtration and Purification in the Biopharmaceutical Industry*. Third Edition. CRC Press, 169–190. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315164953-8>
- Dewangan, A.K., Patel, A.D., Bhadania, A.G. (2015) Stainless steel for dairy and food industry: A review. *J. of Material Science & Engineering*, 4, 5. DOI: <https://doi.org/10.4172/2169-0022.1000191>
- Dutta, S. (2018) Different types and new applications of stainless steel. *Stainless steel*, 62(5), 86–91. [https://www.researchgate.net/profile/S-Dutta/publication/330383386\\_Different\\_Types\\_and\\_New\\_Applications\\_of\\_Stainless\\_Steel/links/5c3d6a31a6fdcc6b5ad9ee0/Different-Types-and-New-Applications-of-Stainless-Steel.pdf](https://www.researchgate.net/profile/S-Dutta/publication/330383386_Different_Types_and_New_Applications_of_Stainless_Steel/links/5c3d6a31a6fdcc6b5ad9ee0/Different-Types-and-New-Applications-of-Stainless-Steel.pdf)

- Zheng, C., Yu, W. (2018) Effect of low-temperature on mechanical behavior for an AISI 304 austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, 710, 359–365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.003>
- Sunny, K.T., Korra, N.N. (2021) A systematic review about welding of super austenitic stainless steel. *Materials Today Proceedings*, 47, 4378–4381. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.185>
- ISO 15510:2014. (2014) *Stainless steels – Chemical composition, Edition 2. International Organization for Standardization*. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:15510:ed-2:vl:en>
- Boulos, M. I., Fauchais, P., Pfender, E. (2023) *Plasma torches for cutting, welding and PTA coating*. Springer eBooks, pp. 1–83. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-12183-3\\_47-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-12183-3_47-1)
- Węglowski, M., Błacha, S., Phillips, A. (2016) Electron beam welding – Techniques and trends – Review. *Vacuum*, 130, 72–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2016.05.004>
- Ogundimu, E.O., Akinlabi, E.T., Erinosh, M.F. (2019) Comparative study between TIG and MIG welding processes. *J. of Physics Conference Series*, 1378(2), 022074. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/2/022074>
- Khoshnaw, F., Krivtsun, I., Korzyk, V. (2023) *Welding of Metallic Materials. Methods, Metallurgy, and Performanc. Chapter 2 – Arc welding methods*. Elsevier eBooks, pp. 37–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90552-7.00004-3>
- Ahmad, A.Y., Al-Qenaei (2016) Fusion welding techniques. *International J. of Engineering Research and Applications*, 6(3), 78–83. <https://www.academia.edu/download/47559936/M6302078083.pdf>
- Yurchenko, Yu.V., Bernatskiy, A.V., Siora, O.V., Sokolovskiy, M.V., Bondarieva, V.I. (2024) Analysis of actual problems of laser welding of stainless steel thin sheets and search for solutions. *International J. of Science Engineering and Technology*, 12(5), 1–9. DOI: <https://doi.org/10.61463/ijset.vol.12.issue.5.289>
- Singh, A., Singh, S. (2024). Laser Welding Machine Market Size, Forecast 2024 – 2032. In: *Global Market Insights Inc.* <https://www.gminsights.com/industry-analysis/laser-welding-machine-market>
- (2022) *Laser Welding Market Size, Industry Share & Trends – 2032*. <https://www.futuremarketinsights.com/reports/laser-beam-welding-equipment-market>
- Allied Market Research (2023) *Laser Welding System Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report, By Laser type, by power, By Application: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2023–2032*. Allied Market Research. <https://www.alliedmarketresearch.com/laser-welding-system-market-A135089>
- ДСТУ 3761.3–98. *Зварювання та споріднені процеси. Частина 3. Зварювання металів: з'єднання та шви, технологія, матеріали та устаткування. Терміни та визначення*. Чинний від 01.07.1999. Київ, Держстандарт України. DSTU 3761.3–98. *Welding and allied processes. Part 3. Welding of metals: welded joints and welds, technology, materials and equipment. Terms and definitions*.
- Kenda, M., Klobčar, D., Nagode, A., Bračun, D. (2021) Analysis and prevention of weld crater cracking in circumferential laser microwelding of automotive pressure sensors. *Engineering Failure Analysis*, 128, 105579. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105579>
- Artinov, A., Karkhin, V., Bachmann, M., Rethmeier, M. (2020) Mathematical modeling of the geometrical differences between the weld end crater and the steady-state weld pool. *J. of Laser Applications*, 32, 022024. DOI: <https://doi.org/10.2351/7.0000068>
- Lai, W.J., Ganguly, S., Suder, W. (2020) Study on effect of laser keyhole weld termination regimes and material composition on weld overlap start-stop defects. *J. of Manufacturing Processes*, 58, 416–428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.012>
- Norouzian, M., Elahi, M.A., Plapper, P. (2023) A review: Suppression of the solidification cracks in the laser welding process by controlling the grain structure and chemical compositions. *J. of Advanced Joining Processes*, 7, 100139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jajp.2023.100139>

24. Wang, D., Zhang, F., Warinsiriruk, E., Zhu, Q., Li, T., Li, H., Xu, N., Han, K., Wang, Z., Yang, S. (2024) A novel method for evaluating solidification cracking susceptibility of austenitic stainless steel using trapezoidal hot cracking test during laser welding. *Optics & Laser Technology*, **175**, 110789. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110789>
25. Gook, S., Üstündag, Ö., Gumenyuk, A., Rethmeier, M. (2019) Avoidance of end crater imperfections at high-power laser beam welding of closed circumferential welds. *Welding in the World*, **64**, 407–417. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-019-00841-x>
26. Łabanowski, J., Głowacka, M. (2011) Heat tint colours on stainless steel and welded joints. *Welding International*, **25(7)**, 509–512. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2010.540837>
27. Bobić, B., Jegdić, B., Gligorijević, B. (2014) Analysis of corrosion damage in a boiler made of AISI 304L stainless steel. *Zastita Materijala*, **55(1)**, 33–37. DOI: <https://doi.org/10.5937/zasmat1401033b>
28. McNicol, J., Narayanan, B., Sridhar, N., Fink, C. (2022) Corrosion resistance of austenitic stainless steel welds with no-backing gas. *Welding in the World*, **67**, 819–830. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-022-01442-x>
29. Wickström, L., Hinds, G., Turnbull, A. (2015) Influence of weld preparation procedure and heat tinting on sulfide stress corrosion cracking of duplex stainless steel. *CORROSION*, **71(8)**, 1036–1047. DOI: <https://doi.org/10.5006/1645>
30. Schricker, K., Baumann, A., Bergmann, J.P. (2021) Local shielding gas supply in remote laser beam welding. *J. of Manufacturing and Materials Processing*, **5(4)**, 139. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp5040139>
31. Schmidt, L., Hickethier, S., Schricker, K., Bergmann, J.P. (2019) Low-spatter high speed welding by use of local shielding gas flows. *High-Power Laser Materials Processing: Applications, Diagnostics, and Systems VIII*, **10911**, 185–197. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2507024>
32. Gersten, K. (1998) Turbulent Boundary Layers I. In: *Kluwick, A. (eds) Recent Advances in Boundary Layer Theory. CISM International Centre for Mechanical Sciences*, Vol. **390**. Springer, Vienna. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2518-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2518-2_5)
33. Gersten, K., Herwig, H. (1992) *Strömungsmechanik. Grundlagen der Impuls-, Wärme- und Stoffübertragung aus asymptotischer Sicht. Textbook*. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-322-93970-8>
34. Gogineni, S., Shih, C. (1997) Experimental investigation of the unsteady structure of a transitional plane wall jet. *Experiments in Fluids*, **23**, 121–129. DOI: <https://doi.org/10.1007/s003480050093>
35. Blackburn, J., Allen, C., Hilton, P., Li, L. (2010) Nd: YAG laser welding of titanium alloys using a directed gas jet. *J. of Laser Applications*, **22**, 71–78. DOI: <https://doi.org/10.2351/1.3455825>
36. Vyskoč, M., Sahul, M., Dománková, M., Jurči, P., Sahul, M., Vyskočová, M., Martinkovič, M. (2020) The effect of process parameters on the microstructure and mechanical properties of AW5083 aluminum laser weld joints. *Metals*, **10(11)**, 1443. DOI: <https://doi.org/10.3390/met10111443>
37. Deepan Bharathi Kannan, T., Sathiyaa, P., Ramesh, T. (2017) Experimental investigation and characterization of laser welded NiTiNol shape memory alloys. *J. of Manufacturing Processes*, **25**, 253–261. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmpro.2016.12.006>
38. Campana, G., Ascari, A., Fortunato, A., Tani, G. (2008) Hybrid laser-MIG welding of aluminum alloys: The influence of shielding gases. *Applied Surface Science*, **255(10)**, 5588–5590. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.07.169>
39. Wang, H., Shi, Y., Gong, S., Duan, A. (2007) Effect of assist gas flow on the gas shielding during laser deep penetration welding. *J. of Materials Processing Technology*, **184(1–3)**, 379–385. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.12.014>
40. Jegdić, B.V., Bobić, B.M., Prokolab, M.M. (2013) Influence of heat tint on corrosion resistance of stainless steels. *Zavarivanje I Zavarene Konstrukcije*, **58(3)**, 121–126. <https://scindeks.ceon.rs/article.aspx?artid=0354-79651303121J>
41. Frantsen, J.E., Mathiesen, T., Hattesen, K.U., Cheepsujayan, P., Bertelsen, B., Aller, H.C. (2008) Common corrosion problems in the brewery sector. *Force Technology*, NACE-08176. <https://onepetro.org/NACECORR/proceedings-abstract/CORR08/All-CORR08/118824>
42. Mahajanam, S., Heidersbach, K. (2021). Corrosion studies of heat-tinted austenitic stainless steel. *Material Performance*. [https://nace.mydigitalpublication.com/publication/?i=704427&article\\_id=4006538&view=articleBrowser&ver=html5](https://nace.mydigitalpublication.com/publication/?i=704427&article_id=4006538&view=articleBrowser&ver=html5)
43. Yu, Y., Shironita, S., Souma, K., Umeda, M. (2018) Effect of chromium content on the corrosion resistance of ferritic stainless steels in sulfuric acid solution. *Heliyon*, **4(11)**, e00958. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00958>
44. Sun, M., Du, C., Liu, Z., Liu, C., Li, X., Wu, Y. (2021) Fundamental understanding on the effect of Cr on corrosion resistance of weathering steel in simulated tropical marine atmosphere. *Corrosion Science*, **186**, 109427. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109427>
45. Zatkalíková, V., Uhrčík, M., Markovičová, L., Kucharíková, L. (2022) Corrosion Behavior of Sensitized AISI 304 Stainless Steel in Acid Chloride Solution. *Materials*, **15(23)**, 8543. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15238543>
46. Wu, X., Liu, Y., Sun, Y., Dai, N., Li, J., Jiang, Y. (2020) A discussion on evaluation criteria for crevice corrosion of various stainless steels. *J. of Material Science and Technology*, **64**, 29–37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.04.017>
47. Parangusan, H., Bhadra, J., Al-Thani, N. (2021) A review of passivity breakdown on metal surfaces: influence of chloride- and sulfide-ion concentrations, temperature, and pH. *Emergent Materials*, **4**, 1187–1203. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42247-021-00194-6>
48. Bansod, A.V., Patil, A.P., Moon, A.P., Khobragade, N.N. (2016) Intergranular corrosion behavior of Low-Nickel and 304 austenitic stainless steels. *J. of Materials Engineering and Performance*, **25**, 3615–3626. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-016-2221-2>
49. Toppo, A., Pujar, M., Sreevidya, N., Philip, J. (2018) Pitting and stress corrosion cracking studies on AISI type 316N stainless steel weldments. *Defence Technology*, **14(3)**, 226–237. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2018.03.004>
50. Yoon, H., Ha, H., Lee, T., Kim, S., Jang, J. H., Moon, J., Kang, N. (2019) Pitting corrosion resistance and repassivation behavior of C-Bearing Duplex stainless steel. *Metals*, **9(9)**, 930. DOI: <https://doi.org/10.3390/met9090930>
51. Zhou, W., Ma, W., Li, Y., Sun, Y. (2021) Effect of sensitizing treatment on the microstructure and susceptibility to intergranular corrosion of High-Nitrogen austenitic stainless steel. *Metallography Microstructure and Analysis*, **10**, 25–35. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13632-020-00708-4>
52. Fujii, T., Suzuki, M., Shimamura, Y. (2022) Susceptibility to intergranular corrosion in sensitized austenitic stainless steel characterized via crystallographic characteristics of grain boundaries. *Corrosion Science*, **195**, 109946. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109946>
53. Cárcel-Carrasco, F., Pascual-Guillamón, M., García, L.S., Vicente, F.S., Pérez-Puig, M. (2019) Pitting corrosion in AISI 304 rolled stainless steel welding at different deformation levels. *Applied Sciences*, **9(16)**, 3265. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9163265>
54. Ding, J., Colegrove, P., Martina, F., Williams, S., Wiktorowicz, R., Palt, M.R. (2015) Development of a laminar flow local shielding device for wire + arc additive manufacture. *J. of Materials Processing Technology*, **226**, 99–105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.07.005>
55. Vykhtar, B., Lingner, M., Richter, A. M., Hoops, F. (2022) Monitoring and local gas shielding at laser-based welding of titanium alloys. *Procedia CIRP*, **111**, 532c535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.08.085>
56. He, Y., Yang, Z., Yang, D., Duan, R., Xu, J., Wang, W., Shi, M., Xu, G., Chen, S. (2025) Numerical simulation of local cooling on residual stress and deformation of welded joints of unequal thickness plates. *J. of Materials Research and Technology*, **36**, 8410–8420. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.05.057>

57. Murakawa, H. (2013) Residual stress and distortion in laser welding. In: *Handbook of Laser Welding Technologies. Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials*. Elsevier eBooks, pp. 374–398. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857098771.2.374>
58. Unnikrishnan, R., Idury, K.S., Ismail, T., Bhadauria, A., Shekhawat, S., Khatirkar, R.K., Sapate, S.G. (2014) Effect of heat input on the microstructure, residual stresses and corrosion resistance of 304L austenitic stainless steel weldments. *Materials Characterization*, **93**, 10–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.03.013>
59. Deepak, J., RP, A., Sundar, S.S. (2023) Applications of lasers in industries and laser welding: A review. *Materialstoday: Proceedings*, 28 February 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.102>
60. Kumar, B., Bag, S., Mahadevan, S., Paul, C., Das, C., Bindra, K. (2021) On the interaction of microstructural morphology with residual stress in fiber laser welding of austenitic stainless steel. *CIRP J. of Manufacturing Science and Technology*, **33**, 158–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.03.009>
61. Korinko, P.S., Malene, S.H. (2001) Considerations for the weldability of types 304L and 316L stainless steel. *Practical Failure Analysis*, **1**, 61–68. DOI: <https://doi.org/10.1007/bf02715336>
62. Hummelshøj, T.S., Christiansen, T.L., Somers, M.A. (2010). Lattice expansion of carbon-stabilized expanded austenite. *Scripta Materialia*, **63**(7), 761–763. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.05.031>
63. Lin, Y., Chou, C. (1995) A new technique for reducing the residual stress induced by welding in type 304 stainless steel. *J. of Materials Processing Technology*, **48**(1–4), 693–698. DOI: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01710-i](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01710-i)
64. Liu, Y., Wang, P., Fang, H., Ma, N. (2021) Mitigation of residual stress and deformation induced by TIG welding in thin-walled pipes through external constraint. *J. of Materials Research and Technology*, **15**, 4636–4651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.035>
65. Mohammed, M.S., Hamdey, M.D., Kareem, A.H., Majdi, H.S. (2024) Investigation of copper backing plate effects in stainless steel welding distortion, heat distribution, and residual stress. *International J. of Heat and Technology*, **42**(4), 1434–1446. DOI: <https://doi.org/10.18280/ijht.420433>

## ACTUAL PROBLEMS OF LASER WELDING OF THIN-WALLED PRODUCTS MADE OF CORROSION-RESISTANT HIGH-ALLOY STEELS (Review)

Yu.V. Yurchenko

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

E-mail: [yurchenko@paton.kiev.ua](mailto:yurchenko@paton.kiev.ua)

The paper reviews current scientific research on laser welding of thin-walled products made of corrosion-resistant steels. Particular attention is paid to problems affecting the quality of welded joints in products with thin walls. One such problem is the formation of craters at the end of the weld, which is often observed in the manufacture of girth welded joints. It has been established that an effective approach to reducing this defect is to use smooth regulation of the laser radiation power at the beginning and end of the welding process using different types of modulation, as well as overlapping the weld and performing an additional smoothing pass. Another important aspect is ensuring stable gas protection during welding in a narrow gap between the clamping elements. Design solutions that contribute to the formation of a laminar flow of shielding gas are considered, in particular the use of gas distribution elements made of sintered porous materials or metal meshes, which reduce the turbulence and improve the effectiveness of protecting the welding zone from atmospheric influences. The problem of deformations and residual stresses caused by the local influence of the heat source is analyzed separately. It has been established that the use of copper substrates, the optimal location of clamping elements, and the optimization of laser welding parameters can significantly reduce the level of thermal deformations and can ensure high geometric accuracy of joints. Based on the results of the review, the main problems of laser welding of thin-walled products made of corrosion-resistant high-alloy steels were identified, options for their solution were considered, and prospects for further research in these areas were outlined. 65 Ref., 1 Tabl., 9 Fig.

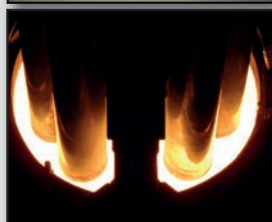
*Keywords: laser welding, high-alloy corrosion-resistant steels, thin-walled products, welding problems, craters, gas shielding, deformations* Отримано

Отримано 25.06.2025

Отримано у переглянутому вигляді 08.10.2025

Прийнято 27.11.2025

## ЕЛЕКТРОШЛАКОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА НАН УКРАЇНИ СЬОГОДНІ



Електрошлакові технології широко застосовуються для отримання високоякісних зливок і вилівок із широкої номенклатури сталей і сплавів у процесі виготовлення деталей відповідального призначення для авіаційної, енергетичної, хімічної та інших високотехнологічних галузей, де необхідно використовувати матеріали з унікальними експлуатаційними властивостями.

Застосування електрошлакових процесів також створює ефективні можливості для рециклінгу металевих відходів у контексті розвитку циркулярної економіки та технологій «зеленої» металургії.

Фахівці ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України стояли біля витоків створення процесу електрошлакового переплаву. В інституті накопичено значний багаторічний досвід розроблення та вдосконалення широкого спектру технологій електрошлакового переплаву, а також проектування та модернізації обладнання для їхньої реалізації у промисловості. Роботи виконуються для замовників із різних країн світу, що підтверджує високий рівень компетентності інституту в цій галузі.

