

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗВАРЮВАННЯ СТАЛЕЙ ВЕЛИКИХ ТОВЩИН

П.І. Онищенко, Т.Б. Майданчук

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: pwi_37@ukr.net

На сьогоднішній день у будівельній, гірничодобувній, металургійній, енергетичній та інших галузях промисловості широко використовуються зварні конструкції зі сталі великих товщин. Проведено аналіз існуючих технологій зварювання сталей, у тому числі із застосуванням висококонцентрованих джерел енергії. Показано, що застосування електронно-променевого, плазмового, лазерного зварювання та гібридних способів на сьогоднішній день потребує високої культури заготівельного виробництва, великих капіталовкладень у допоміжне та зварювальне обладнання. Застосування багатопрохідного електродугового зварювання покритими електродами та механізованого зварювання в захисних газах характеризуються низькою продуктивністю, негарантованою якістю сплавлення присадного матеріалу з основним, утворенням міжшарових дефектів у вигляді шлакових включень, пор. Встановлено, що для зварювання вертикальних швів перспективними технологіями є механізоване дугове зварювання з примусовим формуванням шва та електрошлакове зварювання, які характеризуються високою продуктивністю та стабільністю процесу при значно менших капіталовкладеннях у порівнянні із застосуванням висококонцентрованих джерел енергії. Бібліогр. 56, рис. 9.

Ключові слова: сталь великої товщини, електронно-променеве зварювання, лазерне зварювання, плазмове зварювання, гібридні способи зварювання, зварювання під флюсом, електродугове зварювання з примусовим формуванням шва, електрошлакове зварювання, механічні властивості, техніко-економічне обґрунтування

Вступ. Будівництво об'єктів важкої промисловості, заводів, фабрик, трубопроводів, шляхопроводів, а також цивільне будівництво вимагають виготовлення габаритних конструкцій шляхом з'єднання вузлів і деталей середніх і великих товщин (від 20 мм) як у виробничих цехах, так і в монтажних умовах.

Починаючи з 2023 р. в Україні зріс попит на металоконструкції внаслідок, насамперед, реалізації проєктів із захисту критичної інфраструктури, а також відновлення інфраструктурних і комерційних об'єктів. Необхідні обсяги закупівель товстостіклової сталі (від 40 мм) виявились настільки значними та раптовими, що на ринку Європи виник її дефіцит [1, 2]. У 2024 р. ця тенденція продовжилась.

При проєктуванні та виготовленні зварних конструкцій головним чинником оцінки виробленої продукції є співвідношення ціна–якість, яке можна комплексно охарактеризувати як ефективність. Продуктивність та ефективність праці при зварюванні багато в чому залежать від вірно обраного технологічного рішення й оптимального налаштування обладнання, що використовується.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єктом і предметом дослідження є способи зварювання, які застосовуються при з'єднанні металу великих товщин, їхні основні параметри, умови та обмеження щодо застосування.

У залежності від товщини матеріалів, що зварюються, можливості проведення робіт у цеху чи

в монтажних умовах; положення та геометрії стику (горизонтальна, вертикальна чи нахилена площина, прямий чи криволінійний стик); доступності до стику для застосування того чи іншого обладнання та оснастки; забезпечення необхідних параметрів якості, продуктивності та ефективності можуть використовуватися різні способи зварювання: ручне дугове зварювання (ММА); напівавтоматичне та автоматичне зварювання в захисних газах (MIG, MAG); електронно-променеве (EBW), плазмове (PAW), лазерне (LBW) та їх поєднання; зварювання під флюсом (SAW) або його комбінації з використанням різних типів присадних елементів (суцільний чи порошковий дріт, стрічки, плавкі мундштуки); електрошлакове зварювання (ESW).

Мета та задачі дослідження. Мета дослідження полягає в аналізі існуючих технологій зварювання в різних просторових положеннях металу великих товщин для можливості вибору оптимального способу зварювання, який забезпечить отримання якісних зварних з'єднань та економічну ефективність зварювальних робіт при виготовленні різноманітних металоконструкцій.

Методи досліджень. Методи даного дослідження мають два рівні:

1. Емпіричний – пошук і накопичення наукової інформації за допомогою пошукових систем і баз даних, бібліографічний та ручний пошук даних за досліджуваною темою.

2. Теоретичний – вивчення, аналіз і співставлення існуючих сучасних високоефективних технологій зварювання металу великих товщин.

Результати досліджень. Розглянемо основні методи, які застосовуються для зварювання деталей великих товщин, їхні основні параметри, умови та обмеження щодо застосування.

Електронно-променеве зварювання (EBW). Одним із методів зварювання металу великих товщин є однопрохідне електронно-променеве зварювання (EBW). Даний спосіб застосовується, в основному, для зварювання тугоплавких і хімічно активних матеріалів [3]. Відомо про використання даного способу зварювання для жароміцних сталей 10X9MФБА та 10X12М завтовшки 30 мм [4], супердуплексної сталі марки 2507 завтовшки 20 мм [5]. При цьому якість зварного шва та можливу появу дефектів при EBW металів великих товщин пов'язують зі специфікою формування швів у різних просторових положеннях та особливостями конструкції з'єднань [3].

Слід зазначити, що висока концентрація енергії в промені призводить до утворення специфічної форми зварного шва при EBW (рис. 1) з характерними мінімальними розмірами зони термічного впливу, великим співвідношенням глибини до ширини проплавлення (до 20:1 та більше), а сам виріб має незначні термічні деформації [6].

Незважаючи на суттєві досягнення, повний потенціал процесу EBW не знайшов широкого застосування при зварюванні товстих секцій і великих конструкцій через обмеження, пов'язані з роботою у високому вакуумі, коли вся зварювана конструкція знаходиться у вакуумній камері [8].

В останні десятиліття розроблені нові технологічні можливості EBW без камери [9, 10]. На рис. 2 показано зварний шов, виконаний у нижньому положенні із низьколегованої сталі за допомогою імпульсного невакуумного електронного променя.

Слід зазначити, що зона з'єднання має майже паралельні сторони з добре закругленим закін-



Рис. 1. Макрошліф зварного з'єднання, отриманого електронно-променевим зварюванням у вакуумі [7]



Рис. 2. Зварний шов, виконаний у нижньому положенні, з низьколегованої сталі з імпульсним променем NVEB, глибина провару 22 мм [7]

ченням. За винятком дрібних пор, зона плавлення була задовільною. Зварювання проводилось при середній потужності 26,3 кВт при швидкості зварювання 480 мм/хв.

Незважаючи на переваги способу EBW (висока швидкість зварювання, малі витрати зварювального матеріалу), для отримання якісного зварного шва необхідною умовою є ретельна підготовка кромки і застосування коштовного обладнання, а також, у більшості випадків, необхідність використання вакуумної камери, що обмежує габарити зварюваної деталі. До того ж, зварювання може виконуватись лише в нижньому або в горизонтальному положенні на вертикальній площині, що обмежує застосування даного способу.

Лазерне зварювання (LBW). Лазерне зварювання, на відміну від EBW, не потребує вакууму та може застосовуватись при зварюванні на повітрі [11], а також має ряд явних переваг перед іншими процесами зварювання:

- мінімальна усадка та деформація;
- можливість автоматизації з високою швидкістю руху;
- високе співвідношення глибини до ширини (глибоке проникнення з вузькою шириною валика);
- мала зона теплового впливу;
- можна використовувати на вузлах неправильної форми або у важкодоступних місцях.

Як і всі зварювальні процеси, лазерне зварювання необхідно ретельно контролювати, щоб забезпечити якість. Погано контрольований процес призводить до утворення тріщин, пористості, недостатнього проникнення та відсутності плавлення – будь-що з них може призвести до руйнування зварного з'єднання. Впродовж останніх десяти

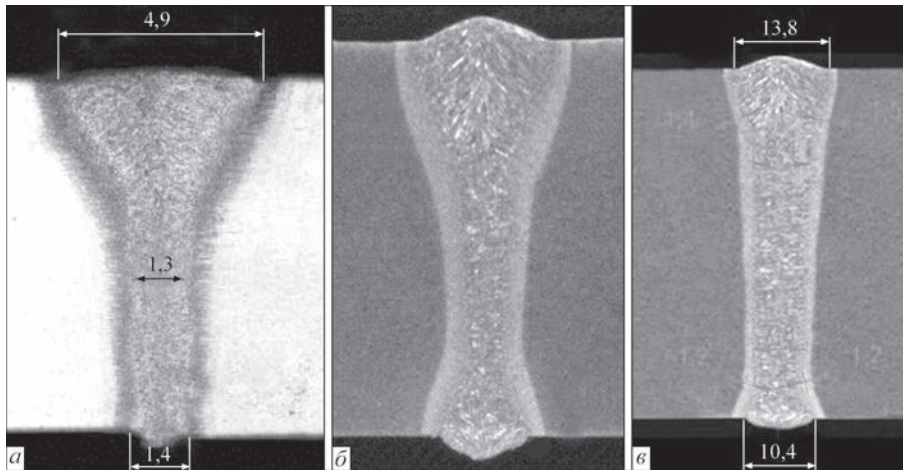


Рис. 3. Характер проплавлення при лазерному зварюванні сталей CO_2 -лазерами: *a* – сталь завтовшки 10 мм, $P_{\text{випр}} = 10$ кВт, $V_{\text{зв}} = 1$ м/хв.; *б* – сталь завтовшки 30 мм, $P_{\text{випр}} \approx 28$ кВт, $V_{\text{зв}} = 1$ м/хв; *в* – сталь завтовшки 50 мм, $P_{\text{випр}} \approx 55$ кВт, $V_{\text{зв}} = 1$ м/хв [14]

років стали доступними (сучасні) твердотільні та волоконні лазери, які дозволяють без короблення зварювати в один шар листи із низьколегованих і вуглецевих конструкційних сталей з товщиною стінки до 10 мм та більше, з високою швидкістю зварювання (на рівні 2 м/хв) [12].

У [13] автори наводять дані щодо зварювання з глибоким проплавленням конструкційної сталі S355 EN 10025 завтовшки 20 і 25 мм за допомогою волоконного лазера високої потужності (12...30 кВт).

У [14] показано, що при дотриманні оптимальних параметрів лазерного зварювання на CO_2 -лазерах успішно проводиться процес проплавлення металу різної товщини із задовільним формуванням зварного шва та заданих геометричних параметрів (рис. 3).

Авторами [13] зазначалося, що лазерне зварювання надвисокої потужності (UHPLW) з потужністю лазера 10 кВт та вище стикається з декількома проблемами зварювання товстолістової сталі (більше 10 мм), такими як: розбризкування, корінний горб, пористість і тріщини при охолодженні зварного з'єднання. Крім того, неоднорідна мікроструктура та низькі механічні властивості залишаються складними, не до кінця вирішеними проблемами, які перешкоджають широкому використанню лазерних технологій зварювання товстолістової сталі та вимагають пошуку шляхів для їхнього вирішення.

Плазмове зварювання (PAW). Плазмове зварювання має переваги перед зварюванням лазерним променем (LBW) та зварюванням електронним променем (EBW) за вартістю обладнання, меншими вимогами до підготовки з'єднань і зручністю експлуатації [15].

Для зварювання металу завтовшки більше 6 мм застосовують режим «keyhole» [16]. При цьому

основний метал частково розплавляється під дією високого теплового потоку від дуги, а поверхня зварювальної ванни поступово проштовхується вниз під дією тиску дуги, що призводить до утворення глухої замкової щілини в основному металі, а потім досягається повне проплавлення, що утворює відкриту замкову щілину [17]. У [15, 18, 19] наведено дані щодо отримання якісних зварних з'єднань сталі даним способом завтовшки до 12,7 мм, нержавкої сталі AISI 304HCu [20] до 9,0 мм, для зварювання сталі марки SS 304 Н завтовшки 6 мм [21] та марки 316 [22].

Різновидом зварювання в замкову щілину є розроблений фірмою Fronius процес TIG-зварювання, відомий як ArcTig. Суттєві відмінності між цим процесом і плазмовим зварюванням у замкову щілину полягають у наступному: замість використання плазмового газу технологія ArcTig використовує високоефективне охолодження широкою зоною для концентрації дуги. Це дозволило знизити температуру на вольфрамовому електроді, що призводить до висококонцентрованої і, отже, ефективної дуги з високою щільністю енергії. Процес використовується для однопрохідного зварювання [23]. Одним із позитивних факторів є відсутність потреби попередньої обробки кромки. Цей процес можна використовувати для зварювання матеріалів з товщиною листа до десяти міліметрів.

Незважаючи на те, що фундаментальні дослідження утворення та існування замкової щілини приведені в багатьох наукових публікаціях [24–26], проблема забезпечення стабільності утворення якісного зварного з'єднання остаточно не вирішена. Особливо це стосується зварювання в положеннях, відмінних від нижнього.

Гібридні способи зварювання. До прогресивних способів зварювання, які дозволяють в широких межах регулювати проплавлення сталі та за-

безпечувати високу продуктивність процесу, слід віднести гібридні способи зварювання, такі як лазерно-дугове зварювання [27, 28] та його різновиди: лазерно-дугове зварювання під флюсом [29]; лазерно-дугове зварювання плавким електродом у суміші МІХ [30], неплавким електродом [31].

Незважаючи на всі переваги та можливості гібридних способів зварювання, у своєму подальшому розвитку для даних технологій характерними є певні труднощі, пов'язані з недостатньою щільністю енергії і складністю здійснення процесу на великих швидкостях, коли відбувається обрив дуги та, як наслідок, отримання нестабільного проплавлення.

Більш практичними та економічно доцільними для зварювання сталей великих товщин, особливо у положення, відмінному від нижнього, є використання дугових та електрошлакових процесів зварювання.

Ручне дугове зварювання (ММА), напівавтоматичне та автоматичне зварювання в захисних газах (MIG, MAG). Незважаючи на широке застосування в промисловості, процес ручного дугового зварювання покритими електродами для сталей великої товщини застосовується переважно в ремонтних цілях, коли використання інших способів неможливе або буде менш раціональним. Це пов'язано з низькою продуктивністю та необхідністю проведення додаткових робіт (очищення металу шва після кожного проходу), підвищеною увагою до контролю якості з'єднання (металу шва та зони термічного впливу), вимагає високої кваліфікації зварника, особливо при зварюванні деталей відповідальних конструкцій та при виконанні швів у просторових положеннях, відмінних від нижнього.

Схожі проблеми є характерними для способів зварювання в середовищі захисних газів (MIG/MAG/TIG). Крім описаних вище недоліків, додатково необхідно забезпечити захист від вітру в монтажних умовах.

Зварювання під флюсом. Зварювання під флюсом – один з основних способів зварювання металу середніх і великих товщин. Даний спосіб дозволяє виконувати зварювання деталей завтовшки від 2 до 500...700 мм (одно- та багатопрохідне виконання) [32, 33]. Завдяки високому рівню механізації та автоматизації, якості отриманих зварних з'єднань, високій продуктивності він широко використовується при серійному виробництві для виконання швів великої довжини. Проте даний метод в основному застосовується при зварюванні в нижньому положенні. При необхідності зварюван-

ня вертикальних або відмінних від горизонтального положення швів необхідне застосування додаткового обладнання: формуючих пристроїв, систем корегування положення дроту та ін. Досить часто в якості зварювального дроту при зварюванні під флюсом використовують порошкові дроти.

Механізоване та автоматизоване зварювання порошковим самозахисним дротом або з додатковим захистом у вуглекислому газі дозволяє виконувати зварювання в різних просторових положеннях, забезпечує високу якість з'єднання, має підвищену продуктивність [34]. Спосіб широко застосовується для зварювання товщин в діапазоні 10...25 мм, особливо при роботі в монтажних умовах.

Основними технологічними недоліками є: можливість отримання дефектів при порушенні технології, підвищений рівень виділення аерозолів, обмежений візуальний контроль за ванною. Також одним з негативних факторів є висока вартість дротів, оскільки вони виготовляються в обмеженій кількості під конкретні задачі.

Методи електродугового зварювання в захисних газах і під флюсом з примусовим формуванням шва. В ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України Г.З. Волошкевичем був розроблений метод зварювання стиків великої товщини з примусовим формуванням металу шва [35], що забезпечує суттєве підвищення продуктивності зварювання вертикальних стиків [36]. Зварювання з примусовим формуванням шва здійснюється на установках автоматизо-

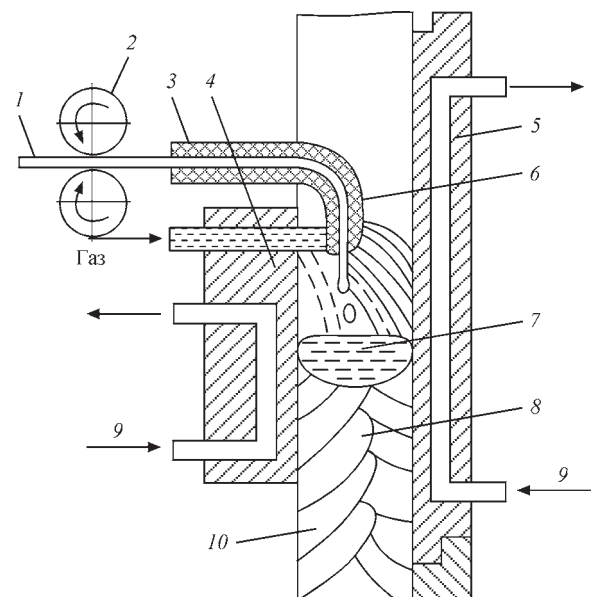


Рис. 4. Схема зварювання плавким електродом у захисному газі вертикального шва з примусовим формуванням шва [37]: 1 – зварювальний дріт; 2 – механізм подачі дроту; 3 – струмопідвідний мундштук; 4, 5 – водоохолоджувані мідні повзуні; 6 – сопло; 7 – зварювальна ванна; 8 – зварний шов, що закристалізувався; 9 – вода; 10 – виріб

ваного зварювання та можливе в усіх положеннях; розплавлений метал утримується та формується охолоджуваними повзунами (рис. 4).

Залежно від товщини металу зварювання проводять одним або декількома електродними дротами [37, 38]. Діапазон зварюваних товщин становить 8...40 мм. Метод знайшов своє застосування при спорудженні резервуарів, корпусів суден, шахтних кріплень, трубопроводів, двотаврових балок та ін.

У [38, 39] описано метод електродугового зварювання з примусовим формуванням шва порошковим дротом, як самозахисним, так і з додатковим газовим захистом. Спосіб не тільки забезпечує високу продуктивність розплавлення дроту, а й став безальтернативним для виконання швів за один/два проходи в різних просторових положеннях, як кільцевих на трубопроводах, газгольдерах, сферичних резервуарах, так і «на стелі» при зварюванні горизонтальних поясів конструкцій з металу завтовшки не менше 25 мм. Метод успішно застосовується в суднобудуванні. Корпуси суден зі сталі ВМСт.3сп. та 09Г2 зварюють на стапелі порошковим дротом ПП-АН5 за допомогою апаратів А-1150. Це дозволяє підвищити продуктивність монтажних робіт на корпусі судна, покращити зовнішній вигляд швів і зменшити залишкові деформації.

Зварювання металу завтовшки 50...70 мм виконують двома електродними дротами суцільного

перерізу або порошковими з коливаннями вздовж стику. В якості захисту зварювальної ванни використовують вуглекислий газ. Метод використовується при зварюванні бокових комінгсів люків (товщина листа 58 мм) великогабаритних контейнеровозів на верфі та машинобудівному заводі Mitsubishi Heavy Industries Limited у Кобе [40].

В ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено метод зварювання з примусовим формуванням вертикальних швів під тонким шаром розплавленого шлаку (рис. 5) дротами суцільного перерізу [41, 42]. Дослідження з відпрацювання техніки такого виконання швів показали перспективність способу, позаяк він поєднав у собі стабільний перебіг процесу та надійний захист зварювальної ванни.

У [43] запропоновано новий спосіб автоматичного однопрохідного електродугового зварювання закладним електродом зразків із низьковуглецевих (Ст3), низьколегованих (09Г2С, 10ХСНД, 16Г2АФ) і високолегованих корозійностійких (08Х18Н10Т, 08Х17Н13М2Т) сталей завтовшки 20...100 мм, яке виконується у вертикальному положенні деталей, що зварюються, і призначений в основному для зварювання коротких (до 1000 мм) стиків, у тому числі в монтажних умовах (рис. 6). Застосування пластинчастого електрода з ізолюючим покриттям дозволяє зменшити зазор між зварюваними кромками до 8...12 мм, завдяки чому, на думку авторів, значно покращуються техніко-економічні показники процесу зварювання металу.

Незважаючи на привабливу простоту здійснення зварювання та задовільні властивості зварних з'єднань лабораторних зразків, цей спосіб не знайшов широкого практичного застосування у зв'язку

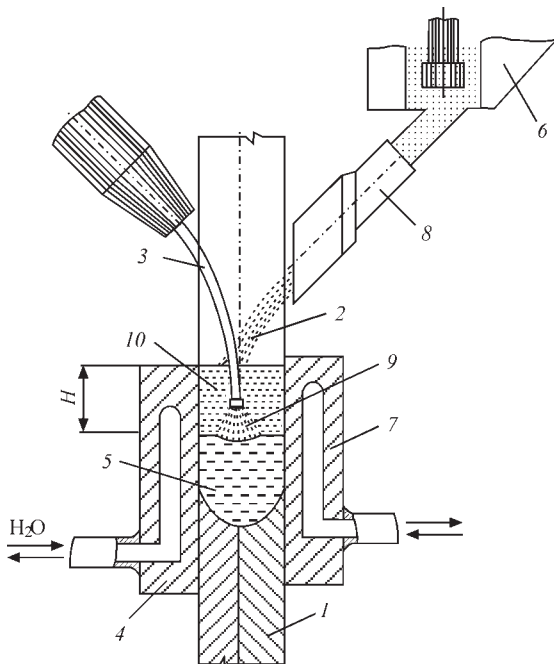


Рис. 5. Схема методу зварювання з примусовим формуванням вертикальних швів під тонким шаром розплавленого шлаку дротами суцільного перерізу: 1 – зварний шов; 2 – флюс; 3 – електродні дроти; 4 – передній повзун; 5 – зварювальна ванна; 6 – флюсобункер; 7 – задній формуючий повзун; 8 – мідне сопло; 9 – зварювальна дуга; 10 – рідкий шлак

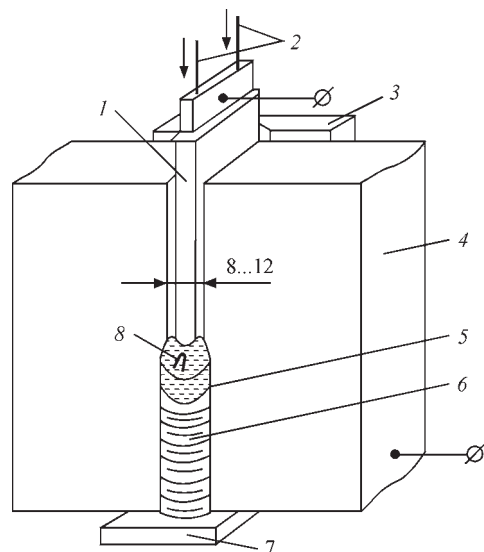


Рис. 6. Схема електродугового зварювання закладним електродом: 1 – закладний електрод; 2 – присадний дріт; 3 – формуючі накладки; 4 – зварюваний виріб; 5 – зварювальна ванна; 6 – зварний шов; 7 – підкладка; 8 – дуга

зі складністю управління процесом, що не дозволяє забезпечувати гарантоване сплавлення основного та присадного металу.

Описані методи знайшли своє використання у зварювальному виробництві, проте властиві їм певні недоліки не дозволяють істотно розширити області їхнього застосування.

Методи зварювання з примусовим формуванням вертикальних швів під тонким шаром розплавленого шлаку дротами суцільного перерізу та в захисному газі мають такі недоліки:

- відсутність для зварювання в монтажних умовах компактного механізму протяжки двох дротів, що забезпечував би надійну та стабільну їхню подачу в зварювальну ванну;
- відсутність механізму позиціонування дротів у щілині між зварюваними кромками;
- флюс АН-47, під яким виконувався процес, не забезпечував стабільність зварювання;
- значно погіршуються умови захисту зварювальної ванни під час виконання зварювальних робіт у монтажних умовах, особливо на висоті, за рахунок дії вітрового навантаження;
- відсутня можливість якісного формування зварних швів у разі бокового відхилення стику від вертикалі понад 30°;
- випромінювання дуги не дозволяє візуально спостерігати за позиціонуванням зварювального дроту між кромками.

Електрошлакове зварювання (ESW). У [44] описано, що для зварювання вертикальних стикових з'єднань кожухів доменних печей вперше у світовій практиці було розроблено та успішно ре-

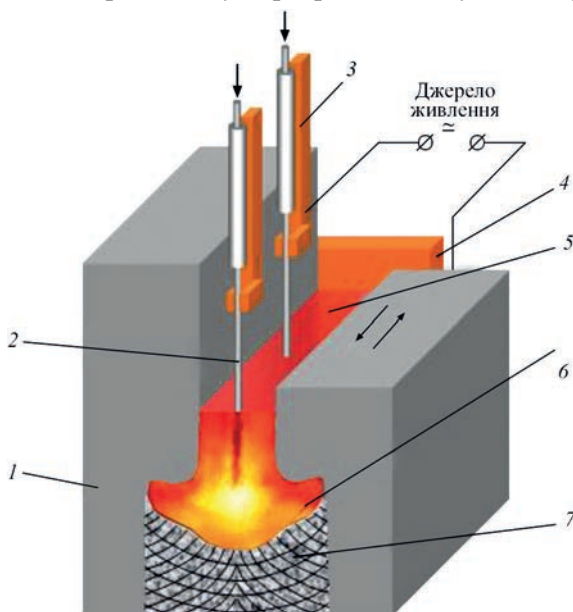


Рис. 7. Схема ESW електродними дротами: 1 – зварювана кромка; 2 – електродний дріт; 3 – струмопідвод; 4 – водоохолоджуваний повзун; 5 – шлакова ванна; 6 – металева ванна; 7 – зварний шов

алізовано новий спосіб електричного зварювання плавленням, який отримав назву – електрошлакове зварювання (ESW) (рис. 7). Цей спосіб відрізнявся цілим рядом технічних і технологічних переваг щодо існуючих промислових способів зварювання плавленням [45].

При виробництві обладнання важкого машинобудування, виготовленні великогабаритних зварних конструкцій у будівництві, суднобудуванні та інших галузях найбільше застосування отримали два способи: електрошлакове зварювання дротяним електродом (WEESW) і плавким мундштуком (FNESW). Цими способами виконуються основні види з'єднань (стикові, кутові, таврові) і типи швів (прямолінійні, кільцеві, змінного профілю) завтовшки 40...200 мм.

На ПАТ «НКМЗ» спільно з ІЕЗ ім. Є.О. Патона створено єдину в світі установку для FNESW (рис. 8) металу, зварюваний переріз шва якого може досягати розмірів 4000×6000 мм [46]. За останні майже 20 років на установці було зварено унікальні металоконструкції [47] станин прокатних станів та іншого обладнання важкого машинобудування (рис. 9).

Типові області застосування електрошлакового зварювання: з'єднання великих виливків; поздовжні зварні шви в циліндричних судинах під тиском; корпуси доменних і кисневих печей; ребра жорсткості верхньої палуби суден; виробництво великих морських контейнеровозів, завантажувальні люки яких необхідно виготовляти зі сталевих листів завтовшки 70...100 мм [48]; арматури зі зміцненої сталі марки 20MnSiV [49]; зварювання кільцевих стиків пресів, печей, корпусів двигунів, коліс для асфальтових машин, стиків суднових



Рис. 8. Зовнішній вигляд установки ESW плавким мундштуком для з'єднання металу, зварюваний переріз якого може досягати розміру 4000×6000 мм



Рис. 9. Зварна заготовка траверси гідравлічного пресу. Маса заготовки 150 т, переріз шва (показано стрілкою), виконаного ESW плавким мундштуком, 2490×3860 мм

пластин і виливків деталей завтовшки 13...400 мм на хімічних, нафтових, морських та енергетичних установках [50].

Спосіб ESW має ряд характерних переваг: високу продуктивність (за швидкістю плавлення присадного металу поза конкуренцією) і стійкість процесу; глибоку металургійну обробку металу зварного шва (відсутність дефектів у вигляді пор і шлакових включень); можливість зварювання металу надмірно великих товщин; економічність процесу; невисоку чутливість до якості підготовки кромки; порівняно низьку вартість зварювальних матеріалів.

Основним недоліком ESW є високе тепловкладення, що пов'язано з природою самого процесу, розмірами з'єднання та зварювальної ванни, застосуванням електродних дрітків діаметром від 3 мм, необхідною високою потужністю джерела живлення для дотримання технологічних параметрів режимів. Це призводить до росту зерна металу шва та зони термічного впливу, внаслідок цього знижуються механічні характеристики з'єднання, особливо відчутно – ударна в'язкість при низьких температурах. Для їх підвищення застосовується високотемпературна обробка (ВТО), яка може бути обмеженою або взагалі неможливою, враховуючи габарити конструкцій або монтажні умови зварювання.

З метою розширення сфери застосування ESW проводяться дослідження методів і технологічних прийомів можливості зниження рівня тепловкладення.

Так, у [51] наведено та детально описано застосування способу ESW плавким мундштуком

у вузький зазор для виготовлення двадцяти зварних швів в опорній вежі моста, розташованого в Сан-Франциско/Окленд. Довжина кожного однопрохідного шва становила 10 м, товщина стиків – 100 та 60 мм. Згідно з матеріалами [52] AASHTO (Американська асоціація державних доріг та транспорту, США) визнала останній метод ESW у вузький зазор (ESWNG) придатним для зварювання звичайних типів мостових сталей та включила його в код зварювання мостів (AWS D1.5: 2010). Сучасні досягнення в області ESW, втілені в ESWNG, використовуються на будівельних майданчиках висотних будівель і спорудження мостів.

У [53] показано, що за рахунок використання біфілярної схеми живлення вдалося зменшити зазор, глибину проплавлення, покращити енергетичні показники процесу.

Розроблена авторами [54] схема живлення дозволила значно підвищити швидкість зварювання, у результаті чого вдалося досягти задовільних показників якості з'єднання без виконання ВТО.

У [55, 56] досліджено можливість виконання ESW у вузький зазор сталей завтовшки від 20 мм за рахунок використання дрітків малого діаметра (1,6 і 2,0 мм) та сучасних інверторних джерел живлення та високошвидкісних механізмів подачі.

Висновки

1. Проведено аналіз існуючих технологій зварювання в різних просторових положеннях металу великих товщин для можливості вибору оптимального способу зварювання із забезпеченням отримання якісного зварного з'єднання та економічної ефективності робіт.

2. Розвиток науково-технічної бази дозволив розробити обладнання й технології зварювання сталей завтовшки 30...100 мм із застосуванням таких методів як: плазмове, лазерне та електронно-променеве зварювання. Однак застосування висококонцентрованих джерел енергії вимагає істотної перебудови всього виробництва: підвищення культури виробництва, заміни основного й допоміжного обладнання, перепідготовки персоналу, підвищення точності заготівельних і складальних операцій. Це призводить до додаткових витрат і зниження економічної ефективності процесів виробництва.

3. Такі електродугові способи як MMA та MIG/MAG/TIG, які характеризуються низькою продуктивністю, негарантованою якістю сплавлення присадного матеріалу з основним, можливістю утворення міжшарових дефектів у вигляді шлакових включень, пор, застосовуються переважно при ре-

монтному зварюванні, коли використання інших методів неможливе або нераціональне.

4. Механізовані електродугові та електрошлаковий способи займають лідируючі позиції за обсягом застосування для зварювання металів великих товщин, зокрема у вертикальному положенні, завдяки таким ключовим перевагам як: висока продуктивність і стійкість процесу ESW, а також технологічні можливості зварювання практично необмеженої товщини металу.

5. Враховуючи проведений аналіз, можна стверджувати про перспективність і необхідність подальших досліджень щодо розробки та вдосконалення технологій зварювання металу великих товщин як найбільш поширених способів EAW та ESW, так і з використанням висококонцентрованих джерел енергії (EBW, PAW, LBW).

Список літератури

1. Григоренко Ю. (2024) *Відновлення інфраструктури підтримало попит на сталь в Україні у 2023 році*. <https://gmk.center/ua/posts/vidnovlennia-infrastruktury-pidtrymalo-popyt-na-stal-v-ukraini-u-2023-rotsi/>
2. (2024) *Огляд ринку металокопонування 2022-2023*. Український центр сталевих будівництв (УЦСБ). Асоціація учасників ринку металокопонування. https://uscc.ua/uploads/page/images/publications/oglyad_rynku_2023.pdf
3. Кайдалов А. (2004) *Электронно-лучевая сварка и смежные технологии*. Киев, Экотехнология.
4. Нестеренков В.М., Кравчук Л.А., Архангельский Ю.А., Бондарев А.А. (2013) Формирование сварных швов при электронно-лучевой сварке жаропрочных сталей марок 10X9MФБА и 10X12М. *Автоматическая сварка*, **6**, 39–43. <https://patonpublishinghouse.com/rus/journals/as/2013/06/07>
5. Tóth, T., Hesse, A.-C., Kárpáti, V., Mertinger, V., Dilger, K. (2024) Microstructural and mechanical properties of electron beam welded super duplex stainless steel. *Welding in the World*, **68**, 1929–1940. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-024-01680-1>
6. Терещенко В.И., Либанов А.В. (1987) *Выбор и применение способов сварки при изготовлении конструкций*. Киев, Наукова думка.
7. Schubert, G. *Electron Beam Welding – Process, Applications and Equipment*. https://www.ptreb.com/sites/default/files/papers/Electron_Beam_Welding_Process_Applications_and_Equipment2.pdf
8. (2007) *EB welding of large components without a vacuum chamber (April 2007)*. TWI Ltd. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/eb-welding-of-large-components-without-a-vacuum-chamber-april-2007>
9. Бах Ф.В., Беньяш А., Лау К., Конья Р. (2009). Вневакуумная электронно-лучевая сварка конструкционных сталей. *Автоматическая сварка*, **5**, 29–34. <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/2009/05/05>
10. (2022) *Ebflow Reduces 200mm Steel Welding Time to 3 Hours*. Cambridge Vacuum Engineering. <https://camvaceng.com/ebflow-reduces-200mm-steel-welding-time-from-3-months-to-3-hours/>
11. Dawes, C. (1992) *Laser Welding. A Practical Guide: Chapter 2. Principles of laser welding and its characteristics*. Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, pp. 19–30. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845698843.16>
12. Бернацький А.В. (2022) *Огляд наукових праць, присвячених дослідженню впливу складових процесів лазерного та гібридного лазерно-дугового зварювання на формування структури та рівень механічних характеристик зварних*

з'єднань конструкційних сталей. Baltija Publishing. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8-3>

13. Yuantai Li, Shaoning Geng, Leshi Shu, Yan Li, Ping Jiang (2023) Ultra-high-power laser welding of thick-section steel: Current research progress and future perspectives. *Optics & Laser Technology*, **167**, 109663. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109663>
14. Григорьянц А.Г., Грезев А.Н., Грезев Н.В. (2012) *Лазерная сварка сталей больших толщин с применением мощных оптоволоконных и CO₂-лазеров*. Машиностроение.
15. Zu Ming Liu, Shuang Lin Cui, Zhen Luo, Chang Zhen Zhang, Zheng Ming Wang, Yu Chen Zhang (2016) Plasma arc welding: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling. *J. of Manufacturing Processes*, **23**, 315–327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.04.004>
16. Weman, K. (2012) *Plasma welding Welding Processes Handbook* (Second Edition). Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857095183.71>
17. Tashiro, S. (2024) Interaction mechanism of arc, keyhole, and weld pool in keyhole plasma arc welding: A review. *Materials*, **17**(6), 1348. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17061348>
18. Кривцун І.В., Квасницький В.В., Максимов С.Ю., Сромулаєв Г.В. (2017) *Спеціальні способи зварювання*. Підручник. Патон Б.С. (Ред.). Миколаїв, НУК.
19. Sakuramoto, Y., Wada, K., Kanemaru, S., Kamei, T. (2013) Application of plasma welding process for manufacturing of stainless steel cylindrical vessel. In: *Taiyo Nippon Sanso Technical Report*, Taiyo Nippon Sanso, Tokyo, Japan, Volume 32, pp. 33–34. (In Japanese).
20. Sam Infant Jones, P.G., Rajakumar, S., Kavitha, S., Balasubramanian, V. (2022) Experimental studies on keyhole plasma arc welding process parameters of AISI 304 HCu stainless steel tube joints. *Welding International*, **36**(11), 655–667. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2022.2151386>
21. Harish, T.M., Jerome, S., Yadukrishna, B., Rishi, S., Kumar C. (2019) Midhun suresh and krishnakanth ramesh assessment of microstructure and mechanical properties of keyhole plasma arc welded similar butt joint of AISI 304 H austenitic stainless steel. *Materials Research Express* (Online), **6**(11), 1165b2. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/ab4e04>
22. Emmanuel Sam Franklin, D., Vijay, S.J., Mohanasundaram, S., Kantharaj, I., Hiran Gabriel, D.J. (2021) A study on plasma keyhole welding of stainless steel grade 316. *Materials Today: Proceedings*, **47**(19), 6908–6912. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.187>
23. (2020) *Keyhole welding – definition and variants*. Fronius. Perfect Welding Blog. <https://blog.perfectwelding.fronius.com/en/keyhole-welding-plasma-tig-arctig/>
24. Li Yan, Yun Ze, Zhou Xiang, Wu Chuansong (2023) Fundamental understanding of open keyhole effect in plasma arc welding. *Physics of fluids*, **35**, 043316. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0144148>
25. Jia, C.B., Liu, X.F., Zhang, G.K., Zhang, Y., Yu, C.H., Wu, C.S. (2021) Penetration/keyhole status prediction and model visualization based on deep learning algorithm in plasma arc welding. *The International J. of Advanced Manufacturing Technology*, **117**, 3577–3597. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07903-9>
26. Li, Y., Wang, L., Wu, C. (2019) Simulation of keyhole plasma arc welding with electro-magneto-thermo-hydrodynamic interactions. *The International J. of Advanced Manufacturing Technology*, **101**, 2497–2507. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3067-6>
27. Кривцун І.В., Хаскин В.Ю., Коржик В.Н., Ло Цзыи (2015) Промышленное применение гибридной лазерно-дуговой сварки (Обзор). *Автоматическая сварка*, **7**, 44–50. <https://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2015/as201507all.pdf>
28. Acherjee, B. (2018) Hybrid laser arc welding: State-of-art review. *Optics & Laser Technology*, **99**, 60–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.09.038>
29. Райзген У., Ольшок С. (2009) Гибридная лазерно-дуговая сварка под флюсом. *Автоматическая сварка*, **4**, 46–51. <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/2009/04/08>

30. Üstündağ, Ö., Bakir, N., Gook, S., Gumenyuk, A., Rethmeier, M. (2022) Hybrid laser-arc welding of laser-and plasma-cut 20-mm-thick structural steels. *Welding in the World*, **66**(3), 507–514. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-022-01255-y>
31. Кривцун І.В., Крикент І.В., Демченко В.Ф., Райсген У., Забиров А.Ф., Мокров О.А. (2015) Взаимодействие излучения СО₂-лазера с плазмой аргоновой дуги при гибридной (лазер + ТИГ) сварке. *Автоматическая сварка*, **3-4**, 7–16. <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/2015/04/01>
32. Царюк А.К., Левченко С.В., Гришин М.М., Вавілов А.В., Кантор А.Г., Бивалькевич А.І. (2020) Зварювання в енергетичній промисловості України. *Автоматичне зварювання*, **3**, 29–34. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.03.03>
33. Царюк А.К., Скульський В.Ю., Єлагін В.П., Осипенко І.Г. (2025) Технологічна міцність з'єднань сталі 25ХН3МФА при зварюванні під флюсом. *Автоматичне зварювання*, **2**, 29–37. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2025.02.04>
34. Романюк В.С., Ковалев В.Д., Резник С.А., Семененко А.Н. (2011) Высокопродуктивная сварка неповоротных стыков труб порошковой проволокой с принудительным формированием шва. *Сварщик*, **2**, 23–25. <https://welder.stc-paton.com/pdf/welderua201102.pdf>
35. Волошкевич Г.З. (1949) Автоматическая сварка вертикальных швов. *Трубы по автоматической сварке под флюсом ИЭС им. Е.О. Патона*, **6**, 81–90.
36. Волошкевич Г.З. (1951) Метод принудительного формирования и его применение. *Автоматическая сварка*, **1**, 5–19.
37. (2006) *Машиностроение. Энциклопедия*. Патон Б.Е. (Ред.). Т.III. Машиностроение.
38. Походня І.К., Дубовецький В.Я., Шлепаков В.Н. и др. (1966) Дуговая сварка вертикальных швов с принудительным формированием. *Автоматическая сварка*, **11**, 67–70.
39. Походня І.К., Суптель А.М., Шлепаков В.Н. (1972) *Сварка порошковой проволокой*. Киев, Наукова думка.
40. Sasaki, K., Suda, K., Motomatsu, R., Hashiba, Y., Ohkita, S., Imai, S. (2004) Development of two-electrode electrogas arc welding process. *Nippon Steel Technical Report*, **90**, 67–74. <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9013.pdf>
41. Ющенко К.А., Яблонский Б.В., Крицкий М.В. (1993) *Способ вертикальной дуговой сварки под флюсом*. А.с. 927441 СССР. МКИ В23К 9/18.
42. Яблонский Б.В. (1988) Техника двухэлектродной сварки вертикальных стыков с принудительным формированием шва под слоем шлака. *Автоматическая сварка*, **5**, 56–59.
43. Кузьменко Г.В., Кузьменко В.Г., Галинич В.И., Отроков В.В., Лактионов М.А. (2006) Однопроходная электродуговая сварка закладным электродом металла большой толщины. *Автоматическая сварка*, **6**, 44–49. <https://patonpublishinghouse.com/as/pdf/2006/as200606all.pdf>
44. Волошкевич Г.З. (1956) *Способ электрической сварки плавлением*. А.с. 104248 СССР. МПК 21 В29/13.
45. (1980) *Электрошлаковая сварка и наплавка*. Патон Б.Е. (Ред.). Машиностроение.
46. Невидомский В.А., Красильников С.Г., Панин А.Д., Гулида В.П. (2002) Новая установка для электрошлаковой сварки крупных элементов на АО Новокраматорский машиностроительный завод. *Автоматическая сварка*, **2**, 50–52. <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/2002/02>
47. Шаповалов К.П., Белинский В.А., Мерзляков А.Е., Косинов С.Н., Ющенко К.А., Лычко И.И., Козулин С.М. (2016) Электрошлаковая сварка крупногабаритной станины прессы. *Автоматическая сварка*, **8**, 43–46. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2016.08.07>
48. Uemori, R., Fujioka, M., Inoue, T., Minagawa, M., Ichikawa, K., Shirahata, H., Nose, T. (2012) Steels for marine transportation and construction. *Nippon Steel Technical Report*, **101**, 37–47. https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/NSTR101-08_tech_review-1-2.pdf
49. Патон Б.Е., Ющенко К.А., Козулин С.М., Лычко И.И. (2019) Электрошлаковый сварочный процесс. Анализ состояния и тенденции развития (Обзор). *Автоматическая сварка*, **10**, 36–46. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.10.05>
50. Kaluç, E., Taban, E., Dhooge, A. (2006) Elektrocüruf kayanak yöntemi ve endüstriyel uygulamaları (Electroslag welding process and industrial applications). *Met. Dünyası*, **152**, 100–105. <https://metaldunyasi.com.tr/>
51. Turpin, B., Danks, D., Callaghan, I., Wood, W. (2012) Narrow gap electroslag is process of choice for welding San Francisco-Oakland Bay Bridge. *Welding J.*, **91**(5), 24–31.
52. Janice, J., Chambers, Brett R. (2016) Manning. Electroslag welding: From Shop to Field. *Structure magazine, February*. <https://www.structuremag.org/article/electroslag-welding-from-shop-to-field/>
53. Ланкін Ю.М., Бондаренко О.П., Тюкалов В.Г., Соловійов В.Г., Романова І.Ю. (2022) Експериментальне дослідження біфілярного електрошлакового зварювання із зрівняльним дротом. *Автоматичне зварювання*, **3**, 34–37. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2022.03.04>
54. Бондаренко О.П., Москаленко В.Г., Тюкалов В.Г., Белецкий Ю.А. (1994) Новая технология электрошлаковой сварки толстолистовых сталей без последующей термобработки. *Автоматическая сварка*, **12**, 3–4.
55. Онищенко П.І., Козулін С.М. (2025) Электрошлаковое зварювання сталі 09Г2С малої товщини. *Автоматичне зварювання*, **4**, 47–53. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2025.04.07>
56. Onyshchenko, P.I., Kozulin, S.M., Marynenko, S.Y. et al. (2025) A study of the features of electroslag welding of 09G2 steel with two electrode wires. *Strength of Mater.*, **57**, 559–566. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-025-00788-z>

References

- Hryhorenko, Y. (2024) Infrastructure restoration supported steel demand in Ukraine in 2023 [in Ukrainian]. <https://gmk.center.ua/posts/vidnovlennia-infrastruktury-pidtrymalo-popyt-na-stal-v-ukraini-u-2023-rotsi/>
- (2024) *Metal Structures Market Review 2022-2023*. Ukrainian Center for Steel Construction (UCSC). Association of Metal Structures Market Participants [in Ukrainian]. https://uscc.ua/uploads/page/images/publications/oglyad_rynku_2023.pdf
- Kaidalov, A. (2004) *Electron-beam welding and adjacent technologies*. Kyiv, Ecotechnology [in Russian].
- Nesterenkov, V.M., Kravchuk, L.A., Arkhangelsky, Yu.A., Bondarev, A.A. (2013) Welds formation in ebw of heat-resistant steels of the grades 10Kh9MFBA and 10Kh12M. *The Paton Welding J.*, **6**, 38–42. <https://patonpublishinghouse.com/rus/journals/tpwj/2013/06/07>
- Tóth, T., Hesse, A.-C., Kárpáti, V., Mertinger, V., Dilger, K. (2024) Microstructural and mechanical properties of electron beam welded super duplex stainless steel. *Welding in the World*, **68**, 1929–1940. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40194-024-01680-1>
- Tereshchenko, V.I., Lybanov, A.V. (1987) *Selection and application of welding methods in the manufacture of structure*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
- Schubert, G. *Electron Beam Welding – Process, Applications and Equipment*. https://www.ptreb.com/sites/default/files/papers/Electron_Beam_Welding_Process_Applications_and_Equipment2.pdf
- (2007) *EB welding of large components without a vacuum chamber (April 2007)*. TWI Ltd. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/eb-welding-of-large-components-without-a-vacuum-chamber-april-2007>
- Bach, Fr.-W., Beniyash, A., Lau, K., Konya, R. (2009). Non-vacuum electron beam welding of structural steels. *The Paton Welding J.*, **5**, 22–26. <https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tpwj/2009/05/05>
- (2022) *Ebflow Reduces 200mm Steel Welding Time to 3 Hours*. Cambridge Vacuum Engineering. <https://camvaceng.com/ebflow-reduces-200mm-steel-welding-time-from-3-months-to-3-hours/>
- Dawes, C. (1992) *Laser Welding. A Practical Guide: Chapt. 2. Principles of laser welding and its characteristics*. Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, 19–30. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845698843.16>
- Bernatsky, A.V. (2022) Review of scientific papers devoted to the study of the influence of the component processes of laser and hybrid laser-arc welding on the formation of the structure and the level of mechanical characteristics of weld-

- ed joints of structural steels [in Ukrainian]. Baltija Publishing. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-254-8-3>
13. Yuantai Li, Shaoning Geng, Leshi Shu, Yan Li, Ping Jiang (2023) Ultra-high-power laser welding of thick-section steel: Current research progress and future perspectives. *Optics & Laser Technology*, **167**, 109663. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109663>
 14. Hryhoryants, A.G., Grezev, A.N., Grezev, N.V. (2012) *Laser welding of thick steels using powerful fiber optic and CO₂ lasers*. Mashinostroenie [in Russian].
 15. Zu Ming Liu, Shuang Lin Cui, Zhen Luo, Chang Zhen Zhang, Zheng Ming Wang, Yu Chen Zhang (2016) Plasma arc welding: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling. *J. of Manufacturing Processes*, **23**, 315–327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.04.004>
 16. Weman, K. (2012) *Plasma welding. Welding Processes. Handbook* (Second Edition). Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies. DOI: <https://doi.org/10.1533/9780857095183.71>
 17. Tashiro, S. (2024) Interaction mechanism of arc, keyhole, and weld pool in keyhole plasma arc welding: A review. *Materials*, **17**(6), 1348. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17061348>
 18. Krivtsun, I.V., Kvasnitsky, V.V., Maksimov, S.Yu., Yermolaev, G.V. (2017) *Special welding methods. Textbook*. By Ed. B.E. Paton. Mykolaiv, NUK [in Ukrainian].
 19. Sakuramoto, Y., Wada, K., Kanemaru, S., Kamei, T. (2013) Application of plasma welding process for manufacturing of stainless steel cylindrical vessel. In: *Taiyo Nippon Sanso Technical Report*, Taiyo Nippon Sanso, Tokyo, Japan, Volume 32, 33–34 [in Japanese].
 20. Sam Infant Jones, P.G., Rajakumar, S., Kavitha, S., Balasubramanian, V. (2022) Experimental studies on key-hole plasma arc welding process parameters of AISI 304 HCU stainless steel tube joints. *Welding International*, **36**(11), 655–667. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2022.2151386>
 21. Harish, T.M., Jerome, S., Yadukrishna, B., Rishi, S., Kumar C. (2019) Midhun suresh and krishnakanth ramesh assessment of microstructure and mechanical properties of key-hole plasma arc welded similar butt joint of AISI 304 H austenitic stainless steel. *Materials Research Express (Online)*, **6**(11), 1165b2. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/2053-1591/ab4e04>
 22. Emmanuel Sam Franklin, D., Vijay, S.J., Mohanasundaram, S., Kantharaj, I., Hiran Gabriel, D.J. (2021) A study on plasma keyhole welding of stainless steel grade 316. *Materials Today: Proceedings*, **47**(19), 6908–6912. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.187>
 23. (2020) *Keyhole welding – definition and variants*. Fronius. Perfect Welding Blog. <https://blog.perfectwelding.fronius.com/en/keyhole-welding-plasma-tig-arctig/>
 24. Li Yan, Yun Ze, Zhou Xiang, Wu Chuansong (2023) Fundamental understanding of open keyhole effect in plasma arc welding. *Physics of Fluids*, **35**, 043316. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0144148>
 25. Jia, C.B., Liu, X.F., Zhang, G.K., Zhang, Y., Yu, C.H., Wu, C.S. (2021) Penetration/keyhole status prediction and model visualization based on deep learning algorithm in plasma arc welding. *The International J. of Advanced Manufacturing Technology*, **117**, 3577–3597. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07903-9>
 26. Li, Y., Wang, L., Wu, C. (2019) Simulation of keyhole plasma arc welding with electro-magneto-thermo-hydrodynamic interactions. *The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, **101**, 2497–2507. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3067-6>
 27. Krivtsun, I.V., Khaskin, V.Yu., Korzhik, V.N., Luo Ziyi (2015) Industrial application of hybrid laser-arc welding (Review). *The Paton Welding J.*, **7**, 41–46. DOI: <http://doi.org/10.15407/tpwj2015.07.07>
 28. Acherjee, B. (2018) Hybrid laser arc welding: State-of-art review. *Optics & Laser Technology*, **99**, 60–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.09.038>
 29. Reisgen, U., Olschok, S. (2009) Laser-submerged arc hybrid welding. *The Paton Welding J.*, **4**, 38–43. <https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/2009/04/08>
 30. Üstündağ, Ö., Bakir, N., Gook, S., Gumenyuk, A., Rethmeier, M. (2022) Hybrid laser-arc welding of laser-and plasma-cut 20-mm-thick structural steels. *Welding in the World*, **66**(3), 507–514. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-022-01255-y>
 31. Krivtsun, I.V., Krikent, I.V., Demchenko, V.F., Reisgen, U., Zabirow, A.F., Mokrov, O.A. (2015) Interaction of CO₂-laser radiation beam with electric arc plasma in hybrid (Laser + TIG) welding. *The Paton Welding J.*, **3-4**, 6–15. DOI: <http://doi.org/10.15407/tpwj2015.04.01>
 32. Tsaryuk, A.K., Levchenko, E.V., Grishin, M.M., Vavilov, A.V., Kantor, A.G., Bivalkevich, A.I. (2020) Welding in power engineering industry of Ukraine. *The Paton Welding J.*, **3**, 19–24. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.03.03>
 33. Tsaryuk, A.K., Skulskyi, V.Yu., Yelagin, V.P., Osipenko, I.G. (2025) Technological strength of 25KhN3MFA steel joints in submerged arc welding. *The Paton Welding J.*, **4**, 37–45. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj.2025.04.06>
 34. Romanyuk, V.S., Kovalev, V.D., Rezyuk, S.A., Semenenko, A.N. (2011) High-performance welding of non-rotating pipe joints with flux-cored wire with forced seam formation. *Svarshchik*, **2**, 23–25 [in Russian]. <https://welder.stc-paton.com/pdf/welderua201102.pdf>
 35. Voloshkevich, G.Z. (1949) Automatic welding of vertical seams. *Trudy PWI*, **6**, 81–90 [in Russian].
 36. Voloshkevich, G.Z. (1951) Method of forced formation and its application. *Avtomaticheskaya Svarka*, **1**, 5–19 [in Russian].
 37. (2006) *Mechanical engineering. Encyclopedia*. Dy Ed. B.E. Paton. Vol. III. Mashinostroenie [in Russian].
 38. Pokhodnya, I.K., Dubovetskyi, V.Ya., Shlepakov, V.N. et al. (1966) Arc welding of vertical seams with forced forming. *Avtomaticheskaya Svarka*, **11**, 67–70 [in Russian].
 39. Pokhodnya, I.K., Suptel, A.M., Shlepakov, V.N. (1972) *Welding with powder wire*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
 40. Sasaki, K., Suda, K., Motomatsu, R., Hashiba, Y., Ohkita, S., Imai, S. (2004) Development of two-electrode electroslag arc welding process. *Nippon Steel Technical Report*, **90**, 67–74. <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9013.pdf>
 41. Yushchenko, K.A., Yablonsky, B.V., Krytskyi, M.V. (1993) *Method of vertical arc welding under flux*. C.c. 927441 USSR. MKI B23K 9/18 [in Russian].
 42. Yablonsky, B.V. (1988) Technique of two-electrode welding of vertical joints with forced formation of a seam under a layer of slag. *Avtomaticheskaya Svarka*, **5**, 56–59 [in Russian].
 43. Kuzmenko, G.V., Kuzmenko, V.G., Galinich, V.I., Otrokov, V.V., Laktionov, M.A. (2006) Single-pass arc welding of thick metal using embedded electrode. *The Paton Welding J.*, **6**, 35–39. <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2006/tpwj200606all.pdf>
 44. Voloshkevich, G.Z. (1956) *The method of electric welding by melting*. C.c. 104248 USSR. MPK 21 B29/13 [in Russian].
 45. (1980) *Electroslag welding and surfacing*. By Ed. B.E. Paton. Mashinostroenie [in Russian].
 46. Nevidomsky, V.A., Krasilnikov, S.G., Panin, A.D., Gulida, V.P., Lychko, I.I. (2002) New machine for electroslag welding of large parts at JSC «NKMBF». *The Paton Welding J.*, **2**, 49–51.
 47. Shapovalov, K.P., Belinsky, V.A., Merzlyakov, A.E., Kossinov, S.N., Yushchenko, K.A., Lychko, I.I., Kozulin, S.M. (2016) Electroslag welding of large-sized press fram. *The Paton Welding J.*, **8**, 36–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2016.08.07>
 48. Uemori, R., Fujioka, M., Inoue, T., Minagawa, M., Ichikawa, K., Shirahata, H., Nose, T. (2012) Steels for marine transportation and construction. *Nippon Steel Technical Report*, **101**, 37–47. https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/NSTR101-08_tech_review-1-2.pdf
 49. Paton, B.E., Yushchenko, K.A., Kozulin, S.M., Lychko, I.I. (2019) Electroslag welding process. Analysis of the state and tendencies of development (Review). *The Paton Welding J.*, **10**, 33–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.10.05>
 50. Kaluç, E., Taban, E., Dhooge, A. (2006) Electroslag welding process and industrial applications. *Met. Dünyası*, **152**, 100–105. <https://metaldunyasi.com.tr/>

51. Turpin, B., Danks, D., Callaghan, I., Wood, W. (2012) Narrow gap electroslag is process of choice for welding San Francisco-Oakland Bay Bridge. *Welding J.*, 91(5), 24–31.
52. Janice, J., Chambers, Brett R. (2016) Manning. Electroslag welding: From Shop to Field. *Structure Magazine, February*. <https://www.structuremag.org/article/electroslag-welding-from-shop-to-field/>
53. Lankin, Yu.M., Bondarenko, O.P., Tyukalov, V.G., Soloviov, V.G., Romanova, I.Yu. (2022) Experimental studies of bifilar electroslag welding with an equalizing wire. *The Paton Welding J.*, 3, 41–44. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.03.05>
54. Bondarenko, O.P., Moskalenko, V.G., Tyukalov, V.G., Beletsky, Yu.A. (1994) New technology of electroslag welding of thick sheet steels without subsequent heat treatment. *Avtomaticheskaya Svarka*, 12, 3–4 [in Russian].
55. Onyshchenko, P.I., Kozulin, S.M. (2025) Electroslag welding of 09G2S steel of small thickness. *Avtomatychne Zvaryuvannya*, 4, 47–53 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2025.04.07>
56. Onyshchenko, P.I., Kozulin, S.M., Marynenko, S.Y. et al. (2025) A study of the features of electroslag welding of 09G2 steel with two electrode wires. *Strength of Mater.*, 57, 559–566. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-025-00788-z>

MODERN WELDING TECHNOLOGIES FOR THICK-SECTION STEELS

P.I. Onyshchenko, T.B. Maidanchuk

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

E-mail: pwj_37@ukr.net

At present, welded structures made of thick-section steel are extensively employed in the construction, mining, metallurgical, energy and other industrial sectors. An analysis of existing steel welding technologies, including those utilizing high-energy-density sources, has been conducted. The results indicate that the application of electron-beam, plasma, laser and hybrid welding methods currently requires a high level of preparation and production culture, as well as significant capital investment in auxiliary and welding equipment. Multi-pass arc welding with covered electrodes and mechanized welding in shielding gases are characterized by low productivity, inconsistent fusion quality between the filler and base materials, and the formation of interlayer defects such as slag inclusions and porosity. It has been established that for welding vertical seams, promising technologies are mechanized arc welding with forced seam formation and electroslag welding, which are characterized by high productivity and process stability with significantly lower capital investments compared to the use of highly concentrated energy sources. 56 Ref., 9 Fig.

Keywords: thick-section steel, electron-beam welding, laser welding, plasma welding, hybrid welding methods, submerged arc welding, arc welding with forced seam formation, electroslag welding, mechanical properties, techno-economic justification

Отримано 23.09.2025

Отримано у переглянутому вигляді 24.11.2025

Прийнято 12.01.2026



7th International Conference

«Fracture Mechanics of Materials and Structural Integrity»

March 3–5, 2026, Lviv, Ukraine

Traditionally, the Conference has been taking place in Lviv, and previous conferences of this series were also held in Lviv in 1999, 2004, 2009, 2014 and 2019. The conference aims to bring together leading scientists, researchers and research scholars to share their experience, research results and scientific ideas regarding key areas of fracture and damage mechanics, structural integrity assessment and maintenance. The conference is expected to become an interactive platform for discussion of recent advances, trends and practical challenges in the field of fracture mechanics and structural integrity.

This conference is dedicated to the 100th anniversary of the birth of the Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Professor Volodymyr Panasyuk (1926–2026). Professor Panasyuk has made a significant contribution to the development of various areas of fracture mechanics and strength of materials and structures, which was recognized by the international scientific community. We cordially invite you and your colleagues to participate in the conference!

<https://www.ipm.lviv.ua/fmsi2026/index.php>
conference.fmsi2026@gmail.com