



ЮРЧЕНКО Юрій Вікторович,
інженер-технолог I категорії,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0001-9253-009X

СОКОЛОВСЬКИЙ Микола Володимирович,
провідний інженер,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0003-3243-5060

ШАМСУТДІНОВА Наталія Олександрівна,
інженер,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0002-3525-0080

СІОРА Олександр Васильович,
науковий співробітник,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0003-1927-790X

БЕРНАЦЬКИЙ Артемій Володимирович,
канд. техн. наук, старший дослідник,
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона
Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0002-8050-5580

ЛАЗЕРНЕ ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОСТІННИХ ВИРОБІВ З ВІССЮ ОБЕРТАННЯ, ВИГОТОВЛЕНИХ ІЗ ВИСОКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ АБО ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ

1. Вироби, що виготовляються з тонкостінних матеріалів

У промисловості широко використовуються конструкції з групи матеріалів що мають малу і особливо малу товщину. До цієї групи необхідно віднести матеріали з листового прокату товщиною менше 1 мм. Однією з найрозповсюдженіших марок високолегованих сталей є AISI 321. Вироби з цієї сталі широко застосовуються для різних цілей. Наприклад: сільфоні

компенсатори (рис. 1), гнучкі металеві рукава, кільцеві колектори (рис. 2), теплообмінники, колектори скидання для авіадвигунів, трубопроводи (включаючи зварні елементи конструкції), фланці, газовідвідні патрубки та інші вироби, які експлуатуватимуться на відкритому повітрі та/або в умовах постійного нагрівання¹.



Рис. 1. Сильфонний компенсатор²

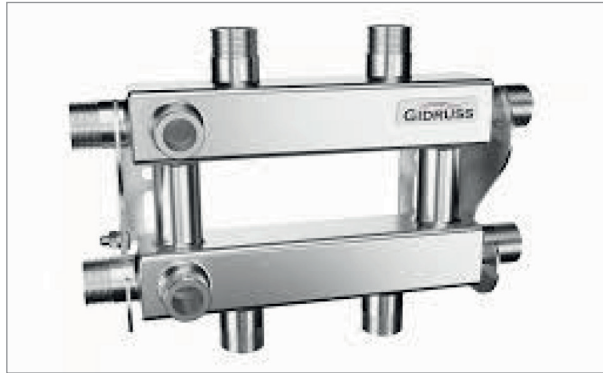


Рис. 2. Кільцевий колектор³

Корозійна стійкість виробів з нержавіючих сталей зумовлена впливом хрому, що входить до їх складу. Завдяки здатності утворювати на поверхні сталі стійку захисну плівку окислу металу, хром має властивість самозахисту проти атмосферної корозії і дії ряду хімічних речовин. Це пояснюється тим, що вільна поверхня хрому або залізо-хромистого сплаву на повітрі швидко окислюється і покривається дуже стійкою плівкою, яка захищає вироби з нержавіючої сталі від подальшого окислення⁴.

1 Sait vyrobnyka «Vesta.kiev.ua» [Manufacturer's website «Vesta.kiev.ua»]. *westa.kiev.ua*. Retrieved from <https://westa.kiev.ua/ru/standarty/marki-stali/stal-aisi-321>. [in Russian]; Sait vyrobnyka «Steel service» [Manufacturer's website «Steel service»]. *steelservice.com.ua*. URL : <https://steelservice.com.ua/aisi-321>. [in Russian].

2 Sait vyrobnyka «ito Engineering & supply» [Manufacturer's website «ito Engineering & supply»]. *ito.kiev.ua*. URL : <http://www.ito.kiev.ua/genebre/compensatory.html>. [in Ukrainian].

3 Sait vyrobnyka «Gidruss» [Manufacturer's website «Gidruss»]. *catalog.gidruss.com*. URL : <https://catalog.gidruss.com/RMSS-40-2>. [in Russian].

4 Buyak, T.O. (2019). Aktualni zadachi suchasnykh tekhnologiy [Actual tasks of modern technologies]. Proceedings from: VIII Mizhnarodna naukovocotekhnichn konferentsia molodykh vchenykh. VIII International scientific and technical conference of young scientists and students. (p.27–28). Ternopil: TNTU. [in Ukrainian].

Одним з найпопулярніших жароміцних сплавів є Inconel 718.

Сплав Inconel 718 комбінує високу міцність і корозійну стійкість з чудовою зварюваністю, а також, відсутність схильності до корозійного розтріскування біляшовних зварних зон. Відрізняється високою міцністю на розрив при температурах до 700° С. Створювався як листовий обшивочний матеріал для надзвукових літаків (рис. 3).



Рис. 3. Літак у якого обшивка виконана зі сплаву Inconel 718⁵

В даний час широко використовується в газових турбінах, ракетних двигунах, космічних апаратах, атомних реакторах, в нафтохімічній промисловості. Аналогом можна розглядати вітчизняний сплав ХН45МВТЮБР⁶. Сплави Інконель є стійкими до окиснення та корозії. При нагріванні Інконель формує тонку стабільну пасивуючу оксидну плівку, що захищає поверхню від подальшого руйнування. Інконель зберігає міцність в широкому діапазоні температур, тому знаходить застосування для умов, де алюміній чи сталь не працюють. Сплави вирізняються високими міцністю і ударною в'язкістю при температурах до 900°С, нечутливістю до надрізів при низьких (до -78°С) температурах.

2. Конкуруючі технології зварювання тонколистового металу

2.1. Електронно-променеве зварювання

До одного з методів зварювання тонколистового металу можна віднести електронно-променеве зварювання.

Електронно-променеве зварювання – зварювання з високою концентрацією теплоти, відмінним захистом. Джерелом теплоти є електронний

5 Sait zhurnalu «The National Interest» [Magazine website «The National Interest»]. *nationalinterest.org*. URL : <https://nationalinterest.org/blog/buzz/americas-f-35-vs-chinas-j-31-stealth-fighter-video-breaks-it-all-down-63837>. [in English].

6 Sait vyrobnyka «Bibus Metals» [Manufacturer's website «Bibus Metals»]. *bibusmetals.com.ua*. URL : <https://www.bibusmetals.com.ua/products/alloys/inconel-alloy-718/>. [in Ukrainian].

промінь, одержуваний за рахунок термоелектронної емісії з катода електронної гармати. Зварювання ведеться у високому вакуумі у вакуумних камерах. Відома також технологія зварювання електронним променем у атмосфері нормального тиску, коли електронний промінь залишає область вакууму безпосередньо перед зварюваними деталями. Основний компонент – електронний промінь, який створюється спеціальним приладом – електронною гарматою⁷. Схему електронно-променевого зварювання показано на рис. 4.

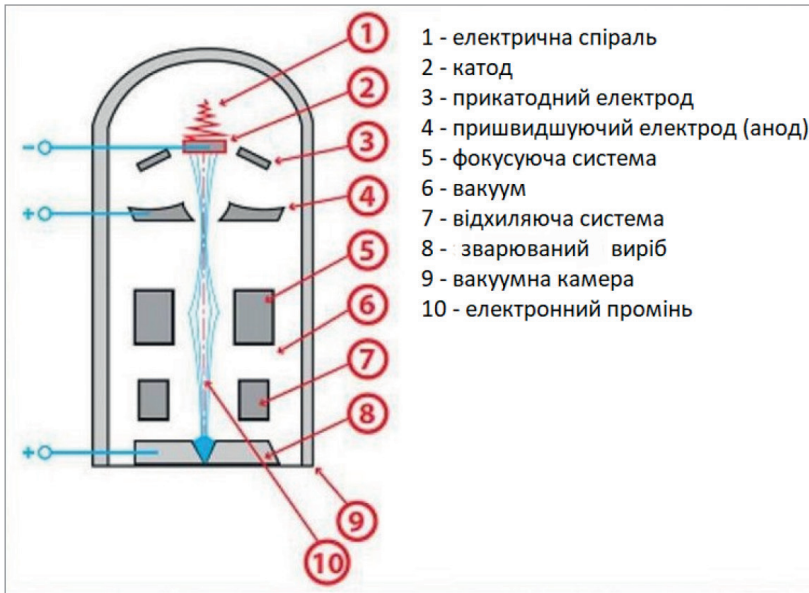


Рис. 4. Схема електронно-променевого зварювання⁸

Спосіб електронно променевого зварювання заснований на використанні для нагріву і розплавлення зварювальних деталей енергії пучка швидкорухомих електронів – електронного променю. Електрони, що випускаються випромінювачем-катодом, розганяються під дією електричного поля високої напруженості до великих швидкостей, порівнянних із швидкістю світла, і фокусуються в тонкий промінь, спрямований від випромінювача до зварюваного виробу, яке є анодом. Процес електронно променевого зварювання здійснюється у вакуумі не нижче 10^{-4} мм рт. ст., тому що в противному випадку велика частина енергії електронів буде витрачатися на нагрів і іонізацію газів навколишньої атмосфери. Зустрівшись з поверхнею

⁷ Gitlevych, A. D., & Etingof, L. A. (1982). *Mechanizatsia i avtomatyzatsia zvaryvalnogo vyrobnytstva* [Mechanization and automation of welding production]. Moskva: Mashinostroenie [in Russian].

⁸ Sait «Zvarka.info» [Website «Zvarka.info»]. *zvarka.info*. URL : <https://zvarka.info/elektronno-promeneve-zvaryuvannya/>. [in Ukrainian].

анода (зварюваної деталі), електрони гальмуються і віддають свою кінетичну енергію виробу у вигляді тепла⁹.

Технологія електронно-променевої обробки матеріалів характеризується такими **загальними перевагами**¹⁰:

- 1) можливість за рахунок фокусування електронного променя плавно змінювати у широких межах питому енергію у зоні нагрівання.
- 2) велика потужність (від десятків ватів до мегаватів) у місці взаємодії електронного променя з оброблюваною заготовкою.
- 3) відносна простота керування просторовим положенням електронного променя за допомогою магнітної системи та можливість модулювання променя за потужністю.
- 4) наявність вакууму як робочого середовища і, як наслідок, чистота процесу.
- 5) можливість отримання малорозмірної (прецизійної) зони дії електронного променя на оброблюваний матеріал.

Недоліки електронно-променевої обробки матеріалів:

- 1) необхідність забезпечувати високий вакуум, що для ряду виробів надзвичайно складно.
- 2) складність виготовлення та експлуатації електронно-променевого обладнання.
- 3) наявність рентгенівського випромінювання, що вимагає використання спеціальних засобів захисту.

Електронно-променеве зварювання застосовують при зварюванні жароміцних і високоміцних сталей і сплавів на основі титану і алюмінію, зварювання молібдену, танталу, ніобію, вольфраму, цирконію, нікелю, берилію, міді, алюмінію та ін. Для точної обробки і зварювання мікродеталей (наприклад, в мікроелектроніці та інших областях) використовуються високовольтні електронні гармати з напругою прискорення до 150 кВ, струмі пучка від 0,3 до 20 мА, що дають на виробі дуже тонкий пучок діаметром від 0,01 до 0,1 мм. При цьому забезпечується висока питома потужність в плямі на виробі, що досягає 2000 кВт/мм². Робота на високовольтних установках вимагає особливого захисту персоналу від радіовипромінювання¹¹.

9 *Zvaruvalne ustatkuvannia [Welding equipment]*. (1992). Kyiv. [in Ukrainian].

10 Kovalenko, V. S. (1983). *Tekhnologia i oborudovanie elektrofizicheskikh i elektrokhimicheskikh metodov obrabotki materialov [Technology and equipment for electrophysical and electrochemical methods of material processing]*. Moskva: Vysshaya shkola. [in Russian].

11 Kovalenko, V. S. (1983). *Tekhnologia i oborudovanie elektrofizicheskikh i elektrokhimicheskikh metodov obrabotki materialov [Technology and equipment for electrophysical and electrochemical methods of material processing]*. Moskva: Vysshaya shkola. [in Russian].

У зв'язку з труднощами створення вакуум-камер великих розмірів таким шляхом зварюються поки переважно не надто великі вироби. Деяка схожість з електронно променевою зварюванням має зварювання когерентним світловим променем, створюваним спеціальними джерелами – лазерами. Потужний світловий промінь з надзвичайно високою концентрацією енергії може плавити, зварювати, марнувати, різати метали та інші матеріали. Вакуум при цьому не вимагається. Обробляється матеріал може бути віддалений від генератора світлового променя – лазера.

В усьому світі ЕПЗ широко використовується при виготовленні деталей турбін, ракет, автомобілів тощо завдяки високій якості та надійності з'єднань. Наприклад, авіаційне підприємство MTU (Мюнхен) за інформаційним проспектом фірми «MesserGriesheim GmbH» використовує електронний промінь з початку 60-х рр. ХХ ст.¹² Для ЕПЗ деталей з аустенітних, теплостійких та жароміцних сталей і сплавів титану, алюмінію, міді, а також інших матеріалів створене нове покоління електронно-променевого зварювального устаткування з робочою камерою об'ємом 11 м³. Використовуються сучасні системи числового програмного керування, які забезпечують автоматизацію процесу, контроль та запис із графічним зображенням усіх важливих параметрів, позицій променя та часу зварювання. Усі записи фіксуються в пам'яті машини. Зварюють напрямні апарати, ротори, вали, корпуси турбін та компресорів, камери згоряння тощо. На кожній деталі промінь гравірує реєстраційний номер, за допомогою якого можна будь-коли відтворити всі параметри режиму зварювання. Допускається відхилення прискорюючого напруження і сили струму променя до 1 %, сили струму фокусуючої лінзи – до 0,5 %. Разом з активним контролем якості зварювання в сучасному устаткуванні забезпечується ультразвуковий контроль з'єднань у процесі зварювання, наприклад при зварюванні роторів¹³.

Електронно-променеве зварювання дозволяє отримувати з'єднання, для яких застосовують способи зварювання плавленням, однак його переваги найбільш повно реалізуються при виготовленні стикових з'єднань. Для деяких з'єднань застосовують лише ЕПЗ, наприклад однопрохідне зварювання розташованих на різній висоті стикових швів проникаючим променем. За допомогою ЕПЗ можна отримувати з'єднання з прорізними

12 Krivtsun, I.V., Kvasnytskyi, V.V., Maksymov, S.Y., & Yermolayev, G.V. (2017). *Spetsialni sposoby zvaryuvannia* [Special methods of welding]. Mykolaiv: NUK. [in Ukrainian].

13 Ibid. P. 225.

швами, виконувати зварювання у вузьких щілинах та важкодоступних місцях. Деякі типи з'єднань при ЕПЗ показано на рис. 5¹⁴.

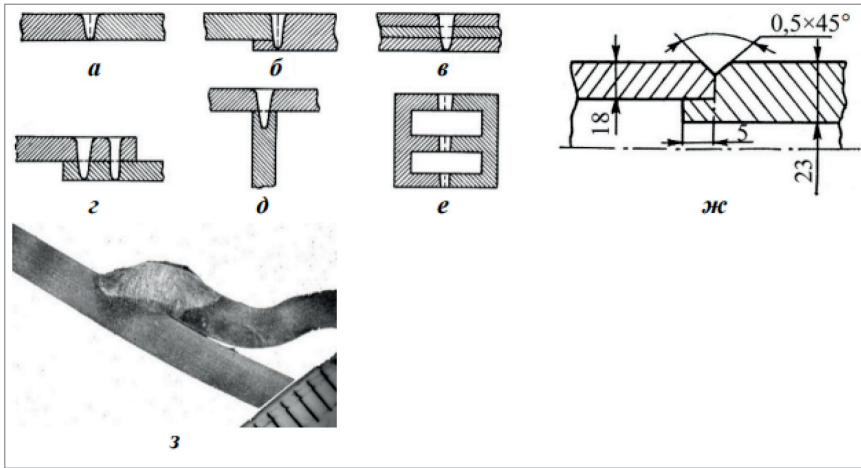


Рис. 5. Деякі типи з'єднань при ЕПЗ: а, б – стикові; в, г – з прорізними швами; д – таврове з прорізним швом; е – однопрохідне зварювання трьох стиків; ж – стикове з'єднання деталей циліндричної форми; з – з'єднання деталей жарової труби¹⁵

Цей спосіб також перспективний для з'єднання металоконструкцій в умовах космічного простору: ремонтної зварюванні, споруді орбітальних станцій, усуненні їх пошкоджень та інших подібних роботах. При цьому використовується природний вакуум та живлення апаратури від сонячної енергії.

2.2. Мікроплазмове зварювання

Ще однією технологією зварювання тонколистових матеріалів є мікроплазмове зварювання. Плазмове зварювання (plasmaschweissen; plasma arc welding; плазменная сварка) – електродугове зварювання, під час якого стовп дуги або частина стовпа стискується потоком газу або магнітним полем, у результаті чого газовий струмінь дуги нагрівається до високих температур, іонізується і набуває властивостей плазми¹⁶. Плазма – це високоіонізований газ. Вона являє собою четвертий стан речовини, поряд з твердим, рідким та газоподібним. Плазма, яка використовується в технологічних процесах обробки матеріалів, належить до низькотемпературної.

Плазмовий струмінь може бути прямої та непрямої дії.

¹⁴ Krivtsun, I.V., Kvasnytskyi, V.V., Maksymov, S.Y., & Yermolayev, G.V. (2017). *Spetsialni sposoby zvaryuvannia [Special methods of welding]*. Mykolaiv: NUK. [in Ukrainian]. P. 212, P. 8.

¹⁵ Ibid.

¹⁶ Ibid.

При плазмовому струмені прямої дії виріб входить до зварювального кола дуги, на відміну від струменя непрямої дії. Плазموутворюючий газ може бути одночасно і захисним. Останній також може подаватися окремо. Схему процесу показано на рис. 6¹⁷.

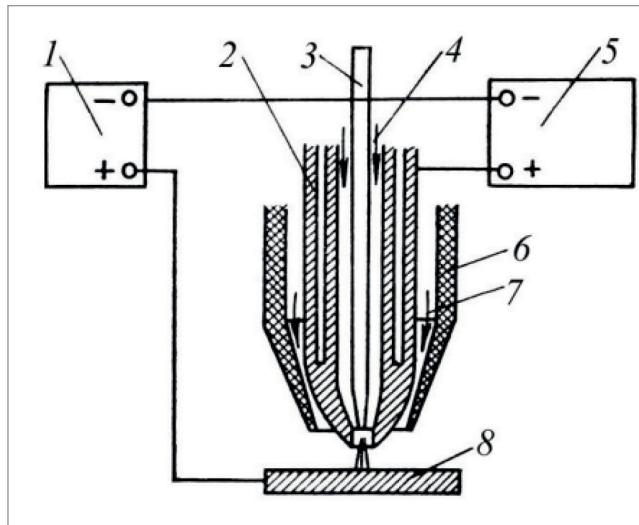


Рис. 6. Схема процесу мікроплазмового зварювання:

- 1 – основне джерело живлення постійного струму;
- 2 – водоохолодне мідне сопло; 3 – вольфрамовий електрод;
- 4 – плазموутворюючий газ;
- 5 – низькоамперне джерело живлення чергової дуги;
- 6 – керамічне сопло; 7 – захисний газ; 8 – виріб¹⁸

Для металів малих товщин (від десятків мікрметрів до 2 мм) застосовують мікроплазмове зварювання, яке в цьому випадку має значні переваги перед усіма відомими способами зварювання¹⁹. Зварювання звичайно ведеться в безперервному або імпульсному режимі дугою прямої полярності, що горить між вольфрамовим електродом плазмотрона і виробом у струмені плазموутворюючого інертного газу (як правило, аргону).

Мікроплазмове зварювання проводиться при силах струму від декількох десятків міліампер до десятків ампер. Витрати газів незначні: плазموутворюючого $(3,3...5,0) \cdot 10^{-6}$ м³/с (12...18 л/год), захисного $(50...205) \cdot 10^{-6}$ м³/с (180...740 л/год). Пропорційно витраті плазموутворюючого газу зростає напруга до 20...30 В. Склад захисного газу вибирається залежно від роду зварюваних матеріалів. Звичайно це газові суміші на основі аргону з

¹⁷ Krivtsun, I.V., Kvasnytskiy, V.V., Maksymov, S.Y., & Yermolayev, G.V. (2017). Spetsialni sposoby zvaryuvannia [Special methods of welding]. Mykolaiv: NUK. P. 261, P. 8. [in Ukrainian].

¹⁸ Ibid.

¹⁹ Paton, B.E., Grozdetskiy, V.S., & Dudko, D.A. (1979). Mikroplazmennaya svarka [Microplasma welding]. Kiev: Naukova dumka. [in Russian].

домішками водню або вуглекислого газу при зварюванні сталей, з домішками гелію або чистий гелій при зварюванні активних металів.

Мікроплазмове зварювання на прямій полярності широко застосовується при виготовленні деталей із вуглецевих та легованих сталей, міді, нікелю, титану, ніобію, молибдену та інших тугоплавких металів. Для зварювання матеріалів будь-яких марок силу струму вибирають пропорційно товщині (рис. 7, а). Для кожної товщини існує оптимальна швидкість зварювання (рис. 7, б).

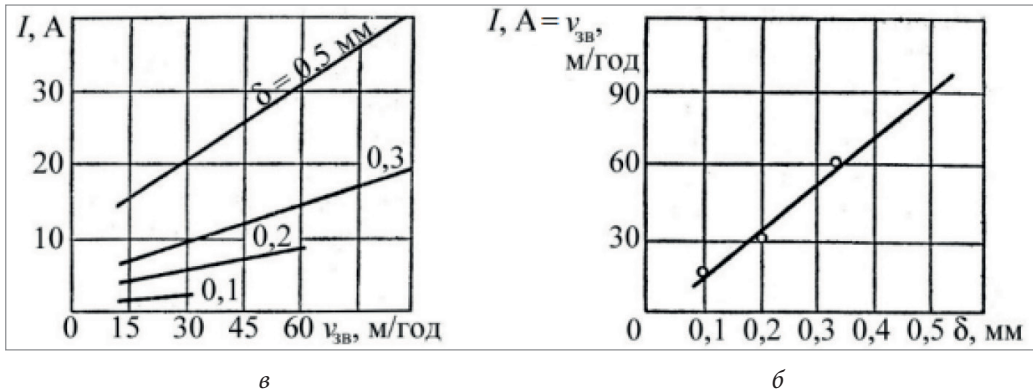


Рис. 7. Вплив товщини металу і швидкості зварювання на силу струму (а) та товщини металу на швидкість мікроплазмowego зварювання (б) постійним струмом прямої полярності²⁰

Швидкість зварювання вибирають з умови якісного формування шва. При перевищенні швидкості зварювання утворюються підрізи. При малих швидкостях збільшується ширина шва та зони термічного впливу. Суттєве збільшення величини зерна призводить до зниження механічних властивостей зварних з'єднань. Для з'єднання металів товщиною до 0,2 мм розроблено спосіб імпульсного мікроплазмowego зварювання, при якому нагрівання і плавлення металу здійснюються в момент подачі імпульсу струму²¹. Частота імпульсів і швидкість зварювання вибираються такими, щоб забезпечити перекриття точок.

До переваг зварювання відносять:

- високу концентрацію тепла при мінімальній зоні теплового впливу, що виключає в процесі зварювання викривлення деталей, а значить і відпадає необхідність в їх виправленню;
- стабільність горіння дуги;

²⁰ Ibid. P. 264, P. 8.

²¹ Olshanskiy, N.A. (1978). *Svarka v mashinostroenii* [Welding in mechanical engineering]. (Vol. 1). Moskva: Mashinostroenie. [in Russian].

- високу швидкість зварювання (до 50 м / год), що дозволяє підвищити продуктивність праці;
- проплавлення металу на всю глибину, що дозволяє перед зварюванням не здійснюють оброблення крайок;
- широкі межі регулювання зварювальної дуги;
- відсутність розбризкування металу в процесі проведення робіт;
- економічність;
- висока якість отриманого зварного з'єднання;
- можливість повної автоматизації зварювального процесу.

До недоліків відносять:

- складність обслуговування деяких видів обладнання;
- необхідність дотримуватися техніки безпеки.

Зварювання плазмовою дугою застосовують при виготовленні деталей з нержавіючих сталей, титану, нікелевих сплавів, молібдену, вольфраму тощо в авіаційній та електронній промисловості, суднобудуванні, нафтохімічному машинобудуванні, інших галузях²². Застосовується звичайно зварювання дугою прямої дії. Завдяки циліндричній формі стовпа дуги процес зварювання характеризується стабільним проплавленням металу. Спеціальні сопла дозволяють регулювати форму плями нагрівання. Зварювання може виконуватися в будь-якому просторовому положенні. Заміна аргонодугового зварювання труб з нержавіючої сталі на плазмодугове при товщині стінок 2,3...7,0 мм дозволяє збільшити швидкість зварювання на 50...200 %. Мікроплазмове зварювання використовують у радіoeлектроніці та приладобудуванні для з'єднання фольги, дротів і тонкостінних деталей товщиною 0,025...1,0 мм при силі струму 0,1...10,0 А ²³.

3. Специфіка лазерного зварювання високолегованих сталей

Лазерне зварювання отримало велику увагу як багатообіцяючу технологію з'єднання з високою якістю, високою точністю, високою продуктивністю, високою швидкістю, гарною гнучкістю і низькою деформацією або спотвореннями геометрії зварюваних елементів, на додаток до розпізнавання простих і широких застосувань завдяки можливості об'єднання з роботом, зменшення людської праці, повна автоматизація, Систематиза-

22 Olshanskiy, N.A. (1978). Svarka v mashinostroenii [Welding in mechanical engineering]. (Vol. 1). Moskva: Mashinostroenie. P. 278, P. 8. [in Russian].

23 Ibid.

ція, виробничі лінії тощо²⁴. Недоліками лазерів та лазерного зварювання є високі витрати на лазерні апарати, ускладнене плавлення високовідбивних або високотермопровідних металів, мала міцність на розрив та легке утворення дефектів зварювання, таких як пористість у зонах глибокого проплавлення зварного шва.

Одними з найрозповсюдженіших марок високолегованих сталей у світі є AISI 304, AISI 321, AISI 316, їх вітчизняними аналогами є сталі 08X18H10, 12X18H10T, 07X18H13M2 відповідно. Висока механічна міцність, стійкість до корозії, температурних перепадів і дії хімічно активних сполук, а також інші експлуатаційні властивості цих сталей дозволяють використовувати ці сплави в різних галузях промисловості і побуту. Вони добре зварюється, легко піддаються глибокій витяжці і формуванню, а також без проблем обробляються ручним механічним інструментом.

Сталі не втрачають своїх технічних і експлуатаційних якостей в широкому температурному діапазоні (від -190 до +600 градусів), що дозволяє їх використовувати при будь-яких погодних умовах, а також в агресивних і високотемпературних середовищах.

Існує багато експериментальних досліджень, що вивчають зварюваність та механічні властивості високолегованих сталей. Так наприклад, в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України проводили лазерне зварювання тонкостінних фільтруючих елементів зі сталі 08X18H10²⁵.

Даний процес допускає зазори між кромками, що зварюються, у разі її проведення з подачею присадкового порошкового матеріалу. В якості такого використовували гранульовані порошки сталі 08x18h10t або нікелевих сплавів, що самофлюсуються, ПГ-10Н-04 і Пг-НЧЗ з діаметром гранул до 150 мкм²⁶. Зварювання проводили на мідній підкладці без формоутворювальних канавок.

У ході виконання експериментів встановили, що при лазерному зварюванні можуть виникати непровари і пропали. Підбір режимів подачі порошку присадки в сукупності з певними величинами потужності і швидкості дозволив отримати бездефектні зварні з'єднання (рис. 8).

24 Katayama, S. (2005). *New development in laser welding. New developments in advanced welding*. Cambridge England: Woodhead Publishing Limited.

25 Shelyagin, V.D., Khaskin, V.Y., Bernatsky, A.V., & Siora, A.V. (2017). Laser welding of thin-wall filter elements of steel 08Kh18N10T. *The Paton Welding Journal*, 4, (pp.49–52). URL : <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.04.10>

26 Borisov, Yu.S. (1987). *Gazotermicheskie pokrytiya iz poroshkovykh materialov* [Gas-thermal coatings from powder materials]. Kiev: Naukova dumka. [in Russian].

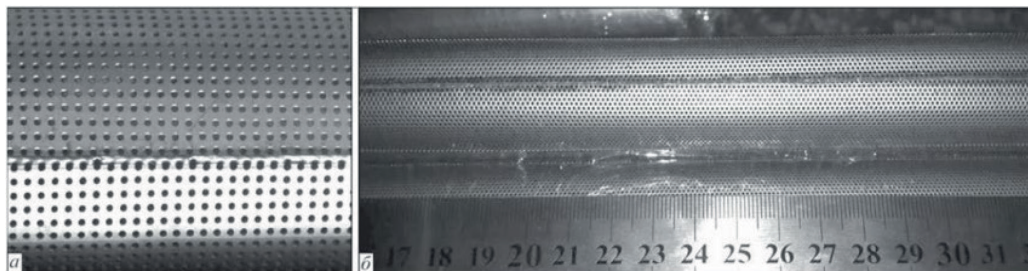


Рис. 8. Зовнішній вигляд зварного з'єднання (а) та зразка (б) фільтруючого елемента з нержавіючої сталі 08X18H10T ($\delta = 0,5$ мм), отриманого лазерним зварюванням з порошковою присадкою ПГ-10Н-04²⁷

При цьому було визначено таку область стабільності технологічних режимів: потужність випромінювання $P = 0,5...0,6$ кВт; швидкість зварювання $V_{\text{св}} = 140...160$ м/год.; величина розфокусування $\Delta F = -15...-20$ мм; витрата порошку присадки $G_{\text{п}} = 0,2...0,3$ г/с. Такий досить широкий розкид параметрів режиму свідчить про значну стабільність лазерного зварювання і дозволяє прогнозувати незначний відсоток браку при промисловому застосуванні процесу. Лазерне зварювання нещільно прилеглих кромок з використанням порошкового присаджувального матеріалу як у разі використання безперервного, так і імпульсного випромінювання забезпечує міцність на рівні 90 % міцності основного металу та корозійну стійкість зварних з'єднань від 90 до 98 % відносно стійкості основного металу.

Також було досліджено теплообмін та потік розплаву при лазерному точковому зварюванні нержавіючої сталі 304²⁸. У даному дослідженні застосовувалась нестационарна числова модель для розуміння теплопередачі та потоку рідини при лазерному точковому зварюванні нержавіючої сталі 304. Для розрахунку нестационарної конвекції зварювальної ванни були розглянуті поверхневий натяг та архімедові сили. Для досягнення точності у розрахунках використовувались дуже дрібні сітки та невеликі часові кроки. Розраховані розміри зварювальної ванни порівнювались з відповідними вимірними значеннями для перевірки моделі. Поперечні перетини отриманих експериментально зварювальних ван порівнюються з відповідними розрахунковими значеннями на рис. 9.

27 Borisov, Yu.S. (1987). *Gazotermicheskie pokrytiya iz poroshkovykh materialov* [Gas-thermal coatings from powder materials]. Kiev: Naukova dumka. [in Russian]. P. 49, P. 15.

28 He, X., Fuerschbach, P.W., & DebRoy, T. (2003). Heat transfer and fluid flow during laser spot welding of 304 stainless steel. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36, p.1388. URL : <https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/12/306>.

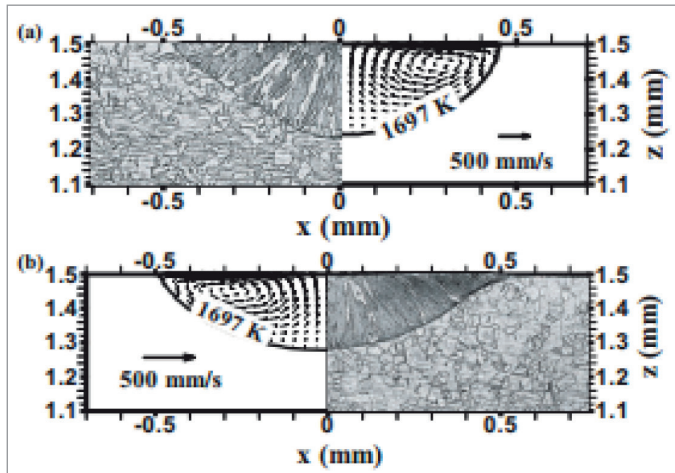


Рис. 9. Експериментальний та розрахунковий перетини зварювальної ванни для потужності лазера 1967 Вт і тривалості імпульсу 3 мс. а) радіус променю 0,428 мм; б) радіус променю 0,57 мм²⁹

Можна побачити, що розрахункові геометрія та розміри зварювальної ванни добре узгоджуються з експериментальними значеннями. Як експериментальні, так і розрахункові результати показують, що зі збільшенням діаметра пучка зварювальна ванна стає ширшою та меншою. Це спостереження узгоджується з розподілом енергії у ширшій області зі збільшенням діаметра пучка. Оскільки температурний коефіцієнт поверхневого натягу від'ємний, розплавлений метал на поверхні переноситься від центру до периферії ванни.

Був проведений розмірний аналіз для того, щоб зрозуміти значення різних рушійних сил для конвекції у ванні розплаву. Досліджено поведінку квазістаціонарної зони, тобто, твердофазної двофазної області, при нагріванні та охолодженні. У результаті було отримано важливу інформацію про параметри: швидкість кристалізації R і температурний градієнт G у рідині у двофазній зоні/фронті рідини як функції часу. Ці дані корисні для визначення морфології кристалізації та розмірів субструктури кристалізації. Дана робота демонструє, що застосування числових явищ переносу може значно збільшити базу кількісних знань у сфері зварювання плавленням.

В дослідженні авторів Nawi, Saktioto та ін., були проведені експерименти зі зварювання нержавіючої сталі для пакування пристроїв

²⁹ He, X., Fuerschbach, P.W., & DebRoy, T. (2003). Heat transfer and fluid flow during laser spot welding of 304 stainless steel. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36, p.1388. URL : <https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/12/306>. P. 1391, P. 16.

Photonics, а також виконані випробування на міцність зварних з'єднань внапуск і в стик³⁰. Найчастіше для пакувальних пристроїв для фотоніки зварні шви мають бути стикові або з'єднання внапуск, для яких необхідна глибина проникнення зварного шва має бути більшою за ширину зварювання. Більше того, для мініатюрних пакетів, які містять деякі чутливі компоненти з'єднання, глибина проникнення повинна бути досить великою для досягнення сильної з'єднання³¹. У той же час ширина зварного шва повинна бути невеликою, щоб мінімізувати ЗТВ а отже, запобігти пошкодженню чутливих оптичних компонентів³². Бажаний матеріал для цієї програми вимагався низької теплопровідності або більшого електричного опору³³. Чим нижча теплопровідність матеріалу, тим більше шансів поглинути лазерну енергію. Низьковуглецева аустенітна нержавіюча сталь (сталь серії 300), яка складається із вуглецю менше ніж 0,1 %, забезпечує високу якість та надійну продуктивність зварних з'єднань³⁴. Отже, в цьому дослідженні нержавіюча сталь 304 використовується в якості основного матеріалу для лазерного зварювання. З результатів експериментів встановлено, що стикове з'єднання утворює набагато міцніше з'єднання, ніж внапуск. Більш міцному з'єднанню сприяє більший об'єм звареної нержавіючої сталі 304 на стикових з'єднаннях, яке показано на рис. 12 (а). Однак силу з'єднання внапуск можна збільшити, забезпечуючи більшу глибину проникнення шва. Це робиться шляхом контролю параметрів лазерного променя наприклад, пікова потужність лазера та тривалість імпульсу. Зроблено висновок, що комерційний зварювальний матеріал, InvarTM, забезпечує більш надійне з'єднання, ніж нержавіюча сталь 304. Також можна зробити висновок, що зварена нержавіюча сталь 304 не може досягти модуля міцності та пружності самої нержавіючої сталі 304. Однак нержавіюча сталь 304 є хорошим зварювальним матеріалом для упаковки пристроїв фотоніки використовуючи імпульсну техніку лазерного зварювання за допомогою Nd: YAG лазера.

30 Nawi, I.N., Saktioto, T., Fadhalic, M., Hussaind, M.S., Alie, J., & Yupapinf, P.P. (2011). A reliable Nd:YAG laser welded stainless steel 304 for photonics device packaging application. *Procedia Engineering*, 8, (pp.380–385). URL : <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.03.070>.

31 Fadhali, M., Zainal, J., Munajat, Y., Ali, J., & R. Rahman. (2007). Laser diode pigtailling and packaging using Nd:YAG laser welding technique. *Journal Komunikasi Fisika Indonesia*, (Vol. 5), (pp. 203–208).

32 Fadhali, M., Zainal, J., Munajat, Y., Ali, J., & Rahman, R. (2011, December 20). Analysis of laser microwelding applied for photonic devices packaging. *Journal of Solid State Science and Technology Letters*, 14, (pp.18–19).

33 Dawes, C. (1992). *Laser welding: A practical guide*. Woodhead Publication Ltd., England.

34 Shannon, G. & Palen, E. (2002, May). Laser weld attachment enables repeatable submicron precision. *Opto-Mechanical Systems Design*, 1(2); Naim, I., Saktioto, T., Fadhali, M., Ali, J., & Yupapin, P. P. (2009). An investigation of a pulsed Nd:YAG laser welding technique. *IEEE-Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics*, 1, (pp. 274–280).

Прикладене навантаження для випробування та зміщення витягування для точкового та шовного зварювання показано на рис. 10 і на рис. 11 відповідно. Максимальне прикладене навантаження вважається міцністю зварного шву. Рис. 10 ілюструє максимальне навантаження для стикового і з'єднань внапуск – 0,2296 кН і 0,0691 кН зі зміщенням при витягуванні 0,43 мм і 0,40 мм відповідно. Рис. 8 також вказує на зміщення при розтягу стикового з'єднання на 0,48 мм та 0,72 мм, значних змін у його міцності немає, оскільки кожна точка уздовж зварного шва має однакову максимальну міцність, але це не досягається одночасно в залежності від її геометрії.

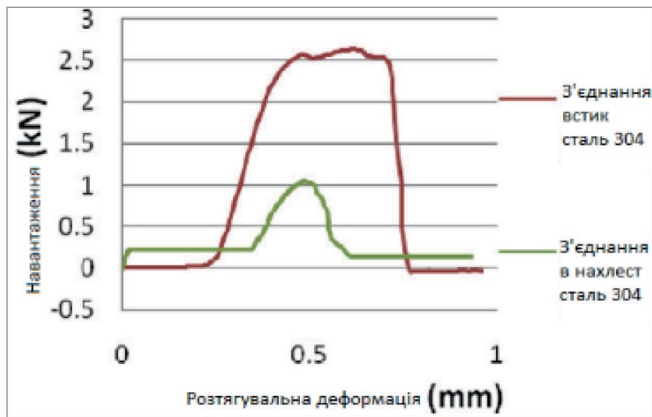


Рис. 10. Профіль міцності одинарного точкового зварювання, виготовленого з нержавіючої сталі 304 та Invar з використанням 3,5 кВт пікової потужності Nd:YAG лазерного променя та тривалістю імпульса 6,5 мс³⁵

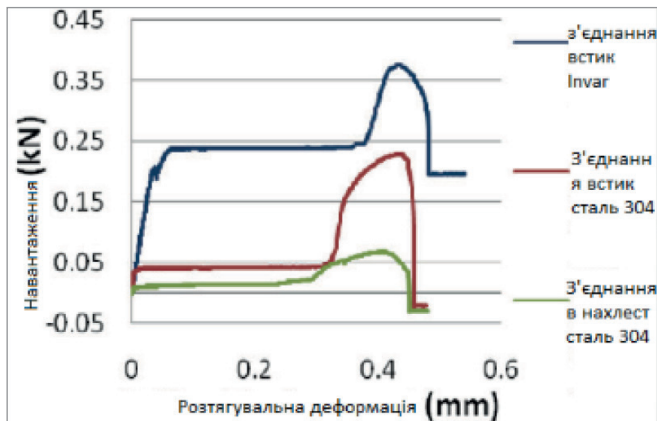


Рис. 11. Профіль міцності зварного шва, виготовленого з нержавіючої сталі 304 вздовж поверхні з'єднання в $10,0 \pm 0,1$ мм³⁶

35 Shannon, G. & Palen, E. (2002, May). Laser weld attachment enables repeatable submicron precision. Opto-Mechanical Systems Design, 1(2); Naim, I., Saktioto, T., Fadhali, M., Ali, J., & Yupapin, P. P. (2009). An investigation of a pulsed Nd:YAG laser welding technique. IEEE-Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics. 1, (pp. 380–385, 17).

36 Ibid.

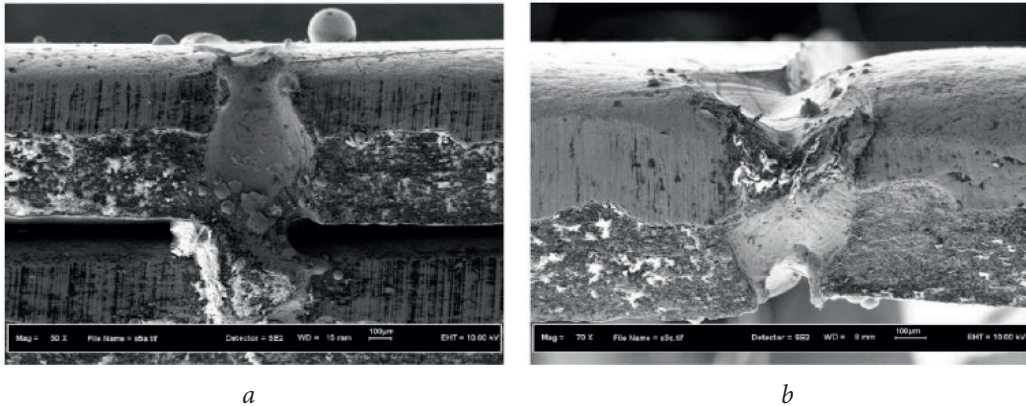


Рис. 12. Мікрофотографії FESEM зварного шва з нержавіючої сталі 304;
(а) стиковий та з (б) з'єднання внапуск, що утворюється піком
лазерного променя потужністю 3,5кВт і тривалістю імпульсу 6,5 мс³⁷

Для з'єднання внапуск товщина нержавіючої сталі 304 подвоюється, як верхній та нижній листи з нержавіючої сталі перекриваються один з одним. Якщо лазерний промінь утворює недостатню глибину проникнення, таким чином, тільки невеликий об'єм звареної нержавіючої сталі 304 утворюється на поверхні з'єднання, як показано на рис. 12(б). Це призводить до послаблення з'єднання. Але глибину проникнення можна збільшити, контролюючи пікову потужність і тривалість імпульсу лазерного променя.

В результаті проведених досліджень автори зробили висновки, що стикове з'єднання має набагато міцніше з'єднання, ніж з'єднання внапуск. З'єднання міцніше за рахунок збільшення об'єму звареної нержавіючої сталі 304 на стикових з'єднаннях. Було помічено, що кожна точка уздовж шва зварювання має схожі параметри максимальної міцності, але цього не можна досягти одночасно. Подібний градієнт, який було отримано з лінійного співвідношення, говорить про відсутність суттєвої різниці у впливі кількості точок на міцність стикового з'єднання і з'єднання внапуск. Комерційний зварювальний матеріал, InvarTM, забезпечує міцніше з'єднання, ніж нержавіючий сталь 304. Зварна нержавіюча сталь 304 не може досягти модуля міцності та пружності звичайної нержавіючої сталі 304. З результатів випробувань на міцність було встановлено, що нержавіюча сталь 304 є гарним кандидатом для використання в якості зварювання матеріал для пакування пристроїв фотоніки за допомогою технології імпульсного зварювання Nd: YAG.

³⁷ Shannon, G. & Palen, E. (2002, May). Laser weld attachment enables repeatable submicron precision. Opto-Mechanical Systems Design, 1(2); Naim, I., Saktioto, T., Fadhal, M., Ali, J., & Yupapin, P. P. (2009). An investigation of a pulsed Nd:YAG laser welding technique. IEEE-Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics. 1, (pp. 380–385, 17).

4. Специфіка лазерного зварювання жароміцних сплавів на основі нікелю

Жароміцні сплави демонструють високу міцність, стійкість до корозії або окислення при підвищених температурах та опір повзучості. Класичний тип жароміцних сплавів – це сплави на основі нікелю. В основному вони використовуються в аерокосмічній, нафтогазовидобувній, нафтохімічній та інших галузях промисловості³⁸.

Суперсплави на основі нікелю часто класифікують за хімічним складом. Inconel 718 залишається одним з найбільш досліджуваних суперсплавних марок на основі нікелю з точки зору аспектів цілісності поверхні. Інші марки суперсплавів на основі нікелю, які привернули увагу дослідників, включають ME16, RR1000, IN-100 та FGH95, отримані методом порошкової металургії, та Udimet 720LI, які також знаходять застосування в аерокосмічній та автомобільній промисловості. Інші марки нікельованих суперсплавів, включаючи Німонік С-263 Німонік-75 та Німонік-105 використовуються переважно в камерах гарячого згоряння газових турбін. Ціліснолиті суперсплави IN-713LC використовуються в лопатках ротора газових турбін, авіаційних турбін та робочих коліс³⁹.

Проводилися деякі дослідження в ІЕЗ ім. Є.О. Патона, які стосуються математичного моделювання теплових процесів, що виникають при лазерному зварюванні тонкостінних стикових з'єднань багатокомпонентних жароміцних сплавів для виробів аерокосмічної техніки⁴⁰. Метою роботи було моделювання теплових процесів, що виникають при лазерному зварюванні тонкостінних стикових з'єднань сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr, а також проведення аналізу теплообміну стикового з'єднання пластин сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr та виведення закономірностей теплової складової за допомогою пакету САПР COMSOL Multiphysics. Було встановлено⁴¹, що

38 Seleznev, A., Solis Pinargote, N., & Smirnov, A. (2021). Ceramic cutting materials and tools suitable for machining high-temperature nickel-based alloys: A Review. *Metals*, 11, (P.1385).

39 Ibid.

40 Bernatskyi, A.V., Sokolovskyi, M.V., Siora, O.V., Bondarieva, V.I., Shamsutdinova, N.O. (2023). Simulation of thermal processes occurring during laser welding of thin-walled butt joints of multicomponent heat-resistant superalloys for aerospace applications. *Academic notes of TNU named after V.I. Vernadskyi*. (Vols. 34, (73) №2). [in Ukrainian]. URL : <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.1/01>.

41 Courtois, M., Carin, M., LeMasson, P., Gaied, S., & Balabane, M. (2013, November 26). A new approach to compute multi – reflections of laser beam in a keyhole for heat transfer and fluid flow modelling in laser welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50, (p.505305). URL : <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/50/505305>; Wang, L., Huang, Y., Yang, D., Li, H., Peng, Y., & Wang, K. (2020, November–December). Multi – scale simulation of grain growth during laser beam welding of nickel – based superalloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), (pp.15034–15044). URL : <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.10.091>; Gusarov, A.V., Yadroitsev, I., Bertrand, Ph., & Smurov, I. (2007, December 15). Heat transfer modelling and stability analysis of selective laser melting. *Applied Surface Science*, 254, (pp. 975–979). URL : <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.08.074>.

створення абсолютно точної моделі процесу лазерного зварювання тонкостінного стикового з'єднання є не вигідним у практичних застосуваннях через надвисоку комплексність такої моделі, що встановлює непомірно високі вимоги до розрахункового комп'ютера, а також потребує великої кількості часу для розрахування лічених секунд процесу зварювання. Через це було виведено ряд вимог та умовностей⁴², що дозволять створити задовільну модель процесу зварювання тонкостінних деталей, виготовлених з багатокомпонентних жароміцних сплавів.

Сама модель являє собою дві пластини тіло, яке змодельовано з допомогою крайніх значень (constraints) Thermal Insulation та Heat Flux. Область, що розраховується – дві пластини з габаритами 50×20×0.8 мм. Лазерне випромінювання проходить по стику двох пластин з однорідною швидкістю 300 мм/хв. Газовий захист – відсутній. Для уточнення результатів розрахунку сітка була покращена (Refined) в зоні стику двох пластин. Геометрія моделі представлена на рис. 13.

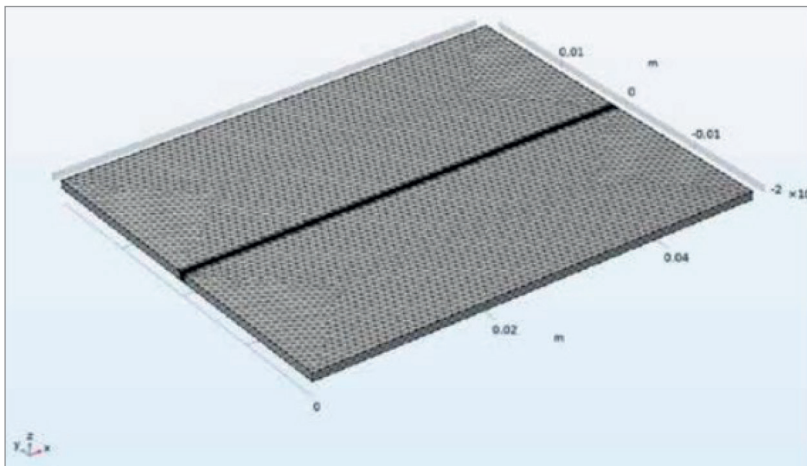


Рис. 13. Геометрія розрахункової моделі експерименту з нанесеною на неї розрахунковою сіткою⁴³

При лазерній обробці сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr (F-48) в напівбескінечному тілі було помічено, що більшість проплавлення матеріалу відбувається через 0,1–0,2с після передачі енергії лазерним випромінюванням. Це явно помітно на рис. 11, який показує зріз торця розрахункової зони під час проходження ЛВ через його площину. При цьому даний сплав має яскраво виражену схему конвективного теплообміну, розповсюджуючи

⁴² Gusarov, A.V., Yadroitsev, I., Bertrand, Ph., & Smurov, I. (2007, December 15). Heat transfer modelling and stability analysis of selective laser melting. *Applied Surface Science*, 254, (pp.975–979). URL : <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.08.074>.

⁴³ Ibid.

теплову енергію горизонтально на 1,1–1,2 мм в обидві сторони, забезпечуючи повний проплав пластини.

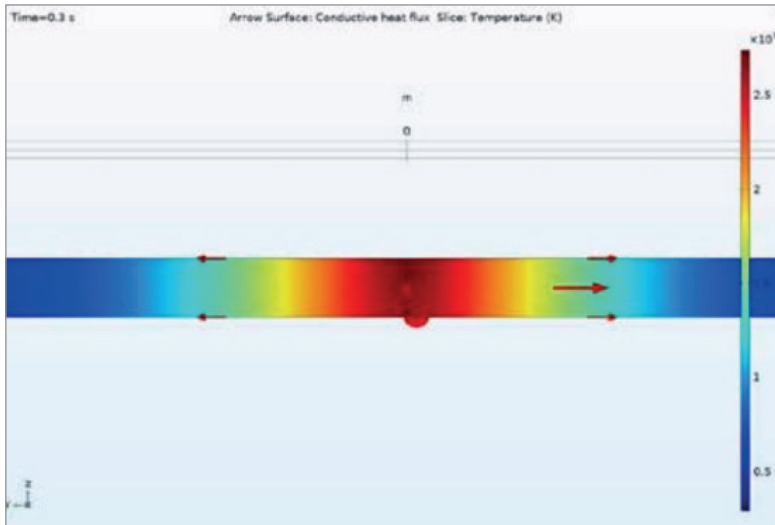


Рис. 14. Схема теплообміну при лазерному зварюванні пластин сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr ЛВ потужністю 400 Вт в площині YZ, момент часу 0,3 с ⁴⁴

Більш явна картина в горизонтальній площині, яка спричинена дією лазерного випромінювання в сплаві Nb-15W-5Mo-1Zr, демонструється на рис. 15 та рис. 16.

Було помічено, що через малу товщину матеріалу, основна частина поглинутої теплової енергії переходить в горизонтальну, а не вертикальну площину. При цьому висока швидкість охолодження, а також широка ванна розплаву вказує на необхідність проведення достатнього контролю над якістю шляхом захисту зони термічного впливу та використання комплексних технологічних заходів.

P. S. Wei присвятив роботу дослідженню фізики дефектів зварного з'єднання ⁴⁵. Автор дійшов висновку, що фазові переходи між рідиною і газом, твердим тілом і рідиною також включені. Розміри і амплітуди рифлення та горблення можуть бути ефективно виявлені з розрахунків балансу сил збуреної рідини, тиску газу та поверхневого натягу. Будь-який чинник, який може викликати перепади тиску або зміну поверхневого натягу відповідає за конкретні поверхневі утворення.

⁴⁴ Gusarov, A.V., Yadroitsev, I., Bertrand, Ph., & Smurov, I. (2007, December 15). Heat transfer modelling and stability analysis of selective laser melting. *Applied Surface Science*, 254, (P. 4, P. 22.). URL : <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2007.08.074>.

⁴⁵ Wei, P. S. (November 21st, 2012). The physics of weld bead defects. *Welding Processes*. URL : <http://dx.doi.org/10.5772/50668>.

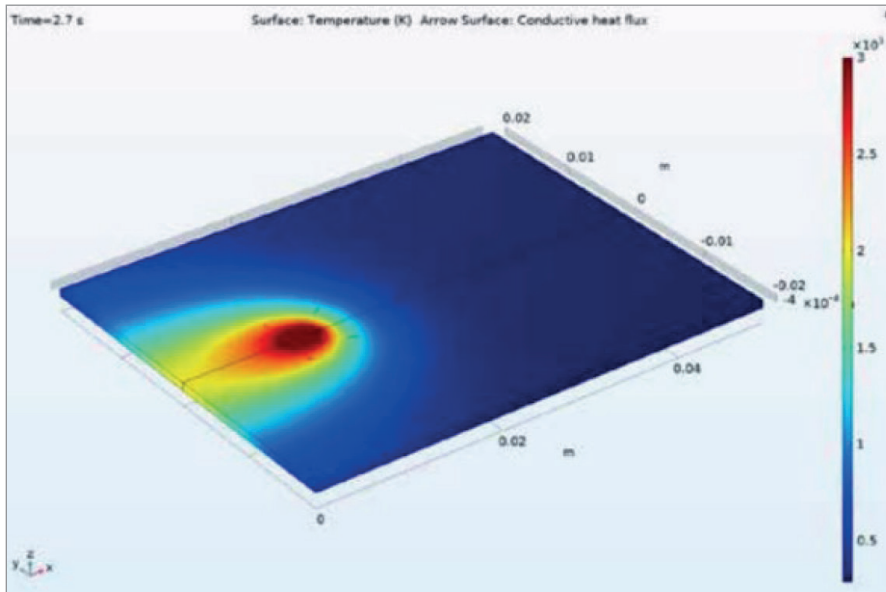


Рис. 15. Тривимірна схема теплообміну при лазерному зварюванні пластин сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr ЛВ потужністю 400 Вт, момент часу 2,7 с (верхня сторона)⁴⁶

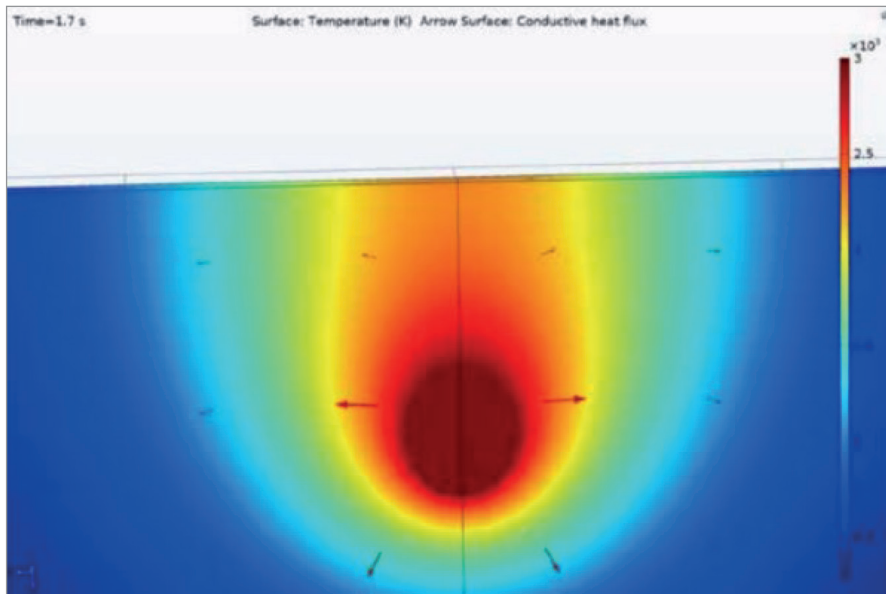


Рис. 16. Тривимірна схема теплообміну при лазерному зварюванні пластин сплаву Nb-15W-5Mo-1Zr ЛВ потужністю 400 Вт, момент часу 2,7 с (нижня сторона)⁴⁷

46 Wei, P. S. (November 21st, 2012). The physics of weld bead defects. *Welding Processes*. URL : <http://dx.doi.org/10.5772/50668>. P. 5, P. 22.

47 Ibid. P. 5, P. 22.

В своїй роботі Lin-Jie Zhang та ін. досліджували вплив модуляції потужності та дефекти пористості при лазерному зварюванні торцевої заглушки до тонкостінного молібденового сплаву⁴⁸. Лазерне зварювання (ЛЗ) демонструє багато переваг, включаючи високу щільність енергії, високу швидкість зварювання, низьку витрату тепла зварного шва та вузьку зону плавлення і зону термічного впливу (ЗТВ), тому воно підходить для зварювання тонкостінних конструкцій з тугоплавких металів⁴⁹. Проте сучасні дослідження показали, що в лазерних зварних з'єднаннях сплаву NC-Mo існують серйозні дефекти пористості, що значно послаблює механічні властивості зварних з'єднань.

В експерименті використовувався сплав NC-Mo, який складався з ВМ Мо та 0,3 мас. % нанорозмірних (NS) частинок Ce_2O_3 , дисперсно розподілених у ВМ. Труби та торцеві заглушки були виготовлені за допомогою порошкової металургії та гарячої прокатки. Крім того, процес виготовлення труби був набагато складнішим, ніж торцевої заглушки. На рис. 17 показана морфологія поверхні зварних з'єднань, отримана на основі схеми експерименту, а на рис. 18 представлена відповідна морфологія поперечного перерізу зварних з'єднань. З рис. 18 видно, що явище розбризкування також було показано на поверхнях зварного кільцевого зварного шва деяких зразків, а ширина зварного шва при різних параметрах модульованого лазерного випромінювання за потужністю показала певну різницю. З рис. 18 видно, що всі поперечні перерізи зварних з'єднань за різних умов мали V-подібну форму, а ЗТВ була відносно широким за умови меншої кількості циклів зварювання.

Правильні сферичні пори різного розміру, показані на рис. 19 (b), (c), (e) і (f). Рис. 19 (b) і (e) відображають однакову морфологію сферичних пор великого розміру. Крім того, рис. 19 (c) і (f) показують однаковий тип морфології сферичних пор малого розміру. Як правило, правильні сферичні пори утворюються через те, що бульбашки не спливають і не випливають із розплавленої ванни до того, як остання затвердіє. Розмір бульбашок,

48 Zhang, L., Liu, J., Pei, J., Ning, J., Zhang, L., Long, J., Zhang, G., Zhang, J., & Na, S. (2019, May). Effects of power modulation, multipass remelting and Zr addition upon porosity defects in laser seal welding of end plug to thin-walled molybdenum alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 41, (pp.197–207). URL : <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.04.001>.

49 Pang, S., Chen, X., Shao, X., Gong, S., & Xiao, J. (2016, July). Dynamics of vapor plume in transient keyhole during laser welding of stainless steel: Local evaporation, plume swing and gas entrapment into porosity. *Optics and Lasers in Engineering*, 82, (pp.28–40). <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.01.019>; Guo, W., Crowther, D., Francis, J., Thompson, A., Liu, Z., Li, L. (2015, November 15). Microstructure and mechanical properties of laser welded S960 high strength steel. *Materials & Design*, 85, (pp.534–548). URL : <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.037>; Lee, H., Han, H., Son, K., & Hong, S. (2006, January 15). Optimization of Nd:YAG laser welding parameters for sealing small titanium tube ends. *Materials Science and Engineering: A*, 415(1–2), (pp.149–155). URL : <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.09.059>; Tan, C., Yang, J., Zhao, X., Zhang, K., Song, X., Chen, B., Li, L., & Feng, J. (2018, October 5). Influence of Ni coating on interfacial reactions and mechanical properties in laser welding-brazing of Mg/Ti butt joint. *Journal of Alloys and Compounds*, 764, (pp.186–201).

розмір ванни розплаву та швидкість зварювання є важливими факторами, які впливають на те, чи можуть бульбашки витікати з ванни розплаву⁵⁰.

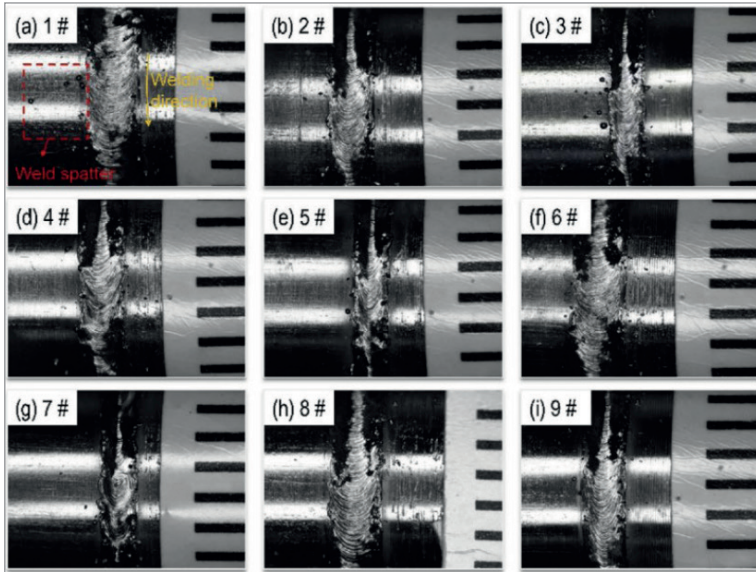


Рис. 17. Морфологія поверхні зварних з'єднань, виготовлених на основі ортогонального тестового плану⁵¹

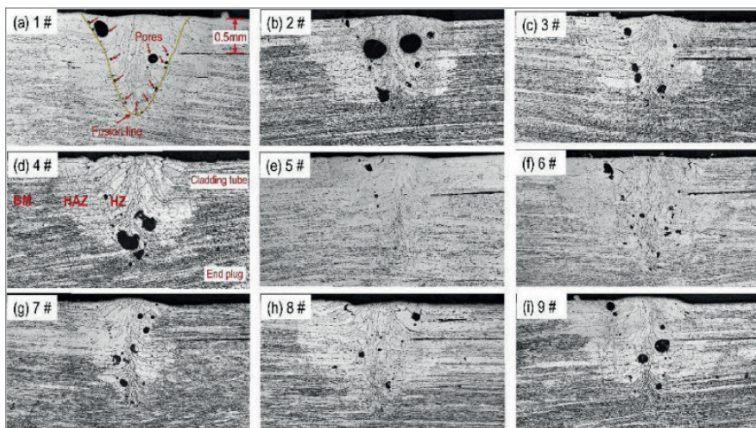


Рис. 18. Морфологія поперечного перерізу зварних з'єднань, виготовлених на основі ортогонального тестового плану⁵²

50 Haboudou, A., Peyre, P., Vannes, A.B., & Peix, G. (2003, December). Reduction of porosity content generated during Nd:YAG laser welding of A356 and AA5083 aluminium alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 363, (pp.40–52). URL : [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00637-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00637-3); Panwisawas, C., Perumal, B., Ward, R.M., Turner, N., Turner, R.P., & Brooks, J.W. (2017, March). Keyhole formation and thermal fluid flow-induced porosity during laser fusion welding in titanium alloys: experimental and modelling. *Acta Mater*, 126, (pp.251–263). URL : <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.12.062>; Sun, J., Nie, P., Feng, K., Li, Z.G., Guo, B.C., & Jiang, E. (2017, October). The elimination of pores in laser welds of AISI 304 plate using different shielding gases. *Journal Mater Process Tech* 2017, 248:(pp.56–63). URL : <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.05.011>.

51 Tan, C., Yang, J., Zhao, X., Zhang, K., Song, X., Chen, B., Li, L., & Feng, J. (2018, October 5). Influence of Ni coating on interfacial reactions and mechanical properties in laser welding-brazing of Mg/Ti butt joint. *Journal of Alloys and Compounds*, 764, (pp. 197–207, P. 25).

52 Ibid.

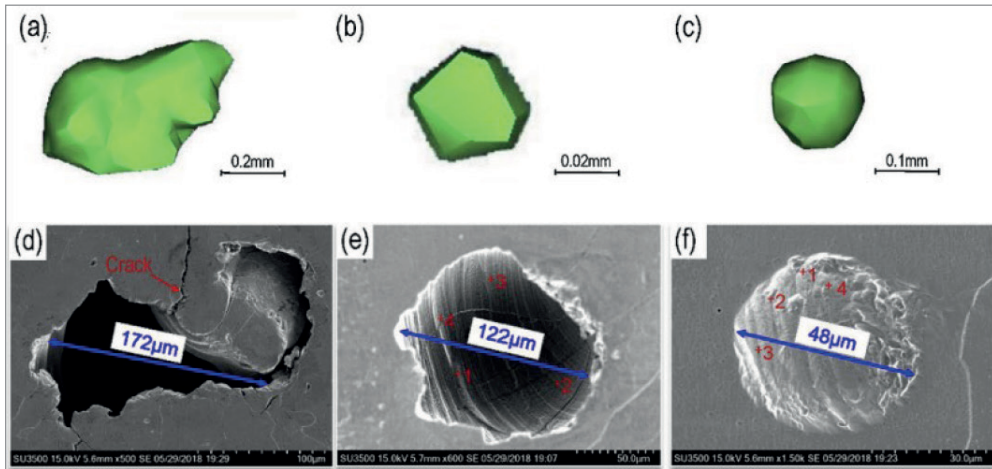


Рис. 19. 3D-реконструкція та реальна картина трьох різних морфологій пор у лазерних зварних з'єднаннях⁵³

Авторами було досліджено механізм утворення та заходи контролю дефектів пористості в з'єднанні тонкостінної труби та торцевої заглушки зі сплаву NC-Mo, звареного лазером. З даної роботи можна зробити наступні висновки:

- 1) Існують два типи дефектів пористості в лазерному зварному з'єднанні сплаву NC-Mo, тобто пори великого розміру, викликані замковою щілиною, неправильної форми, і регулярні сферичні пори, викликані металургією, невеликого розміру. Поява великої кількості спричинених металургією пор у лазерному зварному з'єднанні сплаву NC-Mo було пов'язано з тим, що зона зварювання містила домішкові елементи O та H.
- 2) За умови фіксованого загального часу зварювання збільшення швидкості зварювання (тобто збільшення циклів зварювання) може значно зменшити коефіцієнт пористості ЗТВ, і особливо пористість великого розміру з неправильною формою значно зменшується. В експериментальних умовах, коли кількість циклів зварювання зростає з 2 до 8, коефіцієнт пористості ЗТВ знизився з приблизно 1,00 % до приблизно 0,48 %. Завдяки аналізу можна зробити висновок, що збільшення часу переплавлення було сприятливим для відтоку газу в басейні розплаву та очищення металів у ЗТВ, таким чином дозволяючи зменшити коефіцієнт пористості зварного з'єднання.

⁵³ Tan, C., Yang, J., Zhao, X., Zhang, K., Song, X., Chen, B., Li, L., & Feng, J. (2018, October 5). Influence of Ni coating on interfacial reactions and mechanical properties in laser welding-brazing of Mg/Ti butt joint. *Journal of Alloys and Compounds*, 764, (pp. 197–207, P. 25).

- 3) Метод мікролегування шляхом додавання цирконія до ЗТВ може значно усунути пори малого розміру та змінити кількість пор неправильної форми з великим розміром. В умовах експерименту після додавання незначної кількості елемента Zr у ЗТВ коефіцієнт пористості зварного з'єднання знизився приблизно до 0,35 %. За допомогою аналізу можна зробити припущення, що Zr переважно прореагував з О в розплавленому басейні з утворенням ZrO_2 , таким чином перешкоджаючи утворенню леткого MoO_2 . Таким чином, дефекти пористості у ЗТВ значно зменшилися після додавання елемента Zr.

Висновки

1. Встановлено, що стикове з'єднання утворює набагато міцніше з'єднання, ніж внапуск. Більш міцному з'єднанню сприяє більший об'єм звареної нержавіючої сталі AISI 304 на стикових з'єднаннях. Однак силу з'єднання внапуск можна збільшити, забезпечуючи більшу глибину проникнення шва.
2. InvarTM забезпечує більш надійне з'єднання, ніж нержавіюча сталь AISI 304. Також зварена нержавіюча сталь AISI 304 не може досягти модуля міцності та пружності самої нержавіючої сталі AISI 304.
3. Сучасні дослідження показали, що в лазерних зварних з'єднаннях сплаву NC-Mo існують серйозні дефекти пористості, що значно послаблює механічні властивості зварних з'єднань.
4. Метод мікролегування шляхом додавання цирконія до ЗТВ може значно усунути пори малого розміру та змінити кількість пор неправильної форми з великим розміром.

DOI: 10.51587/9798-9866-95952-2024-018-169-192