

ВПЛИВ ДИНАМІЧНОГО ШАРУ РІДКОГО РОЗПЛАВУ НА ФОРМУВАННЯ З'ЄДНАНЬ ПРИ ПРЕСОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ТРУБ МАГНІТОКЕРОВАНОЮ ДУГОЮ

В.С. Качинський¹, D. Allford², В.І. Клименко¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: vskweld@gmail.com

²ARC SPECIALTIES, 1730 Stebbins Drive, Houston, TX 77043-2807 USA. E-mail: dan@arcspecialties.com

Наведено результати експериментальних і теоретичних досліджень процесу пресового зварювання магнітокерованою дугою (ПЗМД) товстостінних труб із вуглецевих і високоміцних трубних сталей. Встановлено, що визначальним чинником формування якісного зварного з'єднання є кероване формування та утримання в зазорі між торцями труб суцільного шару рідкого розплаву в період, що безпосередньо передус осадженню. Показано, що керований рух дуги у зовнішньому магнітному полі забезпечує рівномірний нагрів по периметру та товщині кромок, знижує локальні перегріви та відхилення від оптимальних значень температурного поля та мікроструктури ЗТВ. Виявлено режим комбінованого дуго-електроконтактного нагрівання, за якого рідкі контакти великої площі підтримують суцільний розплав навіть при зварюванні труб зі стінкою, що перевищує діаметр активних плям дуги. Експериментально підтверджено, що зварні з'єднання труб діаметром до 320 мм і товщиною стінки до 16 мм зі сталей X70, X80, 09Г2С, 35, STPG410 та 01Star520 мають характеристики міцності та пластичності на рівні основного металу, а значення ударної в'язкості за температур до -40°C становлять не менше 80 % від його рівня. Процес реалізується без застосування захисних газів і подальшої термічної обробки. Бібліогр. 23, рис. 12.

Ключові слова: пресове зварювання магнітокерованою дугою (ПЗМД), товстостінні труби, кероване магнітне поле, рідкий розплав, зона термічного впливу, ударна в'язкість

Вступ. Забезпечення стабільної якості зварних з'єднань неповоротних стиків сталевих труб за високої продуктивності та мінімального впливу людського чинника є одним із ключових завдань для підприємств енергетичного, нафтогазового та машинобудівного комплексів. Особливо гостро ця проблема постає під час зварювання товстостінних труб і трубчастих деталей з товщиною стінки понад 5 мм із високоміцних сталей, де навіть незначні відхилення температурного режиму та умов деформації призводять до суттєвої варіабельності структури й механічних властивостей зварних з'єднань.

Пресове зварювання магнітокерованою дугою належить до високопродуктивних способів зварювання тиском і поєднує концентрований дуговий нагрів із керованим переміщенням джерела тепла у зовнішньому магнітному полі [1–7]. Галузі, де вже застосовується процес ПЗМД: будівництво трубопроводів для систем термічної стабілізації ґрунту за температури навколишнього середовища до -40°C — зварено понад 8 тис. км трубопроводів діаметром до 100 мм, що підтримують у мерзломому стані загалом 25 млн м^3 ґрунту на площі 2,5 млн м^2 ; будівництво тепличних комплексів зварено понад 100 гектарів труб малого діаметра до 70 мм, труб із фітингами для різного використання, виробництво карданних валів тощо в автомо-

більній індустрії, трубчастих корпусів гідравлічних циліндрів та ін. деталей [8–10].

Мета роботи – проведення досліджень із наступним експериментальним обґрунтуванням впливу динамічного шару рідкого розплаву в процесі зварювання на формування з'єднань та розроблення технології ПЗМД труб і трубчастих деталей діаметром до 320 мм і товщиною стінки до 16 мм із високоміцних сталей, адаптованої до умов монтажних і стаціонарних робіт.

Фізичні основи процесу ПЗМД. Суть процесу ПЗМД (рис. 1) полягає в нагріві торців зварюваних труб дуговим розрядом, що переміщується в зазорі під дією зовнішнього магнітного поля, з подальшою осадкою нагрітих торців і формуванням з'єднання у твердій фазі [11–15].

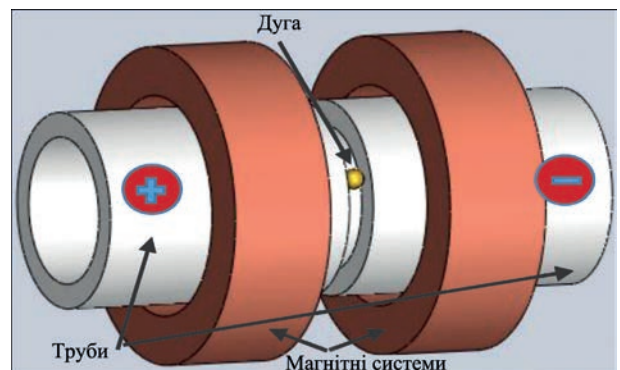


Рис. 1. Схема процесу ПЗМД труб

© В.С. Качинський, D. Allford, В.І. Клименко, 2026

Ця стаття у відкритому доступі за ліцензією CC BY-NC-ND <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Рух дуги визначається дією електродинамічних сил, що виникають унаслідок взаємодії струму дуги I з індукцією магнітного поля B . Радіальна й аксіальна складові магнітного поля та зварювальний струм формують сили, які забезпечують як обертальний рух дуги по периметру труб, так і її поперечні коливання між внутрішньою та зовнішньою поверхнями кромок. Важливу роль при цьому відіграє феромагнітна маса труб, яка впливає на розподіл магнітного поля та сприяє стійкому зміщенню дуги після збудження в зону внутрішніх кромок торців труб [16].

Інтенсивність нагріву торців визначається струмом дуги, швидкістю її руху та характером сканування. На відміну від стаціонарної дуги, швидко переміщувана під впливом зовнішнього магнітного поля дуга формує усереднене температурне поле зі зниженим максимумом температури в приконттактних шарах, що принципово важливо під час пресового зварювання високоміцних трубних сталей.

Вплив рідкого розплаву на формування зварного з'єднання. Як і за інших методів зварювання тиском, для отримання якісних з'єднань при ПЗМД необхідно сформувати задане температурне поле та забезпечити захист нагрітих торців деталей. Вважається [16], що частковий захист від окиснення в зазорі створюють пари металу, які утворюються під час нагрівання дугою. Розроблені в ІЕЗ технології ґрунтуються на концепції, відповідно до якої при ПЗМД, так само як і при контактному стиковому зварюванні оплавленням [17], основною умовою отримання якісних з'єднань є формування на торцях зварюваних деталей у період, що передуює осадженню, шару розплавленого металу та оксидів легуювальних елементів, які входять до його складу. Розплав, унаслідок нагрівання дугою, яка швидко переміщується, має температуру, вищу за температуру плавлення зварюваного матеріалу. Експериментально встановлено, що при контактному оплавленні сталей температура розплаву досягає $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$, а його кристалізація відбувається в інтервалі $1700\ldots 1370\text{ }^{\circ}\text{C}$. Якщо деформація нагрітих торців деталей здійснюється в межах цього температурного інтервалу, розплав повністю видавлюється зі стику разом з оксидними структурами. Тривалість інтервалу кристалізації розплаву $t_{\text{ж}}$ залежить від теплофізичних властивостей зварюваних матеріалів і прийнятої технології зварювання:

$$t_{\text{ж}} = \frac{\delta_{\text{ж}} \gamma q}{\lambda \frac{d\theta}{dx_{x=0}}}; \quad (1)$$

де $t_{\text{ж}}$ – тривалість кристалізації; $\delta_{\text{ж}}$ – товщина шару розплаву; $\frac{d\theta}{dx_{x=0}}$ – градієнт температурного поля у

приконттактному шарі; λ – коефіцієнт теплопровідності; q – тепловміст розплавленого металу за температур, що перевищують температуру його плавлення.

Під час вибору технології зварювання існує можливість варіювати умови нагрівання труб і частково величину $\delta_{\text{ж}}$. Найбільш сприятливі умови для формування якісного зварного з'єднання реалізуються за забезпечення достатньої товщини шару розплаву та оптимального градієнта температурного поля у приконттактному шарі, що дозволяє здійснити деформацію торців у межах інтервалу кристалізації. За таких умов розплавлений метал разом з оксидними включеннями ефективно видавлюється зі стику, забезпечуючи очищення зони з'єднання та формування однорідної дрібнозернистої структури з підвищеними механічними властивостями.

Експериментальними дослідженнями з використанням високошвидкісної відеозйомки встановлено, що в процесі нагріву на торцях труб формується шар рідкого розплаву, який рухається під впливом та в одному напрямку з дугою (рис. 2), товщина якого під час ПЗМД може досягати $0,6\text{ мм}$ і більше (рис. 3).

У міру зростання температури розплав утримується на поверхні торців силами поверхневого

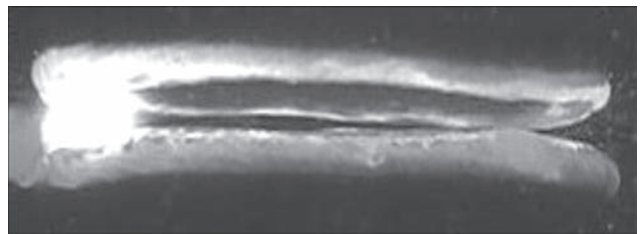


Рис. 2. Формування на торцях рідкого розплаву під дією руху дуги

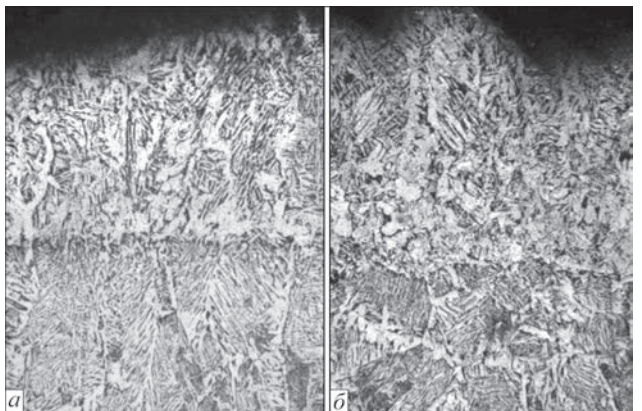


Рис. 3. Структура литого металу на катоді (а) та аноді (б), $\times 200$

натягу, а за досягнення критичної товщини починає переміщуватися синхронно з дугою. Рух розплаву зумовлений спільною дією електродинамічних сил і газодинамічного тиску в дуговому зазорі. Цей рух призводить до інтенсивного перемішування розплаву, його оновлення та вирівнювання по периметру й товщині кромок труб.

Із використанням швидкісної відеозйомки (5000 кадрів/с) досліджено процес формування розплаву на торцях труб під час нагрівання рухомою дугою в інтервалі, що безпосередньо передуює осадженню. На рис. 4 наведено серію високошвидкісних кадрів процесу формування динамічного шару розплавленого металу в дуговому зазорі труб у режимі дугового нагрівання. Видно, що розплав не формує стаціонарну зварювальну ванну, а існує у вигляді тонкого, протяжного та нестійкого шару, який безперервно деформується, витягується вздовж осі зазору та локально розривається під дією теплових, електромагнітних і гідродинамічних сил.

Під дією зовнішнього магнітного поля рідкі контакти здійснюють керований рух по всій площі торців, що забезпечує збереження суцільного рідкого шару до моменту осадження. У процесі еволюції динамічного шару спостерігається його розширення та збільшення площі рідкого контакту між торцями, що призводить до поступового згасання дугового розряду та переходу процесу в режим електроконтактного струмопровідного нагрівання. На фінальних кадрах зафіксовано момент схлопування шару розплаву та встановлення суцільного рідкого контакту перед осадженням. Під шаром розплаву розташований твердий метал, нагрітий до пластичного стану. Після прикладання зусилля осадження відбувається безпосередній контакт і спільна пластична деформація матеріа-

лу, що створює умови для формування суцільного зварного з'єднання.

Отримані візуальні дані підтверджують, що динамічний шар розплаву виконує багатофункціональну роль: екранує торці від окиснення атмосферним киснем, сприяє руйнуванню оксидних плівок та забезпечує винесення продуктів окиснення та домішок із зони контакту. Стан і стабільність цього шару безпосередньо визначають якість формування з'єднання та його механічні властивості.

Отримані результати свідчать, що стан і динаміка розплаву в інтервалі, який безпосередньо передуює осадженню, є визначальними чинниками формування якісних з'єднань при ПЗМД. Динамічний шар розплаву виконує багатофункціональну роль: забезпечує екранування торців від окиснення; сприяє руйнуванню оксидних плівок; забезпечує винесення продуктів окиснення та легувальних домішок із зони контакту. Передчасна кристалізація розплаву до початку деформації призводить до утворення оксидних включень у площині з'єднання та зниження механічних властивостей шва.

Одним із ключових результатів роботи є встановлення зв'язку між рівномірністю шару розплаву та зниженням варіабельності властивостей зварного з'єднання. Під час ПЗМД рівномірний розподіл розплаву по периметру труби призводить до:

- вирівнювання температурного поля в приконтактній зоні;
- зменшення відхилень ширини ЗТВ;
- формування однорідної дрібнозернистої структури по лінії з'єднання;
- зниження варіабельності мікротвердості й підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань.

На рис. 5 наведено розподіл температурного поля у зоні нагрівання під час зварювання труб із високоміцних сталей методом ПЗМД. Температу-

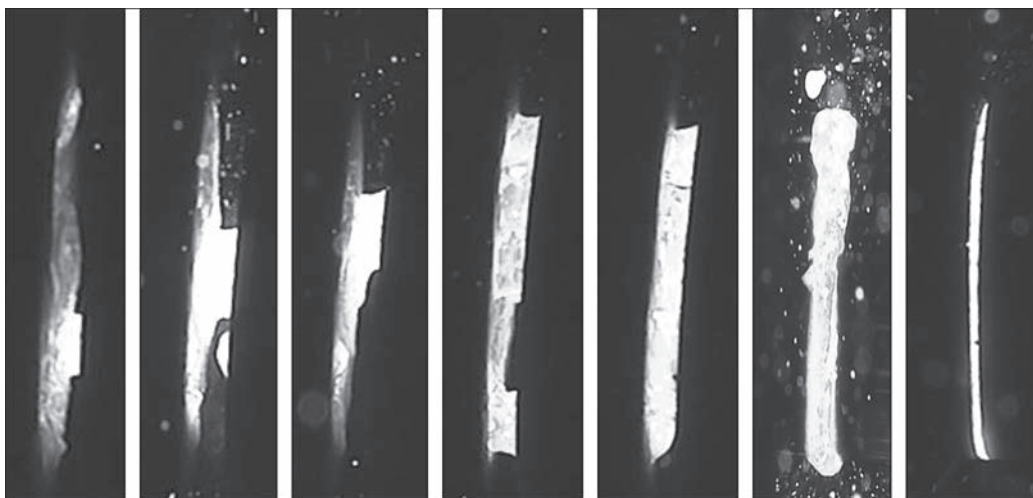


Рис. 4. Послідовність кадрів утворення, еволюції та схлопування динамічного шару розплаву між торцями труб перед і під час осаджування

ра нагріву приконтактних шарів металу на відстані 2 мм від поверхні оплавлення в момент, що безпосередньо передус початку деформації, при ПЗМД не перевищує 1050 °С. Встановлено експериментально, що за умов швидкісного нагрівання зразків сталевих труб до температур понад 1100...1150 °С спостерігається різке зниження показників ударної в'язкості за Шарпі (KCV), що пов'язано з інтенсифікацією процесів росту зерна та формуванням структурних неоднорідностей.

Оскільки в процесі осадження мікроструктура центральної частини шва та зони по лінії з'єднання визначається структурним станом приконтактних шарів, температурний розподіл слід вважати оптимальним для різних способів зварювання тиском з точки зору забезпечення значень KCV зварного з'єднання, близьких до показників основного металу труб, і підвищеної стійкості зварних з'єднань до крихкого руйнування.

Незважаючи на симетричну геометрію процесу, температура в зоні катода дещо перевищує температуру анода, що зумовлено різницею механізмів енергопідведення в приконтактних шарах дуги. На катоді основний внесок у тепловий баланс здійснює бомбардування поверхні позитивними іонами, прискореними в катодному спаді напруги, тоді як на аноді нагрівання зумовлене переважно електронами з меншою енергією. Вищий катодний спад напруги (10...20 В) порівняно з анодним (2...5 В) зумовлює значно більшу щільність теплового потоку на катоді, що призводить до формування вищої локальної температури катода порівняно з анодом [18–20].

Під час процесу ПЗМД стабільний розплав дає змогу реалізувати процес осадження труб в оптимальному температурному інтервалі кристалізації. Це забезпечує ефективне видавлювання рідкої фази й оксидних включень та формування з'єднання в твердій фазі зі зниженою чутливістю до локальних перегрівів.

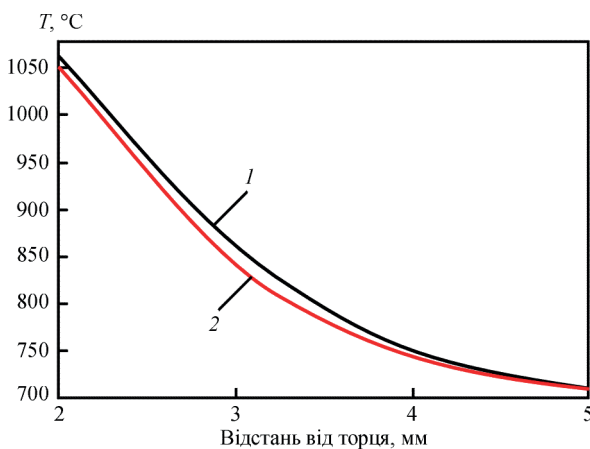


Рис. 5. Формування температурного поля при зварюванні труб: 1 – катод, 2 – анод

Експериментальні дослідження та результати. Зварювання виконували на машинах ПЗМД типів МД-101 для труб діаметром до 57 мм (рис. 6) і МД-205 для труб діаметром до 220 мм (рис. 7).

Дослідження проводили на трубах зі сталей X70, X80, 09Г2С, 35, STPG410, 01Star520 діаметром 42...320 мм і товщиною стінки 4...16 мм. Контроль параметрів процесу містив реєстрацію струму, напруги, швидкості переміщення дуги та зусилля осадження. Механічні випробування зварних з'єднань, виконані згідно з вимогами стандартів Американського нафтового інституту (API) [21] та Американського зварювального товариства (AWS) [22], показали, що границя міцності та пластичні властивості перебувають на рівні основного металу, а значення ударної в'язкості за температур +20 °С, –20 °С і –40 °С становлять не менше 80 % від відповідних показників основного металу [23]. Важливо, що зазначені характеристики досягаються без застосування подальшої термічної обробки. Металографічні дослідження підтвердили формування під час ПЗМД вузької зони термічного впливу (близько 4...10 мм залежно від товщини стінки) і дрібнозернистої структури в центральній частині шва.

Аналіз впливу параметрів процесу на формування з'єднань. Вплив швидкості переміщення дуги. Швидкість переміщення дуги в зазорі між торцями труб є одним із визначальних параметрів



Рис. 6. Зварювальна установка МД101



Рис. 7. Зварювальна установка МД205

процесу ПЗМД. Збільшення швидкості руху дуги в зазорі приводить до більш рівномірного розподілу теплового потоку по периметру та товщині кромок, зменшуючи локальні перегріву та імовірність утворення крупнозернистих структур. Експериментально встановлено, що для труб діаметром 42...320 мм оптимальний діапазон швидкостей руху дуги в період нагріву становить 50...240 м/с. За зазначених значень забезпечується стійке формування розплаву необхідної товщини та його рівномірний розподіл по периметру торців.

Вплив індукції магнітного поля. Індукція зовнішнього керованого магнітного поля визначає характер руху дуги та глибину прогріву кромок труб. За недостатньої індукції магнітного поля рух дуги має нестійкий характер, що супроводжується нерівномірним нагрівом і підвищеною варіабельністю структури зварного з'єднання. Із підвищенням індукції магнітного поля до оптимальних значень досягається оптимальний обертальний рух дуги, який забезпечує рівномірний тепловий режим. Слід зазначити, що надмірне збільшення індукції магнітного поля може призводити до надмірного прискорення дуги та погіршення умов формування розплаву. Отже оптимізація індукції магнітного поля повинна здійснюватися з урахуванням діаметра труб, товщини стінки та хімічного складу сталі.

Вплив зусилля осадження. Зусилля осадження під час ПЗМД є одним із ключових технологічних параметрів, що визначає повноту вичавлювання рідкої фази та оксидних включень із зони з'єднання, а також формування суцільного металевго контакту по всій площі стику. За недостатнього зусилля осадження частина розплаву та оксидних продуктів залишається в площині з'єднання, що призводить до утворення неметалевих включень і зниження механічних властивостей зварного шва.

Збільшення зусилля осадження до оптимальних значень забезпечує інтенсивну пластичну деформацію приконтактних шарів, ефективно вичавлювання рідкої фази за межі стику та руйнування оксидних плівок. Це сприяє формуванню дрібнозернистої структури в зоні з'єднання та зниженню допускних відхилень механічних властивостей по периметру шва.

Водночас надмірне зусилля осадження може призводити до надлишкового витіснення металу, збільшення підсилення шва та локальних структурних неоднорідностей. Таким чином, вибір зусилля осадження при ПЗМД повинен здійснюватися з урахуванням температурного стану приконтактних шарів, товщини стінки труб і умов формування шару рідкого розплаву перед деформацією.

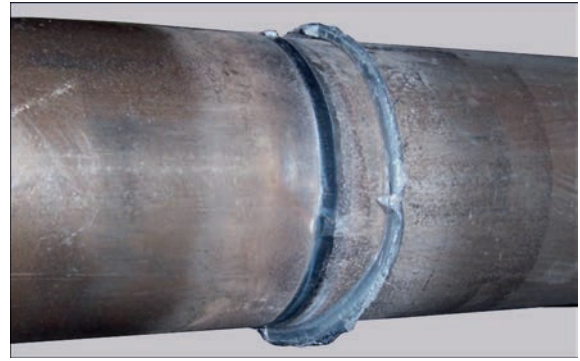


Рис. 8. Труба Ø121×10 мм, сталь 01Star520 після зрізання грати

Формування низькопрофільного підсилення зварного шва під час ПЗМД зварювання тиском труб. Під час зварювання труб зварний шов формується як на зовнішній, так і на внутрішній поверхнях з'єднання. Залежно від умов експлуатації зварюваних конструкцій труб це підсилення може бути видалене механічним зрізанням (рис. 8) або збережене у складі виробу. Однак у низці промислових і будівельних застосувань наявність значного зовнішнього та внутрішнього підсилення обмежує використання пресового зварювання. Такі обмеження зумовлені жорсткими вимогами до гідравлічних і аеродинамічних характеристик трубопроводів та трубчастих деталей, а також до точності співвідносності з'єднань у складальних конструкціях.

Зменшення висоти підсилення зварного шва має принципове значення для розширення сфери застосування зварювання тиском. Проведені дослідження показали (рис. 9), що шляхом керування енергією, яка підводиться до торців труб при ПЗМД, величиною припуску на осадження труб, а також дією зовнішнього магнітного поля в процесі нагрівання та осадки, можна цілеспрямовано впливати на формування геометрії зварного шва.

Встановлено, що за обертання зварювальної дуги під дією зовнішнього магнітного поля зі швидкістю до 200 м/с на торцях труб формується тонкий шар розплавленого металу завтовшки до 0,6 мм. Унаслідок обертового руху дуги розплавлений метал переміщується в тому ж напрямку, рів-

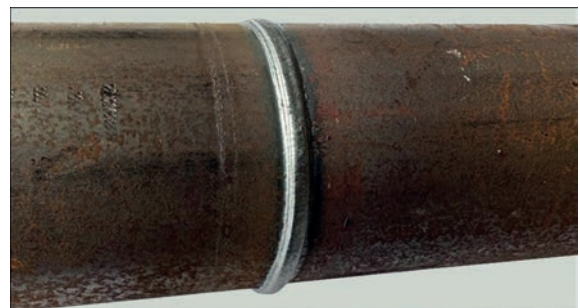


Рис. 9. Технологічно зменшена висота підсилення зварного шва на трубі

номірно покриваючи всю поверхню торців труб. У процесі осадки обертання розплавленого шару зберігається, що забезпечує рівномірний перерозподіл металу в зоні з'єднання та сприяє формуванню низькопрофільного симетричного зварного шва.

Особливості формування мікроструктури при ПЗМД. Формування мікроструктури зварного з'єднання під час ПЗМД визначається сукупним впливом температурного режиму нагріву, швидкості охолодження та умов деформації в період осадження. Завдяки відносно низькій температурі при контактних шарів і високій швидкості теплового циклу при ПЗМД створюються умови для формування дрібнозернистої структури з рівномірним розподілом фаз.

Металографічні дослідження, проведені на зварних з'єднаннях сталевих труб $\varnothing 121 \times 10$ мм зі сталі 01Star520, показали, що по лінії з'єднання формується переважно ферито-перлітна структура. У центральній частині шва спостерігається дрібнозерниста структура (8–9 бал), що позитивно впливає на поєднання міцності та ударної в'язкості. Розмір феритного зерна відповідає 9-му балу за стандартною шкалою зернистості. Мікротвердість металу в зоні з'єднання становить $HV1 - 2210 \dots 2450$ МПа (рис. 10). Ділянка перегріву зони термічного впливу вирізняється ферито-перлітною структурою. Ферит переважно має пластинчасту морфологію; перліт присутній у незначній кількості у складі ферито-перлітної суміші, а також у вигляді окремих виділень. Розмір колишнього аустенітного зерна відповідає № 5–6. Ширина ділянки перегріву становить близько 700 мкм. Мікротвердість у цій зоні знаходиться в межах $HV1 - 2280 \dots 2530$ МПа (рис. 10).

Ділянка повної перекристалізації має дрібнозернисту ферито-перлітну структуру, розмір зерна відповідає 9-му балу. Мікротвердість у цій зоні становить $HV1 - 2210 \dots 2280$ МПа (окремі значення — до 2300 МПа) (рис. 11).

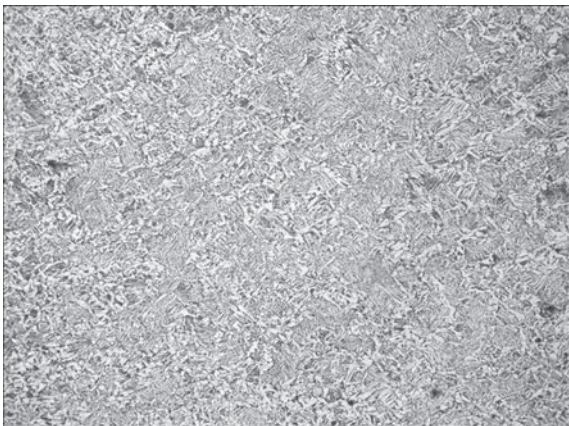


Рис. 10. Лінія зварного з'єднання, зона перегріву, $\times 100$



Рис. 11. ЗТВ, ділянка повної перекристалізації, $\times 100$

Основний метал вирізняється текстурою прокатки та ферито-перлітною структурою. Розмір зерна відповідає 8-му балу. Мікротвердість основного металу становить $HV1 - 1990$ МПа (рис. 12).

Структура металу в зоні підсилення вирізняється крупнозернистою структурою порівняно з центральною частиною зварного з'єднання, розмір колишнього аустенітного зерна відповідає № 3–4. Структура ферито-перлітна, ферит переважно пластинчастий, з незначною кількістю фериту Відманштеттена. Мікротвердість у зоні підсилення становить $HV1 - 2210$ МПа.

У межах підсилення чітко проявляється смуга лінії з'єднання, що вирізняється дрібнозернистою феритною структурою. Розмір феритного зерна відповідає 8-му балу, мікротвердість знаходиться в межах $HV1 - 2060 \dots 2210$ МПа.

Вплив ПЗМД на експлуатаційні властивості зварних з'єднань. Високі показники ударної в'язкості зварних з'єднань, виконаних ПЗМД, мають принципове значення для експлуатації трубопроводів в умовах низьких температур і динамічних навантажень. Експериментально встановлено, що зварні з'єднання зберігають не менше 80 % від ударної в'язкості основного металу за температур випробувань до -40 °С. Таке поєднання властивостей досягається завдяки зниженню перегріву мета-

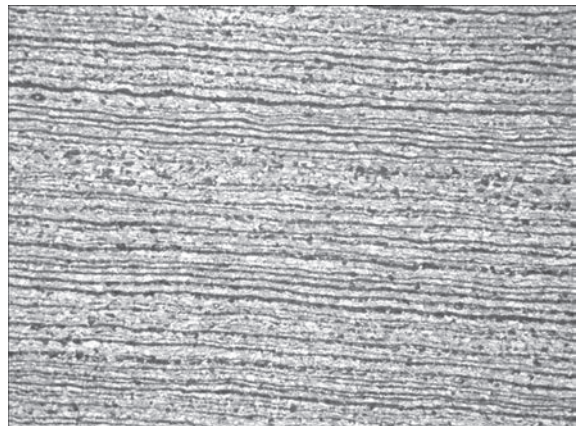


Рис. 12. Структура основного металу, $\times 100$

лу, вузькій зоні термічного впливу та відсутності протяжних зон структурного розміщення. У результаті підвищується надійність зварних з'єднань та їхня стійкість до крихкого руйнування.

Обговорення результатів. Результати досліджень показали, що стабільність і відтворюваність властивостей зварних з'єднань при ПЗМД визначається насамперед станом рідкого розплаву в зазорі між торцями труб у період, що передуює проведенню осадки. Саме стабільний за товщиною шар розплавленого металу забезпечує рівномірний тепловий режим, захист приконттактних поверхонь від окиснення та умови для повного видавлювання оксидів і забруднень під час осадки.

На практиці це означає, що якість з'єднання залежить не від максимального струму або потужності дуги, а від здатності процесу сформувати та утримувати суцільний рідкий шар на торцях. За рахунок керованого руху дуги у зовнішньому магнітному полі забезпечується рівномірний розподіл тепла по периметру та товщині кромок, що зменшує локальні перегріву та запобігає утворенню крупнозернистих ділянок.

Виявлено, що за певного співвідношення ширини зазору, швидкості руху дуги та індукції магнітного поля в зазорі формуються рідкі контакти значної площі. У цьому режимі дуга частково або повністю гасне, а нагрів реалізується як струмопровідний електроконтактний. Такий комбінований тепловий режим дозволяє зберігати суцільний шар розплаву навіть при зварюванні труб зі стінкою, що перевищує діаметр активних плям дуги, і є ключовим для розширення технологічних можливостей ПЗМД.

Отримані температурні поля підтверджують, що приконттактні шари металу перед осадженням перебувають в оптимальному інтервалі температур, достатньому для пластичної деформації, але без перегріву. Це безпосередньо пояснює вузьку зону термічного впливу, малий розкид мікротвердості та високі значення ударної в'язкості зварних з'єднань.

Таким чином, для забезпечення стабільної якості при ПЗМД необхідно керувати не лише струмом і напругою, а насамперед параметрами, що визначають стан розплаву: швидкістю руху дуги, індукцією магнітного поля, шириною зазору та моментом осадження. Саме контроль цих параметрів дозволяє реалізувати відтворюваний процес зварювання товстостінних труб із високоміцних сталей у виробничих умовах.

Перспективи розвитку технології ПЗМД. Подальший розвиток технології ПЗМД пов'язаний із удосконаленням систем керування магнітним по-

лем та автоматизацією контролю параметрів процесу в реальному часі. Використання адаптивних алгоритмів керування дасть змогу підтримувати стабільність відтворення зварних з'єднань і розширити діапазон зварюваних матеріалів. Перспективним напрямом є застосування ПЗМД для зварювання труб і трубчастих деталей із термічно зміцнених і легованих сталей нових поколінь, а також дослідження можливостей технології під час зварювання різномірних матеріалів.

Висновки

Встановлено вплив стабільного за товщиною динамічного шару рідкого розплаву на торцях труб у початковий період осадження на формування зварних з'єднань під час пресового зварювання труб дугою керованою зовнішнім магнітним полем.

Показано, що керований рух дуги у зовнішньому магнітному полі забезпечує рівномірний нагрів торців труб, товщина яких перевищує діаметр активних плям дуги та знижує варіабельність структури та властивостей зварного з'єднання.

Розроблено та експериментально обґрунтовано алгоритми керування параметрами ПЗМД, які забезпечують зварювання труб без застосування захисних газів і подальшої термічної обробки.

Зварні з'єднання труб із високоміцних сталей, виконані ПЗМД, мають характеристики міцності та пластичності на рівні основного металу та високі показники ударної в'язкості за температур випробувань до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Розроблено технологію ПЗМД труб і трубчастих деталей діаметром до 320 мм і товщиною стінки до 16 мм із високоміцних сталей, адаптовану до умов монтажних і стаціонарних робіт.

Список літератури/References

- Loebner, R. (1979) *Magnetarc welding theory and practice*. The Welding Institute, London, UK, Vol. 1, 29–37.
- Takagi, K., Aracida, F. (1982) Magnetically impelled arc butt welding of gas pipeline. *Metal Construction*, **10**, 542–548.
- Taneko, A., Arakida, F., Takagi, K. (1987) Analysis of arc rotation velocity in magnetically impelled arc butt welding. *Weld. Int.*, **1**, 247–253.
- Steffen, W. (1982) Pressure welding of tubes with a magnetically displaced arc. *Schweißen. Schneid.*, **4**, E70–E72.
- Takagi, K., Otsuka, H., Abakida, F., Myamori, H., Katsuki, M. (1987) *Establishment of optimum welding conditions of magnetically impelled arc butt welding and application to field operation*. IIW, Doc. III-880-1987.
- Chaturvedi, M., Subbiah, A.V., Simion, G. et al. (2023) Critical review on magnetically impelled arc butt welding: Challenges, perspectives and industrial applications. *Materials*, **16**(21), 7054. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16217054>
- Fletcher, L., Stecher, G., Stubbs, C. et al. (2006) MIAB welding of oil and gas pipelines. In: *Vol. 3. Materials and Joining; Pipeline Automation and Measurement; Risk and Reliability; Pts A, B, ASMECD*. Calgary, Alberta, Canada, 643–650.

8. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Kachinskiy, V.S. et al. (2010) Magnetically-impelled arc butt welding of pipes of steel X70. *Australasian Welding J.*, **55**, 20–22.
9. Kachinskiy, V.S., Hiroshi Imaizumi (2012) Magnetically-impelled arc butt welding for manufacture of hollow parts of mass production. *Welding Technology J.*, **60**, 68–73.
10. Kachinskiy, V., Kuchuk-Yatsenko, S. (2021) Method of magnetically impelled arc butt welding for hydraulic cylinder from high-strength steel. *Japan Welding Technology*, **1**, 103–107.
11. Schlebeck, E. (1978) Welding with a magnetically moved arc (MBL Welding): A new means of rationalization. In: *Proc. of the Fourth Intern. Conf., Harrogate, UK, 9–11 May 1978*, 249–256.
12. Kustron, P., Piwowarczyk, T., Korzeniowski, M., Sokołowski, P., Bicz, A. (2020) The detectability of welding defects in MIAB welded thin-walled tubular components by immersion ultrasonic technique. *J. Nondestruct. Eval.*, **39**, 42. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10921-020-00684-3>
13. Norrish, J., Cuiuri, D., Hossain, M. (2005) Modelling and simulation of the magnetically impelled arc butt (MIAB) process for transmission pipeline applications process. In: *Proc. of the Intern. Pipeline Integrity Conf., Sydney, Australia, 7–9 March 2005*.
14. Sato, T., Katayama, J., Ioka, S., Otani, M. (1991) An experimental study of rotational behavior of the arc during magnetically impelled arc butt welding. *Weld. Int.*, **5**, 5–10.
15. Kachinskiy, V., Krivenko, V. (2004) MIAB welding of thick walled pipe ends. *Tube Pipe J.* <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/tubepipeproduction/miab-welding-of-thick-walled-pipe-ends>
16. Kachinskiy, V.S., Krivenko, V.G., Ignatenko, V.Yu. (2002) Magnetically impelled arc butt welding of hollow and solid parts. IIW Doc. III-1208-02. *Welding in the World*, **46(7/8)**, 49–56. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03263390>
17. (1992) *Контактная стыковая сварка оплавлением*. Под ред. С.И. Кучука-Яценко. Киев, Наукова думка. (1992) *Contact butt welding by flashing*. Ed. by S.I. Kuchuk-Yatsenko. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
18. Lancaster, J.F. (1984) *The physics of welding* pergamon press.
19. Beilis, I.I. (2024) The phenomenon of a cathode spot in an electrical arc: The current understanding of the mechanism of cathode heating and plasma generation. *Plasma*, **7(2)**, 329–354. DOI: <https://doi.org/10.3390/plasma7020019>
20. Eager, T.W., Tsai, N.S. (1983) Temperature fields produced by traveling distributed heat sources. *Welding J.*, **62(12)**, 346–355.
21. (2013) API Standard 1104. *Welding of pipelines and related facilities*. American Petroleum Institute.
22. AWS B4.0:2016. *Standard methods for mechanical testing of welds*.
23. Kachynskiy, V., Allford, D., Klymenko, V. (2025) MIAB welding technology of pipes and parts of automotive industry. *The Paton Welding J.*, **8**, 19–28. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2025.08.02>

INFLUENCE OF DYNAMIC LIQUID MELT LAYER ON JOINT FORMATION DURING MIAB WELDING OF PIPES

V.S. Kachinskiy¹, D. Allford², V.I. Klymenko¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: vskweld@gmail.com

²ARC SPECIALTIES, 1730 Stebbins Drive, Houston, TX 77043-2807 USA. E-mail: dan@arcspecialties.com

The results of experimental and theoretical studies of the process of magnetically impelled arc butt (MIAB) welding of thick-walled pipes made of carbon and high-strength pipeline steels are presented. It is established that the key factor in the formation of a high-quality welded joint is the controlled formation and retention of a continuous layer of molten metal in the gap between the pipe ends during the period immediately preceding upsetting. It is shown that the controlled motion of the arc in an external magnetic field ensures uniform heating along the perimeter and through the thickness of the edges, reduces local overheating, and minimizes deviations from the optimal values of the temperature field and the HAZ microstructure. A regime of combined arc–electrical contact heating is identified, in which large-area liquid contacts maintain a continuous molten layer even when welding pipes with a wall thickness exceeding the diameter of the active arc spots. It is experimentally confirmed that welded joints of pipes with diameters up to 320 mm and wall thicknesses up to 16 mm made of steels X70, X80, 09G2S, 35, STPG410, and 01Star520 exhibit strength and ductility characteristics at the level of the base metal, while the impact toughness at temperatures down to –40 °C is at least 80 % of that of the base metal. The process is implemented without the use of shielding gases and without subsequent post-weld heat treatment. 23 Ref., 12 Fig.

Keywords: magnetically impelled arc butt (MIAB) welding, thick-walled pipes, controlled magnetic field, molten metal, heat-affected zone, impact toughness

ORCID

V.S. Качинський – <https://orcid.org/0000-0001-9695-6434>, В.І. Клименко – <https://orcid.org/0000-0002-8709-5924>

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів

АВТОР ДЛЯ ЦИТУВАННЯ

V.S. Качинський

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, Україна, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: vskweld@gmail.com

РЕКОМЕНДОВАНЕ ЦИТУВАННЯ

V.S. Качинський, D. Allford, V.I. Клименко (2026) Вплив динамічного шару рідкого розплаву на формування з'єднань при пресовому зварюванні труб магнітокерованою дугою. *Автоматичне зварювання*, **05**, 22–29.

DOI: <https://doi.org/10.37434/as2026.05.03>

ГОЛОВНА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as>

Отримано 05.02.2026

Отримано у переглянутому вигляді 25.06.2026

Підписано до друку 30.09.2026

Оприлюднено 20.10.2026