

ТЕХНОЛОГІЯ ПРЕСОВОГО ЗВАРЮВАННЯ МАГНІТОКЕРОВАНОЮ ДУГОЮ З ІМПУЛЬСНИМ НАГРІВАННЯМ ТА КОНТРОЛЬОВАНОЮ ОСАДКОЮ

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

У статті наведено результати розробки технології пресового зварювання магнітокерованою дугою, відомої як Magnetically impelled arc butt welding (MIAB welding), із застосуванням імпульсного зварювального струму та контрольованого прецизійного припуску осадки під час формування з'єднань трубних сталей і деталей автомобільної промисловості. Основна увага приділяється зниженню енерговитрат за умови забезпечення високої якості зварних з'єднань. У ході зварювання здійснювався операційний контроль основних технологічних параметрів: зварювального струму, напруги, переміщення та зусилля в момент осадки. Для вивчення процесів, що відбуваються в дуговому проміжку між торцями труб, застосовувалась високошвидкісна відеозйомка з роздільною здатністю до 4500 кадрів/с, а також реєстрація основних параметрів зварювального циклу. Отримані зварні з'єднання були випробувані відповідно до вимог міжнародних стандартів для газо- та нафтопроводів (API, DNV), що дозволило оцінити їх механічні характеристики, надійність і відповідність вимогам щодо промислового застосування. Бібліогр. 20, табл. 4, рис. 17.

Ключові слова: пресове зварювання магнітокерованою дугою, трубні сталі, імпульсний зварювальний струм, осадка, імпульсне нагрівання

Вступ. Пресове зварювання магнітокерованою дугою (ПЗМД), відоме як Magnetically impelled arc butt welding (MIAB welding), є інноваційним процесом, який об'єднує переваги теплової обробки та механічного стикового зварювання сталевих труб і трубчастих деталей. ПЗМД знайшло застосування у різних галузях промисловості завдяки своїй високій продуктивності, стабільності якості зварних з'єднань, а також високому рівню механізації та автоматизації технологічного процесу.

У ході досліджень було встановлено, що вплив термічного та деформаційного циклів із застосуванням імпульсного зварювального струму перед осадкою та виконання контрольованого припуску осадки сприяє формуванню з'єднань з оптимальними характеристиками згідно з технічними вимогами підприємств.

Промислове застосування ПЗМД. До основних переваг процесу належать висока продуктивність, зумовлена потенційно високим рівнем автоматизації, а також зниження вартості виготовлення зварних трубних з'єднань. Цей процес є особливо перспективним для застосування в автомобільній промисловості, на електростанціях, у котельному виробництві, на трубопроводах різного призначення, нафтопереробних і нафтохімічних підприємствах, суднах і в інших галузях, де транспортування рідин і газів здійснюється під високим тиском і температурою, а також де висувуються підвищені вимоги до надійності та точності зварних з'єднань.

Результати наукових досліджень, проведених дослідниками різних країн, визначили основні напрямки використання ПЗМД [1–13]. Завдяки короткому зварювальному циклу та високій відтворюваності якості з'єднань ПЗМД є ефективним рішенням для масового промислового виробництва.

Метод використовується в автомобільній промисловості для з'єднання приводних валів, карданних валів, пневматичних пружин, амортизаторів тощо. Промислове використання в автомобільній індустрії отримали розробки технології та устаткування для Magnetarc зварювання компанії КУКА (Німеччина) та ПЗМД, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України [14–16].

Програма досліджень. Для всебічного вивчення зварювання в широкому діапазоні типорозмірів сталевих труб і трубчастих деталей діаметром 20...300 мм використовувались машини К872, МД-205 та МД101. Зварювання виконувалось на установках, розроблених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Конструкцію дослідної машини К-872 представлено на рис. 1. Основні технічні характеристики експериментальних установок представлені в табл. 1. Марки сталей та їхні механічні властивості наведено в табл. 2–4.

До складу установок К872 та МД205 входять (рис. 2, а): машина зварювальна 1, захист 2, насосна станція 3, гідравлічна система 4, комп'ютеризована система керування 5, джерело зварювального

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

© В.С. Качинський, D. Allford, В.І. Клименко, 2025

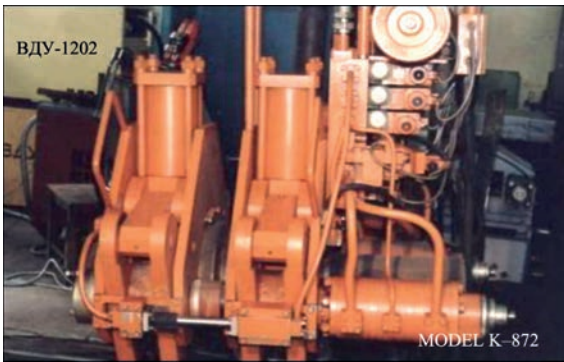


Рис.1. Лабораторна установка К-872

струму 6, пульт керування 7, гідравлічні рукава 8, електричні кабелі 9. На рис. 2, б представлено промислову установку МД205 для зварювання трубчастих деталей корпусів гідравлічних циліндрів.

Конструкцію модернізованої машини МД101 із розробленим гідравлічним приводом для зварювання труб діаметром до 60 мм представлено на рис. 3.

Для проведення робіт було модернізовано устаткування за такими напрямками:

1. Доопрацьовано гідравлічні системи машин з можливістю осадки, контрольованої з заданим припуском.

2. Розроблено систему імпульсного підвищення зварювального струму перед осадкою.

3. Доопрацьовано програму управління та систему реєстрації технологічних параметрів зварювання для виконання вищевказаних розробок.

Блок-схему зварювальної установки після модернізації наведено на рис. 4.

Для забезпечення реалізації алгоритму контролю якості було виконано модернізацію системи керування на базі індустріального комп'ютера. Для живлення дуги використовували три зварювальних випрямляча Lincoln Linc 635SA, під'єднаних паралельно. Також для створення імпульсного струму використовувалися суперконденсатори [17].

Функціонування програми керування та реєстрації технологічних параметрів зварювання. Підготовка виконавчих пристроїв машини до

Таблиця 1. Основні технічні характеристики машин для ПЗМД труб

Марка машини	Діаметр труб, мм	Товщина стінки, мм	Продуктивність, стиків/год	Зусилля осадки, кН	Споживана потужність, кВА	Маса, кг
МД101	10...61	1...5	60	40	30	230
К872	32...220	3...10	60	280	150	2700
МД205	32...240	3...11	60	350	170	2300

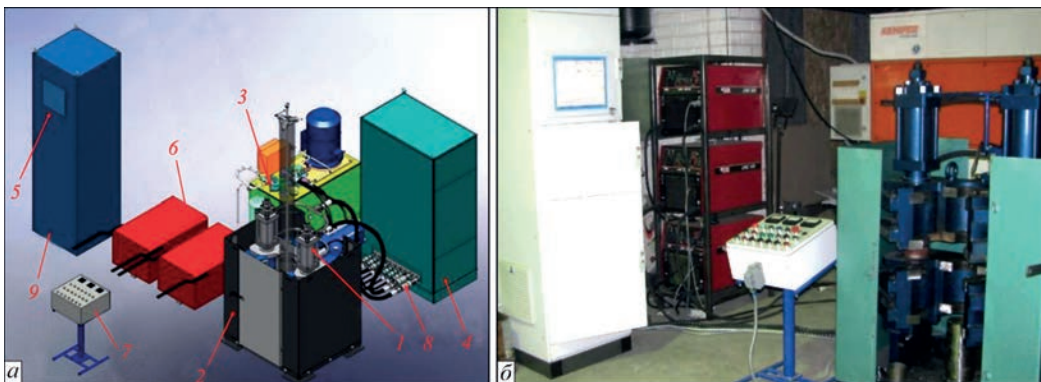


Рис. 2. Установка МД205 для зварювання труб: а – склад обладнання; б – машина МД205 на виробництві

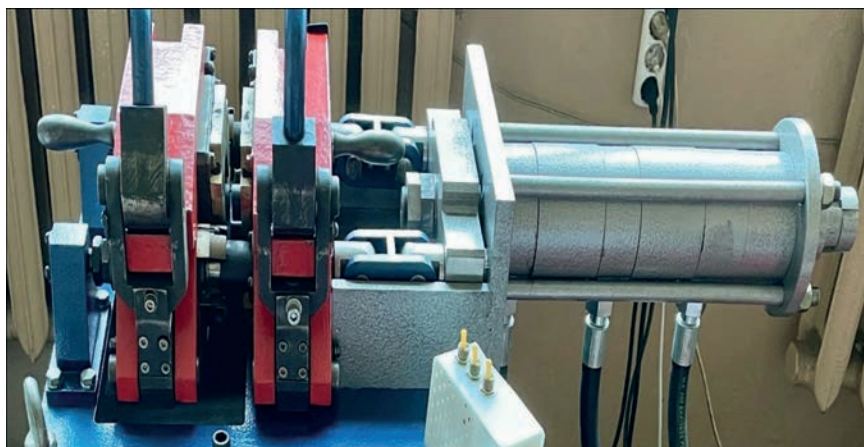


Рис. 3. Машина МД-101

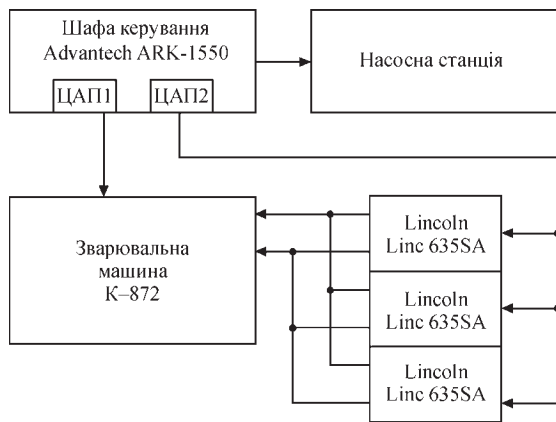


Рис. 4. Блок-схема зварювальної установки

виконання зварювального процесу здійснюється у такій послідовності:

1. увімкнення шафи керування, запуск програми керування та реєстрації параметрів;
2. увімкнення насосної станції та джерела живлення;
3. встановлення труб у стартову позицію для зварювання.

Процес зварювання труб відбувається в автоматичному режимі без використання захисних газів.

Розроблено алгоритм контролю якості зварювання на основі аналізу параметрів процесу, що складається з трьох ключових етапів:

1. нагрівання – період формування температурного поля на торцях труб, що зварюються;
2. імпульс зварювального струму – забезпечення захисного середовища в дуговому проміжку за рахунок інтенсивного оновлення поверхонь;
3. контрольована осадка – формування з’єднання у твердій фазі.

Висновок про якість отриманого зварного з’єднання з певним ступенем імовірності здійснюється на основі логічних правил, сформованих за результатами досліджень технологічних особливостей процесу ПЗМД. Розроблена система керування та реєстрації технологічних параметрів зварювального процесу значно розширює можливості персоналу під час експлуатації зварювального обладнання [18].

Можливим є автоматичний перехід на інший режим зварювання у разі зміни діаметра труб. Під час кожного запуску зварювального циклу система автоматично виконує наступні дії:

- створює файл даних технологічного процесу;
- формує діаграму перебігу зварювання;
- вносить відповідні зміни до файлу звіту (рапорту).

Ці операції виконуються незалежно від ходу зварювального процесу та завершуються після його закінчення. Документування параметрів зварювання здійснюється в автоматичному режимі, що дозволяє:

- оцінити рівень відхилення технологічних параметрів від заданих значень;
- виконати корекцію параметрів у разі необхідності.

Дослідження впливу основних технологічних параметрів на характер процесу зварювання труб. Дослідження процесів, що відбуваються в дуговому зазорі під час нагрівання торців труб електричною дугою, яка переміщується з високою швидкістю (до $V_d = 180$ м/с), проводилися на трубчастих деталях діаметром до 200 мм і товщиною стінки до $\delta = 10$ мм. Для спостереження за перебігом процесу використовувалася високошвидкісна відеозйомка.

Основні параметри процесу – індукція магнітного поля, зварювальний струм і напруга дуги – змінювалися в межах, характерних для режимів, застосовуваних при зварюванні труб зазначеного типу. Одночасно здійснювалася комп’ютерна реєстрація цих параметрів.

Дослідження, виконані в межах цієї роботи, були спрямовані на розробку технології стикового з’єднання труб зі сталей, адаптованих для експлуатації як в польових, так і в стаціонарних умовах. Зварювання здійснювали на зразках із різних марок сталей, зокрема: X60, X70, X80, St35, 09Г2С, JIS STPG410, ASTM A615 Grade 520. Хімічний склад сталей наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Хімічний склад сталей, застосовуваних у дослідженнях, %

Марка сталі	09Г2С	St35	API X70	DIN 17100 St52-3	ASTM A615 Grade 520	JIS STPG410	ASTM A106/API5L
C	0,11	0,39	0,030	0,18	0,159	0,25	0,28
Si	0,75	0,35	0,156	0,52	0,172	0,34	0,25
Mn	1,38	0,75	1,45	1,35	1,19	0,9	1,20
P	0,015	0,035	0,004	0,02	0,012	0,024	0,030
S	0,016	0,04	0,004	0,03	0,006	0,033	0,030
Cu	0,05	0,25	0,30	0,28	0,13	–	0,50
Ni	0,05	0,25	0,14	0,24	0,04	0,001	0,50
Cr	0,25	0,25	0,14	0,24	0,04	0,001	0,50
Mo	0,05	–	0,20	–	0,002	–	0,15
Ti	–	–	0,022	–	0,002	–	–
Nb	–	–	0,062	–	0,002	–	–
Al	0,01	–	–	–	0,03	–	–

Рівномірне нагрівання поверхонь труб, що зварюються, визначається стабільністю переміщення дуги під впливом зовнішнього керуючого магнітного поля (КМП). Швидкість переміщення дуги залежить від таких факторів:

- величини зварювального струму;
- індукції КМП;
- зазору між торцями труб;
- якості підготовки кромок.

Положення дуги на торцях зварювальних деталей визначається як розподілом індукції керуючого магнітного поля, так і впливом на дугу феромагнітних мас сталевих труб. Результати досліджень показали, що при зварюванні сталевих виробів, електрична дуга після збудження на зовнішніх кромках під впливом феромагнітних мас деталей та радіальної складової індукції КМП зміщується в дуговому зазорі на внутрішню область торців (рис. 5).

Установлено, що оптимальний зазор для зварювання труб діаметром 150 мм становить $\delta = 1,9 \pm 0,2$ мм. Результати досліджень показали, що при індукції КМП менше $B_p = 70$ мТл переміщення дуги є нестабільним. Недостатній рівень індукції призводить до коливань стовпа дуги, особливо при горизонтальному розміщенні труб, що викликає локальний перегрів і утворення розплаву металу в нижній частині зварювальної зони. Унаслідок цього формується вирва в зазорі між торцями труб (рис. 6).

Стійке переміщення дуги по торцях труб досягається при радіальній складовій індукції КМП у межах $B_p = 110...180$ мТл (рис. 7, а). За таких умов забезпечується відносно рівномірне нагрівання торців, що є необхідною умовою для пластичної деформації матеріалу під час осадки (рис. 7, б).

Час нагрівання при постійних інших параметрах знаходиться у вузькому діапазоні. Його величина залежить від струму та напруги дуги, причому зміна одного з цих параметрів впливає на зміну іншого. Надмірне нагрівання торців труб може призвести до утворення рідких перемичок між трубами, що порушує стабільне пересування дуги в зазорі.

Розмір дугового зазору значною мірою визначає якість зварних з'єднань. Цей параметр залежить від вимог до стійкості збудження дуги та її стабільного пересування. У досліджуваному діапазоні труб величина дугового зазору, як показали

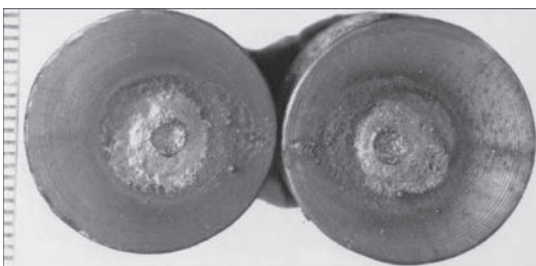


Рис. 5. Зміщення дуги на внутрішню область торців

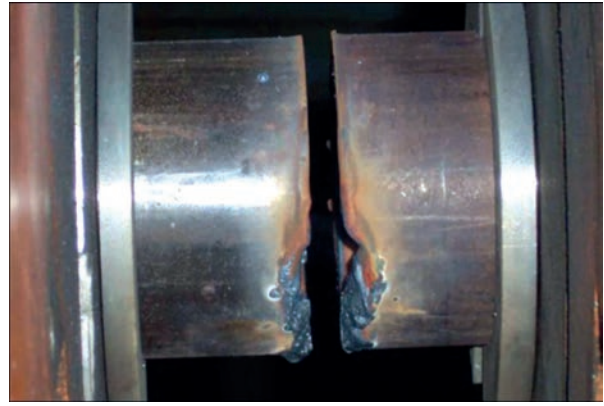


Рис. 6. Вирив розплавленого металу

експерименти, варіюється в межах $\delta = 1,7...2,1$ мм. На рис. 8 наведено фотографії, що ілюструють поведінку дуги в зазорі під час нагрівання торців на різних етапах зварювання труб.

Зварювальний струм дуги складає $I_d = 200...250$ А, напруга дуги $U_d = 25 \pm 2$ В. Після збудження дуги між торцями її швидкість руху під час нагрівання постійно збільшується від $V_d = 50$ м/с, досягаючи до $V_d = 240$ м/с у залежності від діаметра труб (рис. 8, а). У міру підвищення температури торців збільшується товщина розплаву (рис. 8, б), який утримується на поверхні торців силами поверхневого натягу. При досягненні певної товщини розплаву під впливом цих сил обертає дугу вздовж нагрітих торців (рис. 8, в), і починає рухатися в тому ж напрямку. Регульована швидкість цього руху за певних умов може досягати $V = 3$ м/с. Рух розплаву зумовлений дією електродинамічних сил і тиском газу в дуговому зазорі, що утворюється стовпом дуги. Це переміщення сприяє перемішуванню розплавленого шару металу. Перед осадкою шар розплаву рівномірно розподіляється по периметру труби та товщині її кромок (рис. 8, г). У початковий період осадки зазор між торцями зменшується і дуговий розряд припиняється на час закриття зазору (рис. 8, д); між торцями починає формуватися суцільний прошарок розплавленого металу (рис. 8, е), який під дією магнітного поля (подача струму через торці не припиняється) продовжує ру-

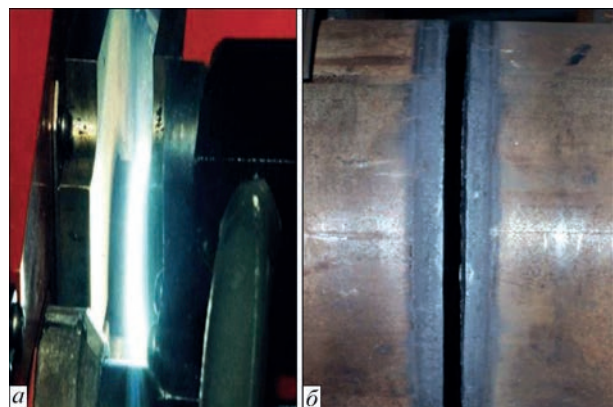


Рис. 7. Процес зварювання труб: а – ПЗМД труб; б – торці труб після нагрівання

хатися круговими траєкторіями. Це сприяє оновленню розплаву та формуванню суцільного прошарку по всьому перерізу труб, що зварюються. У момент закриття зазору розплав видавлюється зі стику, і відбувається деформація нагрітих шарів металу в твердому стані [19].

Значний вплив на характер зсуву активних плям зварювальної дуги мають величина та напрямок індукції КМП. Було встановлено, що в процесі зварювання під дією зовнішнього магнітного поля швидкість дуги при нагріванні досягає $V_d = 120 \dots 140$ м/с залежно від діаметра труб, при цьому спочатку відбувається зміщення катодного потоку плазми стовпа дуги відносно анодного (рис. 9). Дійшовши до анода, катодний потік плазми дуги утворює нову анодну пляму. Відбувається переміщення як анодної, так і катодної активних плям дуги.

З метою дослідження характеру змін лінійної швидкості руху дуги було проведено серію досліджень зі зварювання труб діаметром 121×8 мм, у ході яких варіювалися технологічні параметри перебігу процесу. Зокрема у широких межах змінювався імпульс зварювального струму перед етапом осадки.

На рис. 10 наведено графічний запис змін основних параметрів нагрівання. У прямокутнику на графіку виокремлено ділянку, що охоплює період від моменту початку імпульсного підвищення зварювального струму до початку виконання осадки під струмом. Цю ділянку детальніше представлено на рис. 11, що дало змогу проаналізувати форму імпульсу та характер змін зварювального струму як перед осадкою, так і безпосередньо під час її виконання.

При підвищенні зварювального струму дуги відбувається різке прискорення швидкості пересування дуги (до 240 м/с), що призводить до інтенсивного оновлення поверхонь зварювання та створює захисне середовище. Експерименти показали, що величина струму імпульсу перед осадкою повинна бути вищою за струм нагрівання. На оплавлених торцях залишається відносно рівномірний шар рідкого металу завтовшки до $\delta_p = 0,5$ мм, що сприяє формуванню зварних з'єднань. Встановлено оптимальний струм імпульсу для кожного розміру труб до діаметра 200 мм. Зміни струму імпульсу на $\pm 5\%$ від оптимального істотно не впливають на якість з'єднань.

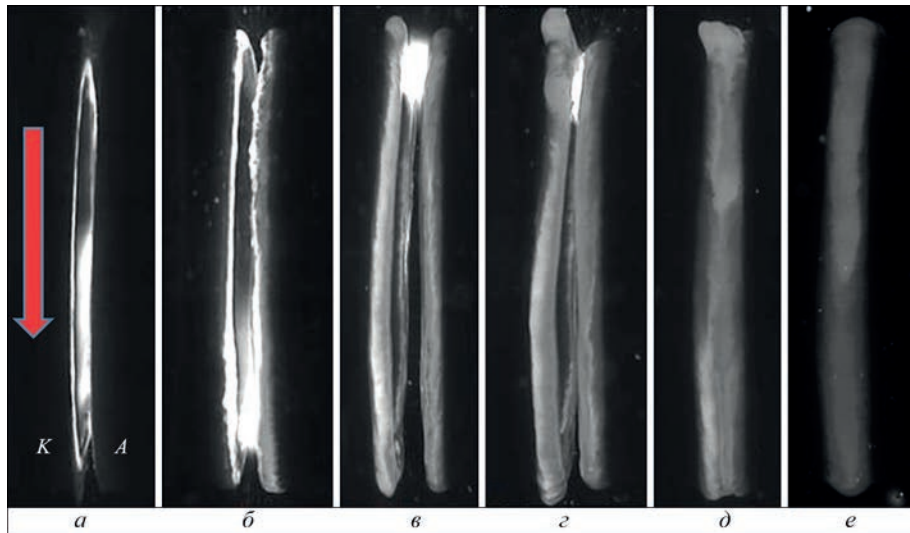


Рис. 8. Стадії зварювання труб: а – початок переміщення дуги під дією КМП; б – формування шару розплаву на торцях труб; в – переміщення розплаву в процесі нагрівання; г – оновлення розплаву перед осадкою; д – початок осадки; е – формування зварного з'єднання

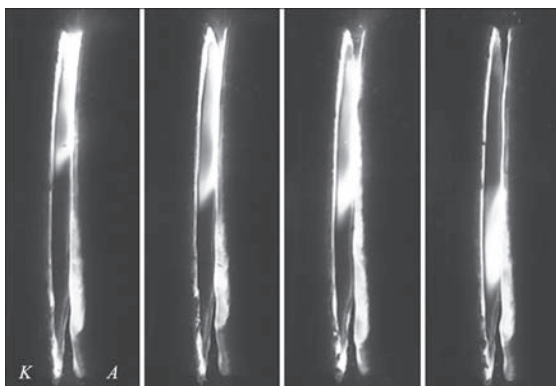


Рис. 9. Рух катодного та анодного потоку плазми стовпа дуги

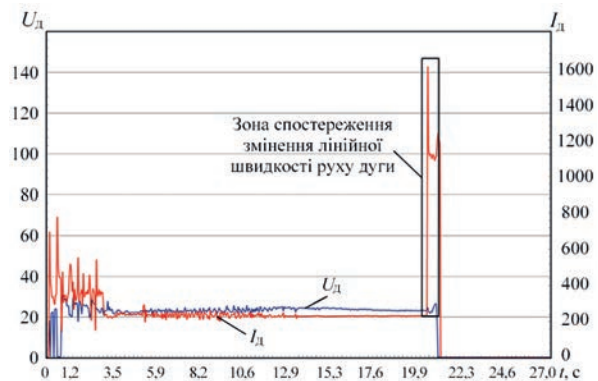


Рис. 10. Основні параметри процесу нагрівання труб

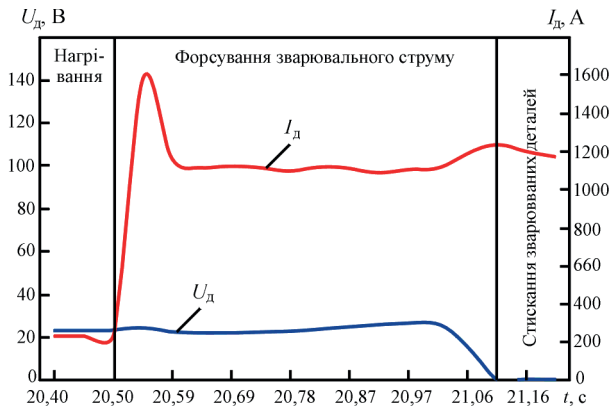


Рис. 11. Імпульс зварювального струму дуги перед осадкою труб

Тривалість імпульсу струму знаходиться в межах $t = 0,2...0,6$ с. При менших ($t < 0,2$ с) значеннях тривалості імпульсу струму дуга, що пересувається, повністю не встигає оновити з поверхонь торців насичений газами шар розплавленого металу. У цьому випадку якість зварних з'єднань низька. Витримка підвищеного значення струму більш ніж $t = 0,7$ с призводить до підвищених витрат нагрітого металу торців труб і зниження якості зварного з'єднання.

Осадка визначається швидкістю закриття дугового зазору між зварюваними торцями труб і формуванням зварного з'єднання. Для цього необхідно забезпечити умови, за яких зберігається рідкий шар металу на торцях і відбувається контрольована деформація зони термічного впливу згідно з заданим припуском. Час кристалізації шару металу на торцях залежить від багатьох факторів, які супроводжують охолодження, що для труб знаходяться в межах $t = 0,01...0,025$ с. Переривання струму на кінцевій стадії процесу нагрівання перед осадкою призводить до окислення торців і кристалізації рідкого шару на торцях труб.

Дослідним шляхом було визначено, що при значеннях швидкості осадки менше ніж $V_{oc} = 40$ мм/с у зварних з'єднаннях спостерігаються оксиди, що значно знижує пластичність і міцність з'єднань.

Наведений обсяг робіт дозволив зробити такі висновки:

- підтримка установчих і електричних параметрів зварювання в межах допустимих величин призводить до отримання якісних зварних з'єднань;
- дефекти по лінії з'єднання (оксиди й матові плями) розміром до 2 мм² належать до дефектів основного металу, які попадають у стик. Як показали випробування, ці дефекти не впливають на якість зварних з'єднань.

Технологія ПЗМД з імпульсним нагріванням і контрольованим припуском осадки для формування зварного з'єднання труб. У процесі виконання зварювання труб, наприкладі труб діаметром 140×8 мм, система дозволяє отримувати графічне уявлення про проходження процесу. Це дає можливість візуально оцінити перебіг процесу зварювання (рис. 12). Зварювальний струм можна розділити на три етапи, а час зварювання – на чотири етапи. Для зварювання труб струм I_1 використовується протягом приблизно $t_1 = 0,5$ с, за якого труби, що зварюються, короткочасно стискаються до короткого замикання та вмикається зварювальний випрямляч; t_2 – це проміжок часу, протягом якого короткозамкнені торці труб відводяться на дуговий зазор, після чого між ними збуджується дуга. На етапі часу t_2 дуга починає обертання в зазорі та нагрівання торців труб, струм дуги $I_2 = 490...510$ А. На етапі часу t_3 зварювальний струм підвищується до $I_3 = 580...600$ А, продовжується нагрівання торців труб. На етапі часу t_4 , струм дуги імпульсно підвищується до $I_4 = 1500$ А, дуга прискорюється та обертається з від-

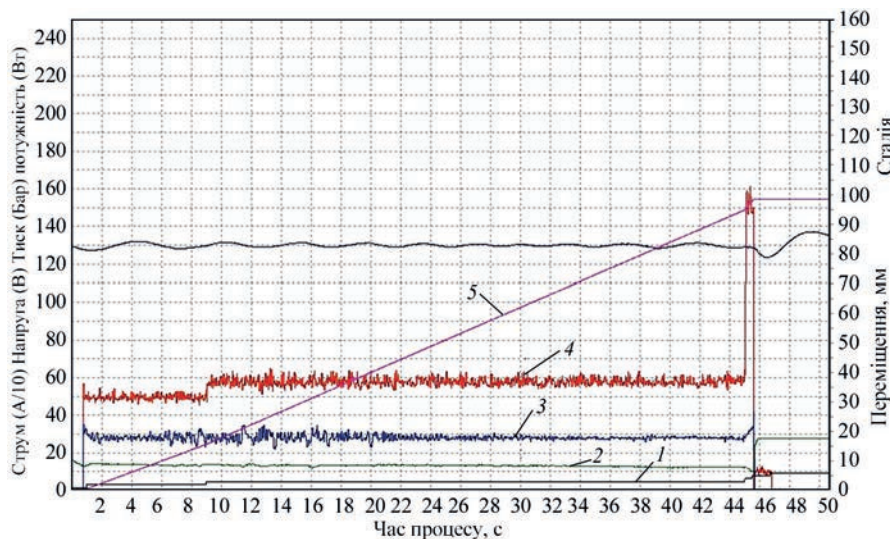


Рис. 12. Діаграма процесу зварювання труб: 1 – положення рухомої частини машини; 2 – ділянка керованої осадки; 3 – напруга дуги; 4 – зварювальний струм; 5 – енергія, накопичена в процесі нагрівання труб

носно високою швидкістю, оновлюючи поверхні нагрітих торців труб. Цикл зварювання завершується контрольованою осадкою з припуском $S = 6,2$ мм. Загальний час ПЗМД зварювання труб діаметром 140×8 мм становить $t = 46$ с.

Формування зварних з'єднань труб при ПЗМД, як і при інших пресових методах стикового зварювання, відбувається внаслідок спільної деформації нагрітих до пластичного стану торцевих поверхонь труб. Рівномірне нагрівання торців є необхідною, проте недостатньою умовою для утворення якісного з'єднання. Одним із ключових параметрів, що впливають на якість з'єднання, є швидкість обертання дуги та тривалість нагріву. Занадто низька частота обертання призводить до нерівномірного теплового поля, утворення локальних зон перегріву або, навпаки, недогріву, що негативно впливає

на структуру зварного шва. Оптимізація цього параметра дозволяє забезпечити стабільність процесу, рівномірний розподіл температури вздовж зони зварювання та знижує ймовірність виникнення внутрішніх дефектів. Якість зварного з'єднання можливо забезпечити навіть без застосування газового захисту за умови, що частота обертання дуги в момент перед осадкою є достатньою для постійного оновлення шару розплаву на всій поверхні торців. Це запобігає кристалізації металу в проміжках часу між проходженням дуги через окремі ділянки, що, у свою чергу, сприяє формуванню однорідного та міцного з'єднання.

Формування зварних з'єднань труб діаметром 140×8 мм, виконаних ПЗМД без контрольованого припуску на осадку, наведено на рис. 13, *а*. На рис. 13, *б* показано поперечний переріз зварного з'єднання. Висота зовнішнього та внутрішнього підсилення складає до 7 мм, що не задовольняє вимогам API стандартів.

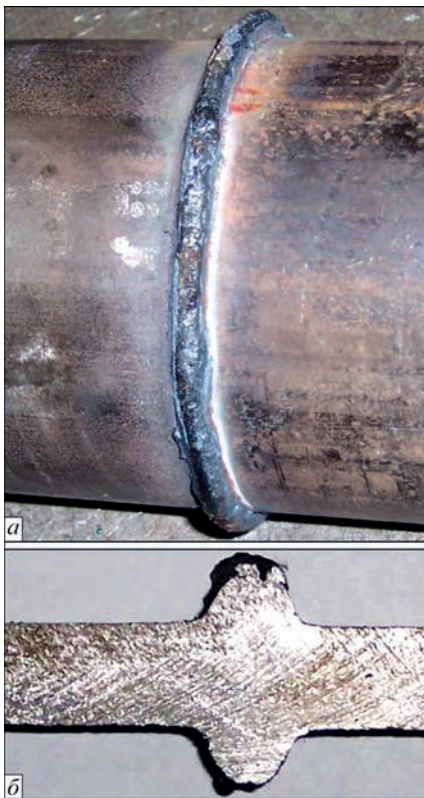


Рис. 13. Формування зварного з'єднання труб без припуску на осадку: *а* – загальний вигляд зварного з'єднання; *б* – поперечний переріз зварного з'єднання

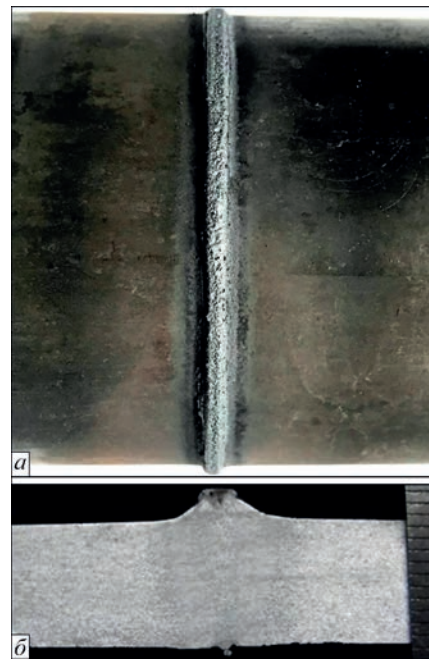


Рис. 14. Формування зварного з'єднання з контрольованою осадкою: *а* – загальний вигляд зварного з'єднання; *б* – поперечний переріз зварного з'єднання

Таблиця 3. Основні технологічні параметри зварювання

Марка сталі	Розмір труб, мм	Час зварювання, с	Зусилля осадки, кН	Величина осадки, мм
09G2S	42/4	14	40,6	3,6
JIS STPG410	60,5/5,5	19	80	4,8
St35	76/16	82	255	12,4
DIN 17100 St52-3	90/5	16	135	4,8
ASTM A615 Grade 520	121/7	27	200	6,7
ASTM A615 Grade 520	121/10	43	278	9,2
API X70	168/7	31	247	6,8
API X70	219/8	38	281	7,7
ASTM A106 API 5L	114,3/6	19**	140	5,7
ASTM A106 API 5L	148,3/6	28	171	5,6

Таблиця 4. Механічні властивості зварних з'єднань труб

Марка сталі	Розмір труб, мм	σ_B , МПа		KCV_{+20} , Дж/см ²		KCV_{-20} , Дж/см ²		KCV_{-40} , Дж/см ²
		Основний метал	Зварне з'єднання	Основний метал	Зварне з'єднання	Основний метал	Зварне з'єднання	Зварне з'єднання
09G2S	42/5	469 ± 10	465 ± 14	56 ± 5	68 ± 10	58 ± 3	69 ± 5	–
JIS STPG410	60/5,5	458 ± 10	456 ± 10	94 ± 4	87 ± 3	96 ± 3	91 ± 4	92 ± 3
St35	89/10	551 ± 14	541 ± 13	60 ± 3	70 ± 19	–	–	–
DIN 17100 St52-3	90/5	498 ± 11	486 ± 7	–	–	–	–	–
API X70	168,6/7,8	551 ± 19	540 ± 8	256 ± 10	189 ± 48	257 ± 9	197 ± 39	–
ASTM A615 Grade520	191/7	651 ± 14	656 ± 22	135 ± 14	119 ± 31	–	–	–
ASTM A106 API 5L	114,3/6	421 ± 14	418 ± 15	–	–	–	–	–
ASTM A106 API 5L	148,3/6	429 ± 12	437 ± 14	–	–	–	–	–

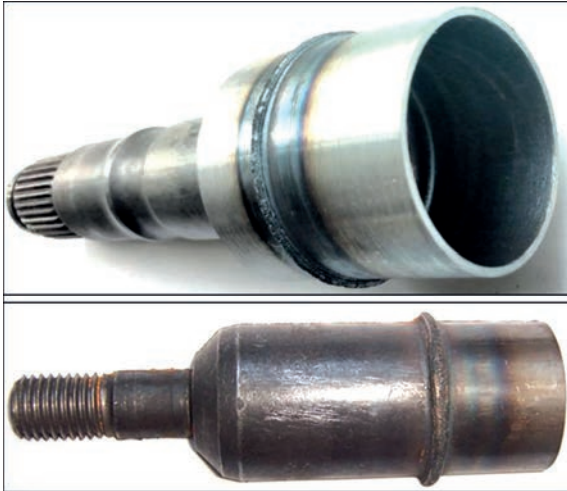


Рис. 15. Деталі автомобільного сортаменту



Рис. 16. Зварювання труб з фітингами для гідравлічних систем будівельних машин



Рис. 17. Зварювання трубопроводів для систем термостабілізації ґрунту: а – зварне з'єднання труби з донцем; система для термостабілізації ґрунту фундаментів будівель (б) та нафтогазових сховищ (в)

Контроль припуску осадки труб після зварювання дозволяє значно зменшити висоту підсилення зварного з'єднання від 1 до 3 мм у залежності від діаметра труб (рис. 14).

У табл. 3 наведено основні технологічні параметри зварювання труб з контрольованою осадкою.

Механічні випробування трубних з'єднань проводились відповідно до вимог стандартів API [20] та DNV. Механічні властивості зварних з'єднань труб показані в табл. 4.

Усі з'єднання зазначених труб, зварених методом ПЗМД без подальшої термічної обробки, продемонстрували ударну в'язкість при температурах

випробувань + 20, – 20 та – 40 °С на рівні не нижче 80 % від відповідних показників основного металу.

Області застосування ПЗМД наведено на рис. 15–17.

Висновки

1. Досліджено вплив феромагнітних мас деталей та радіальної складової індукції КМП на зміщення дуги в зазорі на внутрішню область торців.

2. Визначено, що стійке переміщення дуги по торцях труб досягається при радіальній складовій індукції КМП у межах 110...180 мТл, яка забезпечує відносно рівномірне нагрівання торців труб,

що є необхідною умовою для пластичної деформації під час осадки.

3. Розроблено технологію ПЗМД з імпульсним підвищенням зварювального струму, яка забезпечує зменшення пікових навантажень на електричну мережу.

4. Розроблено та апробовано дослідне ПЗМД устаткування з виконанням контрольованої осадки труб, трубопроводів та порожнистих валів автомобілів.

5. Розроблено технологію ПЗМД з контрольованою прецизійною осадкою для формування підсилення зварного з'єднання до 1...3 мм у залежності від діаметра та товщини стінки труб і трубчастих деталей згідно з вимогами стандарту API 1104.

6. Розроблено комп'ютеризовану систему контролю та реєстрації основних технологічних параметрів ПЗМД у режимі реального часу.

Список літератури/References

- Ganovski, F.J. (1974) The magnetarc welding process. *Welding and Metal Fabrication*, **5**, 206–213.
- Johnson, K.I., Carter, A.W., Dinsdale, W.O., Threadgill, P.L., Wright, J.A. (1979) The magnetically impelled arc butt welding of mild steel tubing. *Weld. J.*, **59**, 17–27.
- Takagi, K., Aracida, F. (1982) Magnetically impelled arc butt welding of gas pipeline. *Metal Construction*, **10**, 542–548.
- Steffen, W. (1982) Pressure welding of tubes with a magnetically displaced arc. *Schweißen. Schneid.*, **4**, E70–E72.
- Edson, D.A. (1982) *Magnetically impelled arc faying surfaces welding of thick wall tubes*. IIW, IM-726–82.
- Kachinskiy, V.S., Krivenko, V.G., Ignatenko, V.Yu. (2002) Magnetically impelled arc butt welding of hollow and solid parts. *Welding in the World*, **46**, 49–56. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03263390>
- Leigh, F., Cec, S., Gabriel, S. (2003) *MIAB welding: Break-through technology for high productivity field welding of pipelines*. APIA National Convention Pipelines – Yesterday, Today and Tomorrow Convened by the Australian Pipeline Industry Association.
- Norrish, J., Cuiuri, D., Hossain, M. (2005) Modelling and simulation of the magnetically impelled arc butt (MIAB) process for transmission pipeline applications. In: *Proc. of the Intern. Pipeline Integrity Conf.*, Sydney, Australia, 7–9 March 2005.
- Iordachescu, D., Georgescu, B., Iordachescu, M., Lopez, R., Miranda, R.M., García-Beltrán, A. (2011) Characteristics of MIAB welding process and joints. *Weld World*, **55**, 25–31. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03263512>
- Vendan, S.A., Manoharan, S., Nagamani, C. (2012) MIAB welding of alloy steel tubes in pressure parts: Metallurgical characterization and non destructive testing. *JMP*, **14**(1), 82–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2011.09.006>
- Kachinskiy, V., Hiroshi Imaizumi (2012) Magnetically-impelled arc butt welding for manufacture of hollow parts of mass production. *Welding Technology J. Japan*, **60**, 68–73.
- Vendan, S.A., Manoharan, S., Buvanashakaran, G., Nagamani, C. (2012) Strength assessment using destructive testing on MIAB welded alloy steel tubes and subsequent techno-economical evaluation. *JMP*, **14**(3), 328–335. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2011.12.001>
- Vendan, S.A., Mundla, S., Buvanashakaran, G. (2012) Feasibility of magnetically impelled arc butt (MIAB) welding of high-thickness tubes for pressure parts. *Mater. Manuf.*, **27**, 573–579. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2011.585488>
- Hagan, D., Riley, N. (1979) MIAB welding. Pt 2: Fabrication of the Fiesta rear axle. *Metal Construction*, **12**, 625, 627–629.
- Hiller, F., Schmidt, M., Breiksch, J. (2003) *Use of the magnetarc welding process in the production of truck cab suspension systems*. ThyssenKrupp Techforum, 40–43.
- Kachinskiy, V.S., Kuchuk-Yatsenko, S.I., Ignatenko, V.Yu. (2010) Magnetically-impelled arc butt welding of automobile parts. *Australasian Welding J.*, **55**, 40–48.
- Kachynskiy, V.S., Allford, D., Drachenko, M.P., Ziakhor, I.V., Klymenko, V.I., Samotryasov, S.M. (2024) Development of the technology of pressure welding with a magnetically impelled arc of small-diameter pipes using supercapacitors. *The Paton Welding J.*, **10**, 3–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2024.10.01>
- Koval, M.P., Kuchuk-Yatsenko, S.I., Kachynskiy, V.S. (2020) System of control, registration of parameters and monitoring in the process of press welding of pipes using magnetically-impelled arc. *The Paton Welding J.*, **6**, 36–40. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.06.07>
- Kachinskiy, V.S., Kuchuk-Yatsenko, S.I. (2017) Joint formation in magnetically-impelled arc butt welding of thick-walled pipes from high-strength steels. *The Paton Welding J.*, **8**, 39–45. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.08.06>
- (2013) API Standard 1104. *Welding of pipelines and related facilities*. American Petroleum Institute.

PRESS MAGNETICALLY IMPELLED ARC BUTT WELDING TECHNOLOGY WITH PULSED HEATING AND CONTROLLED UPSET ALLOWANCE

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 article presents the results of the development of press magnetically impelled arc butt welding (MIAB) technology using pulsed welding current and controlled precision upset allowance for the formation of joints of pipe steels and automotive parts. The research is focused on reducing energy consumption while ensuring high-quality welded joints. During the welding process, the in-process monitoring of the main parameters was performed: welding current, voltage, displacement and force at the time of upset. High-speed video recording with a resolution of up to 4500 frames per second was used to study the processes taking place in the arc gap between the pipe ends, as well as recording the main parameters of the welding cycle. The produced welded joints were tested in accordance with the requirements of international standards for gas and oil pipelines (API, DNV), which made it possible to assess their mechanical characteristics, reliability and compliance with the requirements for industrial use. 20 Ref., 4 Tabl., 17 Fig.

Keywords: press magnetically impelled arc butt welding, pipe steels, pulsed welding current, upset, pulsed heating

Отримано 14.05.2025

Отримано у переглянутому вигляді 18.07.2025

Прийнято 11.09.2025