

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРЕСОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТРУБЧАСТИХ ДЕТАЛЕЙ В УМОВАХ ВИРОБНИЦТВА З МЕТОЮ ЕКОНОМІЇ РЕСУРСУ ТА ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВИСОКОНАВАНТАЖЕНИХ ВИРОБІВ

С.І. Кучук-Яценко, В.С. Качинський, М.П. Коваль

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Заміна застарілих технологій при виробництві трубчастих деталей є актуальним завданням. В роботі наведено матеріали виконаних досліджень по пресовому зварюванню високонавантажених сталевих трубчастих деталей діаметром до 120 мм с товщиною стінки до 6 мм, розробленню системи керування, проведених металографічних та механічних досліджень по визначенню властивостей зварних з'єднань. Показано основні технологічні переваги пресового зварювання високонавантажених виробів. Бібліогр. 7, табл. 3, рис. 6.

Ключові слова: високонавантажені сталеві трубчасті деталі, пресове зварювання магнітокерованою дугою, система управління зварювальним процесом, технологічні параметри процесу зварювання

Останнім часом на підприємствах промисловості України значно підвищилися обсяги виконання робіт з виготовлення латунних деталей діаметром від 40 до 120 мм. Для вирішення завдань, що стоять перед промисловістю України, пропонується наступне. Замінити старі існуючі технології робіт по застосуванню дорогої латуні та прецизійних пресів на 350 т, які використовуються у виробництві трубчастих деталей, новою технологією з використанням зварних сталевих трубчастих заготовок. Це дозволить значно заощадити ресурс шляхом заміни латуні, яка має значно вищу вартість, на більш дешеві сталеві заготовки, збільшити продуктивність і поліпшити умови праці, знизити витрати електроенергії, знизити собівартість продукції.

Спосіб зварювання застосовується в промисловості переважно для з'єднання деталей трубчастого перетину з товщиною стінки до 4 мм діаметром до 100 мм, які використовуються в автомобільній промисловості, при цьому використовуються захисні гази [1–4], а також можливий процес ПЗМД, без використання захисного газу [5, 6].

На початку виконання досліджень були вирішені проблеми відпрацювання конструкції і технології виготовлення зварних сталевих трубчастих деталей, які потребують вирішення цілого комплексу питань щодо функціонування високонавантажених трубчастих деталей. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження, спрямовані на вирішення принципових питань виробництва зварних сталевих деталей, розроблена техноло-

гія, що забезпечує масове виробництво сталевих трубчастих деталей на заводах галузі.

Основою технологічної системи стало використання промислового комп'ютера, який працює під управлінням ОС WINDOWS10 та спеціально розробленого програмного забезпечення. Програмне забезпечення розроблено з урахуванням накопиченого досвіду та останніх досягнень у галузі обчислювальної техніки стосовно накопичення та обробки інформації. У побудові системи управління та реєстрації параметрів зварювання використані загальнодоступні елементи та прилади, що значно спрощує налагодження технологічних параметрів управління системою та процесом зварювання.

В основу системи управління зварювальної машини для реалізації процесу ПЗМД покладено процеси сканування датчиків системи, обробка отриманих даних та формування файлів даних та зведеного файлу денного рапорту, у якому фіксуються наступні параметри:

- час зварювання по етапам нагрівання T1, T2, T3, T4, T5, T6;

- струм зварювальної дуги по етапам нагрівання, I2, I3, I4, I5;

- напруга зварювальної дуги на трьох етапах нагрівання деталей U2, U3, U4 (U1 – напруга етапу збудження та початку сталого руху дуги (розгін дуги) під дією магнітного поля по кромках деталей не враховується, тому що до початку сталого руху дуги приймає значення від режиму короткого замикання до режиму холостого ходу джерела живлення зварювальної дуги);

Кучук-Яценко С.І. – <https://orcid.org/0000-0002-1166-0253>, Качинський В.С. – <https://orcid.org/0000-0001-9695-6434>,

Коваль М.П. – <https://orcid.org/0000-0003-2066-3365>

© С.І. Кучук-Яценко, В.С. Качинський, М.П. Коваль, 2020

– загальна кількість витраченої на нагрівання деталей енергії E_a ;

– швидкість осадки V_{oc} (тут і далі мається на увазі початкова швидкість зближення рухомої частини зварювальної машини з нерухомою частиною, тобто експериментально встановлено, що це середня швидкість зустрічного руху на 1,5 мм дугового зазору перед контактом зварюваних деталей);

– величина осадки S_{oc} (величина спільної деформації деталей);

– тиск осадки P_{oc} (максимальне значення падіння тиску в гідравлічній системі зварювальної машини під час виконання осадка);

Відхилення цих параметрів за межі допусків залежить від багатьох причин, у зв'язку з цим необхідно розробити алгоритми:

– керування для дворівневої системи, які забезпечують коригування режиму зварювання з метою стабілізації процесу й, відповідно, необхідної якості зварного стику;

– оцінки якості зварного стику;

– оцінки технічного стану зварювальних машин і умов їх експлуатації;

– формування рекомендацій з коригування параметрів технологічного процесу.

Існуючий контроль якості, при якому порівнюють отримані дані з еталонними, є логічною функцією – показники якості перебувають у допуску при одночасному знаходженні в допуску всіх

контрольованих параметрів. При такому контролі не враховується:

– значимість впливу кожного з параметрів на показник якості;

– невизначеність межі допусків параметрів процесу для різних виробів;

– можливе посилення впливу на якість зварювання сукупності певної комбінації відхилень.

Розроблено алгоритм контролю якості зварювання на основі аналізу параметрів процесу на трьох етапах його здійснення.

1. Нагрівання трубчастих деталей. Період формування температурного поля на торцях деталей, що зварюються.

2. Форсування. Етап забезпечення захисного середовища в дуговому проміжку.

3. Осадка. Формування з'єднання у твердій фазі.

Висновок про якість отриманого зварного з'єднання з певним ступенем імовірності здійснюється на підставі логічних правил, які складені за результатами досліджень технологічних особливостей процесу ПЗМД.

Для контролю процесу зварювання використовуються наступні параметри:

час зварювання по етапам (Т1–Т6); величина струму на етапах нагрівання (12–15);

значення напруги на етапах існування дуги (U2–U4); швидкості та величини осадка (V_{oc} та L_{oc}); тиск в гідравлічній системі під час виконання осадка P_{oc} ; енергія, що витрачена на нагрівання деталей E_a .

Розроблення схеми управління машини для ПЗМД зварювання К-872 виконувалось шляхом заміни застарілого обладнання та модернізації і вдосконалення програмного забезпечення керуючого модуля. Для забезпечення реалізації алгоритму контролю якості було виконано модернізацію шафи керування та проведено часткову заміну виконавчих пристроїв системи управління. Використано сучасну ПЕОМ, яка пристосована для використання в промислових умовах.

Реєстрація параметрів перебігу процесу зварювання на модернізованій машині К-872 відбувалась за схемою, яка наведена на рис. 1.

Відповідність комп'ютерної оцінки контролю якості з реальним станом речей є забезпечення вищевказаної системи реальними вихідними даними. У випадку виконання ПЗМД такими даними є струм та напруга зварювальної дуги, спільне розташування зварюваних труб, тиск у гідравлічній системі під час виконання осадки.

Отримання даних від датчиків системи реєстрації відбувається наступним чином. Вхід нормуючого вхідного підсилювача 8 підключено безпосередньо до клем, які розташовані на затискних пристроях. В підсилювачі падіння напруги

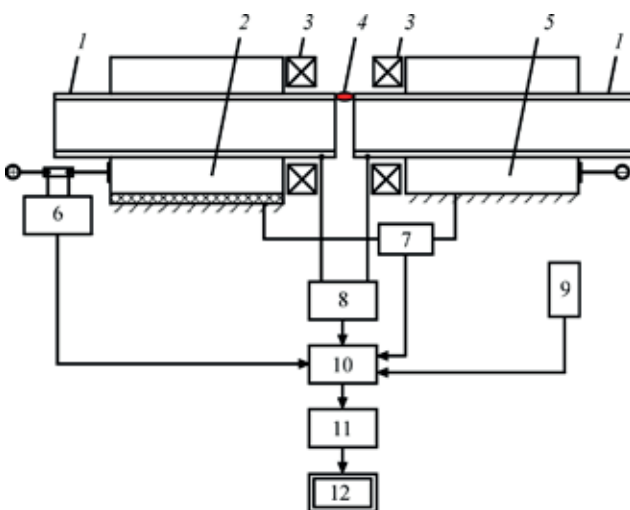


Рис. 1. Блок-схема макету контролю якості зварюваних з'єднань: 1 – зварювані труби; 2 – рухомий затискний пристрій; 3 – елементи магнітної системи; 4 – стовп електричної дуги, яка рухається по кромках зварюваних труб; 5 – нерухомий затискний пристрій; 6 – датчик струму з інструментальним підсилювачем сигналу; 7 – датчик положення рухомої частини зварювальної установки; 8 – датчик падіння напруги на зварювальній дузі; 9 – датчик вимірювання абсолютного тиску гідравлічної системи, вбудований в штокову порожнину циліндру осадка зварювальної машини; 10 – нормуючий інструментальний підсилювач (з ФНЧ $F_{сп} = 100$ Гц); 11 – приймаючий аналогово-цифровий перетворювач (АЦП); 12 – персональна електронно-обчислювальна машина



Рис. 2. Зварне з'єднання трубчастих деталей 102×6 мм

зварювальної дуги, яке виникає під час початку процесу і складає величину в межах 20...30 В постійного струму, нормується до вихідної напруги 2...3 В. Для подальшої обробки та аналізу похідний сигнал падіння зварювальної напруги з виходу підсилювача δ надсилається на вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Під час початку роботи програмного забезпечення АЦП налаштовується таким чином, що частота опитування аналогових входів складає 10 точок опитування на одне читання даних з виходу АЦП. Досягається більш точне передавання даних до програми контролю.

Доопрацювання програмного забезпечення управляючого комплексу виконувалось шляхом змінення функціональних параметрів існуючих програмних модулів. Це дозволило розширити часові та параметричні межі роботи виконавчих пристроїв при виконанні настроювання параметрів процесу ПЗМД. Програмне забезпечення виконує формування бази даних, яка, в свою чергу, дозволяє виконувати аналіз отриманих в процесі зварювання даних за весь час роботи устаткування, що значно спрощує пошук оптимальних параметрів режиму зварювання [7].

На хід процесу нагрівання в процесі зварювання впливають різні фактори, що викликає необхідність проведення контролю якості зварних з'єднань. На процес формування з'єднань впливають наступні фактори:

- стан торцевих поверхонь (температура поверхні, наявність мікронерівностей, оксидних плівок і інших забруднень);
- розподіл температури в торцях деталей;
- величина і характер пластичної деформації торців під час осадки.

Були виконані експериментальні зварювання, розроблена дослідно-промислова технологія та виконані дослідження зразків зварних з'єднань трубчастих деталей діаметром 102×6 мм сталі марки сталь 35 + сталь 20 (рис. 2).

Хімічний склад зварювальних сталей приведено в табл. 1. Механічні властивості зварних з'єднань трубчастих деталей приведено в табл. 2. По-

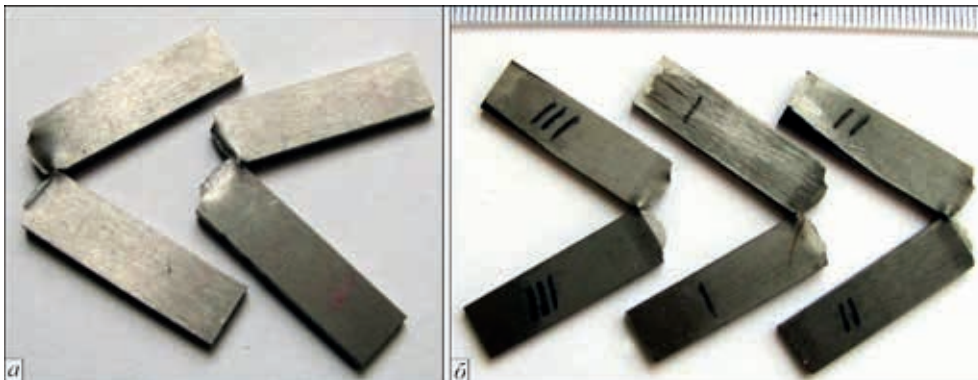


Рис. 3. Зовнішній вигляд зруйнованих зразків: а – основний метал; б – зварне з'єднання

Таблиця 1. Хімічний склад зварювальних сталей, мас.%

Сталь	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al
20	0,19	0,30	0,50	0,005	0,004	0,16	0,12	0,08	0,05	0,01
35	0,39	0,32	0,68	0,004	0,024	0,08	0,03	0,04	0,05	0,01

Таблиця 2. Результати проведених випробувань на розрив і ударну в'язкість основного металу труби і зварного з'єднання

Сталі	Розмір труб, мм	σ_b , МПа		KCV^{20} , Дж/см ²	
		Основний метал	Зварне з'єднання	Основний метал	Зварне з'єднання
20 + 35	102×6,0	508...525	510...524	67...84	78...81
		516,5	517,5	75...5	79...5
20 + 35	42×3,5	508...525	516...527	67...84	88...85
		516,5	522,5	75,5	86

Таблиця 3. Порівняльні показники витрат електроенергії при зварюванні одного стику труб при дуговому зварюванні РДЗ і ПЗМД

Розмір труби, мм	Метод зварювання	Витрата електроенергії на 1 стик, кВт/год
102×6,0	РДЗ	0,98
	ПЗМД	0,042

рівняльні показники витрат електроенергії при зварюванні одного стику труб при ручному дуговому зварюванні РДЗ та ПЗМД приведені в табл. 3.

На рис. 3 показані зразки основного металу і зварного з'єднання після випробувань на удару в'язкість.

У місці з'єднання деталей дефектів не спостерігається (рис. 4), знеуглецьована смужка металу на кордоні з'єднання відсутня. Спостерігається спряженість кордонів металів сталі 20 та сталі 35 по лінії зварного з'єднання (рис. 4).

Структура металу сталі 20 у лінії з'єднання феритно-перлітна. Кількість фериту значно переважає. Ферит виділяється уздовж колишніх зерен аустеніту (полігональний). Основна маса – це пластинчастий ферит з упорядкованою і невпорядкованою другою фазою (рис. 5, 6). Бал зерна на ділянці перегріву (крупного зерна) поблизу лінії з'єднання відповідає № 6 по ГОСТ 5639–82, в міру віддалення від лінії з'єднання зерно подрібнюється до № 8, 9 за шкалою ГОСТ.

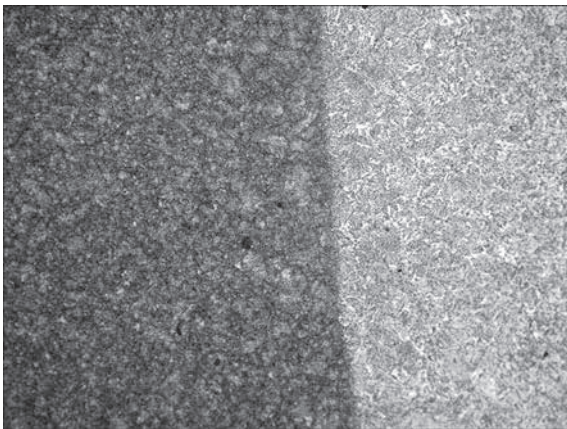


Рис. 4. Загальний вид з'єднання сталь 35 + сталь 20 (×25)

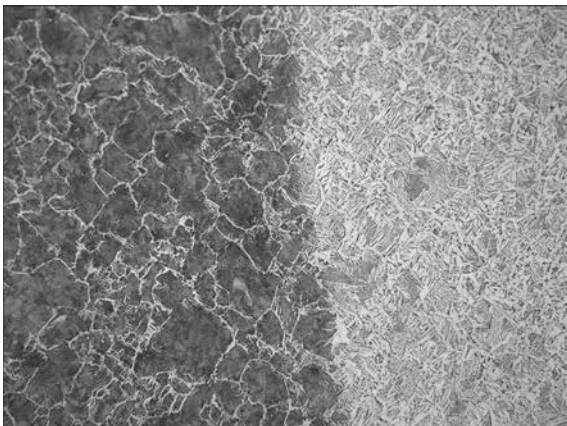


Рис. 5. Мікроструктура (×100) металу з'єднання сталь 35 + сталь 20

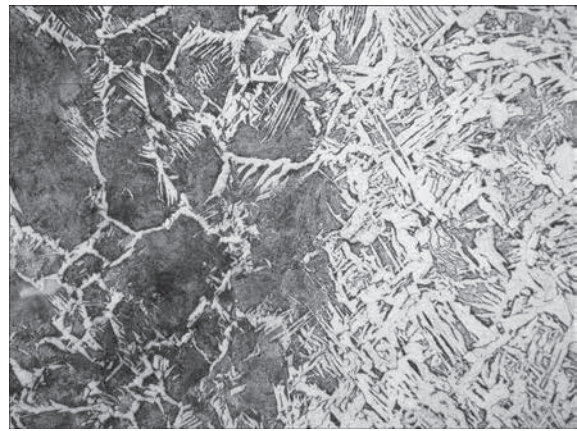


Рис. 6. Мікроструктура (×400) металу з'єднання сталь 35 + сталь 20

На ділянці повної перекристалізації структура дрібнозерниста, бал зерна № 10, структура феритно-перлітна.

Структура основного металу феритно-перлітна, бал зерна № 8 по ГОСТ5639–82. Ширина ділянок ЗТВ:

- ділянка великого зерна (ділянка перегріву) – 2300 мкм;
- ділянка дрібного зерна (ділянка повної перекристалізації) – 2000 мкм;
- ділянка неповної перекристалізації – 1500 мкм;
- ширина ЗТВ – 5000 мкм.

Структура металу сталі 35 у лінії з'єднання перлітно-феритна. Кількість перліту значно переважає (рис. 5, 6). На ділянці перегріву в структурі ЗТВ є перлітні зерна, облямовані феритною сіткою уздовж кордонів колишніх зерен аустеніту. Дуже незначна кількість фериту (рис. 6). Бал зерна на ділянці перегріву у лінії з'єднання відповідає № 5 (ГОСТ5639–82), в міру віддалення від стику зерно подрібнюється до 8 балів.

Ділянка дрібного зерна відрізняється подрібненою структурою (феритно-перлітною), бал зерна № 10.

Дефектів в ЗТВ і основному металі не виявлено. Ширина ділянок ЗТВ:

- ділянка великого зерна (ділянка перегріву) – 1500 мкм;
- ділянка дрібного зерна (ділянка повної перекристалізації) – 2400 мкм;
- ділянка неповної перекристалізації – 2000 мкм;
- ширина ЗТВ – 6000 мкм.

Результати вимірювання твердості у напрямку ОМ сталь 20–ЗТВ–ЛЗ–ЗТВ–ОМ сталь 35, при навантаженні 100 г з кроком 100; 200; 500 мкм.

Крок 500 – ОМ –1760, сталь 20: ЗТВ – 1560, 1510, 1570; крок 200–1760, 1760, 1690, 1690, 1690, 1810, 1810, 1720, 1640, 1640, 1760, 1870, 1850, 1870, 1870, 1870, 1870, 1870, 1930, 1930; крок 100–2130, 1930, 1930; крок 50–1930.

ЛЗ – 2060, 1930, 1930, 1930.

Сталь 35. ЗТВ: крок 100 – 2060, 2280, 2300; крок 200 – 2280, 2260, 2450, 2360, 2600, 2540, 2240, 2160, 2130, 1990, 1990, 2130, 2130, 2130, 2130, 1910, 1890, 1810, 1810; крок 500 – 1930, 1930, 1990, 2060.

Крок 500 – ОМ – 1920, 1810.

Як видно з наведеної таблиці, для зварювання одного стику при ПЗМД витрачається майже в 22 рази менше електроенергії, ніж при РДЗ. Ця економія досягається за рахунок скорочення часу зварювання одного стику з'єднання. Крім цього, при дуговому зварюванні багато електроенергії витрачається на розплавлення більш значної за розмірами ванни рідкого металу.

Основні технічні переваги розробленої дослідно-промислової технології зварювання високонавантажених трубчастих деталей:

- відносно невеликий час зварювання;
- висока продуктивність, особливо при масовому виробництві;
- низькі витрати енергії і матеріалів;
- концентрований нагрів торців зварюваних деталей;
- мінімальні припуски на оплавлення і осадку;
- відсутність жорстких вимог до чистоти бічних і поверхонь, що зварюються;
- відсутність проблем з допусками попередньої підготовки;
- високі пластичні властивості зварних з'єднань;
- відносно невелике розбризкування металу;
- відсутність бризок металу на внутрішній поверхні труб, що зварюються;
- можливість контролю і реєстрації основних технологічних параметрів в процесі зварювання.

Висновки

1. Визначено оптимальні умови, що дозволяють стійко переміщати дугу у вузькому зазорі для досягнення відносно рівномірного нагріву зварюваних торців трубчастих деталей.

2. Розроблено спосіб управління, що дозволяє переміщати дугу по всій зварюваній площі поперечного перерізу труб і формувати на ній рівномірно розподілений розплав.

3. Визначено основні умови для формування зварного з'єднання високонавантажених трубчастих деталей.

4. Розроблено та апробовано дослідно-промисловою технологією ПЗМД високонавантажених трубчастих деталей діаметром до 120 мм з товщиною стінки до 6 мм.

Список літератури/References

1. Hagan, D., Riley, N. (1979) MIAB welding. Part 2. Fabrication the Fiesta rear axle. *Metal Construction*, **12**, 625, 627–629,
2. Ganovski, F.J. (1974) *The magnetarc welding process*. Weld. Met. Fab, **5**, 206–213
3. Kenji Takagi, Hirokazu Otsuka, Fumiho Abakida et al. (1987) *Establishment of optimum welding conditions of magnetically impelled arc butt welding and application to field operation*, International Institute of Welding, III-880–1987.
4. Edson, D.A. (1982) *Magnetically Impelled Arc Butt Welding of Thick Wall Tubes*, International Institute of Welding, III-726–82, July 1982.
5. Kuchuk-Yatsenko, S.I., Kachinsky, V.S., Ignatenko, V.Yu., et al. (2010) Magnetically-impelled arc butt welding of pipes of steel X70. *The Paton Welding J.* **7**, 29–31
6. Kachynskyi, V.S., Kuchuk-Yatsenko, S.I., Koval, M.P. (2020) Press magnetically-impelled arc welding of high-strength steel tubular parts of hydraulic cylinders. *Ibid*, **1**, 43–48
7. Koval, M.P., Kuchuk-Yatsenko, S.I., Kachynskyi, V.S. (2020) System of control, registration of parameters and monitoring in the process of press welding of pipes using magnetically-impelled arc, *Ibid.*, **6**, 36–40

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY AND EQUIPMENT FOR PRESS WELDING OF TUBULAR PARTS UNDER THE CONDITIONS OF PRODUCTION FOR THE PURPOSE OF SAVING RESOURCES AND INCREASE IN THE REALIABILITY OF HIGH-LOADED PRODUCTS

S.I. Kuchuk-Yatsenko, V.S. Kachynsky, M.P. Koval

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Replacement of outdated technologies in the production of tubular parts is an urgent task. The paper presents the materials of carried out investigations on press welding of high-load steel tubular parts with a diameter of up to 120 mm with a wall thickness of up to 6 mm, development of control system, metallographic and mechanical examinations on determination of the properties of welded joints. The main technological advantages of press welding of high-loaded products are shown. 7 Ref., 3 Tabl., 6 Fig.

Keywords: high-loaded steel tubular parts, magnetically-impelled press arc welding, control system of welding process, technological parameters of welding process

Надійшла до редакції
30.09.2020