УДК 621.791.76 DOI: https://doi.org/10.37434/as2020.01.06

ПРЕСОВЕ ЗВАРЮВАННЯ МАГНІТОКЕРОВАНОЮ ДУГОЮ ВИСОКОМІЦНИХ СТАЛЕВИХ ТРУБЧАСТИХ ДЕТАЛЕЙ ГІДРОЦИЛІНДРІВ

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

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

Наведено матеріали по проведенню роботи в рамках дослідження зварюваності деталей гідравлічних циліндрів діаметром від 40 до 200 м с товщиною стінки до 10 мм, а також результати виконаних металографічних досліджень та механічних властивостей зварних з'єднань.Визначено основні умови для формування зварного з'єднання трубчатих деталей гідроциліндрів. Розроблено процес пресового зварювання магнітокерованою дугою труб гідроциліндрів діаметром до 200 мм з товщиною стінки до 10 мм. Бібліогр. 8, табл. 4, рис. 16.

Ключові слова: пресове зварювання магнітокерованою дугою, труби для гідроциліндрів, формування з'єднання, технологія зварювання

У різних галузях промисловості виконується великий обсяг робіт зі зварювання кільцевих швів труб і трубчастих деталей гідроциліндрів діаметром 40…220 мм з товщиною стінки від 4 до 10 мм, що працюють під високим тиском. При цьому використовується в основному електродугове зварювання.

Розробка технологій та обладнання для пресового зварювання в стаціонарних умовах дозволила б значно підвищити продуктивність праці в промисловості і поліпшити стабільність якості з'єднань. Досвід, накопичений ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України за останні десятиліття в області зварювання труб тиском свідчить про перспективність виконання таких розробок на основі методу пресового зварювання магнітокерованою дугою (ПЗМД).

В останні десятиліття технології ПЗМД розроблені та успішно впроваджені при виготовленні різних трубчастих вузлів на автомобільних заводах України та інших країн, зварюванні труб при будівництві тепличних комплексів, при зварюванні трубопроводів в умовах вічної мерзлоти [1–6].

Метою проведених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона останнім часом досліджень була розробка технології та обладнання для зварювання ПЗМД труб з донцем різного сортаменту та хімічного складу сталі, діаметром до 200 мм з товщиною стінки до 10 мм, що покриває найбільш затребуваний сортамент трубчастих деталей для виготовлення циліндрів (рис. 1).

Хімічний склад досліджених трубних сталей наведено в табл. 1, показники механічних властивостей основного металу і зварного з'єднання наведено в табл. 2. Типорозміри деталей, що зварюються, включали: діаметр 40…188 мм, товщина стінки 4…10 мм (32 типорозміри).

Всі зварні з'єднання випробовувалися відповідно до міжнародного стандарту API [7], а також проводились додаткові випробування на загин згідно з відомчими методиками і стандартами.

Металографічні дослідження проводилися після травлення в 4%-му розчині HNO_3 в спирті. Вимірювання мікротвердості проводились на приладі М-400 фірми «Леко» при навантаженні 10; 100; 1000 г. Фотографування структури зварних з'єднань проводилися на оптичному мікроскопі «Neophot-32».

Рис. 1. Конструкція донця гідроциліндра (висота 35 мм)

Таблиця 1. Хімічний склад сталей, мас. %

Марка сталі	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	Nb	B	Al
St52-3	0,18	0,52	1,35	0,02	0,03	0,28	0,24	0,23	-	-	-	-	-
01Star520 (X80)	0,159	0,172	1,19	0,012	0,006	0,13	0,04	0,04	0,03	0,002	0,002	0,001	0,03

В.С. Качинський – http://orcid.ord/0000-0001-9695-6434; С.І. Кучук-Яценко – http://orcid.ord/0000-0002-1166-0253
М.П. Коваль – http://orcid.ord/0000-0003-2066-3365
© В.С. Качинський, С.І. Кучук-Яценко, М.П. Коваль, 2020

Таблиця 2. Основні технологічні параметри зварювання

Марка сталі	Діаметр труби × товщину стінки, мм	Час зварювання, с	Зусилля осадки, кН	Укорочення труб, мм
St52-3	40×4	6	40	4,1
St52-3	60×5	14	57	5,4
St52-3	120×7,5	37	257	8,2
01Star520 (X80)	121×7	35	250	8
01Star520 (X80)	121×10	43	278	10

Процес ПЗМД характеризується тим, що дуга під дією зовнішнього керуючого магнітного поля рухається в зазорі між торцями трубчастих деталей, що зварюються. Відносно висока швидкість руху дуги, до 170 м/с, дозволяє перерозподіляти теплову енергію зварювальної дуги по всій поверхні торців деталей. Досягається відносно рівномірний нагрів зварювальних торців труб. Зварне з'єднання формується при стисканні та спільній пластичній деформації торців деталей [8]. Процес зварювання деталей гідроциліндрів виконується на повітрі, без застосування захисних газів.

З огляду на різні умови тепловідведення деталей, мета досліджень полягала в тому, щоб знайти способи керування процесом нагрівання, що дозволяють стійко переміщати зварювальну дугу по всій площі поперечного перерізу торців труби і донця, досягаючи їх рівномірного нагрівання.

В результаті проведених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона досліджень було розроблено спосіб, що дозволяє управляти переміщенням дуги по всій площі поперечного перерізу трубчастих деталей. Процес нагріву торців виконується при переміщенні зварювальної дуги по зовнішнім кромкам, в області з підвищеним значенням радіальної складової індукції управляючого магнітного поля (УМП) (рис. 2).

Після досягнення рівномірного нагріву, що забезпечує необхідні умови для пластичної деформації торців, виконується програмна зміна технологічних параметрів зварювання, що призводить до сканування зварювальної дуги по поверхні торців труб (рис. 3). Якісне формування зварного з'єднання труби з донцем може бути забезпечено без будь-якого газового захисту за умови, що частота обертання дуги в момент перед осадкою обрана такою, що шар розплаву металу в будь-якій точці на поверхні торців не встигає кристалізуватися за інтервали часу при проходженні дуги через ці ділянки. Потім виконується осадка.

На базі цих досліджень розроблена система автоматичного управління процесом ПЗМД труби з донцем, визначені оптимальні програми зміни основних параметрів в процесі зварювання, а також алгоритми їх управління з використанням зворотних зв'язків [5]. Розроблено технології ПЗМД деталей гідроциліндрів, а також обладнання для зварювання. Основні показники, які характеризують режими зварювання наведені в табл. 2.

Високоміцні сталеві трубчасті деталі, що працюють під високим тиском, використовуються при виготовленні гідравлічних циліндрів. Фотографія зовнішнього вигляду зварних з'єднань наведена на рис. 4.

Механічні випробування, такі як випробування на розтягання, вигин (рис. 5), розрив, вимірювання твердості та металографічні дослідження проводилися відповідно до стандарту API 1104 [7].

Механічні властивості зварних з'єднань труб наведено в табл. 3.

Проведені всебічні механічні випробування свідчать про практичну рівноміцність зварних з'єднань і основного металу та задовольняють нормативним вимогам.

Рис. 2. Сліди, залишені зварювальною дугою при нагріванні зовнішніх кромок труби

Рис. 3. Поверхні торців труб і донця, покриті шаром розплаву металу

Рис. 4. Зварне з’єднання труби з донцем діаметром 120×7,5 мм

Таблиця 3. Механічні властивості зварних з'єднань труб

Марка сталі	Діаметр труби×товщину стінки, мм	$\sigma_в$, МПа		KCV_{20}, Дж/см^2	
		Основний метал	Зварне з'єднання	Основний метал	Зварне з'єднання
St52-3	90×5	492...513 / 498	480...492 / 486	–	–
01Star520	121×10	685...708 / 696	630...645 / 638	125...168 / 147	60...168 / 114
01Star520	191×7	638...665 / 651	618...674 / 656	116...154 / 135	87...152 / 119
St52-3	120×7,5	491...512 / 497	478...489 / 483	–	–

Металографічні дослідження виконувалися на оплавленому торці виробу діаметром 90 мм (рис. 3) в момент перед осадкою та зварному з'єднанні діаметром 120×7,5 мм (рис. 4) зі сталі St52-3. Зразки для досліджень виготовили на високошвидкісних дисках за допомогою алмазних паст різної дисперсності. Виявлення структури проводили за допомогою хімічного травлення в 4%-му розчині HNO_3 в етиловому спирті. Дослідження проводили на мікроскопах «Neophot-32» і «Poluvar» при різних збільшеннях. Твердість товщини шару розплаву вимірювали на мікротвердомірі М-400 фірми «Leco».

Зразок після нагрівання, без осадки (див. рис. 3). На оплавленому торці зразка є ділянка з литою структурою (рис. 6). Ширина ділянки становить 300…400 мкм. Структура металу феритно-перлітна, ферит виділяється уздовж границь кристалітів. На цій ділянці виявлено полігональний та відманштеттів типи феритів, а по границям кристалітів поліедричний (в незначній кількості) . Твердість на цій ділянці *HV*1 – 2240 МПа; *HV*1 – 1850 МПа; *HV*1 – 2280 МПа; *HV*1 – 2060 МПа. На ділянці перегріву структура складається з верхнього і нижнього бейніту з твердістю *HV*1 – 2830 МПа; *HV*1 – 3090 МПа; *HV*1 – 3360 МПа; *HV*1 – 3480 МПа. Ширина цієї ділянки – 2000 мкм, далі в структурі з'являється перліт, кількість бейніту зменшується, твердість знижується до *HV*1 – 2490 МПа; *HV*1 – 2450 МПа.

На ділянці повної перекристалізації структура дрібна, що складається з фериту, перліту і невеликої кількості бейніту. У структурі з'являються сліди зі смугами (рис. 7), які відсутні на ділянці перегріву (рис. 8). Твердість *HV*1 – 2060…2240 МПа.

Рис. 5. Результати випробувань зварного з'єднання на вигин

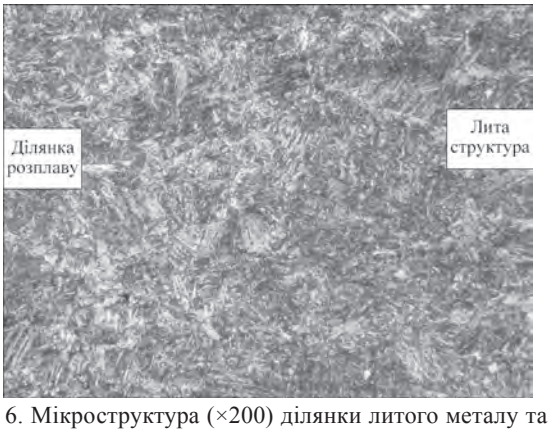


Рис. 6. Мікроструктура (×200) ділянки литого металу та ділянки розплаву

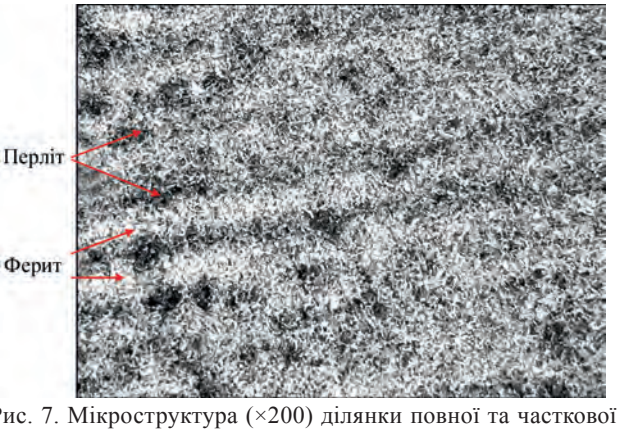


Рис. 7. Мікроструктура (×200) ділянки повної та часткової перекристалізації зі сторони донця

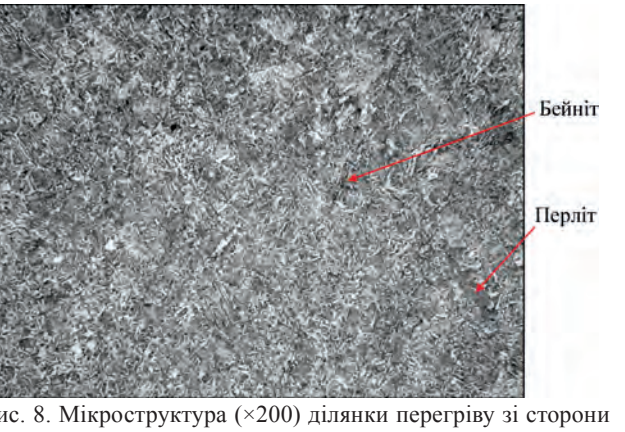


Рис. 8. Мікроструктура (×200) ділянки перегріву зі сторони донця

Ділянка неповної перекристалізації після осідання має дрібнозернисту феритно-перлітну структуру (бал 9 по ГОСТ 5639-82), де смуги фериту та перліту чергуються (рис. 7). Твердість металу на ділянці *HV*1 – 1880…1960 МПа (ферит) та *HV*1 – 2060…2240 МПа (перліт).

Основний метал має феритно-перлітну структуру у вигляді смуг із балом феритного зерна № 7-8 по ГОСТ 5639-82 та твердістю *HV*1 – 1870…1760 МПа. Ширина зони термічного впливу становить 4000 мкм.

Макрошліф зварного з'єднання діаметром 120×7,5 мм приведено на рис. 9. Лінія з'єднання – переривчаста біла смуга завтошки до 40 мкм в центральній області зварного з'єднання і розширюється до 80 мкм до країв зразка. Структура лінії з'єднання феритна з твердістю *HV*1 – 1650…1810 МПа. З розподілу твердості видно, що у з'єднанні є незначне підвищення твердості феритної смужки до *HV*1–1800 МПа, що вище за твердість основного металу трубчастих деталей. Розподіл твердості в стику свідчить про відсутність суттєвих змін міцності на основних ділянках зварного шва. Показники твердості по лінії з'єднання також близькі до аналогічних показників основного металу. Структура металу в ЗТВ при ПЗМД більш однорідна. Дефектів по лінії з'єднання не виявлено (рис. 10).

Структура ділянки перегріву з боку кришки має невеликі ділянки перліту та фериту різних модифікацій, в основному це ферит з упорядкованою другою фазою. Крім цього, є поліедрічний ферит, відманштеттів ферит, полігональний ферит у вигляді фрагментів феритних смужок по границям колишніх аустенітних зерен.

Твердість металу на цій ділянці *HV*1 – 1830…2160 МПа (рис. 10).

По мірі віддалення від лінії з'єднання структура подрібнюється, збільшується кількість полігонального та поліедричного фериту.

На ділянці повної перекристалізації структура дрібнозерниста (10-11 бал по ГОСТ 5639-82) феритно-перлітна.

Рис. 9. Макрошліф зварного з’єднання труби і донця діаметром 120×7,5 мм

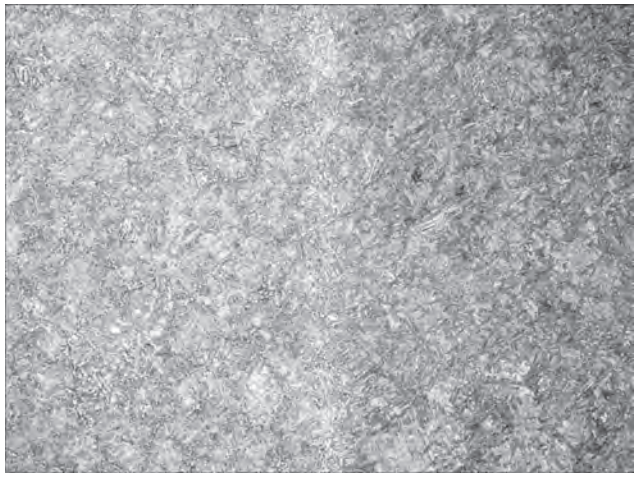


Рис. 10. Мікроструктура (×200) зварного з'єднання

Основний метал має феритно-перлітну структуру з балом зерна № 8 та твердістю *HV*1 – 1560…1760 МПа. Ширина ЗТВ приблизно 6000 мкм.

Ділянка перегріву з боку труби має майже таку ж структуру, як і ділянка з боку кришки (рис. 11, 12). Відмінність полягає в тому, що переважна кількість фериту з невпорядкованою другою фазою та структура на ділянці перегріву дрібніша. Твердість металу на ділянці перегріву *HV*1 – 1780…2060 МПа. По мірі віддалення від лінії з'єднання структура подрібнюється. Ширина ділянки перегріву 2700 мкм. Ширина ділянки перегріву менше після осадки 2700 мкм, в порівнянні з 3500 мкм після нагрівання без осадки.

Структура ділянки повної перекристалізації фериту перлітна дрібнозерниста з переважанням феритної складової (рис. 12). Сліди смуг видно на ділянці неповної перекристалізації. Смуги з'являються в ділянці неповної перекристалізації. Структура на цій ділянці феритно-перлітна, що складається зі смуг фериту та перліту, які чергуються. Ширина ЗТВ приблизно 5000 мкм.

Основний метал являє собою дрібнозернисту (10-11 бал) феритно-перлітну структуру (рис. 13) з твердістю *HV*1 – 1660…1990 МПа.

Дефектів в ЗТВ не спостерігається. Твердість перлітної смужки *HV*1 – 2050 МПа, *HV*1 –1990 МПа,

Рис. 11. Мікроструктура (×200) ділянки перегріву зі сторони донця

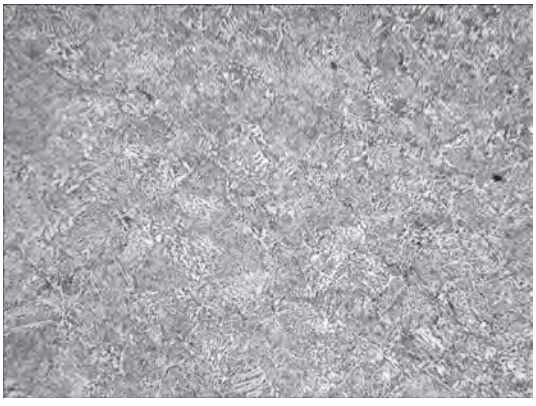


Рис. 12. Мікроструктура (×200) ділянки перегріву зі сторони труби

Рис. 13. Мікроструктура (×200) ділянки повної і неповної перекристалізації з боку труби

Рис. 14. Мікроструктура (×200) основного металу труби

*HV*1 –2050 МПа. Твердість поруч з перлітною феритною сумішшю *HV*1 – 1560…1600 МПа.

Для ПЗМД трубчастих деталей гідроциліндрів була розроблена машина МД-205, що забезпечує промислове зварювання в стаціонарних умовах (табл. 4). З використанням даної технології було зварено понад 17 тис. деталей гідроциліндрів діаметром від 42 до 178 мм (рис. 16).

Машина МД-205 (рис. 15) призначена для пресового зварювання трубчастих деталей різного призначення і складається зі:

– зварювальної головки;

Рис. 15. Готові до експлуатації гідроциліндри

Рис. 16. Зварювальна машина МД-205

– гідравлічної насосної станції;

– шафи управління з переносним пультом управління;

– джерела живлення зварювальної дуги.

Зварювальна машина МД-205 кліщового типу, характерною особливістю якої є роздільне затискання труб, що зварюються. Машина конструктивно має можливість завантаження-вивантаження труб, що зварюються, на сторону.

Висновки

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

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

Таблиця 4. Технічні характеристики машини для ПЗМД гідроциліндрів

Індекс машини	Діаметр зварюваних труб, мм	Товщина стінки, мм	Продуктивність, стиків/год	Споживана потужність, кВт	Маса, кг
МД-205	30…200	3…10	80	40	1500

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

4. Розроблено процес ПЗМД, який дозволяє зварювати труби з товщиною стінки, що перевищують розміри активних плям стовпа дуги.

5. Розроблено технології ПЗМД трубчастих деталей із високоміцних сталей при виробництві гідроциліндрів діаметром до 200 мм з товщиною стінки до 10 мм.

Список літератури / References

1. Ganovski F.J. (1974) The magnetarc welding process. *Welding and Metal Fabrication*, June, 206–213.
2. Edson, D.A. (1982) Magnetically impelled arc faying surfaces welding of thick wall tubes. *IIW*, IM-726–82.
3. Takagi K., Aracida F. (1982) Magnetically Impelled Arc Butt Welding of gas pipeline. *Metal Construction*, **20**, 542–548.
4. Hiller F., Schmidt M., Breiksch J. (2003) Use f the magnetarc welding process in the production of truck cab suspension systems. *ThyssenKrupp Techforum*, pp. 40–43.
5. Kuchuk-Yatsenko, SI., Kachinskiy, VS., Ignatenko, Yu V (2010) Magnetically-impelled arc butt welding of automobile parts. *Australasian Welding J.*, **55**, Second Quarter.
6. Kachinskiy V.S., Kuchuk-Yatsenko S.I., Ignatenko Yu.V., Koval M.P. (2010) Magnetically-impelled arc butt welding of pipes of steel X70. *Ibid*.
7. API STANDARD 1104 (2013) *Welding of pipelines and related facilities*. American Petroleum Institute.
8. Kachinskiy V.S., Krivenko V.G., Ignatenko Yu. V. (2002) Magnetically impelled arc butt welding of hollow and solid parts. International Institute of Welding, III-1208-02. *Welding in the World*, 46, **7/8**, 49–56.

PRESS MAGNETICALLY-IMPELLED ARC WELDING OF HIGH-STRENGTH STEEL TUBULAR PARTS OF HYDRAULIC CYLINDERS

V.S. Kachynski, S.I. Kuchuk-Yatsenko, 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

Materials for carrying out works in the framework of investigating welding of parts of hydraulic cylinders with diameters from 40 to 200 m with a wall thickness of up to 10 mm, the results of performed metallographic examinations and mechanical properties of welded joints are presented. The basic conditions for forming welded joints of tubular parts of hydraulic cylinders were determined. The process of press magnetically-impelled arc welding of pipes of hydraulic cylinders with a diameter of up to 200 mm with a wall thickness of up to 10 mm was developed. 8 Ref., 4 Tabl., 16 Fig.

Keywords: press magnetically-impelled arc welding, pipes for hydraulic cylinders, joint forming, welding technology

Надійшла до редакції 06.11.2019

Міжнародна конференція

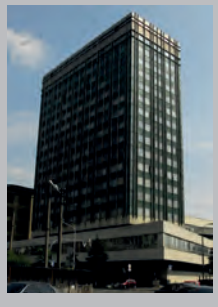
ТИТАН 2020: ВИРОБНИЦТВО ТА ЗАСТОСУВАННЯ

Київ, ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України

1–3 червня 2020 р.

Голова программного комітету
академік Б.Є. Патон

Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАНУ
Запорізький титано-магнієвий комбінат
Інститут титану
Міжнародна Асоціація «Зварювання»



Тематика конференції

- Технології та обладнання для отримання губки, злитків та відливок з титану та його сплавів
- Адитивні технології в виробництві виробів з титанових сплавів
- Деформаційна обробка титану
- Виробництво та використання порошків титану
- Структура та властивості титанових сплавів
- Нові сплави на основі титану та інтерметалідів титану
- Інженерія поверхні титанових сплавів
- Технології зварювання та пайки титанових сплавів
- Застосування виробів та конструкцій з титану та сплавів на його основі в промисловості

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАНУ
вул. Казимира Малевича, 11,
м. Київ, 03150, Україна
Тел./факс: (38044) 200-82-77
E-mail: journal@paton.kiev.ua
www.pwi-scientists.com/ukr/titan2020

Інформаційна підтримка:
«Сучасна електрометалургія»
«Автоматичне зварювання»