

УДК 621.791.92

ІМПУЛЬСНО-ДУГОВЕ НАПЛАВЛЕННЯ КОРОЗІЙНОТРИВКИХ АУСТЕНІТНО-МАРТЕНСИТНИХ СТАЛЕЙ

Ю. М. КУСКОВ¹, Х. Р. ЗАДОРЖНА², В. Д. МАКАРЕНКО³,
В. А. ТИЩЕНКО¹, Г. Н. ГОРДАНЬ¹, І. Л. БОГАЙЧУК¹, Т. В. КАЙДА¹

¹ Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

³ Національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка, Полтава

Подано результати корозійних випробувань аустенітно-мартенситної сталі, наплавленої на зразки зі сталі 40X під шаром флюсу АН-26 порошковим дротом ПД-Нп-30X22МН Ø 2,2 mm в один шар з перекриттям валиків на 50% за двох режимів подачі в зварювальну ванну (0,5 і 0,7 Hz). Встановлено, що найкращі експлуатаційні характеристики за впливу корозивного середовища є за наплавлення з імпульсом подачі електродного дроту 0,7 Hz.

Ключові слова: імпульсно-дугове наплавлення, аустенітно-мартенситна сталь, порошковий дріт, імпульс подачі дроту, корозія, мікроструктура.

The results of corrosion tests of austenitic-martensitic steel deposited on 40X steel samples under a layer of АН-26 flux-cored wire ПД-Нп-30X22МН with a diameter of 2.2 mm in one layer with 50% overlapping rollers under two modes of its supply to the welding bath (0.5 and 0.7 Hz) are presented. It is established that the best operational characteristics under the influence of the corrosive environment are obtained during surfacing with a pulse of an electrode wire supply of 0.7 Hz.

Keywords: pulse-arc surfacing, austenitic-martensitic steel, flux-cored wire, pulse of wire supply, corrosion, microstructure.

Вступ. Плунжери та штоки гідравлічних пристроїв, в т.ч. шахтних гідростійок механізованих кріплень, зазвичай експлуатують в умовах сильного абразивного зношування і корозивних середовищ [1, 2]. Для підвищення терміну служби таких деталей під час виготовлення їх робочі поверхні електролітично хромують або використовують дороговартісні технології [3–6]. Одношарове електродугове наплавлення під шаром флюсу запобігає екологічно шкідливому впливу хромування зі збереженням високої довговічності деталей.

Більшість робіт, присвячених зварюванню та наплавленню сталей, стосуються корозійнотривких сталей аустенітного та аустенітно-феритного класів [7–9]. Водночас відомо, що для наплавлення сталей з високою зносостійкістю бажано застосовувати сталі мартенситного або аустенітно-мартенситного класів з оптимальним співвідношенням аустенітної та мартенситної фаз [7, 10, 11]. В останньому випадку поєднання твердої і зносостійкої мартенситної складової з менш твердою, але в'язкішою та корозійнотривкішою аустенітною фазою дає змогу отримати структуру, яка добре чинить опір двом видам зношування – корозійному та абразивному.

В Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України розроблено порошкові дроти, які дають змогу отримувати наплавлений метал типу 30X22МН та 30X20МН з високими експлуатаційними характеристиками [1, 2, 12]. Раніше

встановлено [11], що наплавлення порошкового дроту ПД-Нп-30Х20МН в імпульсному режимі, порівняно зі звичайним наплавленням (з постійною подачею дроту), дозволяє суттєво знизити хімічну та структурну мікронеоднорідності наплавленого металу, підвищити дисперсність фаз і їх мікротвердість. Проте повністю уникнути розвитку корозійних явищ на межах зерен аустеніту не вдалося.

Металу типу 30Х22МН також властиві дуже високі показники експлуатаційних характеристик, тому вирішили довести їх до оптимального рівня, змінюючи технологію наплавлення порошкового дроту.

Нижче подали результати досліджень особливостей формування структури внаслідок одношарового наплавлення металу аустенітно-мартенситного класу системи легування Fe–C–Cr–Ni–Mo і її впливу на опір корозії наплавленого металу за виконання в імпульсно-дуговому режимі [13].

Методика експерименту. Як компоненту шихти обрали основну легувальну складову – високовуглецевий ферохром ФХ800, шматки якого за допомогою подрібнення перетворювали в зерна $\varnothing 2...3$ mm.

Одношарове наплавлення на зразки зі сталі 40Х під шаром флюсу АН-26 здійснювали порошковим дротом ПД-Нп-30Х22МН $\varnothing 2,2$ mm за його імпульсної подачі в зварювальну ванну (0,5 і 0,7 Hz) з 50%-им перекриттям сусідніх валиків (рис. 1).

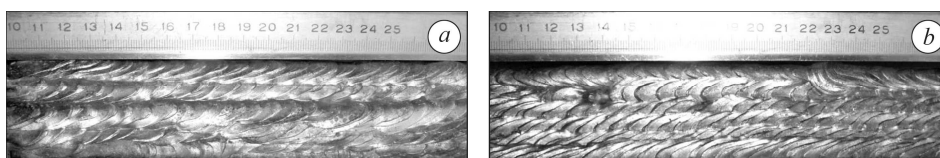


Рис. 1. Поверхня зразків, наплавлених з імпульсом подачі порошкового дроту ПД-Нп-30Х22МН 0,5 (а) і 0,7 Hz (b).

Fig. 1. Surface of the samples deposited with a pulse of supply of the flux-cored wire ПД-Нп-30Х22МН 0.5 (a) and 0.7 Hz (b).

Застосували методи металографічного дослідження та апаратуру, які детальніше розглянуті в праці [12]. Схема вирізання зразків показана на рис. 2.

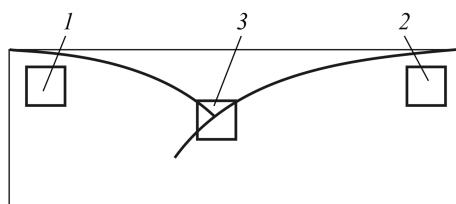


Рис. 2. Схема вирізання зразків для металографічних досліджень: 1, 2 – валики; 3 – зона перекриття валиків.

Fig. 2. Scheme of cutting samples for metallographic research: 1, 2 – rollers; 3 – area of rollers overlap.

Випробовували наплавлені зразки на корозійну тривкість у потенціодинамічному режимі з використанням вольтамперометричної системи СВА-1Б-М. Електрод порівняння – хлоридсрібний типу ЭВЛ-1М1. Швидкість зміни потенціалу 2 mV/s. Швидкість корозії ($i_{\text{кор}}$) визначали екстраполяцією лінійних ділянок поляризаційних кривих на потенціал корозії. Для електрохімічних досліджень робочу частину поверхні зразка виокремлювали циліндричними комірками площею 2 cm^2 [12]. Корозивним середовищем слугував 3%-ий розчин NaCl, у якому зразки попередньо витримували впродовж 1 h. Температура середовища $20 \pm 0,5^\circ\text{C}$.

Результати досліджень. За наплавлення з імпульсом подачі дроту 0,5 Hz мікроструктура металу першого валика – мартенситна матриця та залишковий аустеніт на межах кристалів. Наплавлений метал цього валика має твердість 4880...4930 МПа. Вздовж лінії перекриття валиків (рис. 2) утворюється область з

дисперсною структурою (рис. 3а) твердістю 5080...5190 МПа. Структура другого валика аустенітна, з твердістю 4010...4050 МПа.

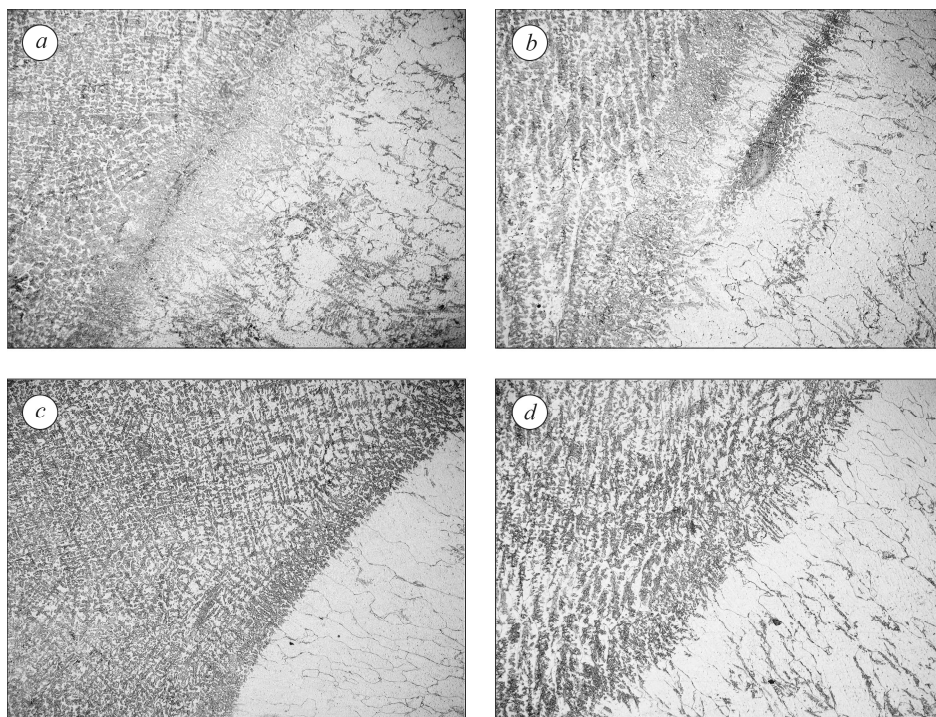


Рис. 3. Мікроструктура металу ($\times 100$), наплавленого за подачі дроту з імпульсом 0,5 Hz (a, b) та 0,7 Hz (c, d): a, c – зона перекриття валиків у приповерхневому наплавленому шарі; b, d – зона перекриття валиків на половині товщини наплавленого шару.

Fig. 3. Microstructure of the metal ($\times 100$), deposited when supplying a wire with a pulse of 0.5 Hz (a, b) and 0.7 Hz (c, d): a, c – the area of the rollers overlap in the near-surface deposited layer; b, d – the area of the rollers overlap at half the thickness of the deposited layer.

Мікроструктура металу на лінії з'єднання середньої частини наплавленого шару показана на рис. 3b. Спостерігаємо чітку межу переходу від першого валика до другого і “затік” металу з підвищеною твердістю (5660 МПа) порівняно з прилеглими шарами.

Наплавлення з імпульсом подачі дроту 0,7 Hz характеризується такими особливостями структуроутворення. Метал першого валика має аналогічну структуру – мартенсит і легований аустеніт з твердістю 4130...4210 МПа за ширини кристалітів 10...15 μm (рис. 3c). Другий валик з аустенітною структурою і тією ж шириною кристалітів має твердість 4830 МПа. Мікроструктура приповерхневої зони перекриття валиків проілюстрована у вигляді чіткої межі, причому з боку металу першого валика розташована область дисперсної нормалізованої структури (рис. 3c) з підвищеною твердістю – 4820 МПа. З боку металу другого валика до області перекриття примикає зона з аустенітною структурою (рис. 3d) з твердістю 3660...3830 МПа.

У мікроструктурі металу в зоні перекриття валиків приблизно на половині їх товщини змін не спостерігаємо. При цьому вона складається з мартенситної матриці і залишкового аустеніту на межах кристалітів. Твердість цієї зони 4210...4420 МПа.

Загалом мікроструктура металу, наплавленого за імпульсу 0,7 Hz, дисперсніша порівняно з металом, отриманим наплавленням з імпульсом 0,5 Hz. Однак мікротвердість її структурних складових як в металі валиків (перший валик), так і в металі зони перекриття в приповерхневій області нижча (~ 15% та ~ 6% відповідно). Це свідчить про дещо підвищений вміст аустенітної складової структури.

Якщо ж орієнтовно оцінювати хімічну і структурну мікронеоднорідності металу обох режимів наплавлення за співвідношеннями значень мікротвердості металу валиків і металу валиків стосовно металу зони їх перекриття, то за наплавлення з імпульсами подачі дроту 0,5 і 0,7 Hz різниця в значеннях мікротвердості металу валиків ~ 18 і ~ 16%, а між металами валиків і зони перекриття ~ 13 і ~ 7%, відповідно. Таким чином, збільшення імпульсу подачі дроту до 0,7 Hz сприяє формуванню тонкішої дендритної структури (відбувається подрібнення кристалічної складової), збільшенню мікротвердості наплавленого металу в області перекриття валиків та структурної однорідності наплавленого металу.

Легування хромом та нікелем мало б забезпечити високу корозійну тривкість наплавлених шарів у нейтральних водних середовищах. Для запобігання виділень карбідів хрому межами зерен шари додатково легували молібденом.

Щоб оцінити вплив зазначених відмінностей у структуроутворенні металу, наплавленого в імпульсно-дуговому режимі за різних імпульсів (0,5 і 0,7 Hz) подачі порошкового дроту ПД-Нп-30X22МН, виконали лабораторні випробування наплавлених зразків на стійкість проти корозії на установці СВА-1БМ [9]. Результати випробувань подані на рис. 4 та в таблиці.

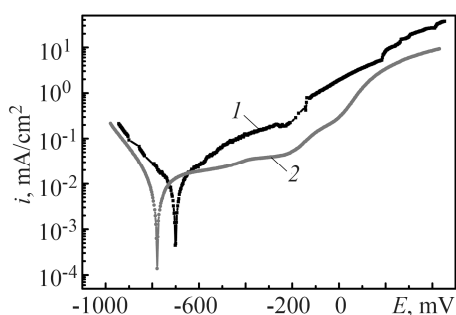


Рис. 4. Потенціодинамічні криві наплавлених шарів, отриманих за різного імпульсу подачі порошкового дроту ПД-Нп-30X22МН: 1 – 0,5 Hz; 2 – 0,7 Hz.

Fig. 4. Potentiodynamic curves of the deposited layers at different supply pulses of the ПД-Нп-30X22МН flux-cored wire: 1 – 0.5 Hz; 2 – 0.7 Hz.

Корозійна тривкість наплавлених шарів, одержаних за різної частоти подачі дроту

Імпульс подачі порошкового дроту, Hz	Показники корозії			
	$E_{\text{сог}}$, mV	$i_{\text{сог}} \times 10^{-3}$, mA/cm ²	b_c	b_a
0,5	-709	10	0,191	0,259
0,7	-779	7,54	0,130	0,342

Форма кривих свідчить про ідентичність процесів, які відбуваються на електроді у катодній області потенціалів за цих умов. Потенціал корозії найнегативніший для покриттів наплавлених дротом ПД-Нп-30X22МН (-779 mV) в імпульсному режимі 0,7 Hz. Найменші струми корозії в покритті, наплавленому в імпульсному режимі 0,7 Hz ($7,54 \cdot 10^{-3}$ mA/cm²), а найвищі – при 0,5 Hz (10^{-2} mA/cm²). Внаслідок анодної поляризації наплавленого металу відбувається активування його поверхні та розчинення за активно-пасивним механізмом.

У корозивному середовищі (хлорид натрію) розчинення покриттів зі зміщенням потенціалу від $E_{\text{сог}}$ в анодну область прискорене, можливо, через утворення адсорбційних поверхневих комплексів добре розчинних агресивними Cl^- йонами.

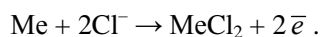
Після вузької ділянки активного розчинення поверхні покриття, наплавленого за імпульсу 0,7 Hz, виникає область пасивного стану за густини струму ($\sim 10^{-2}$ mA/cm²) в межах $-700 \dots -200$ mV. За потенціалу поляризації -200 mV поверхня зразка починає активно розчинятися. Проте на поляризаційній кривій, побудованій для покриття, наплавленого за імпульсу 0,5 Hz, пасивна область відсутня.

Проаналізувавши результати потенціодинамічних досліджень наплавлених шарів, виявили, що електрохімічна корозія відбувається з перевагою анодного контролю ($b_a > b_c$) для усіх режимів наплавлення.

Завдяки своєму хімічному складу досліджені шари схильні до пасивації та утворення на поверхні хемосорбованої оксидної плівки товщиною, яка дорівнює одному або декільком шарам кисню, наприклад за реакцією



Така тонка поверхнева плівка з доброю електронною, але з дуже поганою йонною провідністю вибірково гальмує анодне розчинення поверхневих шарів. Під час випробування в активному щодо хрому хлоридвмісному середовищі може відбутися пробій пасивної плівки з подальшим пітингоутворенням внаслідок поступового витіснення з бар'єрної оксидної плівки кисню йонами хлору. Тому на окремих ділянках захисна оксидна плівка може замінюватися розчинними сполуками металу з галогеном. Захисний шар частково руйнується внаслідок реакції



Проте це не спричиняє загальної активації поверхні, а лише локальне анодне розчинення з утворенням пітингів.

Внаслідок імпульсної подачі наплавленого дроту, особливо при 0,7 Hz, досягають значного зниження хімічної та структурної мікронеоднорідності наплавленого металу, підвищення дисперсності фаз та їх мікротвердості, проте повністю уникнути утворення локальних аустенітних зон, які спричиняють міжкристалітну корозію на межі зерен аустеніту, не вдається (рис. 5).

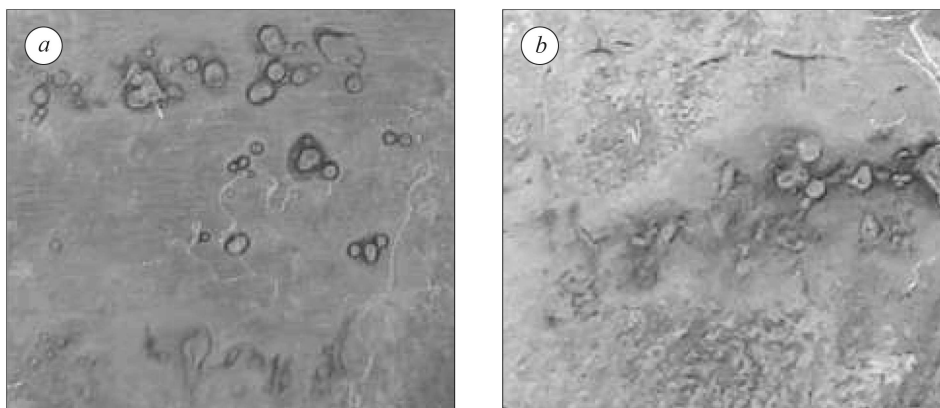


Рис. 5. Поверхня зразків, наплавлених за різного імпульсу подачі порошкового дроту, після корозійних випробувань у 3%-му розчині NaCl: *a* – 5 Hz; *b* – 7 Hz.

Fig. 5. Surface of the samples deposited at different pulses of supply of the flux-cored wire, after corrosion tests in 3% NaCl solution: *a* – 5 Hz; *b* – 7 Hz.

Корозійним пошкодженням властивий типовий стрічковий характер. Стрічки розташовані між гребенями наплавлених шарів у зоні повторного нагріву. Це, мабуть, пов'язано з нерівномірним проплавленням основного металу і, відповідно, коливанням вмісту основного легувального елемента (Cr) в наплавленому металі.

ВИСНОВКИ

Внаслідок одношарового імпульсно-дугового наплавлення аустенітно-мартенситних сталей можна отримувати метал з підвищеними корозійними властивостями порівняно з металом, наплавленим у звичайному режимі (з постійною подачею дроту). Через зміну імпульсу подачі дроту можна регулювати хімічну і структурну мікрогетерогенність наплавленого металу і його мікротвердість. Встановлено, що за одношарового імпульсно-дугового наплавлення порошковим дротом ПД-Нп-30Х22МН найкращі результати за структуроутворенням наплавленого металу і його корозійної тривкості досягають за імпульсної подачі дроту 0,7 Hz. З'ясовано, що мікроструктура металу, наплавленого в режимі імпульсу 0,7 Hz, дисперсніша, порівняно з металом, отриманим за наплавлення з імпульсом 0,5 Hz. Проте мікротвердість її структурних складників як в металі валиків (перший валик), так і в металі зони перекриття в приповерхневої області нижча на ~ 15 та ~ 6% відповідно, що свідчить про дещо підвищений вміст аустенітної складової структури.

1. *Влияние технологии наплавки на сопротивление наплавленного металла коррозии применительно к условиям эксплуатации деталей гидравлических устройств* / Ю. М. Кусков, В. А. Жданов, В. А. Тищенко, М. М. Студент, Н. Р. Червинская // *Автомат. сварка*. – 2016. – № 10. – С. 35–38.
2. *Восстановление дуговой наплавкой под флюсом штоков и плунжеров шахтных гидрокрепей* / Ю. М. Кусков, И. А. Рябцев, Ю. В. Демченко, А. М. Денисенко // *Сварщик*. – 2008. – № 2. – С. 13–15.
3. *Corrosion resistance of VC–FeCr and VC–FeCrCo coatings obtained by supersonic gas-flame spraying* / М. М. Student, Н. V. Pokhmurs'ka, K. R. Zadorozhna, Н. Н. Veselivs'ka, V. M. Hvozdets'kyi, and Y. Y. Sirak // *Materials Science*. – 2019. – **54**, № 4. – P. 535–541.
4. *Corrosion resistance of plasma-electrolytic layers on alloys and coatings of the Al–Cu–Mg system for various modes of heat treatment* / М. М. Student, V. M. Posuvailo, Н. Н. Veselivs'ka, Y. Y. Sirak, and R. A. Yatsyuk // *Materials Science*. – 2018. – **53**, № 6. – P. 789–795.
5. *Flux-cored wires of systems FeCrB + Al and FeCr + Al + C for electric arc metallizing* / V. I. Pokhmurskij, М. М. Student, V. M. Dovgunik, I. I. Sidorak // *Автомат. сварка*. – 2002. – № 3. – P. 32–35.
6. *The effect of increasing the air flow pressure on the properties of coatings during the arc spraying of cored wires* / M. Student, V. Gvozdetsky, O. Student, O. Prentkovskis, P. Maruschak, O. Olenyuk, and L. Titova // *Strojnický Casopis*. – 2019. – **69**, № 4. – P. 133–146.
7. *Медовар Б. И. Сварка хромоникелевых аустенитных сталей*. – К.–М.: Машгиз, 1958. – 339 с.
8. *Каховский Н. И. Сварка нержавеющей сталей*. – К.: Техніка, 1968. – 312 с.
9. *Лившиц Л. С., Хакимов А. Н. Металловедение сварки и термическая обработка сварных соединений*. – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.
10. *Лившиц Л. С., Гринберг Н. А., Куркумелли Э. Г. Основы легирования наплавленного металла*. – М.: Машиностроение, 1969. – 188 с.
11. *Лебедев В. А. Особенности сварки сталей с импульсной подачей электродной проволоки* // *Сварочное производство*. – 2007. – № 8. – С. 30–35.
12. *Methods for increasing the corrosion resistance of coatings deposited under a flux layer from high-chromium powder wires* / Y. M. Kuskov, V. A. Zhdanov, I. O. Ryabtsev, М. М. Student, and Н. Н. Veselivs'ka // *Materials Science*. – 2020. – **55**, № 5. – P. 710–715.
13. *Эволюция систем импульсной подачи электродной проволоки для сварки и наплавки* / Б. Е. Патон, В. А. Лебедев, В. Г. Пичак, С. И. Полосков // *Сварка и диагностика*. – 2009. – № 3. – С. 46–51.

Одержано 08.10.2021