

TIG ЗВАРЮВАННЯ У ВУЗЬКИЙ ЗАЗОР СТАЛІ 20 ПІДВИЩЕНОЇ ТОВЩИНИ

С.В. Ахонін, В.Ю. Білоус, Р.В. Селін, В.В. Пашинський, С.Л. Шваб

ІЕЗ ім. ЄО. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: belousvy@gmail.com

Дугове зварювання з'єднань з вуглецевих сталей завтовшки 20...100 мм може виконуватися, як плавким електродом, так і неплавким, із застосуванням захисних газів або під флюсом. Для підвищення продуктивності зварювальних робіт для металів середньої і великої товщин може застосовуватись багатопшарове зварювання у вузький зазор (ЗВЗ) із подачею присадного дроту. В даній роботі розглядається застосування ЗВЗ вольфрамовим електродом без та із використанням керуючого магнітного поля для зварювання зразків із сталі 20 завтовшки 40 мм. Приведені результати досліджень макрота мікроструктури, мікротвердості зварних з'єднань. Установлено, що застосування зовнішнього керуючого магнітного поля для ЗВЗ з'єднань зі сталі 20 забезпечує більш високу якість зварних з'єднань. Бібліогр. 14, рис. 8.

Ключові слова: аргано-дугове зварювання у вузький зазор, вольфрамовий електрод, сталь 20, керуюче магнітне поле, структура, мікроструктура, мікротвердість

Вступ. Дугове зварювання з'єднань з вуглецевих сталей товщиною 20...100 мм може виконуватися, як плавким електродом, так і неплавким, із застосуванням захисних газів або під флюсом. У даній час зварювання вольфрамовим електродом вважається надійним, але малопродуктивним способом дугового зварювання стикових з'єднань великих товщин. Одним з методів підвищення продуктивності зварювальних робіт для різних металів середньої та великої товщини є багатопшарове зварювання в щільну обробку, а саме ЗВЗ з подачею присадного дроту. Його відмінною особливістю є форма оброблення кромки у вигляді прямокутного паза, в якому, дуговим способом здійснюється наплавлення одного валика на інший по всій ширині зазору. В результаті утворюється шар металу, що заповнює проміжок на певну висоту. Послідовне виконання цих операцій проводить до заповнення всього обсягу зазору наплавленим металом [1, 2]. Основні переваги ЗВЗ – це істотне скорочення необхідної кількості металу, що наплавляється (в порівнянні з обробкою кромки звичайної форми), скорочення витрат присадного дроту, зменшення ширини шва, ширини зони термічного впливу (ЗТВ), а також зменшення зварювальних напруг і деформацій [2]. ЗВЗ з'єднань зі сталей проводиться в основному із застосуванням технології зварювання плавким електродом [3]. Для забезпечення якісних зварних з'єднань необхідно забезпечити надійне розплавлення бічних стінок при ЗВЗ і сплавлення металу шва з основним металом [5, 6]. При зварюванні електродом, що плавиться, застосовується деформований дріт або зварювання з коливаннями при-

садного дроту, зварювання з поворотом присадного дроту [3, 7, 8]. Спосіб ЗВЗ електродом, що плавиться, має таку перевагу в порівнянні зі ЗВЗ вольфрамовим електродом, як більш високу продуктивність [4].

В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона розроблена технологія ЗВЗ вольфрамовим електродом, що добре зарекомендувала себе для зварювання титану та деяких інших кольорових металів [1, 9]. Успішна реалізація цього процесу вимагає подолання певних труднощів, головна з яких – забезпечення надійного оплавлення бічних стінок обробки. Для забезпечення надійного оплавлення бічних стінок необхідно перерозподіляти теплову енергію між кромками, що зварюються. З цією метою при ЗВЗ може застосовуватися як механічне переміщення вольфрамового електрода, так і зовнішнє магнітне поле [10]. Оскільки вуглецеві сталі мають власне магнітне поле і високі магнітні властивості, застосування зовнішнього керуючого магнітного поля для ЗВЗ ускладнюється, так як власне магнітне поле деталей, що зварюються, може накладатись на зовнішнє керуюче магнітне поле, що формується магнітною системою зварювальної головки.

Мета роботи. Дослідити можливість виконання ЗВЗ вольфрамовим електродом з зовнішнім керуючим магнітним полем зварних з'єднань з вуглецевої сталі завтовшки 40 мм.

Матеріали та методи дослідження. З метою вивчення можливостей виконання ЗВЗ вольфрамовим електродом виконувалося зварювання зразків товщиною 40 мм, виготовлених із сталі марки сталь 20 ГОСТ 1050-88. Для зварювання був за-

стосований присадний дріт марки Св-08Г2С діаметром 1,6 мм. Причому зварювання виконувалося як без зовнішнього управляючого поля, так і з зовнішнім керуючим магнітним полем. Схема процесу представлена на рис. 1. Для зварювання було використано вольфрамові електроди, діаметром 5 мм, марки ЭВИ-1. Використовувалося зварювальне джерело живлення ВДУ501. Величина струму зварювання становила 460...500 А, напруга на дузі 12 В, подача присадного металу присадного дроту Св-08Г2С діаметром 1,6 у зварювальну ванну складала на рівні 20...25 гр/хв. Підтримка заданої напруги на дузі проводилася автоматичною системою, що регулювала напругу на дузі. Відхилення зварювальної дуги до бокових стінок забезпечувалося накладанням зовнішнього керуючого магнітного поля, з частотою 10...20 Гц, яке генерує зовнішній електромагніт (рис. 1). Контроль процесу зварювання, положення вольфрамового електрода в обробці контролювалися системою відеоспостереження (рис. 2). Схема збирання зразка для зварювання у ЗВЗ наведено на рис. 2, підкладка для збирання зразків, також виготовлено з сталі 20. Довжина зразків для зварювання становила 600 мм.

Результати досліджень. ЗВЗ вольфрамовим електродом відрізняється великою часткою участі присадного металу у формуванні металу шва,

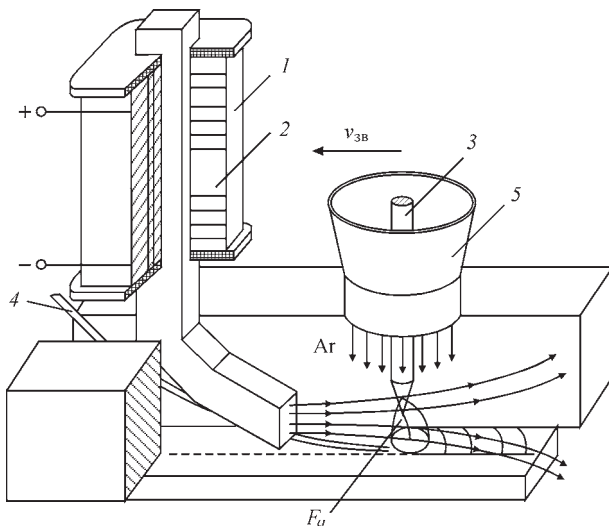


Рис. 1. Схема процесу ЗВЗ вольфрамовим електродом із зовнішнім керуючим магнітним полем: 1 – котушка електромагніту; 2 – сердечник електромагніту; 3 – вольфрамовий електрод; 4 – присадний дріт; 5 – захисне сопло

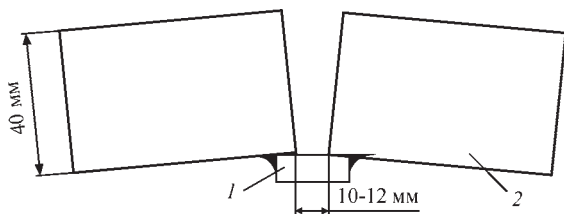


Рис. 2. Схема збирання зразка для зварювання у вузький зазор вольфрамовим електродом: 1 – підкладка; 2 – зразки, що зварюються

в наших експериментах вона складала $\approx 90\%$, тому властивості металу зварних з'єднань виконаних ЗВЗ визначаються головним чином властивостями матеріалу присадного дроту і впливом зовнішнього керуючого магнітного поля.

Металографічне дослідження поперечних макрошліфів не виявило наявності пір у металі шва, виконаного із зовнішнім керуючим магнітним полем. У металі шва, виконаного без зовнішнього керуючого магнітного поля і без перерозподілу теплової енергії зварювальної дуги були несплавлення, непровари і фіксувалися окремі пори.

Фотографії поперечних макрошліфів, виконаних зварних з'єднань наведено на рис. 3.

Проведені металографічні дослідження з'єднань, виконаних ЗВЗ без використання зовнішнього керуючого магнітного поля з подачею присадного матеріалу на рівні 20...25 гр/хв, показали, що зварні шви мали велику глибину проплавлення нижньої стінки оброблення та малу ширину в нижній частині, в зварних швах є непровари та несплавлення (рис. 3, а). Проплавлення вертикальних бічних стінок виявилось нерівномірним, так само, як і форма наплавлених шарів, з чим пов'язана поява таких дефектів, як непровари і несплавлення. Застосування магнітного поля для відхилення зварювальної дуги забезпечило рівномірне проплавлення бічних стінок та хороше формування шва (рис. 3, б). Наплавлені шари мають гладку увігнуту поверхню, що свідчить про надійне сплавлення присадного та основного металу. Проплавлення основного металу та попереднього валика незначне. Рентгенівський контроль зварних з'єднань виконаних із зовнішнім керуючим магнітним полем на оптимальних режимах не показали непроварів, несплавлень і пор у металі шва, виконаного із зовнішнім керуючим магнітним полем.

Окрім впливу зовнішнього керуючого електромагнітного поля (ЗКЕМП) на макроструктуру зварного з'єднання, значний інтерес становить

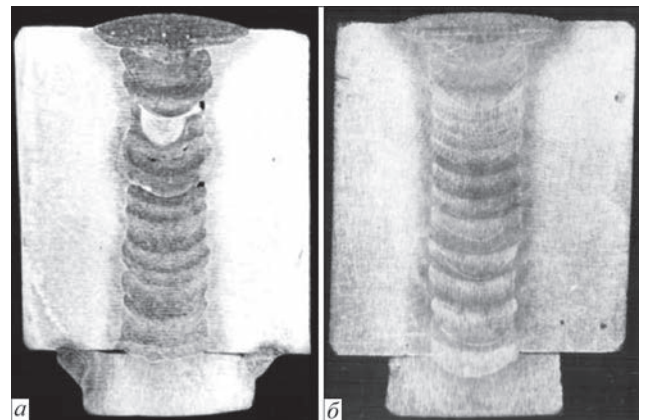


Рис. 3. Поперечні макрошліфи сполук вуглецевої сталі сталь 20, виконаних ЗВЗ вольфрамовим електродом: а – без зовнішнього керуючого магнітного поля; б – із зовнішнім керуючим магнітним полем

оцінка впливу такої обробки на його мікроструктуру. Наявність такого впливу встановлена у багатьох дослідженнях, зокрема в роботах [11, 12, 14] приведено огляд варіантів обробки та можливих механізмів впливу магнітного поля на мікроструктуру сплавів. Слід зауважити, що єдиного загальноприйнятого механізму, що описує вплив поля, не існує. Це пов'язано з тим, що існує багато варіантів технології обробки і вона застосовується для сплавів різного хімічного складу та фізичних властивостей (феромагнітні та не феромагнітні матеріали). Тому може існувати декілька варіантів механізму впливу у залежності від таких факторів, як питома потужність поля, частота, тривалість впливу та температурний інтервал, у якому проводиться обробка. Однак найбільш достовірним фактом є те, що накладення ЗКЕМП приводить до подрібнення структури.

На рис. 4 приведено мікроструктуру металу шва, який не піддавався впливу (ЗКЕМП), та шва, який виконано в умовах прикладення поля. Видно, що у обох випадках при збільшен-

ні $\times 200$ формується однорідна дисперсна структура (рис. 4 *a, б*). Явна різниця між структурами не виявляється. Однак при збільшеннях $\times 500$ (рис. 4 *в, г*) видно, що вплив ЗКЕМП робить структуру більш дисперсною. Ще одна особливість впливу ЗКЕМП становиться помітною при використанні збільшення $\times 1250$ (рис. 4 *д, е*). Вона полягає у тому, що крім подрібнення структури, змінюється морфологія зерен і вони перетворюються з витягнутих (рис. 4, *д*) на рівноосні (рис. 1, *е*). Раніше такий вплив поля був виявлений при дослідженні кристалізації неферомагнітного матеріалу (олов'янистої бронзи) [13], дані цього аналізу дозволяють припустити, що ефект має більш загальний характер.

Прояв цього ефекту видно і при аналізі структури зони сплавлення (рис. 2).

При збільшенні $\times 50$ (рис. 5 *a, б*) в зоні сплавлення виявляється первинна дендритна будова металу, яка в обох випадках подібна і ефект ЗКЕМП явно не виявляється, але при збільшеннях $\times 500$ (рис. 5, *в, г*) та $\times 1250$ (рис. 5, *д, е*) вид-

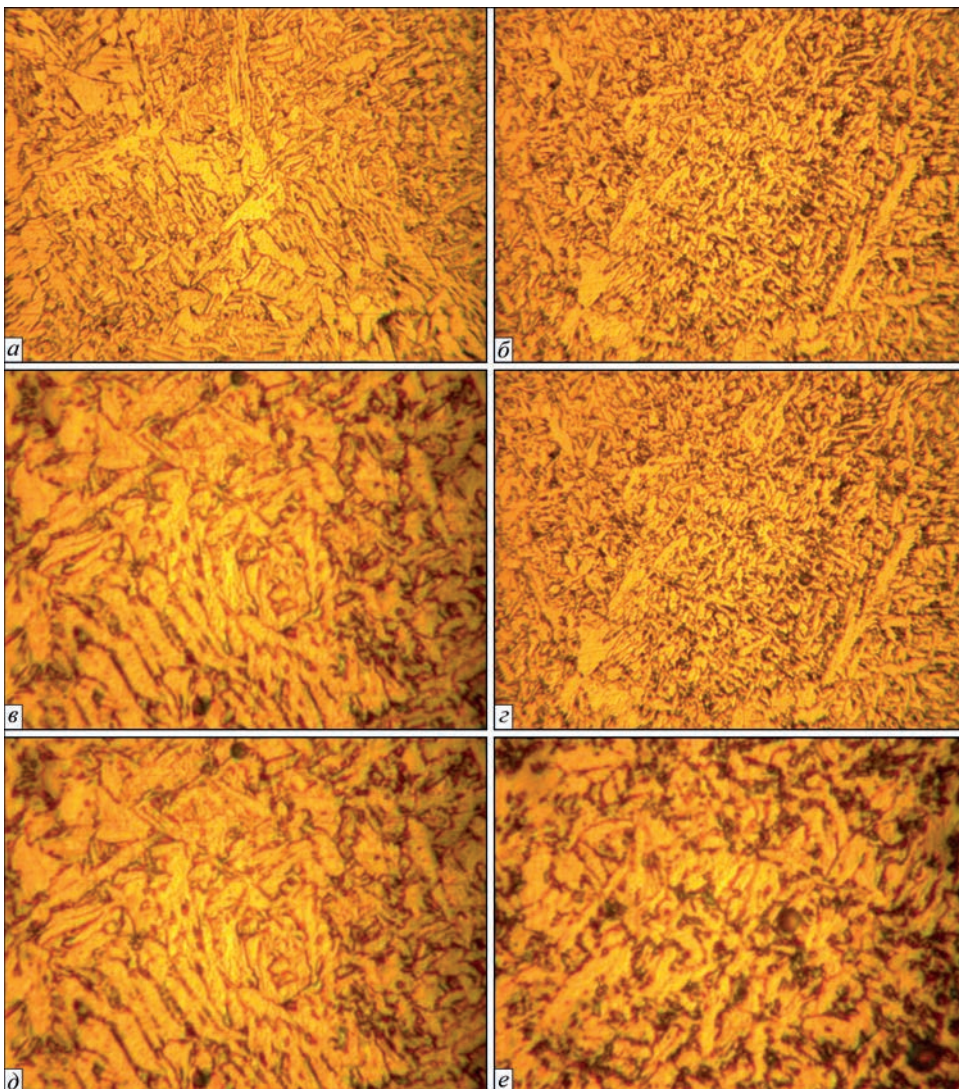


Рис. 4. Мікроструктура металу зварного шва без впливу (*a, в, д*) та з впливом (*б, д, е*) зовнішнього електромагнітного поля: *a, б* – $\times 200$; *в, г* – $\times 500$; *д, е* – $\times 1250$

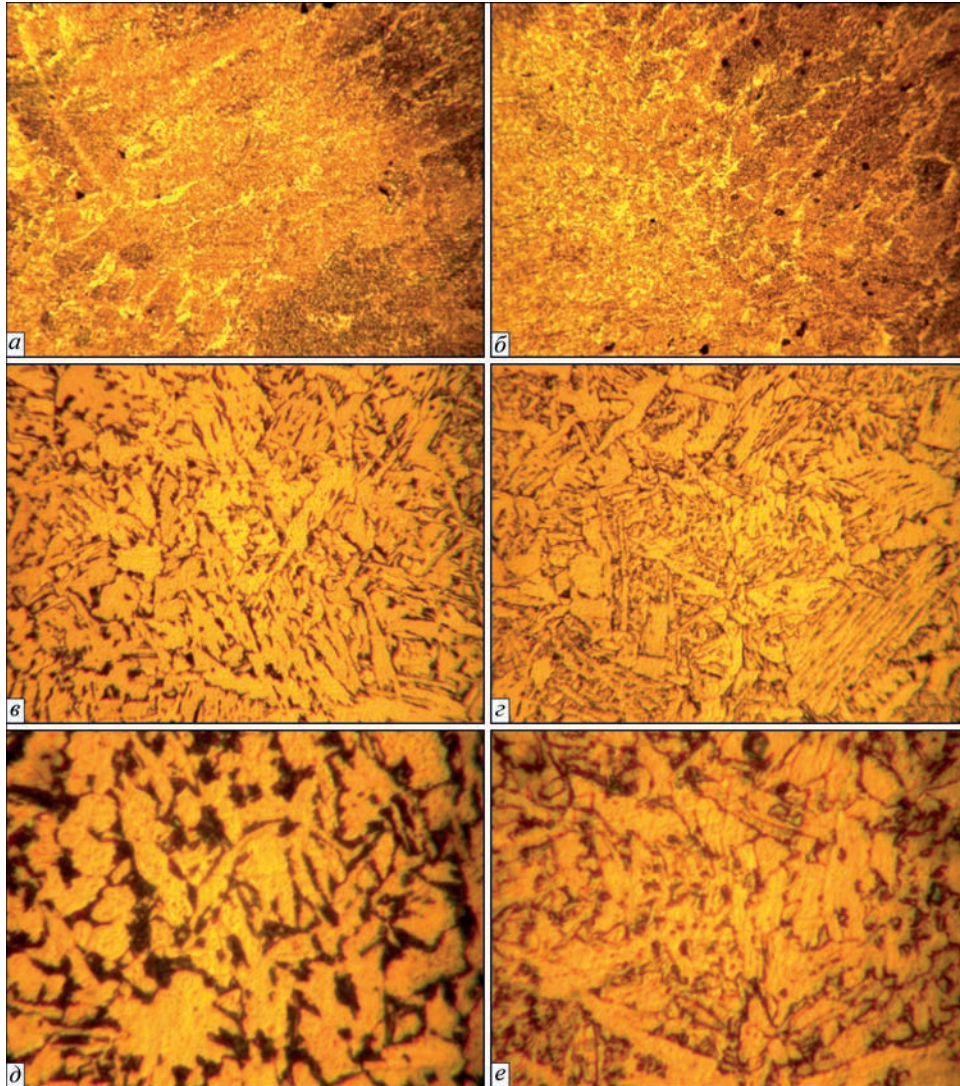


Рис. 5. Мікроструктура металу зони сплавлення без впливу (а, в, д) та з впливом (б, д, е) зовнішнього керуючого електромагнітного поля: а, б – $\times 50$; в, з – $\times 500$; д, е – $\times 1250$

но, що мікроструктура стає більш дисперсною і перлітні колонії практично зникають, змінючись рівномірно розподіленою карбідною фазою.

Встановлення розподілу мікротвердості металу зварних з'єднань з сталі 20, виконаних як з впли-

вом ЗКЕМП, так і без нього проводили з використанням мікротвердометру ПМТ-2 з навантаженням в 100 г (рис. 6).

Значення мікротвердості основного металу (сталі 20) знаходяться на рівні 1700 МПа (рис. 7 та рис. 8). В металі показники мікротвердості знаходяться в середньому на рівні 2000 МПа, що в свою чергу, скоріш за все, пов'язано з утворенням нової гартівної структури. Мікротвердість HV, MPa

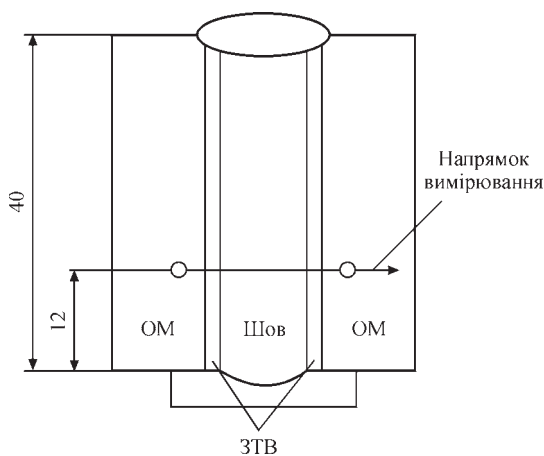


Рис. 6. Схема вимірювання розподілу мікротвердості в зварному з'єднанні сталі 20, виконаному ЗВЗ з присадним дротом Св-08Г2С діаметром 1,6 мм

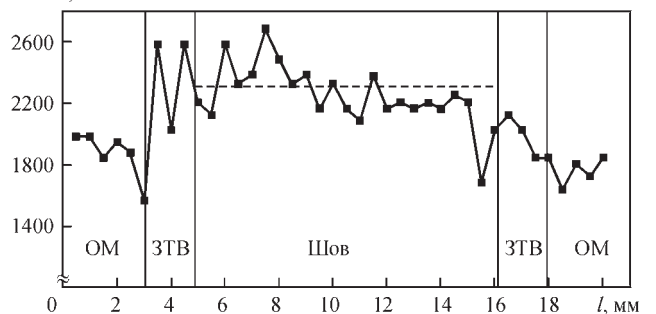


Рис. 7. Розподіл мікротвердості в зварному з'єднанні сталі 20, виконаному ЗВЗ з присадним дротом Св-08Г2С діаметром 1,6 мм, без впливу ЗУЕМП, в стані після зварювання

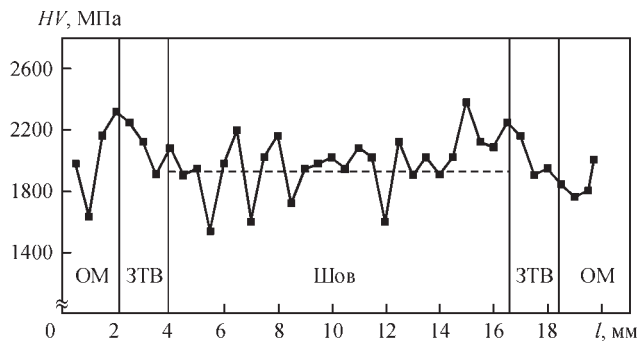


Рис. 8. Розподіл мікротвердості в зварному з'єднанні сталі 20, виконаному ЗВЗ з присадним дротом Св-08Г2С діаметром 1,6 мм, з впливом ЗКЕМП, в стані після зварювання

металу шва, отриманого без участі магнітного поля, знаходиться на рівні 2300 МПа (рис. 7), а металу шва, отриманого під впливом зовнішнього магнітного поля – на рівні 1900 МПа (рис. 8). Це може бути пов'язане з тим, що під час застосування зовнішнього магнітного впливу утворюється більш дрібнозерниста структура зі зміненою морфологією цементитної фази. Карбідні частки не утворюють колонії з пластинчатою морфологією, а розподілені рівномірно у фериті. Як наслідок метал шва, отриманий таким способом має більшу пластичність і меншу мікротвердість, ніж такий же зразок, отриманий без впливу зовнішнього магнітного поля.

Обговорення результатів. Технологія ЗВЗ вольфрамовим електродом із зовнішнім керуючим магнітним полем, що раніше добре зарекомендувала себе для зварювання титану та деяких інших кольорових металів може бути застосована для зварювання з'єднань, виготовлених із магнітних сталей, таких як сталь 20 завтовшки 40 мм, та більше. Магнітне керування перерозподілу теплової енергії зварювальної дуги виконує свою функцію – відхилення зварювальної дуги та зміщення анодної плями на необхідну величину, що забезпечує відсутність у швах непроварів, несплавлень і пор, при цьому проплавлення бічних стінок – рівномірне, з гарним формуванням шва. В зварних швах виконаних без застосування магнітного керування і без перерозподілу теплової енергії дуги фіксуються численні дефекти – непровари та несплавлення. Застосування ЗВЗ з магнітним керуванням зварювальною дугою дозволяє, також, збільшити коефіцієнт наплавки та довести подачу присадного металу присадного дроту Св-08Г2С діаметром 1,6 у зварювальну ванну до рівня 35 г/хв. Наплавляти методом ЗВЗ вольфрамовим електродом без магнітного керування з такою подачею присадного металу авторам не вдалося. Таким чином застосування магнітного керування зварювальною дугою дозволяє дещо компенсувати головний недолік аргоно-дугового зварювання вольфрамовим електродом – низьку продук-

тивність наплавлення. Крім того, дослідження мікроструктури зварних з'єднань та встановлення розподілу мікротвердості металу зварних з'єднань з сталі 20, виконаних як з впливом ЗКЕМП, так і без нього, дозволило зробити висновок, що в цілому рівень мікротвердості в шві з впливом ЗКЕМП характеризується високою рівномірністю без значних перепадів та надмірного зміцнення зони зварного шва у порівнянні з розподілом твердості у зразку, що отриманий без впливу ЗКЕМП. Це дозволяє очікувати більшої стійкості металу зварного з'єднання до дії динамічних та циклічних навантажень.

Таким чином використання ЗКЕМП в процесі зварювання дозволило не тільки запобігти формуванню дефектів макроструктури шва, але й позитивно вплинуло на його мікроструктуру. Подальші дослідження слід направити на встановлення залежності характеристик мікроструктури від параметрів ЗКЕМП з метою підсилення ефектів, що спостерігаються.

Висновки

1. Для зварювання з'єднань, виготовлених зі сталі 20 завтовшки 40 мм застосована технологія ЗВЗ вольфрамовим електродом із зовнішнім керуючим магнітним полем, що раніше добре зарекомендувала себе для зварювання титану та деяких інших кольорових металів.

2. Дослідження зварних швів, виконаних ЗВЗ вольфрамовим електродом із застосуванням зовнішнього керуючого магнітного поля показали практично повну відсутність у швах непроварів, несплавлень і пор, при цьому проплавлення бічних стінок – рівномірне, з гарним формуванням шва.

3. Виконані дослідження дозволяють зробити висновок про більш високу якість зварних з'єднань сталі 20, виконаних ЗВЗ вольфрамовим електродом із зовнішнім керуючим магнітним полем з подачею присадного матеріалу на рівні 20...25 г/хв, порівняно з ЗВЗ вольфрамовим електродом без зовнішнього магнітного керуючого поля.

4. Застосування зовнішнього керуючого електромагнітного поля в процесі зварювання з'єднань сталі 20 у вузький зазор позитивно вплинуло на мікроструктуру з'єднань. Мікроструктура з'єднань стала більш дисперсною, перлітні колонії зникають, змінюючись рівномірно розподіленою карбідною фазою, що супроводжується отриманням рівномірного розподілу мікротвердості металу зварного шва.

Список література/References

1. Ахонин, С.В., Белоус В.Ю., Романюк В.С. и др. (2010) Сварка в узкий зазор высокопрочных титановых сплавов толщиной до 110 мм. *Автоматическая сварка*, 5, 44-48.

- Akhonin, S.V., Belous, V.Yu., Romanyuk, V.S. et al. (2010) Narrow-gap welding of up to 110 mm thick high-strength titanium alloys. *The Paton Welding J.*, **5**, 34-37.
2. Malin, V. (1987) Monograph on Narrow-Gap Welding Technology. WRC, Bulletin 323.
 3. Хори К., Ханэда М. (1999) Дуговая сварка в узкий зазор. *Журн. Япон. свароч. общества*, **3**, 41–62.
Hori, K., Haneda, M. (1999) Narrow gap arc welding. *J. of J.W.S.*, **3**, 41–62.
 4. Jun, J.H., Kim, S.R., Cho, S.M. (2016) A Study on Productivity Improvement in Narrow Gap TIG Welding. *Journal of Welding and Joining*, **34** (1), 68-74.
 5. Dak, G., Khanna, N., Pandey, C. (2023) Study on narrow gap welding of martensitic grade P92 and austenitic grade AISI 304L SS steel for ultra-supercritical power plant application. *Archiv. Civ. Mech. Eng.* **23**, 14-24. <https://doi.org/10.1007/s43452-022-00540-3>
 6. Luo, Y., Zhang, Z.L., Zhou, C.F. et al. (2017) Effect of oscillation parameters of narrow groove MAG welding on weld formation. *J. Hebei Univ. Sci. Technol.*, **38**, **6**. <https://doi.org/10.7535/hbkd.2017yx01002>
 7. Nguyen, D.H. (2014) *Research on Droplet Transfer and Welding Process of Oscillation arc Narrow Gap GMAW*. Master's Thesis, Harbin Institute of Technology, Harbin, China.
 8. Fang, D.S. (2017) *Study on the Characteristics of Three-Wire Indirect arc and Its Thick-Wall Narrow Gap Welding Process under Gas Protection*. Ph.D. Thesis, Dalian University of Technology, Dalian China.
 9. Shoichi, M., Yukio, M., Koki, T. et al. (2013) Study on the application for electromagnetic controlled molten pool welding process in overhead and flat position welding. *Sci. Technol. Weld. Join.* **18**, 38–44. <https://doi.org/10.1179/1362171812Y.0000000070>
 10. Белоус В.Ю., Ахонин С.В. (2007) Влияние параметров управляющего магнитного поля на формирование сварных швов титановых сплавов при сварке в узкий зазор. *Автоматическая сварка*, **4**, 3–6.
Belous, V.Yu., Akhonin, S.V. (2007) Influence of controlling magnetic field parameters on weld formation in narrow-gap argon-arc welding of titanium alloys. *The Paton Welding J.*, **4**, 2-5.
 11. Xinyu, B., Yonglin, M., Shuqing, X. et al. (2022) Effects of Pulsed Magnetic Field Melt Treatment on Grain Refinement of Al-Si-Mg-Cu-Ni Alloy Direct-Chill Casting Billet. *Metals*, **12**(7), 1080. <https://doi.org/10.3390/met12071080>
 12. Yujun, H., Hongjin, Z., Xuede, Y. et al. (2022) Research Progress of Magnetic Field Regulated Mechanical Property of Solid Metal Materials. *Metals*, **12**, 1988. <https://doi.org/10.3390/met12111988>
 13. Pashynskaya, E.G., Pashynskiy, V.V. (1998) Effect of weakpulsed magnetic field on structure and properties of Cu-Sn base alloy. *Physic of Metals and Metallography*, **6**, 670-674.
 14. Ахонин С.В., Белоус В. Ю. (2011) Формирование сварного соединения при сварке титана в узкий зазор с управляющим магнитным полем. *Автоматическая сварка*, **4**, 22-26.
Belous, V.Yu., Akhonin, S.V. (2011) Formation of narrow-gap welded joints on titanium using the controlling magnetic field. *The Paton Welding J.*, **4**, 19-22.

NARROW-GAP TIG WELDING OF THICK STEEL 20

S.V. Akhonin, V.Yu. Bilous, R.V. Selin, V.V. Pashynskiy, S.L. Shvab

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

E-mail: belousvy@gmail.com

Arc welding of joints of carbon steels 20...100 mm thick can be performed both by consumable and nonconsumable electrode, using shielding gases or flux. In order to increase the efficiency of welding operations, multilayer narrow-gap welding with filler wire feeding can be used for metals of medium and large thicknesses. This study deals with application of narrow-gap tungsten electrode welding with and without application of a controlling magnetic field for welding samples from steel 20 of 40 mm thickness. Results of investigations of the macro- and microstructure and microhardness of the welded joints are given. It was found that application of an external magnetic field for narrow-gap welding of steel 20 joints ensures a higher quality of the welded joints. 14 Ref., 8 Fig.

Keywords: narrow-gap argon-arc welding, tungsten electrode, steel 20, controlling magnetic field, structure, microstructure, microhardness

Надійшла до редакції 16.05.2023



Обладнання для ТІГ зварювання у вузький зазор