

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ МЕТАЛУ ШВА ПРИ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОМУ АРГОНОДУГОВОМУ НАПЛАВЛЕННІ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ BT22

С.Л. Шваб¹, С.В. Ахонін¹, І.К. Петриченко¹, С.Л. Антонюк²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
²ДП «Антонов». 03062, м. Київ, вул. Академіка Туполева, 1. E-mail: info@antonov.com

Проведено роботи по дослідженню металу з'єднань з титанового сплаву BT22, отриманих аргонодуговим наплавленням із застосуванням зовнішнього магнітного поля та присадного металопорошкового дроту. Отримано якісні бездефектні з'єднання, що підтверджено газовим аналізом та розподілом легуючих елементів в наплавленому металі. Аналіз мікроструктури показав, що використання зовнішнього магнітного поля при аргонодуговому наплавленні сприяє утворенню більш однорідної і рівномірної структури наплавленого металу, що також підтверджено кількісним аналізом розподілу фаз та аналізом внутрішньозеренної структури наплавленого металу. Проведено дослідження мікротвердості та механічних властивостей наплавлених з'єднань. Бібліогр. 9, рис. 8.

Ключові слова: титановий сплав; аргонодугове наплавлення; магнітокерована дуга; структура; легуючі елементи; мікротвердість; механічні властивості

Нелегований титан і низьколеговані титанові сплави добре зварюються і працездатність їх зварних з'єднань в умовах експлуатації близька до відповідних характеристик самих сплавів. Зварюваність існуючих високоміцних сплавів титану, які отримали найбільше поширення в літакобудуванні, значно гірша, ніж низьколегованих сплавів. Для силових елементів літаків нового покоління широко використовують високоміцні двофазні ($\alpha+\beta$)-титанові сплави, в тому числі титановий сплав BT22 (система легування Ti-5Al-5Mo-5V-1Fe-1Cr) [1], який застосовують як в відпаленому, так і в термічно зміцненому станах. Структура відпаленого сплаву BT22 представлена приблизно рівними кількостями α - та β -фаз і тому він відноситься до найміцніших титанових сплавів в відпаленому стані. Його властивості міцності в відпаленому стані такі ж, як у сплавів BT6, BT3-1, BT14 після загартування і старіння [2].

Деталі з титанових сплавів досить дорогі, з цієї причини в ряді випадків їх ремонт є більш доцільним порівняно з заміною таких же на нові вироби. У зв'язку з цим становить певний інтерес відновлювальне наплавлення виробів з високоміцних титанових сплавів, в тому числі з BT22. Одним з універсальних і економічно доцільних способів відновлення зношених ділянок є аргонодугове наплавлення [3].

Вплив на дугу, яка горить в аргоні, магнітного поля розширює її застосування не тільки при зварюванні, але і при наплавленні, оскільки можливості управління розмірами наплавленого металу і глибиною проплавлення стають більш ефектив-

ними і надійними [4]. Спосіб зварювання вольфрамовим електродом в аргоні магнітокерованою дугою реалізований як при автоматичному зварюванні титану у вузький зазор [5], так і при ручному (механізованому) зварюванні в монтажних умовах [6]. Застосування поперечних постійного і змінного магнітних полів дозволяє зварювати метал в різних технологічних варіантах: з поперечними і поздовжніми коливаннями; кутом вперед і кутом назад, тобто управляти формою і розмірами зварних швів в широких межах. При цьому змінюється і форма зварювальної ванни, що впливає на характер кристалізації металу.

Таким чином, застосування поперечного змінного магнітного поля при зварюванні та наплавленні значно розширює технологічні можливості цих процесів, оскільки дозволяє управляти розподілом теплової енергії дуги між крайками, що зварюються, присадним дротом і металом зварювальної ванни, змінюючи умови кристалізації металу зварювальної ванни і, як наслідок, регулювати форму і розміри зварного шва. Раніше було показано [7], що зміна параметрів зовнішнього магнітного поля призводить до зміни геометрії наплавлювальних з'єднань, а саме: зростання частоти збільшує глибину проплавлення, а також зі збільшенням магнітної індукції зменшується глибина проплавлення, збільшується ширина валика і коефіцієнт зварного (наплавленого) шва.

Метою даної роботи було дослідити особливості формування структури наплавлених з'єднань титанового сплаву BT22, отриманих аргонодуговим на-

С.Л. Шваб <https://orcid.org/0000-0002-4627-9786>, С.В. Ахонін <https://orcid.org/0000-0002-7746-2946>

плавленням з використанням зовнішнього магнітного поля та присадного металопорошкового дроту.

Для вивчення структурних особливостей металу наплавлення на сплав ВТ22, отриманого аргонодуговим способом з присадним титановим металопорошковим дротом, були проведені наплавочні роботи з використанням зовнішнього магнітного поля і без його участі. Експерименти проводилися на установці для автоматичного аргонодугового зварювання титану на наступних встановлених зварювальних параметрах ($I_{зв}$ (зварювальний струм) дорівнював 240 А, U_d (напруга на дузі) — 11,3 В, $V_{зв}$ (швидкість зварювання) — 4 м/год, $V_{под}$ (швидкість подачі присадного дроту) — 35 м/год, L_d (довжина дугового проміжку) — 4 мм) і параметрах магнітного поля (F (частота коливань магнітного поля) — 5 Гц, B (магнітна індукція) — 7,8 мТл). Присадний металопорошковий дріт складався з оболонки з чистого титану марки ВТ1-00 і осердя з гранул сплаву ВТ22 і флюсової складової.

Металографічні дослідження проводили на мікроскопі «NEOFOT-30». Розподілення легуючих елементів вивчали за допомогою мікрорентгеноспектрального аналізу на приладі «Сомеса». Визначення мікротвердості проводили на мікротвердомірі ПМТ-3 з навантаженням на інденторі 50 г. Вміст кисню, азоту, водню в наплавлених з'єднаннях визначали методом відновного плавлення в потоці газоносія. Вміст кисню визначали на установці LECO RO-316, чутливість вимірювань — 10^{-5} мас. %; азоту — на установці LECO TN-114, чутливість вимірювань — 10^{-5} мас. %; водню — на установці LECO RH-2, чутливість вимірювань — $10 \cdot 10^{-5}$ мас. %.

За результатами експериментів з наплавленого з'єднання було отримано макрошліф (рис. 1), який показав відсутність дефектів усадкового характеру в наплавленому металі.

Після наплавлення було проаналізовано розподіл легуючих елементів по перетину металу наплавлення, отриманого з використанням зовнішнього магнітного поля (рис. 2). Як видно з наведених даних, легуючі елементи практично рівномірно розподілені по всьому перетину наплавлення.

Вміст газів в наплавленому металі не перевищував їх допустимі значення в основному металі, мас. %: [O] — 0,098; [H] — 0,0027; [N] — 0,014.

Мікроструктура металу, наплавленого металопорошковим дротом, складалася з рівноосних поліедричних зерен (рис. 3, а) з пластинчастою внутрішньозеренною структурою (рис. 3, б). Після закінчення наплавлення при швидкому охолодженні металу в ньому можуть фіксуватися метастабільні фази, оскільки наплавлений метал



Рис. 1. Макроструктура наплавлення, отриманого присадним металопорошковим дротом

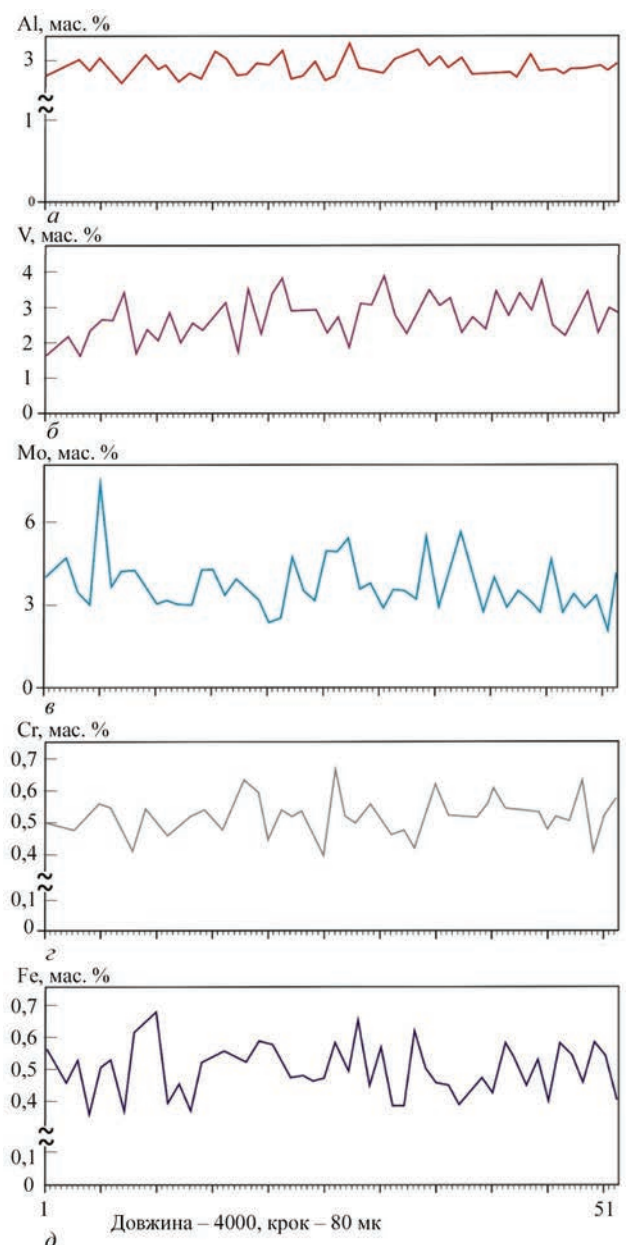


Рис. 2. Розподіл легуючих елементів (а — Al; б — V; в — Mo; г — Cr; д — Fe) в наплавленому металі (напрямок сканування — горизонтальний)

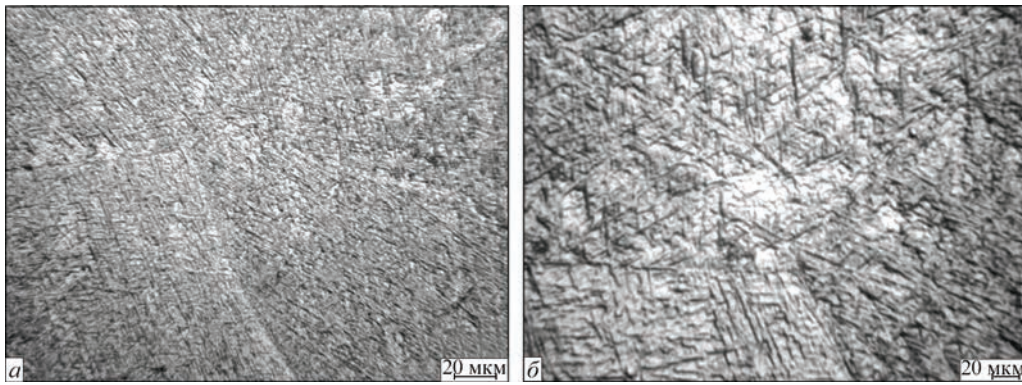


Рис. 3. Мікроструктура металу, наплавленого металопорошковим дротом

високолегований. Товщина пластинчастої фази становила близько 0,5 мкм. Слід зазначити, що розпад β -твердого розчину при швидкому охолодженні стався нерівномірно, в структурі спостерігалися ділянки з різною інтенсивністю пластинчастих виділень.

Структура наплавленого металу з використанням магнітного поля і без характерна для титанових сплавів мартенситного типу і формується при розведенні металу осердя і основного металу (сплав ВТ22 відноситься до титанових сплавів перехідного типу) металом оболонки дроту, що відноситься до α -титану. Однак внутрішньозеренна структура в зразках, виконаних без застосування і з застосуванням магнітного поля, має деякі відмінності. Без застосування магнітного поля мартенситна структура характеризується недостатньою однорідністю і рівномірністю (рис. 4, а), ділянки з інтенсивним розпадом і великою щільністю голчастих мартенситних частинок чергуються зі світлими ділянками, де щільність мартенситних голок менше. У разі застосування магнітного поля структура більш однорідна (рис. 4, б), розпад в об'ємі зерна відбувається більш рівномірно і утворюється більш дрібногочаста структура.

Коливання дуги, викликані дією магнітного поля при наплавленні, інтенсифікують процеси перемішування рідкого металу, що перешкоджає розвитку

ліквіації в металі, який кристалізується та охолоджується [8]. Аналогічний вплив на внутрішньозеренну структуру спостерігається при зварюванні з електромагнітним перемішуванням [5].

Структура зони сплавлення зразків, виконаних без застосування і з застосуванням магнітного поля, ідентична. Ширина зони сплавлення зі структурою, що відрізняється від структури основного і наплавленого металу, становить переважно 50...100 мкм (рис. 5, а). Іноді в зоні сплавлення можна помітити окремі елементи структури α -титану, що пов'язано з його наявністю в металопорошковому дроті у вигляді оболонки. У локальних ділянках зони сплавлення спостерігається вклинювання металу зі структурою α -титану в наплавлений метал (рис. 5, б). У цій ділянці ширина зони сплавлення становить 200 мкм.

Проведений аналіз внутрішньозеренної структури наплавленого металу ВТ22 показав, що з використанням магнітного поля середній розмір зерна вторинної структури зменшується в 1,3 рази (з 16 до 12 мкм) в порівнянні з такою же ділянкою шва, отриманою без участі магнітного поля (рис. 6). Це обумовлено тим, що у випадку використання магнітного поля глибина зварювальної ванни менша, ніж у випадку без його застосування, а отже швидкість охолодження та градієнт температури

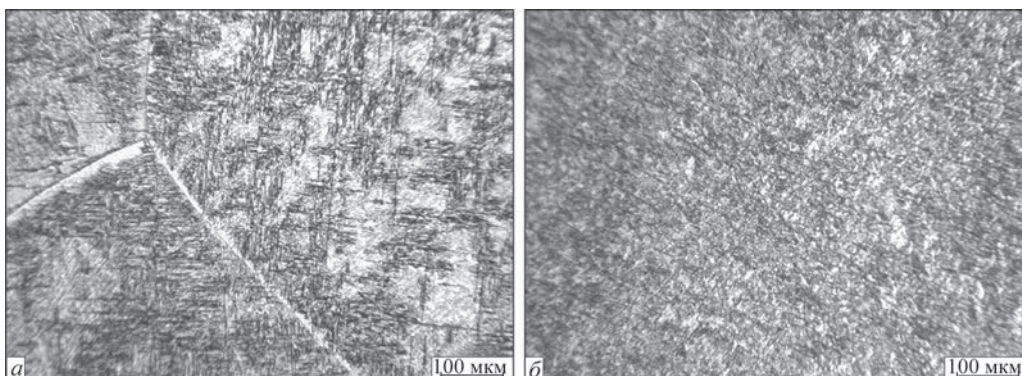


Рис. 4. Внутрішньозеренна структура наплавленого металу, отриманого без магнітного поля (а), з магнітним полем (б)

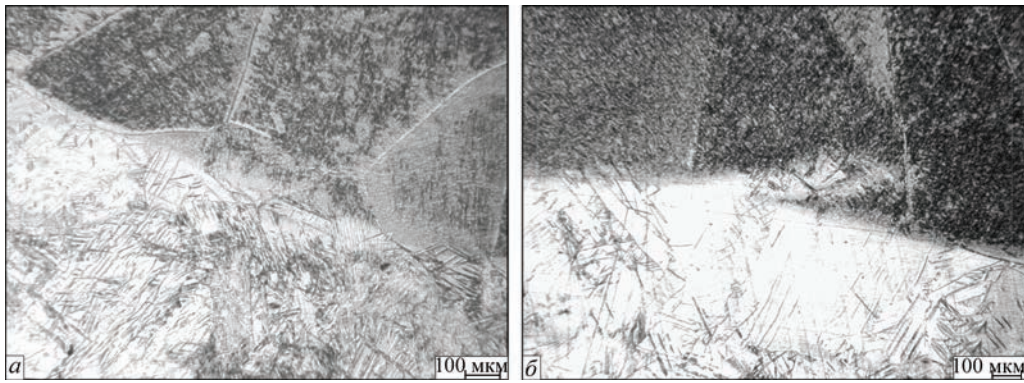


Рис. 5. Мікроструктура зони сплавлення

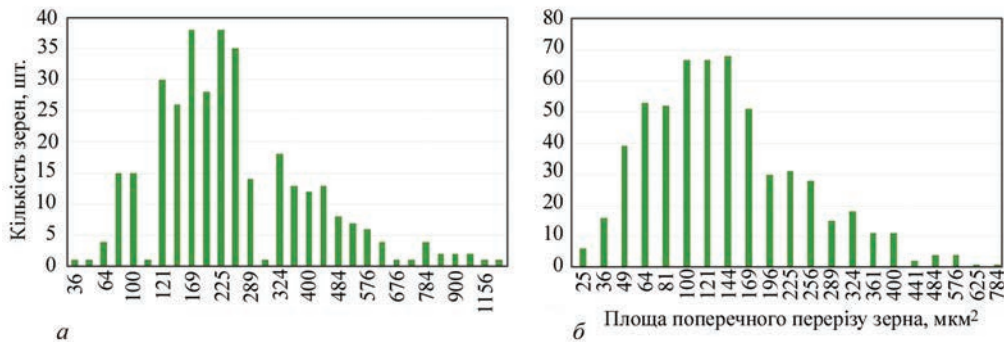


Рис. 6. Гістограми розподілу кількості зерен металу шва сплаву VT22 в залежності від площі їх поперечного перерізу, отримані без магнітного керування (а) і з магнітним керуванням (б)

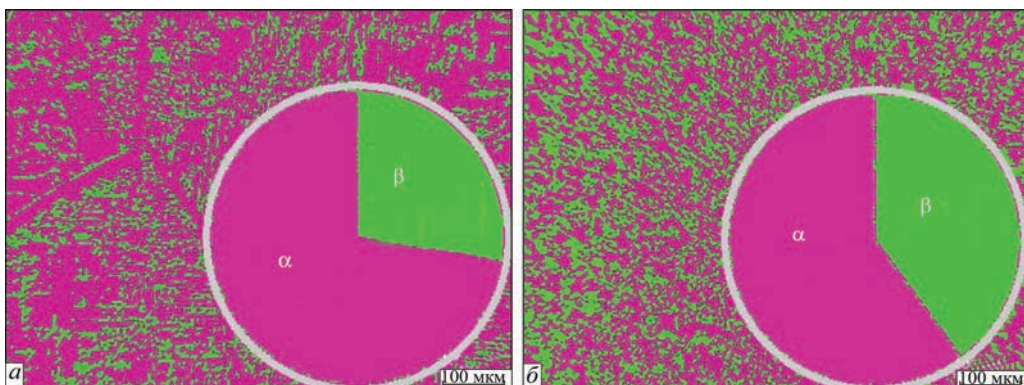
на фронті кристалізації більші, що призводить до утворення більш дрібнозернистої структури.

Кількісний аналіз розподілу фаз в наплавленому металі показав, що з використанням магнітного поля кількість β -фази в металі шва збільшується до 40 %, в металі шва, отриманого без участі магнітного поля, кількість β -фази становить близько 28 % (рис. 7). Таке збільшення кількості метастабільної β -фази пояснюється більшими швидкостями кристалізації розплаву титанового сплаву VT22 за умов використання керуючого магнітного поля при аргонодуговому наплавленні.

В зразках, отриманих із застосуванням зовнішнього магнітного поля, була виміряна мікротвер-

дість наплавленого металу в горизонтальному і вертикальному напрямках (рис. 8). Показники мікротвердості наплавленого металу (шва) вище, ніж в основному металі в 1,5 рази, що може бути обумовлено деяким підвищенням вмісту кисню та азоту в металі наплавлення у порівнянні з основним металом.

Були визначені механічні властивості наплавленого металу, отриманого з використанням зовнішнього магнітного поля (зразки вирізали поперек наплавленого з'єднання, розрив відбувся по металу наплавлення) і вони наступні: межа міцності — 1059 МПа, ударна в'язкість — 7,91 Дж/см², що нижче показників основного металу (1120 МПа і

Рис. 7. Кількість α - та β -фаз в металі шва, отриманого: а — без використання магнітного поля (α — 72; β — 28 %); б — з використанням магнітного поля (α — 60; β — 40 %)

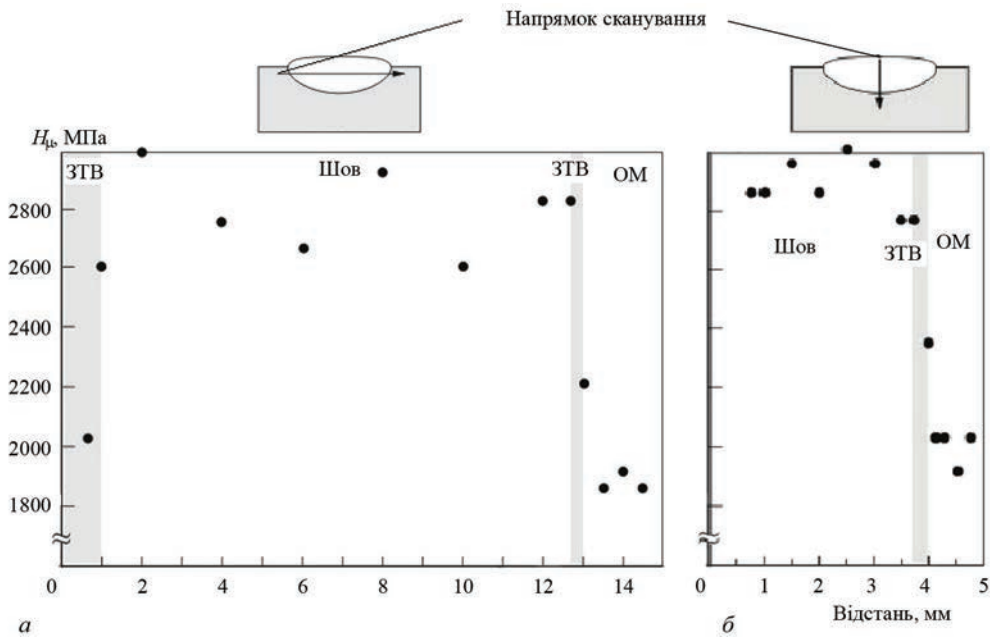


Рис. 8. Мікротвердість наплавленого металу, отриманого присадним металопорошковим дротом, на відстані до поверхні (а) та від поверхні (б)

15,6 Дж/см² відповідно). Отримані дані підтверджують той факт, що для зварних і наплавочних з'єднань з високоміцних титанових сплавів, в тому числі для VT22, необхідно проводити термічну обробку для стабілізації їх структури і підвищення механічних властивостей [9].

Таким чином, вплив поперечного магнітного поля на переміщення металу зварювальної ванни в процесі кристалізації відкриває можливості зміни первинної структури металу, яка кристалізується. При русі дуги по поверхні зварювальної ванни розплавлений метал, що знаходиться під дугою, також переміщується під дією електромагнітної сили. Інтенсивне перемішування розплавленого металу призводить до зміни умов кристалізації і отримання дрібнозернистої структури шва з підвищеним вмістом метастабільної β -фази.

Список літератури

- Moiseyev, V.N. (2005). Titanium alloys: Russian aircraft and aerospace applications. *CRC Press*, **40**, 48–50.
- Гуревич С.М., Замков В.Н., Блашук В.Е. и др. (1986). *Металлургия и технология сварки титана и его сплавов*. Киев, Наукова думка.
- Arrazola, P.J., Garay, A., Iriarte, L.M. et al. (2009). Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3). *J. of Materials Proc. Technology*, **209(5)**, 2223–2230.
- Рыжов Р.Н., Кузнецов В.Д. (2006). Внешние электромагнитные воздействия в процессах дуговой сварки и наплавки (обзор). *Автоматическая сварка*, **10**, 36–44.
- Paton, B.E., Zamkov, V.N., Prilutsky, V.P. (1996). Narrow-groove welding proves its worth on thick titanium. *Welding J.*, **75(5)**, 37–41.
- Замков В.Н., Прилуцкий В.П. (2005). Способы сварки титановых сплавов. *Автоматическая сварка*, **8**, 45–48.

- Schwab, S.L., Petrychenko, I.K., Akhonorin, S.V. (2017). TIG welding of titanium alloy VT22 performed using the external control magnetic field. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach*, **61**, 39–46.
- Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С. (2009). *Титановые сплавы. Состав, структура, свойства*. Москва, ВИЛС-МАТИ.
- Колачев Б.А., Елагин В.И., Ливанов В.А. (2005). *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов*. Москва, МИСиС.

References

- Moiseyev, V.N. (2005) Titanium alloys: Russian aircraft and aerospace applications. *CRC Press*, **40**, 48–50.
- Gurevich, S.M., Zamkov, V.N., Blashchuk, V.E. et al. (1986) *Metallurgy and technology of welding of titanium and its alloys*. Kiev, Naukova Dumka, [in Russian].
- Arrazola, P.J., Garay, A., Iriarte, L.M. et al. (2009) Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555.3). *J. of Materials Proc. Technology*, **209(5)**, 2223–2230.
- Ryzhov, R.N., Kuznetsov, V.D. (2006) External electromagnetic effects in arc welding and surfacing processes (Review). *The Paton Welding J.*, **10**, 29–35.
- Paton, B.E., Zamkov, V.N., Prilutsky, V.P. (1996) Narrow-groove welding proves its worth on thick titanium. *Welding J.*, **75(5)**, 37–41.
- Zamkov, V.N., Prilutsky, V.P. (2005) Methods for welding titanium alloys. *The Paton Welding J.*, **8**, 41–44.
- Schwab, S.L., Petrychenko, I.K., Akhonorin, S.V. (2017) TIG welding of titanium alloy VT22 performed using the external control magnetic field. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach*, **61**, 39–46.
- Iiin, A.A., Kolachev, B.A., Polkin, I.S. (2009) *Titanium alloys. Composition, structure, properties*. Moscow, VILS-MA-TI [in Russian].
- Kolachev, B.A., Elagin, V.I., Livanov, V.A. (2005) *Metals science and heat treatment of nonferrous metals and alloys*. Moscow, MISiS [in Russian].

FEATURES OF THE STRUCTURE OF WELD METAL AT RESTORATION ARGON-ARC SURFACING OF TITANIUM ALLOY VT22

S.L. Shvab¹, S.V. Akhonin¹, I.K. Petrichenko¹, S.L. Antonyuk²¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevyeh Str., Kyiv, 03150, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

²SC «Antonov». 1 Acad. Tupolev Str., 03062, Kyiv, Ukraine. E-mail: info@antonov.com

Investigations were performed of the metal of VT22 titanium alloy joints made by argon-arc surfacing with application of an external magnetic field and metal-cored filler wire. Sound defectfree joints were produced as confirmed by gas analysis and distribution of alloying elements in the deposited metal. Microstructural analysis showed that application of an external magnetic field in argon-arc surfacing promotes formation of a more homogeneous and uniform structure of the deposited metal that is also confirmed by quantitative analysis of phase distribution and analysis of intragranular structure of the deposited metal. Microhardness and mechanical properties of the joints made by surfacing have also been studied. Ref. 9, Fig. 8.

Keywords: titanium alloy; argon-arc surfacing; magnetically-impelled arc; structure; alloying elements; microhardness; mechanical properties

Надійшла до редакції 19.11.2020

XIII Міжнародна спеціалізована виставка

КИЇВСЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ ЯРМАРОК



27–30
КВІТНЯ
2021

 **МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР**
Україна, м. Київ, Броварський пр-т, 15

Вхід вільний, тільки по онлайн реєстрації!

НОВА КНИГА



Мордюк Б.М., Прокопенко Г.І., Волошко С.М., Соловей С.О., Клочков І.М., Линник Г.О., Красовський Т.А., Високолян М.В. **Ультразвукова ударна обробка конструкцій і споруд транспортного машинобудування** / Под ред. Г.І. Прокопенка. Київ: ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України, 2020. — 310 с.

У монографії узагальнено результати багаторічних експериментальних досліджень фізичних основ ультразвукової ударної обробки (УЗУО) поверхні конструкційних матеріалів переважно на основі заліза та алюмінію, а також практичного використання цієї технології для зміцнення зварних з'єднань різноманітних конструкцій і споруд на підприємствах вагобудівної та інших галузей промисловості України. Досліджено структурно-фазові перетворення у поверхневих шарах сталей та алюмінієвих сплавів під час УЗУО; обґрунтовано ефективність застосування УЗУО для підвищення циклічної довговічності зварних з'єднань конструкцій і споруд, які експлуатуються в умовах циклічного навантаження і дії навколишнього середовища.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, які займаються дослідженнями, проектуванням, виготовленням і експлуатацією виробів, конструкцій і споруд, що піддаються дії періодичних або випадкових динамічних навантажень та призводять до деградації матеріалу і втомного руйнування. Може бути корисною для аспірантів і студентів ЗВО будівного та машинобудівного профілю.