

СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ ЕЛЕКТРОШЛАКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ВТ6

І.В. Протоковілов, В.О. Шаповалов, В.Б. Порохонько, С.Г. Григоренко

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

Наведено результати досліджень якості електрошлакових зварних з'єднань плит титанового сплаву ВТ6 товщиною 100 мм. Дослідження включали рентгенографічний контроль, хімічний і газовий аналіз, оптичну металографію, механічні випробування на розтяг і ударну в'язкість, а також фрактографічний аналіз. Рентгенографічний контроль та оптична металографія зварного з'єднання показали відсутність поверхневих та внутрішніх дефектів у металі шва та зоні термічного впливу. Газовий аналіз металу шва показав його відповідність вимогам стандарту до сплаву ВТ6. Міцність на розрив металу шва в середньому становила 90 % від міцності основного металу, а ударна в'язкість (KCU) була в 1,6 рази вище, ніж у основного металу. Руйнування металу шва і ЗТВ мали транскристалітний характер змішаного типу з ділянками як пластичного, так і крихкого руйнування. Показано, що механічні властивості зварного з'єднання обумовлюються, в першу чергу, розміром зерен і мікроструктурою металу шва та ЗТВ, які формуються в умовах низької швидкості охолодження та високого тепловкладення, характерних процесу електрошлакового зварювання. Бібліогр. 9, табл. 3, рис. 8.

Ключові слова: титановий сплав ВТ6; електрошлакове зварювання; зварне з'єднання; структура; механічні властивості; характер руйнування

Вступ. Електрошлакове зварювання (ЕШЗ) є ефективним способом з'єднання товстостінних виробів з різних металів і сплавів [1–5]. Однією з головних переваг ЕШЗ є висока продуктивність і можливість з'єднувати вироби надвеликих товщин (до 500 мм і більше) за один прохід без розроблення кромок.

ЕШЗ найбільш широко використовується при з'єднанні виробів чорної металургії. Однак ЕШЗ також може бути ефективним при з'єднанні товстостінних компонентів із титанових сплавів, у тому числі високоміцних ($\alpha+\beta$)-сплавів [6–9]. У цьому випадку важливим завданням є забезпечення необхідних властивостей зварного з'єднання.

Серед основних вимог до якості ЕШЗ титанових сплавів є забезпечення відсутності критичних поверхневих і внутрішніх дефектів, необхідного газового складу металу шва та механічних власти-

востей з'єднання, які обумовлюються як умовами структуроутворення металу шва, так і структурними перетвореннями у зоні термічного впливу (ЗТВ) під дією термічного циклу зварювання.

Метою даної роботи було дослідити властивості зварного з'єднання плит титанового сплаву ВТ6 товщиною 100 мм, виконаних способом ЕШЗ.

Експериментальна частина. Вихідними заготовками для зварювання були плити зі сплаву ВТ6 розміром 100×150×150 мм у відпаленому стані (рис. 1). ЕШЗ здійснювали плавким мундштуком зі сплаву ВТ6 із застосуванням зварювального дроту зі сплаву СПТ2. Хімічний склад використаних матеріалів наведено в табл. 1.

Зварні з'єднання піддавали рентгенографічному контролю на апараті РАП 150/300. Параметри просвічування становили: напруга на аноді — 250 кВ, струм на аноді — 10 мА, час витримки —

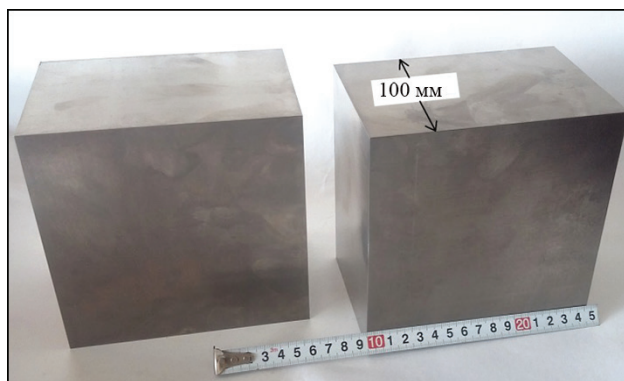


Рис. 1. Зовнішній вигляд заготовок зі сплаву ВТ6

І.В. Протоковілов — <https://orcid.org/0000-0002-5926-4049>, В.О. Шаповалов — <https://orcid.org/0000-0003-1339-3088>,

В.Б. Порохонько — <https://orcid.org/0000-0002-6490-7221>, С.Г. Григоренко — <https://orcid.org/0000-0003-0625-7010>

© І.В. Протоковілов, В.О. Шаповалов, В.Б. Порохонько, С.Г. Григоренко, 2022

Таблиця 1. Хімічний склад матеріалів, які використовували, мас. %

Матеріал	Ti	Al	V	Zr	Fe	Si	O	N	H
Основний метал	89,68	6,11	3,65	0,010	0,15	0,042	0,18	0,008	0,0022
Витратний мундштук	89,59	5,49	4,17	0,003	0,06	0,115	0,09	0,005	0,0029
Зварювальний дріт	90,93	3,99	3,02	1,550	0,07	0,083	0,05	0,018	0,0022

Таблиця 2. Хімічний склад металу зварного шва сплаву ВТ6, мас. %

Матеріал	Ti	Al	V	Zr	Fe	Si	O	N	H
Метал шва	90,07	5,32	3,55	0,54	0,11	0,022	0,14	0,009	0,0024
Технічні вимоги	–	–	–	–	–	–	≤0,2	≤0,05	≤0,015

8,5 хв, відстань — 500 мм, чутливість рентгенографічного контролю — 1 мм.

Хімічний склад металу визначали методом ІСР-спектрометрії. Дослідження механічних властивостей включали випробування на розтяг і ударну в'язкість (*KCU*) при кімнатній температурі. Після випробування на ударну в'язкість зразки піддавали фрактографічному аналізу. Твердість за Брінеллем визначали з використанням кульки діаметром 10 мм при навантаженні 3 т. Випробування мікротвердості за Віккерсом проводили при навантаженні 100 г. Металографічні дослідження виконували із застосуванням мікроскопу «Neophot 32». Для виявлення структури зразки травили в розчині, що містить $\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ в рівних пропорціях. У всіх випадках дослідження проводили на металі трьох основних зон зварного з'єднання: основного металу (ОМ), ЗТВ та металу шва (МШ).

Результати експериментів та їх обговорення. Зовнішній вигляд зварних з'єднань наведено на рис. 2. Поверхня зварного шва сформована добре, має сріблястий колір без окислених ділянок. Дефектів на поверхні шва у вигляді пор, несплавлень, підрізання та тріщин не виявлено. Також слід наголосити на відсутності кутової деформації плит, які зварювали.

Рентгенографічний аналіз показав відсутність внутрішніх дефектів в металі шва і ЗТВ.

Результати хімічного аналізу металу шва наведені в табл. 2. Отримані дані показують, що вміст Al і V в металі шва відповідає табличним значенням для сплаву ВТ6 (5,3...6,8 % Al і 3,5...5,3 % V). Крім того, метал шва містить 0,54 % Zr, що пов'язано з наявністю цього елемента у зварювальному дроті (табл. 1).

Слід зазначити, що газовий склад металу шва повністю відповідає вимогам стандарту до сплаву ВТ6 (табл. 2). Це свідчить про те, що розроблений спосіб ЕШЗ і вжиті технологічні заходи забезпечують надійний захист металу зварного шва від взаємодії з атмосферними газами.

Макроструктура поперечного перерізу зварного з'єднання наведена на рис. 3. На макрошліфу добре помітно структурні зони зварного з'єднання: основний метал; ЗТВ, де відбулися структурні перетворення під впливом термічного циклу зварювання (ділянки крупного і дрібного зерна, а також ділянка неповної перекристалізації); лінія сплавлення; метал шва.

Метал шва характеризується стовпчастою структурою з доволі крупними кристалітами, які розходяться від осі шва до лінії сплавлення в



Рис. 2. Зовнішній вигляд зварних з'єднань (а) і поверхні шва (б): 1 — основний метал; 2 — шов; 3, 4 — технологічні планки



Рис. 3. Макроструктура зварного з'єднання (поперечний переріз): 1 — ОМ; 2 — шов; 3 — ЗТВ

напрямку відведення тепла. Така структура є типовою для литого металу і формується в умовах високого тепловкладення і відносно низької швидкості охолодження, які характерні процесу ЕШЗ.

Лінія сплавлення розмита з плавним переходом від поліедричних рівноосних зерен металу ЗТВ до стовпчастих кристалітів металу шва (рис. 4).

Загалом макроструктура металу щільна, без пор, шлакових включень та інших дефектів.

Дослідження розподілу твердості за Брінелем показали, що найвищу твердість (HB) має ЗТВ (285...295), середню — основний метал (277...282) і найнижчу — метал шва (272...280) (рис. 5). Вочевидь, це зумовлено структурним фактором і меншою мірою — хімічним складом вказаних зон.

Мікроструктура зон зварного з'єднання наведена на рис. 6.

Мікроструктура основного металу (рис. 6, а) характеризувалася рівноосною ($\alpha+\beta$)-структурою з твердістю за Віккерсом α -фази 3360...3540 і β -фази 3300...3540 МПа. Розмір зерна становив 10...15 мкм.

Мікроструктура металу ЗТВ (рис. 6, б-г) складалась з поліедричних зерен ($\alpha+\beta$)-структури, а в окремих ділянках мала голчасту структуру. Пластини α -фази були спрямовані паралельно одна одній, а також під кутами 60 і 90° одна до одної. Їх твердість за Віккерсом становила 3500...3800 МПа. Твердість голчастої структури — 3850...3900 МПа. Середній розмір зерен ме-

Таблиця 3. Механічні властивості зварного з'єднання сплаву ВТ6

Матеріал	σ_r , МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCU , Дж/см ²
ОМ	929,9	971,4	16,9	44,1	38,7
МШ	806,4	874,7	10,6	34,2	61,9
ЗТВ	817,2	878,0	9,3	23,4	55,9

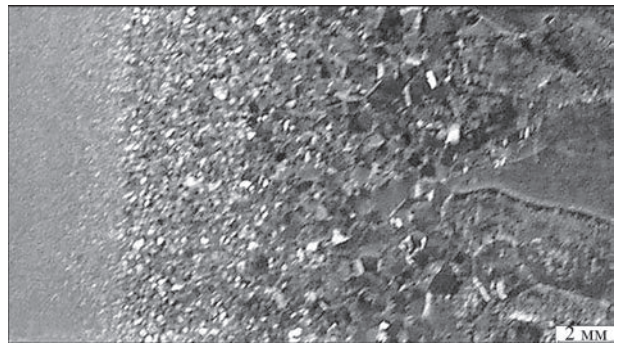


Рис. 4. Структура зони сплавлення

талу ЗТВ був значно більшим за розміром зерен основного металу і становив 300...640 мкм.

Метал шва мав двофазну ($\alpha+\beta$)-структуру з α -фазою у вигляді пластин і ламелей, розділених прошарками β -фази (рис. 6, д, е). По границях литих кристалітів спостерігалися виділення α -фази у вигляді окремих переривчастих ділянок, а також тонких суцільних виділень.

Ширина границь зерен коливалась від 2,5 до 5,0 мкм. Твердість за Віккерсом α -фази становила 3100...3700 МПа. Слід зазначити, що поблизу лінії сплавлення мали місце ділянки голчастої структури з підвищеною твердістю до 3900 МПа у порівнянні з твердістю сусідніх пластин на рівні 3300...3660 МПа. Крім того, в металі шва були ділянки неправильної форми, які мали дисперсну структуру і підвищену твердість до 4090 МПа. Розмір зерен металу шва був найбільшим і становив 2...9 мм.

Загалом, за винятком ділянок з голчастою структурою і кластерами β -фази, твердість за Віккерсом в основному металі, ЗТВ і металі шва була схожою і коливалась від 3200 до 3800 МПа.

Результати механічних випробувань зварного з'єднання наведені в табл. 3 та на рис. 7.

Найвищі значення меж текучості і міцності на розтяг мав основний метал, а найнижчі — метал шва. У середньому міцність металу шва становила близько 90 % від міцності основного мета-

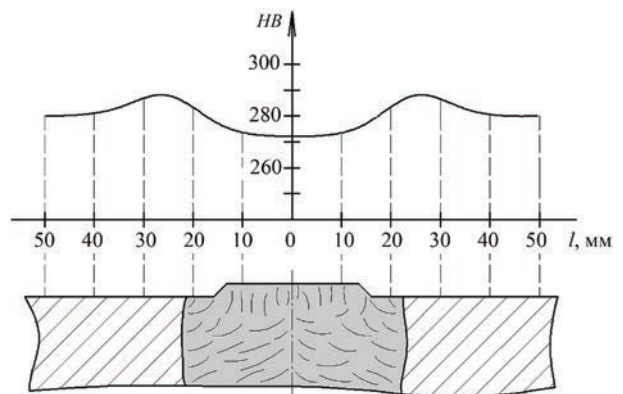


Рис. 5. Розподіл твердості (HB) у поперечному перерізі зварного з'єднання

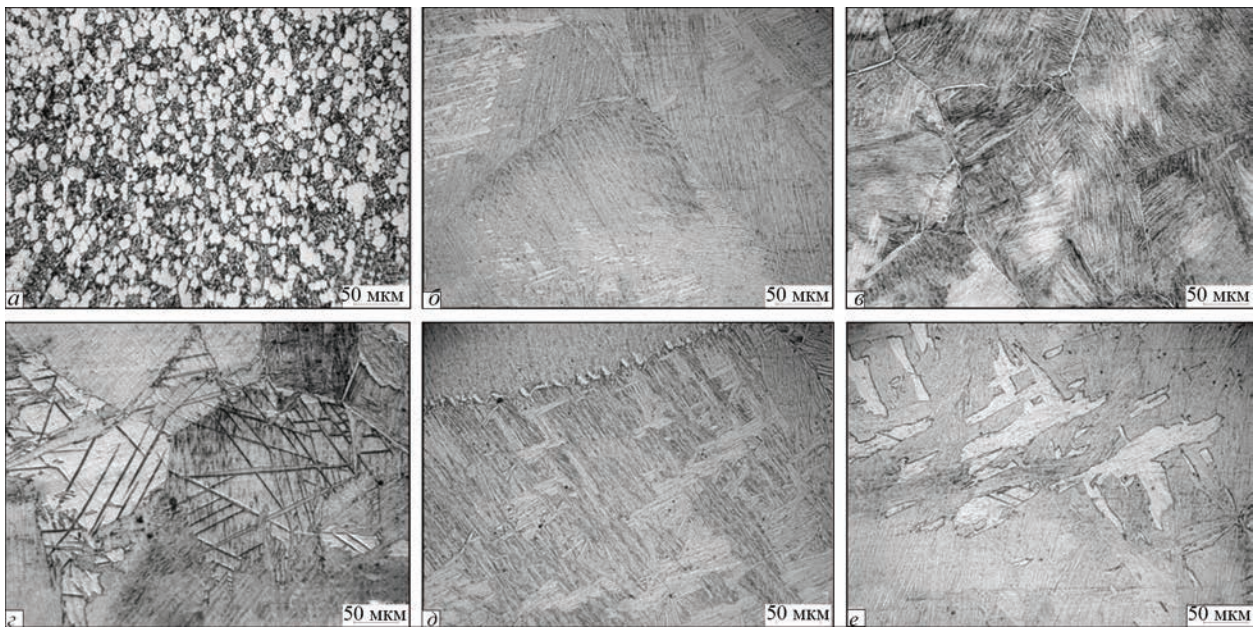


Рис. 6. Мікроструктура зварних з'єднань: *a* — основний метал; *б-г* — ЗТВ; *д, е* — метал шва

лу. Міцність ЗТВ була дещо вищою, ніж металу шва, але нижчою, ніж міцність основного металу. Можна припустити, що зниження міцності металу шва пов'язане із меншим вмістом, по відношенню до основного металу, газових домішок (O, N, H), а також легуючих елементів (Al, V), які сприяють підвищенню міцності титану (табл. 1, 2). Однак відносно видовження та звуження металу шва також були нижчими, ніж у основного металу. Це свідчить про те, що зниження механічних характеристик зварного з'єднання при випробуваннях на розтяг пов'язане, в основному, зі структурними факторами та розміром зерен металу шва.

Інша картина отримана при випробуваннях на ударну в'язкість. В цьому випадку метал шва мав у 1,6 рази вищі значення ударної в'язкості, ніж основний метал. Вірогідно це пов'язано із

надзвичайно великими розмірами кристалітів металу шва (до 9 мм), що могло призвести до того, що площину надрізу зразків, де відбувалося руйнування, перетинало лише декілька кристалів. В свою чергу це призводило до транскристалітного характеру руйнування і збільшення ударної в'язкості металу шва. Крім того, підвищення ударної в'язкості, можливо, пов'язано з низьким вмістом домішок на границях зерен в металі шва.

Таким чином, механічні властивості зварного з'єднання, які визначаються властивостями металу шва та ЗТВ, пов'язані, насамперед, з розміром зерен і мікроструктурою, а по-друге, з хімічним складом і вмістом шкідливих домішок. Великий поперечний розмір зерен і несприятлива голчаста ($\alpha+\beta$)-мікроструктура в металі шва і ЗТВ найбільш негативно впливають на міцність на розтяг

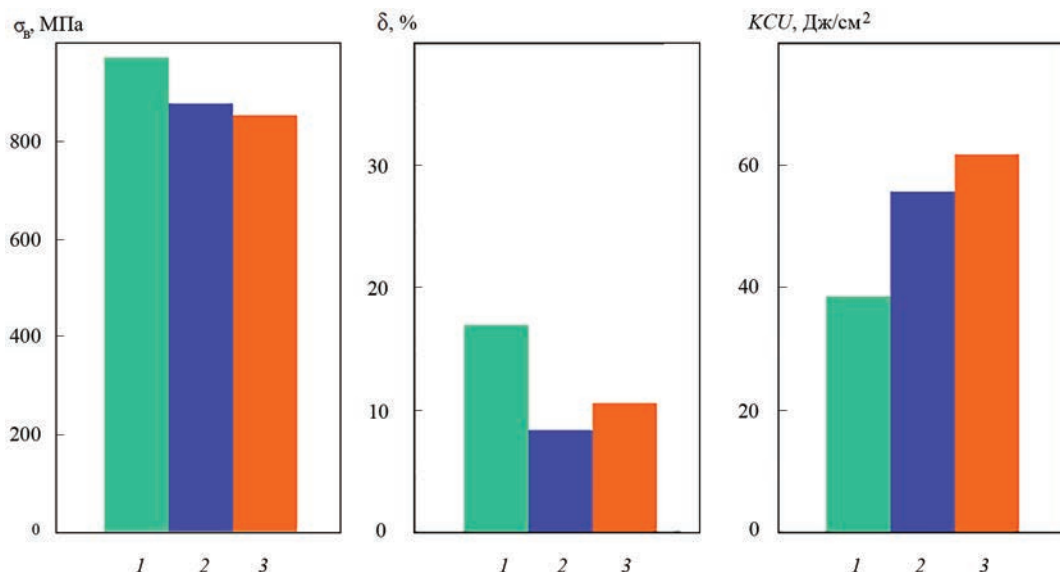


Рис. 7. Механічні властивості зварного з'єднання: 1 — основний метал; 2 — ЗТВ; 3 — метал шва

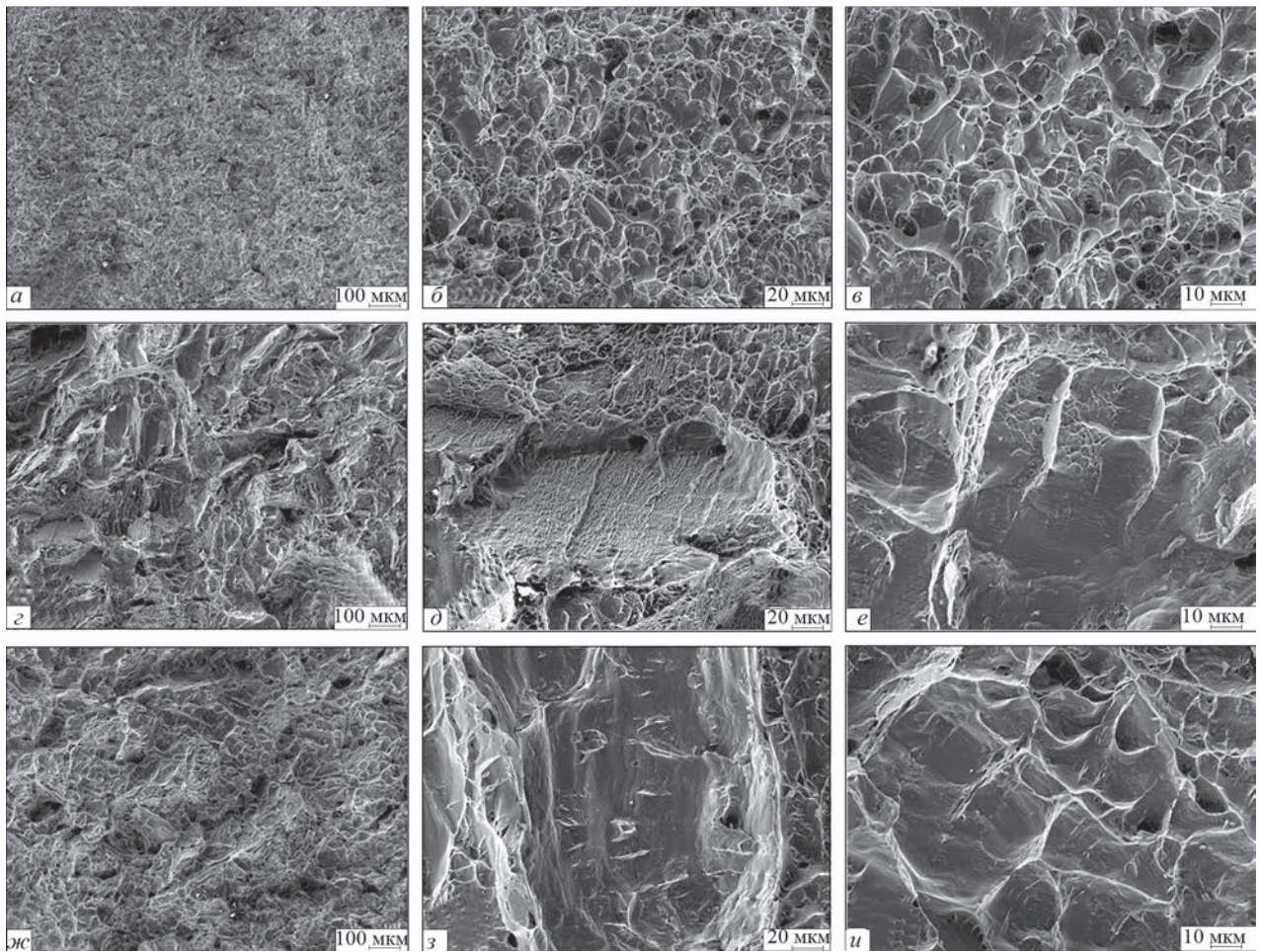


Рис. 8. Фрактограми зразків після іспитів на ударну в'язкість: *а–в* — основний метал; *г–е* — ЗТВ; *ж–и* — метал шва

і пластичність (відносно видовження і звуження) електрошлакових зварних швів.

На рис. 8 показані фрактограми зразків після випробувань на ударну в'язкість. Огляд поверхонь зламу при малому збільшенні ($\times 100$) показав наступне: характер руйнування основного металу транскристалітний (рис. 8, *а*); поверхня зламу матова; основна тріщина розвивається строго перпендикулярно прикладеному навантаженню (переважно по тілу зерна); характер руйнування металу шва і ЗТВ транскристалітний, змішаний (рис. 8, *г, ж*); поверхні зламів матово-блискучі, але спостерігається більше матового компонента; основна тріщина змінює свій напрямок у процесі розвитку.

Подальші дослідження проводили при підвищених збільшеннях. Було виявлено, що характер руйнування основного металу є транскристалітним, в'язким, з ямковою поверхнею (рис. 8, *б, в*). Зварний шов і метал ЗТВ характеризуються транскристалітним руйнуванням змішаного типу з ділянками як в'язких (ямкових), так і крихких (фасетки сколу, квазі-скол) зламів (рис. 8, *д, е, з, и*). Але слід зазначити, що порівняно з ЗТВ поверхня зламу металу шва мала ямки та фасетки більшого

розміру, що свідчить про значне зростання зерен в цій зоні.

Загалом, можна зробити припущення, що розгалуження тріщин у зварному шві та у металі ЗТВ сприяло тому, що для їх поширення потрібно більше енергії, внаслідок чого ударна в'язкість збільшувалась порівняно з основним металом, де руйнування відбувалося без розгалуження.

Висновки

1. Реалізовано ЕШЗ плит з титанового сплаву ВТ6 товщиною 100 мм.

2. Рентгенографічний аналіз і оптична металогія показали відсутність пор, тріщин, шлакових включень, несплавлень та інших внутрішніх дефектів зварного з'єднання на макро- та мікрорівнях.

3. Газовий склад металу шва відповідає технічним вимогам до сплаву ВТ6, що свідчить про надійний захист металу зварювальної ванни від взаємодії з атмосферними газами.

4. Міцність на розтяг металу шва становить близько 90 % міцності основного металу, проте ударна в'язкість металу шва у 1,6 рази вища ударної в'язкості основного металу.

5. Характер руйнування металу шва і ЗТВ транс-кристалітний, змішаний з наявністю як крихких, так і в'язких ділянок на поверхні зламів. Поверхня руйнування металу шва характеризується найбільш розвиненим рельєфом, що свідчить про значне зростання зерен в цій зоні.

6. Механічні властивості зварного з'єднання, в першу чергу, пов'язані з розміром зерен і мікроструктурою металу шва і ЗТВ, які утворюються в умовах низької швидкості охолодження і високого тепловведення, що характерно для ЕШЗ.

Список літератури/References

1. Paton, B., Yushchenko, K., Kozulin, S., Lychko, I. (2019) Electroslag welding process. Analysis of the state and tendencies of development (Review). *The Paton Welding J.*, **10**, 33–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.10.05>
2. Yushchenko, K., Lychko, I., Kozulin, S. et al. (2018) Application of welding in construction. *The Paton Welding J.*, **9**, 23–27. <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.09.05>
3. Kaluc, E., Taban, E., Dhoogev, A. (2006) Electroslag welding process and industrial applications. *Metal Dunyasi*, **152(13)**, 100–104.
4. Yushchenko, K., Kozulin, S., Lychko, M., Kozulin, M. (2014) Joining of thick metal by multipass electroslag welding. *Ibid.*, **9**, 30–33. <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.09.04>
5. Paton, B., Dudko, D., Palti, A. et al. (1999) Electroslag welding (Prospects of development). *Avtomatich. Svarka*, **9**, 4–6 [in Russian].
6. Shcherbinin, E., Kompan, Ya. (2005) MHD Technologies of Electroslag welding and melting of Titanium alloys for aerospace industry. *Proc. of 15th Riga and 6th Pamir Conf. on Fundamental and Applied MHD*, 287–290.
7. Devletian, J., Chen, S.J., Wood, W. et al. (1990) Fundamental aspects of electroslag welding of titanium alloys. Recent trends in welding science and Technology. *ASM Intern.*, 419–424.
8. Chen, S.J., Devletian, J.B. (1990) Microstructure and mechanical properties of electroslag welds in Ti–6Al–4V alloy. *Weld. J.*, **69(9)**, 319–324.
9. Protokovilov, I., Porokhonko, V., Petrov, D. (2013) Technological peculiarities of electroslag narrow-gap welding of titanium. *The Paton Welding J.*, **1**, 34–38.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF ELECTROSLAG WELDED JOINTS OF VT6 TITANIUM ALLOY

I.V. Protokovilov, V.O. Shapovalov, V.B. Porokhonko, S.G. Hrygorenko
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

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

The paper presents the results of investigations of the quality of electroslag welded joints of 100 mm plates from VT6 titanium alloy. Investigations included X-ray inspection, chemical and gas analysis, optical metallography, mechanical tensile and impact toughness tests, as well as fractographic analysis. X-ray inspection and optical metallography of the welded joint showed absence of surface and inner defects in the weld metal and HAZ. Gas analysis of the weld metal demonstrated its correspondence to standard requirements to VT6 alloy. Ultimate strength of weld metal was equal on average to 90 % of base metal strength, and impact toughness (KCU) was 1.6 times higher than in the base metal. Fractures of metal of the weld and HAZ were of transcrystalline nature of a mixed type, with areas of both ductile and brittle fracture. It is shown that the welded joint mechanical properties are determined, primarily, by the size of grains and microstructure of the weld and HAZ metal, forming under the conditions of a low cooling rate and high heat input, characteristic for electroslag welding process. Ref. 9, Tabl. 3, Fig. 8.

Key words: VT6 titanium alloy; electroslag welding; welded joint; structure; mechanical properties; fracture mode

Надійшла до редакції 21.04.2022

XXI МІЖНАРОДНИЙ
ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2022

МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

15 - 18
листопада

МЕТАЛОБРОБКА
 УКРВАРИВАННЯ
 ГІДРАВЛІКА ПНЕВМАТИКА
 ПІДШИПНИКИ
 УКРВОРТЕХ
 УКРАЇНВО
 АВТОМАТИЗАЦІЯ І РОБОТОТЕХНІКА
 ЗРАЗКИ, СТАНДАРТИ ЕТАЛОНИ, ПРИЛАДИ
 ПІДЪОМНО-ТРАНСПОРТНЕ СКЛАДСЬКЕ ОБЛАДНАННЯ
 БЕЗПЕКА ВИРОБНИЦТВА

Генеральний інформаційний партнер:
ОБОРУДОВАНИЕ ИНСТРУМЕНТ

Ексклюзивний медіа партнер:
ЖУРНАЛ ГОЛОВНОГО ІНЖЕНЕРА

МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР
м. Київ, Броварський пр-т, 15
станція метро «Лівобережна»

+38 (044) 201-11-65, (56)
plast@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua