

Лобода П. И.¹, Зворыкин К. О.¹, Зворыкин В. Л.¹, Вржижевский Э. Л.², Романенко Ю. Н.¹

¹ Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». Украина, г. Киев

² Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Украина, г. Киев

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ НА СТРУКТУРУ АРМИРОВАННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА Ti – TiB_n

Проведен анализ структурных изменений, возникающих в сплаве Ti-мас. 95% и TiB₂-мас. 5%, в результате формирования сварного шва способом электронно-лучевой сварки при различных технологических режимах. Изменяемыми параметрами были скорость перемещения электронного луча и исходная температура свариваемых деталей. Обнаружены закономерности изменения размера и характера распределения борсодержащих волокон в титановой матрице в зависимости от величины варьируемых параметров. Показаны пути управления структурными изменениями для оптимизации структуры сплава Ti – TiB_n в сварном шве и ближайших областях. Установлено, что в результате сварки фазовый состав сварного шва не зависит от мощности электронного пучка и скорости перемещения сварочной ванны, он соответствует фазовому составу исходного материала. Повышение температуры свариваемых деталей приводит к формированию зерен альфа титана глобулярной формы, росту размеров образований и областей когерентного рассеяния фазы из борида титана, а также сегрегированию примеси железа по границам глобулярных зерен из альфа фазы. [dx.doi.org/10.29010/081.10]

Ключевые слова: титан; борид титана; металлографическая структура; сварное соединение; электронно-лучевая сварка; параметры сварки.

Введение

Создание новых металлических материалов на основе титана со структурными составляющими, играющими роль армирующих волокон в композиционных материалах – эффективный путь получения высокопрочных материалов уже нашедших практическое применение в качестве конструкционных [1-3].

Для применения таких материалов в деталях машин часто необходимо изготавливать неразъемные соединения как с аналогичными, так и с иными материалами. В числе наиболее эффективных и распространенных способов получения таких соединений известна сварка, для которой в случае титановых сплавов широко применяется электронно-лучевая технология обработки металлических материалов.

Постановка задачи

В [4] уже были представлены некоторые особенности структуры материала в зоне сварного шва, полученного электронно-лучевой сваркой (ЭЛС) образцов Ti – TiB_n. Настоящая работа продолжает исследования по установлению основных закономерностей и путей оптимизации получения сварных соединений сплавов Ti – TiB_n как с титановыми сплавами, так и с другими конструкционными материалами и направлена на выяснение путей совершенствования структуры Ti – TiB_n в зоне сварного шва, посредством изменения скорости

перемещения электронного луча и начальной температуры свариваемых материалов.

Результаты исследования

Как и в [4], сплав получали при спекании порошков Ti и TiB₂, которое осуществляли после смешивания Ti-мас. 95% и TiB₂-мас. 5%, прессования $P = 0,65$ ГПа и отжига в температурном диапазоне β -области. Полученные компактированные образцы подвергали многократной холодной пластической деформации со степенью деформации $\epsilon = 20\%$.

Экспериментальные образцы размером $500 \times 1000 \times 10$ соединяли между собой по плоскости 1000×10 . Соединяемые поверхности при сварке фиксировались на расстоянии 1 мм между собой в плоскопараллельном состоянии. Сварка выполнялась в режиме: $U_{\text{иск}} = 60$ кВ, $I_{\text{л}} = 90$ мА, скорость перемещения электронного луча изменяли $v_{\text{л}} = 7; 10$ и 13 мм/с, развертка луча сохранялась эллипсообразной, поперечной (3×4 мм). При скорости $v_{\text{л}} = 13$ мм/с температура свариваемых образцов составляла 400 °С и 20 °С, в остальных случаях предварительный нагрев не применялся и начальная температура T_0 составляла 20 °С.

Полученный сварной шов в макро характеристиках при всех условиях сварки может быть охарактеризован как сплошной и однородный. Для анализа структурных особенностей зоны сварного соединения применяли оптическую микроскопию

Таблица 1

Характеристики условий съемки для фазового рентгеноструктурного анализа

X-Ray	30 кВ, 30 мА	Скорость сканирования/ Длительность	град. /мин.
Гониометр		Ширина шага	0.0400 град.
Приложение	–	Ось сканирования	2 зет/зет
Фильтр		Диапазон сканирования	20.0000 - 80.0000 град.
Щель для выборов СВО	–	Щель для инцидентов	1/2 град
Дифференцированный монопучок	Фиксированный монокром. (U4)	Ограничитель длины	–
Детектор	Сцинтиляционный счетчик	Щель приемника #1	1/2 град
Режим сканирования	Непрерывный	Щель приемника #2	0,45 мм.

Таблица 2

Характеристики материала сварных соединений Ti-TiB, полученных при различных режимах электронно-лучевой сварки

№ обр.	Ускоряющее напряжение $U_{\text{уск}}$, кВ	Ток электронного луча $I_{\text{л}}$, мА	Скорость перемещения электронного луча $v_{\text{л}}$, мм/с	Исходная температура свариваемых материалов T_0 , °C	Регистрируемые фазы	Искажение кристаллической решетки Δ , %	Средний размер кристаллических блоков П, 10^{-10} м
1	60	90	7	20	α Ti	α Ti - 0.1 TiB - 0.209	α Ti - 150 TiB - 56.36
2			10	20		α Ti - 0 TiB - 0.23	α Ti - 142 TiB - 195.1
3			13	400	TiB	α Ti - 0 TiB - 0.004	α Ti - 141 TiB - 8403
4			13	20		α Ti - 0.2 TiB - 0.41	α Ti - 140 TiB - 86.65

ME IJI Techno MT 7500 и сканирующую электронную микроскопию РЭМ-106И, и рентгеноструктурный анализ.

Рентгеноструктурный анализ выполнялся в условиях съемки, указанных в таблице 1.

При всех режимах проведения сварки получены неразъемные соединения, в которых зона сварного шва не содержит макродефектов, об этом свидетельствуют результаты как оптической, так и сканирующей электронной микроскопии.

Металлографические исследования на сканирующем электронном микроскопе, проведенные при увеличении до 5000 раз, позволили детально проанализировать материал в зоне сварного шва, свариваемых образцов и переходной зоны. Эксперименты выполнялись на полированных образцах

после химического травления для выявления металлографической структуры (в отраженных и поглощенных электронах).

Основные характеристики материала, выявленные в области сварного шва, условно разделенного на три зоны, приведены в таблице 3.

Полученные результаты свидетельствуют об увеличении ширины зоны, сформировавшейся при взаимодействии расплава с кристаллическим металлом образца, как при уменьшении скорости перемещения электронного луча, так и при увеличении температуры свариваемых образцов. Это свидетельствует о развитии в граничной области релаксационных термодинамических процессов, полнота которых требует продолжительности временного интервала и повышенных температур.

Характеристики структуры Ti – TiV_n (по результатам фазового рентгеноструктурного анализа n=1) в зоне сварного шва

№ образца	Переходная зона, сформировавшаяся при взаимодействии расплава с кристаллическим металлом образца (рис. 1)	Зона сварного шва, сформированная из расплава (рис. 2)	Зона материала образца, не подвергнутая существенному влиянию ЭЛС
1	Ширина области, сохраняющей структурные особенности как исходного материала, так и сварного шва составляет в среднем 50 мкм. Особенностью структуры в такой переходной зоне является наличие в ней как областей лишенных волокнистых включений и включающих крупные борсодержащие волокна, характерных для исходного материала, так и тонких микронных и субмикронных волокон, наблюдаемых в материале сварного шва	Волокна борида титана расположены без преимущественной ориентации (рис. 2, а). Длина волокон составляет от 2 до 8 мкм. Толщина волокон TiV соотносится с их длиной в среднем в отношении 1:6, при этом это отношение для различных включений варьируется от 1:4 до 1:8. Среднее расстояние между волокнами в матрице титана составляет 1,5 мкм.	Характерно наличие крупных вытянутых зерен борида титана, для которых типично уменьшение интенсивности пика характеристического рентгеновского излучения титана в 1,2-1,3 раза по сравнению с основной титановой матрицей. Волокна распределены равномерно по всему объему (их толщина составляет 2-7 мкм (рис. 3)) наблюдаются волокна длиной от 8 до 70 мкм. Толщина волокон TiV соотносится с их длиной в среднем в отношении 1:3, при этом это отношение для различных включений варьируется от 2:3 до 1:15. Направление волокон преимущественно совпадает с направлением прокатки пластины Ti – TiV
2	Ширина области, сохраняющей структурные особенности как исходного материала, так и сварного шва составляет в среднем 40 мкм. Особенностью структуры в такой переходной зоне является наличие в ней как крупных борсодержащих волокон, характерных для исходного материала, так и тонких микронных и субмикронных волокон, наблюдаемых в материале сварного шва. Наблюдаются включения TiV (рис. 4), оставшиеся от исходного материала (не растворившиеся при сварке в жидкой фазе) и имеющие характерную овальную форму.	Волокна борида титана расположены без преимущественной ориентации (рис. 2, б). Длина волокон составляет от 1 до 4 мкм. Толщина волокон TiV соотносится с их длиной в среднем в отношении 1:5, при этом это отношение для различных включений варьируется от 1:4 до 1:6. Среднее расстояние между волокнами в матрице титана составляет 0,8 мкм.	
3	Ширина области, сохраняющей структурные особенности как исходного материала, так и сварного шва составляет в среднем 32 мкм. Особенностью структуры в такой переходной зоне в сравнении с образцами 1,2 и 4 является более высокая степень однородности, приближающаяся к характеристикам материала сварного шва.	Волокна борида титана расположены без преимущественной ориентации (рис. 2, в). Длина волокон составляет от 5 до 20 мкм. Толщина волокон TiV соотносится с их длиной в среднем в отношении 1:9, при этом это отношение для различных включений варьируется от 1:4 до 1:11. Среднее расстояние между волокнами в матрице титана составляет 4 мкм.	
4	Ширина области, сохраняющей структурные особенности как исходного материала, так и сварного шва составляет в среднем 28 мкм. Особенностью структуры в такой переходной зоне является наличие в ней как крупных борсодержащих волокон, характерных для исходного материала, так и тонких микронных и субмикронных волокон, наблюдаемых в материале сварного шва	Волокна борида титана расположены без преимущественной ориентации (рис. 2, г). Длина волокон составляет от 2 до 6 мкм. Толщина волокон TiV соотносится с их длиной в среднем в отношении 1:10, при этом это отношение для различных включений варьируется от 1:6 до 1:10. Среднее расстояние между волокнами в матрице титана составляет 0,8 мкм.	

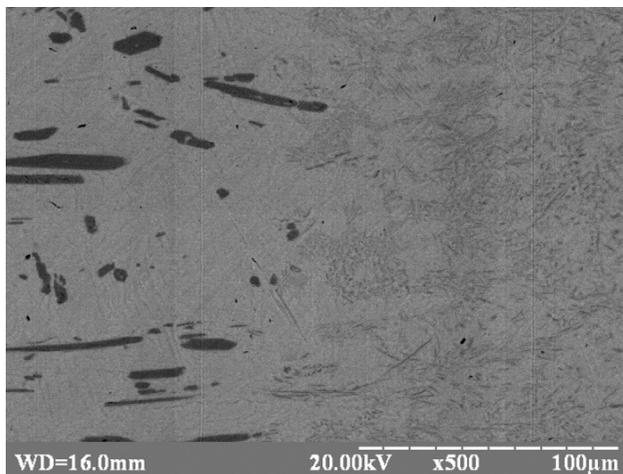
Фазовый состав сварного шва не изменяется при варьировании исходной температуры образцов и скорости перемещения электронного пучка, формирующего сварочную ванну. Состав материала сварного шва и околошовной зоны соответствует фазовому составу исходного материала.

Вместе с тем исходная температура и скорость перемещения электронного источника нагрева по-разному влияют на морфологию фаз. Если при исходной температуре образцов 400 °С наблюдается значительное повышение степени однородности распределения борсодержащей фазы в переходной зоне и увеличение размера волокон этой фазы как по длине, так и по толщине, то при уменьшении скорости сканирования электронного луча наблюдаемые размеры волокон имеют тенденцию к уменьшению, а их распределение в переходной зоне становится все более неоднородным.

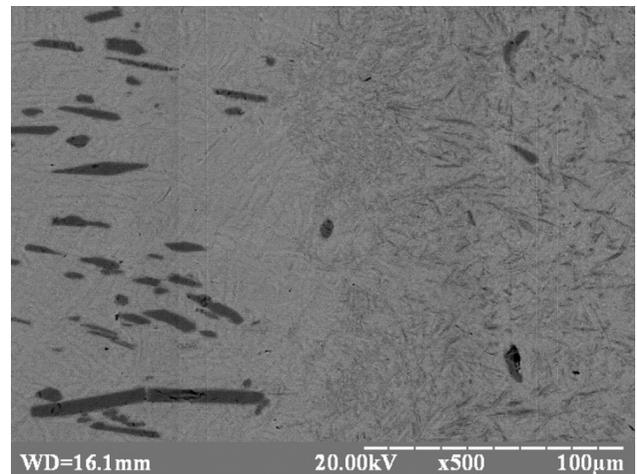
В материале сформировавшегося после кристаллизации расплава сварочного шва наблюдаются похожие тенденции (рис. 2). Вместе с тем, наименьший размер и наивысшая равномерность рас-

пределения волокон TiB в титановой матрице наблюдается в материале сварного шва при средней величине скорости перемещения электронного луча $v_{\text{д}} = 10$ мм/с. Эти же условия приводят к неполному растворению исходных волокон TiB в расплаве сварного шва, контактирующего с нерасплавленным материалом.

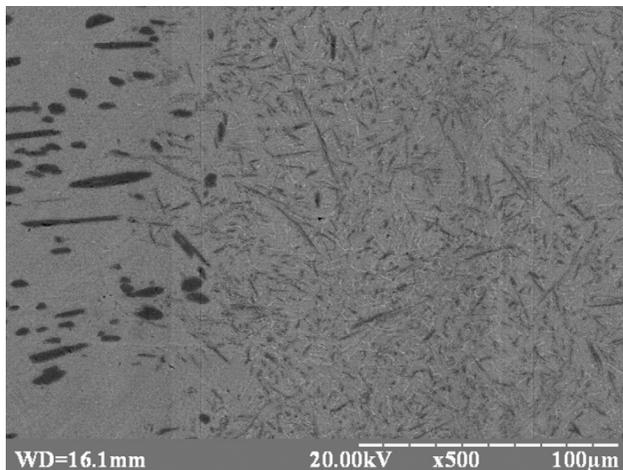
Предварительный нагрев приводит к значительному возрастанию размеров волокон TiB, что вызвано увеличением общей удельной внутренней энергии материала в зоне. Этот фактор обуславливает и существенное возрастание среднего размера кристаллических блоков (таблица 2), вызванный развитием рекристаллизации при повышенных остаточных температурах. Повышение температуры свариваемых деталей приводит к формированию зерен альфа титана глобулярной формы, росту размеров образований и областей когерентного расщепления фазы из боридов титана, а также сегрегированию примеси железа (светлые прослойки) по границам глобулярных зерен из альфа фазы титана (рис. 2, в).



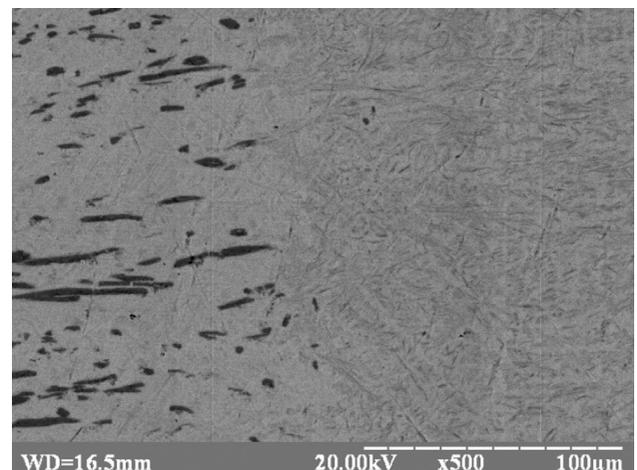
а



б



в



г

Рис. 1. Структура материала в области перехода основного материала в сварной шов
а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3; г – образец 4.

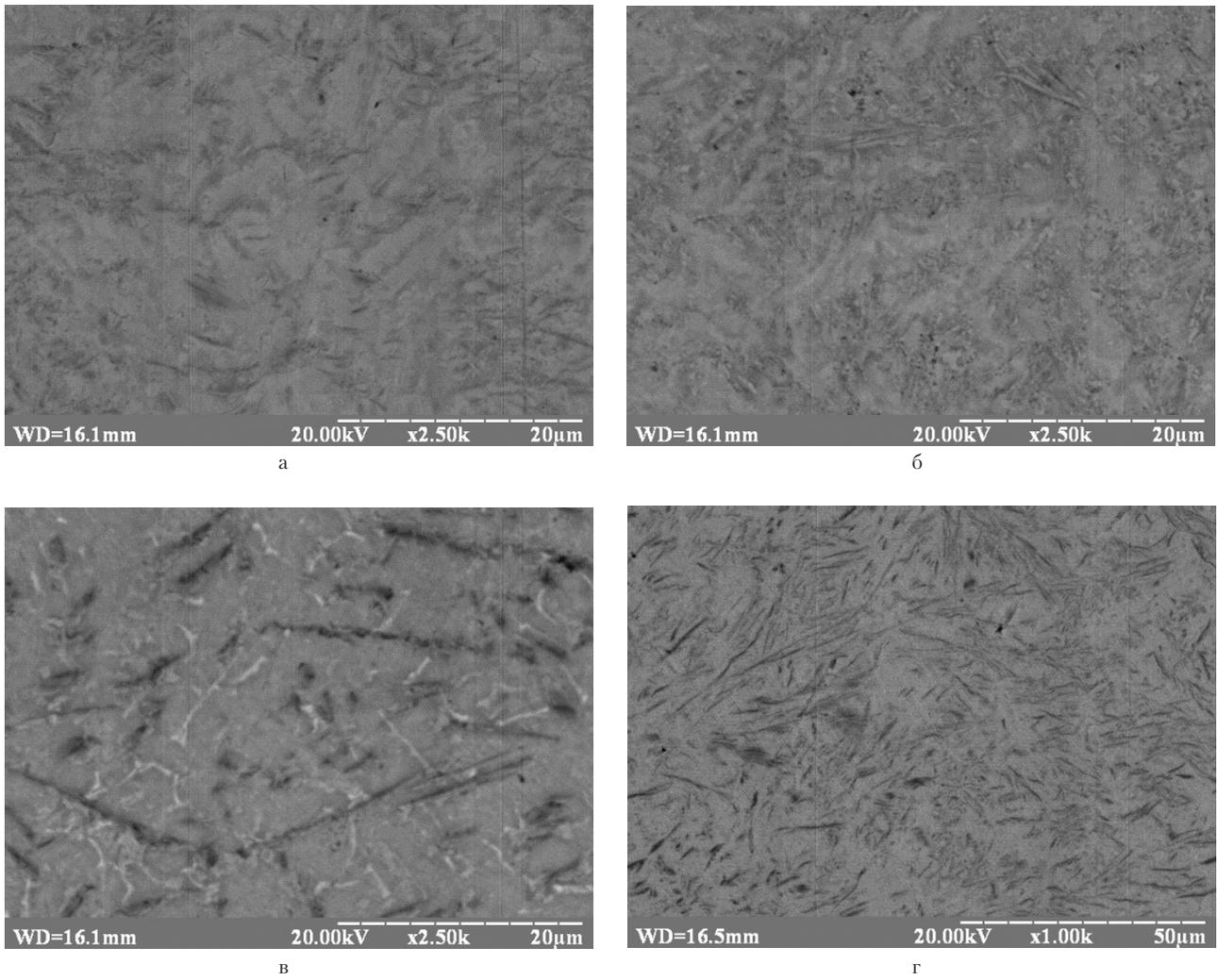


Рис. 2. Структура сплава Ti – TiB_n в зоне сварного шва после ЭЛС
а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3; г – образец 4.

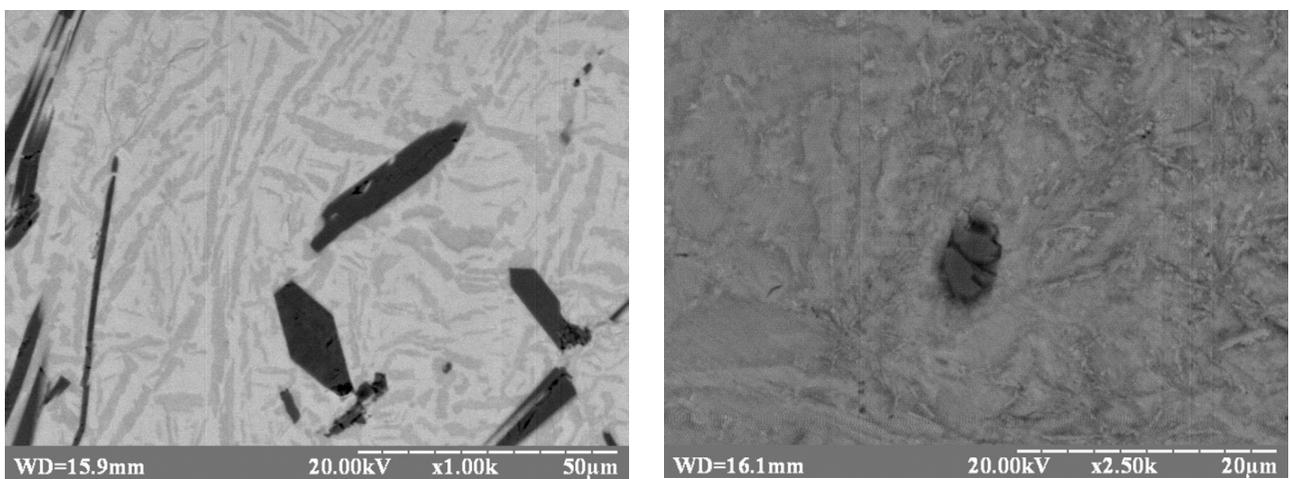


Рис. 3. Структура сплава Ti – TiB_n (Ti-мас. 95 % и TiB₂-мас.5%) вне зоны проведения сварки

Рис. 4. Овальный остаток пластины TiB, нерастворившейся в расплаве сварного шва (скорость перемещения электронного луча $v_{\text{эл}}$ = 10 мм/с)

По-видимому, увеличение v_d не приводит к значительному изменению удельной подведенной тепловой энергии, но вызывает значительное увеличение температурных градиентов в направлении перемещения электронного луча, а соответственно и существенно большую неравновесность фазовых и структурных состояний. С другой стороны уменьшение скорости перемещения электронного луча приводит к ухудшению условий теплоотвода из области его термического влияния, связанные с замедлением выделения боридной фазы и соответствующим понижением теплопроводности, вызывающим возникновение локальных температурных градиентов в области кристаллизации. Это может обуславливать минимальные значения среднего размера кристаллических блоков (таблица 2) при наименьшей скорости v_d .

Преобразование структуры материала в зоне влияния электронного луча развивается в двух направлениях:

– сегрегирование борсодержащих волокон в области с их повышенным содержанием и формирование областей обедненных такими фазами (рис. 1, а).

– рост борсодержащих волокон как по длине, так и по толщине при возрастании остаточной температуры свариваемого соединения как за счет увеличения длительности воздействия электронного луча рис. 2, а, так и за счет предварительного нагрева рис. 2, в. При этом влияние предварительного нагрева значительно более ярко выражено.

Наблюдаемые закономерности изменения структуры материала в сварном соединении образцов Ti – TiB, полученном электронно-лучевой сваркой, демонстрируют широкий диапазон изменений такой структуры при варьировании скорости перемещения электронного луча и изменения исходной температуры свариваемых элементов конструкций достаточный для возможности ее оптимизации.

Выводы

1. Электронно-лучевая сварка при $U_{\text{уск}} = 60$ кВ, $I_d = 90$ мА, развертка луча-эллипсообразная, поперечная (3×4 мм), при всех значениях v_d в интервале от 7 до 13 мм/с, обеспечивает получение неразъемного сварного соединения образцов сплава Ti – TiB содержащего 5 мас.% TiB₂ в титановой основе.

2. При формировании сварного шва исходный материал претерпевает структурные изменения, приводящие к снижению толщины борсодержащих волокон с 3-8 мкм до 0,15-0,9 мкм. При этом теряется их характерная направленность, вызванная пластическим деформированием и наблюдается значительное уменьшение отношения толщины волокон борсодержащей фазы с их длинной.

3. Увеличение исходной температуры свариваемых образцов с 20 до 400 °С приводит к значительному повышению степени однородности распределения борсодержащей фазы в переходной зоне и увеличению размера волокон этой фазы как по длине, так и по толщине как в переходной зоне, так и в области сварного шва, формированию зерен альфа титана глобулярной формы, росту размеров областей когерентного рассеяния фазы из бориды титана, а также сегрегированию примеси железа по границам глобулярных зерен из альфа фазы титана.

4. Переходная зона основной металл – материал сварного шва имеет характерный размер до 50 мкм. Увеличение скорости перемещения электронного луча с 7 до 13 мм/с приводит к двукратному уменьшению этого размера и увеличению равномерности макро распределения борсодержащих волокон в титановой матрице.

5. Фазовый состав сварного шва не изменяется при варьировании исходной температуры образцов и скорости перемещения электронного пучка, формирующего сварочную ванну. Состав материала сварного шва и околошовной зоны соответствует фазовому составу исходного материала.

6. Общий характер наблюдаемых структурных изменений при ЭЛС образцов сплава Ti – TiB, содержащего 5 мас.% TiB₂ в титановой основе позволяет считать изменение скорости перемещения электронного луча и исходной температуры свариваемых элементов эффективным путем достижения оптимальных структурных состояний.

Обозначения

I	– электрический ток, А
P	– давление, ГПа
T	– температура, °С
U	– электрическое напряжение, В
v	– скорость, м·с ⁻¹
Δ	– искажение кристаллической решетки, %
Π	– средний размер кристаллических блоков, 10 ⁻¹⁰ м

Индексы

уск	– ускоряющее
л	– электронного луча

Литература

- [1] Лобода, П. И. Анализ перспектив создания титана, армированного волокнами диборида титана, устойчивого к динамическим нагрузкам [Текст] / П. И. Лобода, Л. О. Зворыкин, В. С. Косюк, Е. В. Солодкий // Технологические системы. – № 2 (75). – 2016. – С. 89-92. – ISSN 2074-0603.

http://technological-systems.com.ua/images/journal/2016/files/ts75_14.pdf

- [2] Effect of hot forging on microstructure and mechanical properties of near titanium alloy / TiB composites produced by casting / R.A. Gaisin, V.M. Imayev, R.M. Imayev // Journal of Alloys and Compounds, Vol. 723, 2017, P. 385–394.
- [3] Deformation behavior and microstructure evolution of a Ti/TiB metal-matrix composite during high-temperature compression tests/ M. Ozerov, M. Klimova, A. Kolesnikov, N. Stepanov, S. Zherebtsov // Materials & Design, Vol. 112, 2016, P. 17-26.
- [4] Лобода, П. И. Особенности структуры сплава Ti – TiB_n в области сварного соединения, полученного электронно-лучевой сваркой [Текст] / П. И. Лобода, К. О. Зворыкин, В. Л. Зворыкин, Э. Л. Вржижевский, Ю. Н. Романенко // Технологические системы. – № 2 (79). – 2017. – С. 50-54. – ISSN 2074-0603. http://technological-systems.com.ua/images/journal/2017/files/ts79_9.pdf

Loboda P. I.¹, Zvorykin C. O.¹, Zvorykin V. L.¹, Vrzhyzhevskiy E. L.², Romanenko Yu. M.¹

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute». Ukraine, Kiev

²E. O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine. Ukraine, Kiev

INFLUENCE OF ELECTRON-BEAM WELDING PARAMETERS ON STRUCTURE OF REINFORCED COMPOSITE MATERIAL TI – TiB_n

The analysis of the structural changes in the alloy Ti-mas. 95% and TiB₂-mas.5%, resulting in the formation of weld method of electron-beam welding in different technological regimes. Parameters changes were moving speed of the electron beam and the reference temperature of welded parts. Clarified the size and nature of the change patterns of boron-containing fibers in Ti-matrix, depending on the size of the varied parameters. Showing ways to manage structural changes to optimize the structure of the alloy Ti-TiB_n in weld and surrounding areas. It is established that as a result of the welding phase composition of weld does not depend on the power of the electron beam and the speed of the welding bath, it corresponds to the phase composition of the source material. Temperature rise of welded parts leads to equal axle grains alpha Titanium, an increase in the size of the fibers and crystallite size of titanium boride, and also leads to the segregation of iron on the globular grains of alpha Titanium. [dx.doi.org/10.29010/081.10]

Keywords: titanium; titanium boride; metallographic structure; welded joint; electron-beam welding; welding parameters.

References

- [1] Loboda, P. I. Analysis of prospects of development titanium reinforced with fibers of titanium diboride, resistant to dynamic loads / P. I. Loboda, L. O. Zvorykin, V. S. Kosyuk, E. V. Soldkyiy // Technological Systems. – # 2 (75). – 2016. – P. 89-92. – ISSN 2074-0603. http://technological-systems.com.ua/images/journal/2016/files/ts75_14.pdf
- [2] Effect of hot forging on microstructure and mechanical properties of near titanium alloy/TiB composites produced by casting/ R.A. Gaisin, V.M. Imayev, R.M. Imayev // Journal of Alloys and Compounds, Vol. 723, 2017, P. 385–394.
- [3] Deformation behavior and microstructure evolution of a Ti/TiB metal-matrix composite during high-temperature compression tests/ M. Ozerov, M. Klimova, A. Kolesnikov, N. Stepanov, S. Zherebtsov // Materials & Design, Vol. 112, 2016, P. 17-26.
- [4] Loboda, P. I. Features of Ti-TiB_n alloy structure in the field of welded joint obtained by electron beam welding / P. I. Loboda, C. O. Zvorykin, V. L. Zvorykin, E. L. Vrzhyzhevskiy, Yu. M. Romanenko // Technological Systems. – # 2 (79). – 2017. – P. 50-54. – ISSN 2074-0603. http://technological-systems.com.ua/images/journal/2017/files/ts79_9.pdf