

УДК 621.791

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

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

<sup>2</sup> Институт электросварки имени Е. О. Патона НАН Украины. Украина, г. Киев

## ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ СПЛАВА Ti – TiV<sub>n</sub> В ОБЛАСТИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ

*Проведен анализ структуры сварного соединения деталей из сплава Ti – TiV<sub>n</sub> содержащего 5 мас.% TiV<sub>2</sub> в титановой основе. Для получения неразъемного соединения применен способ электронно-лучевой сварки. Выполнен сравнительный анализ структуры материала основы детали и сварного шва. Обнаружено, что в области сварного шва в материале теряется исходная направленность волокон содержащих бор, вызванная пластическим деформированием исходного материала, и наблюдается значительное уменьшение размеров таких волокон.*

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

Создание новых металлических материалов со структурными составляющими, играющими роль армирующих волокон в композиционных материалах, позволяет повышать эксплуатационные характеристики конструкционных материалов и эффективно применять их в конструкционных решениях.

Разработка титановых сплавов с армирующими волокнами боридной фазы показала значительное повышение их эксплуатационных характеристик [1–3].

Структурно-композиционное упрочнение создания новых жаропрочных титановых сплавов (на основе волокон TiV<sub>n</sub>) позволяет повысить их эксплуатационные характеристики, например, повысить механические свойства. Однако такие сплавы недостаточно исследованы в отношении их поведения в деталях машин и других конструкционных элементах, что является основным их недостатком. Это затрудняет практическое использование сплавов в изделиях различного назначения и обуславливает необходимость проведения исследований новых сплавов в условиях получения неразъемных соединений, формоизменения и других технологических обработок в машиностроении.

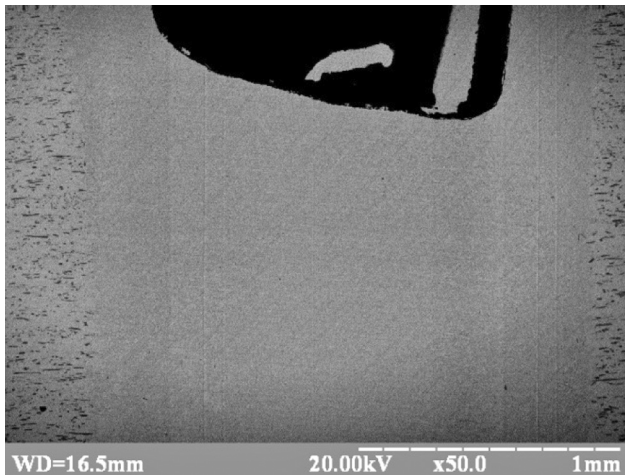
Настоящая работа открывает цикл исследований, направленных на установление основных закономерностей и путей оптимизации получения сварных соединений сплавов Ti – TiV<sub>n</sub> как с титановыми сплавами, так и с другими конструкционными материалами.

Титановые сплавы являются одними из основных конструкционным материалом в авиастроении,

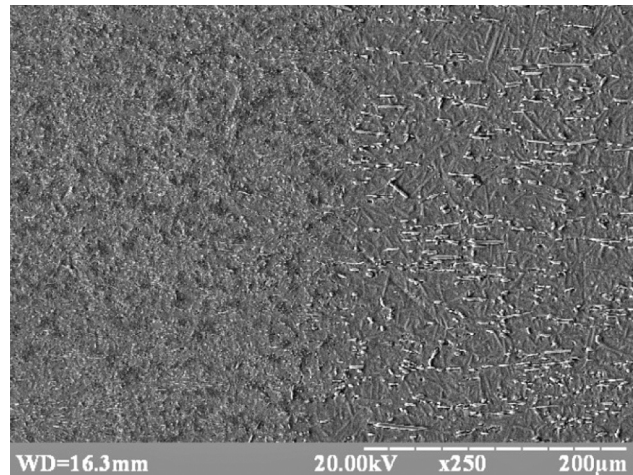
ракетостроении, медицинском протезировании. Уникальные свойства новых титановых сплавов определяют широкие возможности их применения для изготовления ответственных конструкций в двигателестроении, самолетостроении, энергетическом машиностроении, химической и других областях промышленности. Практическая возможность применения изделий из этих сплавов, в том числе сварных, определяется дальнейшим изучением возможностей сварки, где основой остается вопрос изучения характеристик структуры, механических и эксплуатационных характеристик.

Сварка – один из широко применяемых технологических процессов при создании сложных деталей и узлов, поэтому свариваемость Ti – TiV<sub>n</sub> сплавов – важный фактор, определяющий целесообразность его применения [4].

В качестве способа сварки была избрана электронно-лучевая сварка (ЭЛС), позволяющая соединять детали толщиной превышающей 100 мм. Именно этот вид сварки позволяет обеспечить точное регулирование температурных режимов, степень локализации термического влияния. В условиях ЭЛС в области формирования сварного шва наблюдаются значительные температурные градиенты, перепады фазовых состояний [4]. Этому способствует и пониженная теплопроводность, которая характерна для титановых сплавов [5]. Выбор режима ЭЛС позволяет оптимизировать структуру металла в области сварного шва, а возможность проведения локальной термической обработки электронным лучом в вакууме позволяет при необ-



а



б

**Рис. 1.** Зона сварного шва, полученная ЭЛС образцов  $Ti - TiB_n$ : а – без химического травления, изображение в отраженных электронах; б – после химического травления, изображение в поглощенных электронах (материал исходного образца справа)

ходимости изменять структуру свариваемых материалов в областях, примыкающих к сварному шву.

В настоящей работе сплав получали при спекании порошков  $Ti$  и  $TiB_2$ , которое осуществляли после смешивания  $Ti$ -мас. 95% и  $TiB_2$ -мас. 5%, прессования  $P = 0,65$  ГПа и отжига в температурном диапазоне  $\beta$ -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  $1000 \times 10$ . Соединяемые поверхности при сварке фиксировались на расстоянии 1 мм между собой в плоскопараллельном состоянии. Сварка выполнялась в режиме:  $U_{\text{уск}} = 60$  кВ,  $I_{\text{д}} = 90$  мА,  $v_{\text{д}} = 13$  мм/с, развертка луча эллипсообразная, поперечная ( $3 \times 4$  мм).

Формирование сварного шва происходило за счет формирования жидкой фазы при взаимодействии электронного луча с металлической поверхностью образцов. Полученный сварной шов в макрохарактеристиках может быть описан как сплошной и однородный. Для анализа структурных особенностей зоны сварного соединения применяли оптическую микроскопию ME IJI Techno MT 7500 и сканирующую электронную микроскопию РЭМ-106И.

Результаты проведения оптической металлографии дают основания к заключению, что ширина полученного сварного шва составляет 7 мм, что составляет 70% от толщины заготовки, а зона сварного шва не содержит макродефектов.

Исследования на сканирующем электронном микроскопе позволили более детально проанализировать материал в зоне сварного шва, свариваемых образцов и переходной зоны. Эксперименты выполнялись как на полированных образцах, так

и после химического травления (в отраженных и поглощенных электронах).

Для материала в области сварного шва характерно разделение на три зоны (рис. 1):

- зона материала образца, не подвергнутая существенному влиянию ЭЛС;
- зона сварного шва, сформированная из расплава;
- переходная зона, сформировавшаяся при взаимодействии расплава с металлом образца.

Полученные данные показывают, что структура исходного материала и полученного в результате формирования сварного шва значительно отличаются. Если для исходного состояния образцов  $Ti - TiB_n$  характерно наличие довольно крупных вытянутых зерен боридного типа, на которых интенсивность пика характеристического рентгеновского излучения уменьшается в 1,23 раза по сравнению с основной титановой матрицей. Волокна распределены равномерно по всему объему (их толщина составляет 3...6 мкм (рис. 2)) наблюдаются волокна длиной от 8 до 40 мкм. Толщина волокон  $TiB_n$  соотносится с их длиной в среднем в отношении 1:3, при этом это отношение варьируется от 2:3 до 1:15.

Следует отметить, что кроме темных вытянутых зерен боридной фазы в материале  $Ti - TiB_n$  в титановой матрице наблюдаются вытянутые зерна светлой фазы для которых также характерно падение интенсивности характеристического рентгеновского излучения  $Ti$  в 1,06 раза, что также свидетельствует о повышенном содержании бора.

В соответствии с результатами [2] высокая адгезионная прочность межфазных границ между титановой матрицей и нитевидными кристаллами  $TiB_n$  в композитах VT18U /  $TiB$  сохраняется до  $T = 600 - 700^\circ\text{C}$ . В целом эти фазовые образования являются и упрочняющими, и охрупчивающими структурными составляющими.

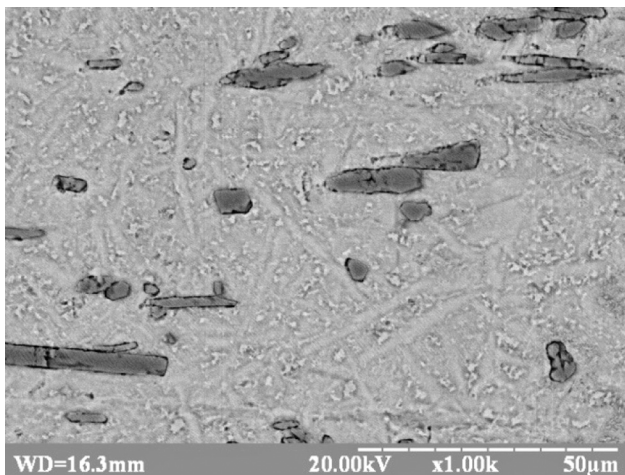


Рис. 2. Структура сплава Ti – TiB<sub>n</sub> до сварки

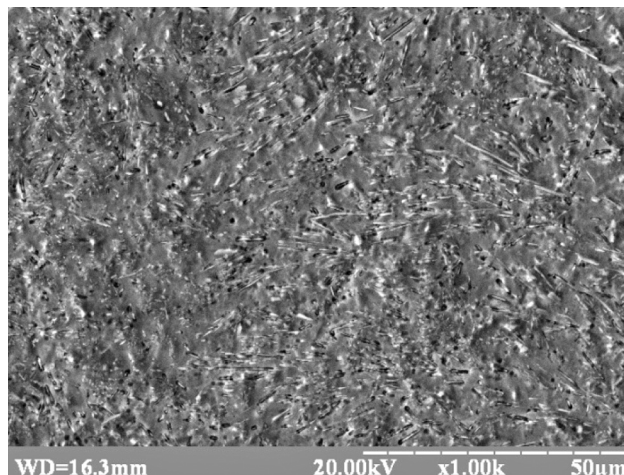


Рис. 3. Структура сплава Ti – TiB<sub>n</sub> в зоне сварного шва после ЭЛС

В зоне сварного шва наблюдаются значительные изменения в структуре сваренного материала рис. 3.

Структура материала в зоне сварного шва значительно более однородна. Волокна распределены равномерно по всему объему, а их толщина составляет 0,1–0,8 мкм (рис. 4), наблюдаются волокна длиной от 4 до 30 мкм. Толщина волокон борсодержащей фазы соотносится с их длиной в среднем в отношении 1:40, при этом это отношение варьируется от 1:10 до 1:150. Наблюдаемая структура, по-видимому, сформирована в условиях быстрой кристаллизации расплава Ti – TiB<sub>n</sub> содержащего 5 мас.% TiB<sub>2</sub> в титановой основе.

Как и в исходном материале интенсивность пика характеристического рентгеновского излучения Ti в зоне борсодержащих волокон уменьшается в 1,1 раза по сравнению с основной титановой матрицей. Снижение уровня спада интенсивности пика характеристического рентгеновского излучения Ti в зоне борсодержащих волокон в исходном мате-

риале и сварном шве, связано с увеличением объема титана соседствующего в матрице с боридным волокном, инициируемого электронным лучом для рентгеновского излучения.

Для выяснения характера влияния наблюдаемых структурных изменений в материале сплава Ti – TiB<sub>n</sub> на прочностные характеристики необходимо проведение механических испытаний сваренных образцов.

Структурные особенности области перехода сварной шов – основной материал свидетельствуют об отсутствии широкой зоны термического влияния. Ширина области, сохраняющей структурные особенности как исходного материала, так и сварного шва составляет в среднем 40–50 мкм (рис. 5, а).

Особенностью структуры в такой переходной зоне является наличие в ней как крупных борсодержащих волокон, характерных для исходного материала, так и тонких субмикронных волокон, наблюдаемых в материале сварного шва (рис. 5, б).

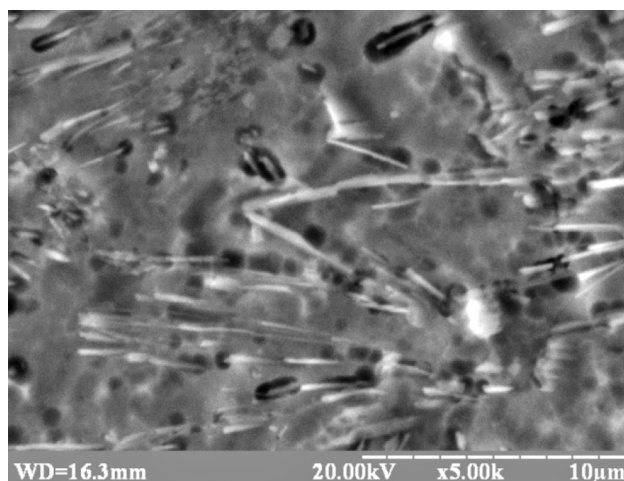
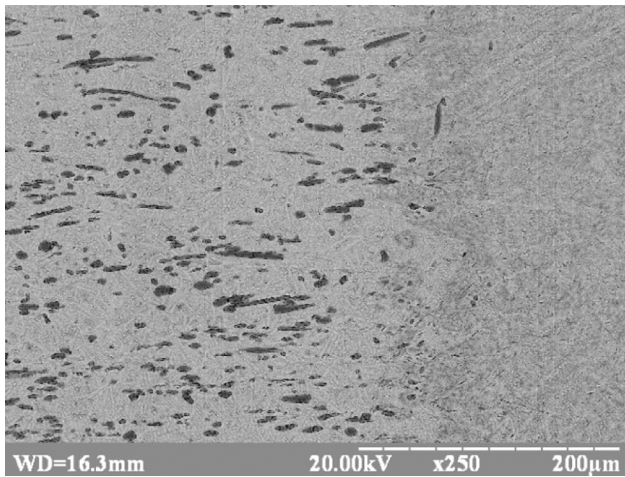
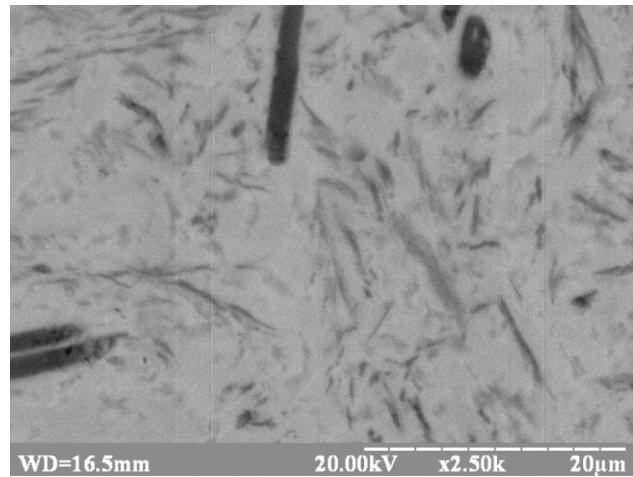


Рис. 4. Распределение борсодержащих волокон в материале сварного шва



а



б

Рис. 5. Структура материала в области перехода основного материала в сварной шов

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- Электронно-лучевая сварка в режиме:  $U_{\text{уск}} = 60$  кВ,  $I_{\text{л}} = 90$  мА,  $v_{\text{л}} = 13$  мм/с, развертка луча – эллипсообразная, поперечная (3×4 мм), обеспечивает получение неразъемного сварного соединения образцов сплава Ti – TiB<sub>n</sub> содержащего 5 мас.% TiB<sub>2</sub> в титановой основе.

- При формировании сварного шва исходный материал претерпевает структурные изменения, приводящие к снижению толщины борсодержащих волокон с 3–6 мкм до 0,1–0,8 мкм. При этом теряется их характерная направленность, вызванная пластическим деформированием и наблюдается значительное уменьшение отношения толщины волокон борсодержащей фазы к их длине.

- Переходная зона основной металл – материал сварного имеет характерный размер 40–50 мкм. В материале этой зоны наблюдаются как борсодержащие волокна толщиной 3–6 мкм длиной от 8 до 40 мкм, характерные для исходного материала, так тонкие длинные борсодержащие волокна, характерные для сварного шва.

- Общий характер структурных изменений, происходящих при формировании сварного шва, позволяет ожидать достаточно высоких прочностных показателей получаемого неразъемного соединения.

### Обозначения

$U_{\text{уск}}$  – ускоряющее напряжение электронного луча,

$I_{\text{л}}$  – электрический ток электронного луча,

$v_{\text{л}}$  – скорость перемещения 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. Солондкий // Технологические системы. – № 2(75). – 2016. – С. 89–92. – ISSN 2074-0603. [http://technological-systems.com/images/journal/2016/files/ts75\\_14.pdf](http://technological-systems.com/images/journal/2016/files/ts75_14.pdf).
- [2] Effect of hot forging on microstructure and mechanical properties of near  $\alpha$  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] Свариваемые сплавы системы / В. И. Замков, В. Ф. Топольский, И. К. Петриченко и др. // Автоматическая сварка. – 1998. – № 3. – С. 23–27.
- [5] Грабин В. Ф. Основы металловедения и термической обработки сварных соединений из титановых сплавов / В. Ф. Грабин. – К.: Наук. думка, 1975. – 262 с.

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

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute». Ukraine, Kiev

<sup>2</sup> E. O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine. Ukraine, Kiev

## FEATURES OF Ti – TiB<sub>n</sub> ALLOY STRUCTURE IN THE FIELD OF WELDED JOINT OBTAINED BY ELECTRON-BEAM WELDING

*The analysis of the welded joint structure of Ti – TiB<sub>n</sub> alloys containing 5% by weight TiB<sub>2</sub> in a titanium base was analyzed. To obtain an all-in-one connection, the electron-beam welding method is used. A comparative analysis of the structure of the base material was made and the welded seam. As a result, it was discovered that in the weld zone in the material, the initial orientation of boron-containing fibers caused by plastic deformation of the starting material is lost and a significant reduction in the dimensions of such fibers is observed.*

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

### References

- [1] Loboda P. I. Analysis of prospects of development titanium reinforced with fibers of titanium diboride, resistant to dynamic loads [Text] / P. I. Loboda, L. O. Zvorykin, V. S. Kosyuk, E. V. Soldkiy // Technological systems. – # 2(75). – 2016. – P. 89–92. – ISSN 2074-0603. [http://technological-systems.com/images/journal/2016/files/ts75\\_14.pdf](http://technological-systems.com/images/journal/2016/files/ts75_14.pdf).
- [2] Effect of hot forging on microstructure and mechanical properties of near  $\alpha$  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] Svarivaemye splavy sistemy / V. I. Zamkov, V. F. Topol'skij, I. K. Petrichenko etc. // Avtomaticheskaya svarka. – 1998. – # 3. – P. 23–27.
- [5] Grabin V. F. Osnovy metalovedenija i termicheskoy obrabotki svarnykh soedinenij iz titanovykh splavov / V. F. Grabin. – K.: Nauk. dumka, 1975. – 262 s.