

# Особенности электронно-лучевой сварки сплава Ti-TiB со сталью 12X18H10T

П. И. Лобода<sup>1</sup> • К. О. Зворыкин<sup>1</sup> • В. Л. Зворыкин<sup>1</sup> • Э. Л. Вржижевский<sup>2</sup> • Т. Г. Таранова<sup>2</sup> • В. А. Костин<sup>2</sup>

1 – КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина;

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

Received: 21 January 2020 / Accepted: 24 February 2020

**Аннотация.** Исследовались основные закономерности и пути оптимизации режимов получения сварных соединений пластин сплава Ti-TiB и стали 12X18H10T. Выяснялись пути достижения необходимых механических характеристик сварных конструкций из элементов толщиной 10 мм, получаемых электронно-лучевой сваркой. Определено, что электронно-лучевая сварка соединений сплава Ti-TiB со сталью 12X18H10T является эффективным при применении двойной прокладки из ниобия и стали 10Г2. Обнаружено, что для получения сварных соединений сплава Ti-TiB с Nb электронно-лучевой сваркой необходимо обеспечивать расплавление сплава Ti-TiB, условия смачивания ниобия полученным расплавом и предотвращать образование интерметаллической прослойки в сварном шве. Показано, что сварное соединение Ti-TiB-Nb-10Г2-12X18H10T, полученное электронно-лучевой сваркой, позволяет достигать уровень прочности не менее  $\sigma_s = 260$  МПа.

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

## Введение

Задача создания сварных конструкций новых титановых сплавов с нержавеющей сталью привлекает перспективами использования таких соединений в машиностроении. Решение этой технологической задачи позволит обеспечить не только необходимые эксплуатационные характеристики сварных соединений, но и обеспечит экономическую эффективность получения соответствующих конструкций.

## Постановка задачи

Настоящая работа продолжает исследования по установлению основных закономерностей и путей оптимизации получения сварных соединений сплавов Ti-TiB<sub>n</sub> как с титановыми сплавами, так и с другими конструкционными материалами. Работа была направлена на установление основных закономерностей и путей оптимизации режимов получения сварных соединений сплава Ti-TiB со сталью 12X18H10T. Целью этого исследования было выяснение пути достижения необходимых механических характеристик сварных конструкций из элементов толщиной 10 мм, получаемых электронно-лучевой сваркой.

## Результаты исследования

Процессы электронно-лучевой сварки сплава Ti-TiB со сталью 12X18H10T реализовывали как в непосредственном контакте вышеуказанных материалов, так и с использованием промежуточных слоев в соединении.

Опыт сварки материалов на основе титана со сталями был представлен в публикациях авторов [1–8]. В частности, авторы пришли к заключению о невозможности сварки плавлением титана со сталями вследствие возникновения трещин [1–2]. Главными причинами возникновения трещин считаются хрупкие интерметаллические фазы, образующиеся в зоне расплава [3]. Для решения этой проблемы используются промежуточные прослойки из материалов, образующих непрерывные твердые растворы с титаном [4–8]. Такая

✉ К. О. Зворыкин  
constantine.oleg@gmail.com

методика позволяет получать сварные соединения элементов ограниченной толщины, в большинстве случаев толщина не превышала 1 мм [4–9]. Известно, что выполнение сварки титановых сплавов с металлами, обладающими высокой растворимостью в титане (ниобий, ванадий), не вызывает проблем. Проблемной является сварка таких материалов со сталями, причем особо существенные проблемы появляются при сварке с нержавеющими аустенитного класса [8]. Получение ограниченной концентрации тугоплавкого металла в сварном шве (до мас. 15 %) может быть реализовано подбором режима сварки для элементов малой толщины, но для массивных свариваемых элементов такие ограничения по всему сварному шву затруднительны. При выполнении сварки ниобия с нержавеющей сталью с расплавлением последней рекомендуется обеспечивать установление межатомных связей свариваемых материалов за счет смачивания ниобия жидкой нержавеющей сталью [7]. В этом случае качество соединения будет определяться, прежде всего, характером процесса смачивания ниобия расплавленным металлом стали в условиях сварки в вакууме.

Сплав Ti-TiB, который был использован в этом исследовании, получали при спекании порошков Ti (марка ПТК-1 ТУ 14-22-57-92, фракция 45–100 мкм >85 %, химический состав, мас. %: N-0,07 %, C-0,05 %, H-0,35 %, Fe-0,35 %, Si-0,10 %, Ca-0,08 %, Cl-0,003 %, Ti-остальное) и TiB<sub>2</sub> (фракционный размер ~5 мкм, химический состав (ТУ 113-07-11.040-89): Ti~70%, B~30 %, Fe < 0,05 % and C < 0,1 %), которое осуществляли после смешивания Ti-95 % и TiB<sub>2</sub>-5 %, прессования  $P = 0,65$  ГПа и отжига в температурном диапазоне  $\beta$ -области (температура начала спекания 1000 °С, нагрев со скоростью 0,03 град/с до 1200 °С, 3 часа, 10 Па). Полученными брикетами заполняли камеру плавления электронно-лучевой установки УЭ-208 с применением промежуточной емкости. Плавление выполняли в условиях вакуума  $(7-9) \times 10^{-2}$  Па в промежуточной емкости, сливая расплав в медный водоохлаждаемый кристаллизатор диаметром 110 мм. В кристаллизаторе обеспечивали направленный теплоотвод путем нагревания поверхности расплава в кристаллизаторе электронными лучами двух электронных пушек [10]. После механической обработки слитка со снятием слоя 2,5 мм проводилась многократная деформационная обработка на прокатном стане 500/350 «Skoda» со степенью пластической деформации  $\varepsilon = 20$  %. Конечная толщина заготовки для экспериментальных образцов составляла 10 мм. Раскрой заготовки выполняли способом гидроабразивной резки. Торцы разреза образцов шлифовали для обеспечения параллельности стыка свариваемых поверхностей (среднеарифметическое отклонение профиля поверхности  $R_a < 3,2$  мкм).

Полученная микроструктура сплава Ti-TiB, состоящего из Ti-матрицы с армирующими боридными волокнами, представлена на рис. 1. Количественное соотношение фаз Ti-95 %, TiB<sub>2</sub>-5 % в экспериментальных образцах контролировалась количественным рентгеновским фазовым анализом методом RIR.

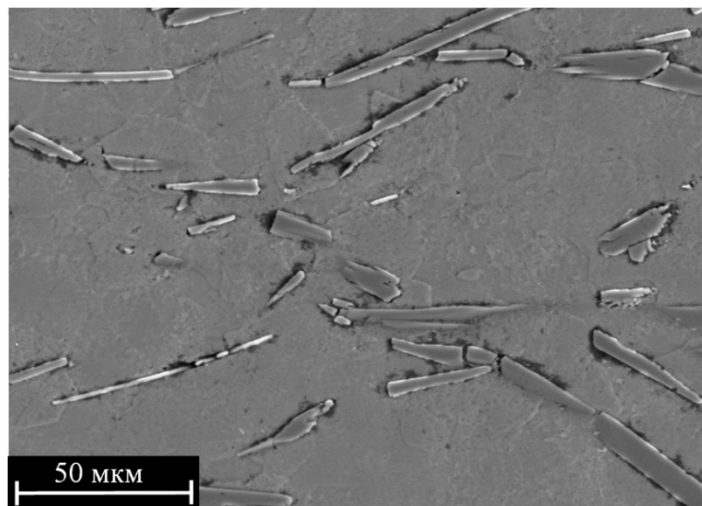


Рис. 1. Структура расплава Ti-TiB перед сваркой

Металлографический анализ показал, что в свариваемом материале Ti-TiB микроволокна TiB были распределены равномерно по всему объему титановой матрицы ( $\alpha$ -Ti), их толщина составляла 2-7 мкм (рис. 1), длина волокон варьировалась в диапазоне от 8 мкм до 70 мкм. Толщина волокон TiB соотносилась с их длиной в среднем в соотношении 1:3, однако указанное соотношение для различных включений изменялось в пределах от 2:3 до 1:15.

Используемый в работе ниобий соответствовал марке СБ-1, ТУ 48-4-337-75 (Nb-98,8 %, Zr-0,9 %, W-0,1 %, Mo-0,1 %, остальные примеси – 0,1 %) и применялся в виде полосы шириной 10 и 18 мм, толщиной 2,0 мм, длиной 100 мм. Применяемую полосу шлифовали ( $R_a < 3,2$  мкм) и подвергали химическому травлению в растворе: 20 %HF + 10 %HNO<sub>3</sub> + 18 %H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 52 %H<sub>2</sub>O.

Образцы из стали 12X18H10T (ГОСТ 2590-88) размером  $50 \times 100 \times 10$  мм изготавливали из круглых заготовок путем механической обработки на фрезерном и плоскошлифовальном станках ( $R_a < 3,2$  мкм).

Образцы сварных соединений на основе сплава Ti-TiB получали электронно-лучевой сваркой (установка УЛ-144). Экспериментальные образцы размером  $50 \times 100 \times 10$  мм соединяли между собой по грани  $100 \times 10$  мм. Сварка выполнялась в режиме:  $U_{\text{уск}} = 60$  кВ,  $I_{\text{л}} = 90$  мА, скорость перемещения электронного луча изменялась  $v_{\text{эл}} = 7$ ; 10 и  $13 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ , развертка луча при сварке титановых сплавов с тугоплавкими металлами и сталями – круглая диаметром 0,5 мм. Использовался Т-образный катод из борида лантана (монокристаллический  $\text{LaB}_6$ ) диаметром 3 мм. Расстояние от электронной пушки до сварного стыка составляло 70 мм. Смещение пятна луча было в сторону от ниобия и составляло  $\sim 0,3$  мм.

Образцы для металлографических исследований приготавливали из полученных образцов сварных соединений (использовался прецизионный гидроабразивный комплекс КГА 2-Р-2500) путем разрезания в плоскости, перпендикулярной оси стыкового сварного шва, с последующей шлифовкой и полировкой, снятием 0,5 мм от образца. Образцы для металлографических исследований были затем травлены в растворе: 15 %HF + 55 %H<sub>2</sub>O + 30 %HNO<sub>3</sub>.

Подготовленные поверхностные слои фотографировали и анализировали с использованием сканирующего электронного микроскопа JSM-840 и зонда для микрорентгеноспектрального с увеличением до 5000 раз. Фотографии были получены от вторичных (SE) и обратно рассеянных (BSE) электронов. Также использовался сканирующий электронный микроскоп JAMP-9500F (JEOL Ltd.) с энергодисперсионным оже-спектрометром OXFORD EDS INCA Energy 350.

Испытания на растяжение проводились на машине для испытания на растяжение ЦД-4 по ГОСТ 1497-84. Образцы для испытания на растяжение вырезались из сваренной пластины водой (использовался прецизионный гидроабразивный комплекс КГА 2-Р-2500), перпендикулярно оси сварного стыка. При этом сварной шов находился посередине образца на растяжение. Образец подвергали механической обработке для достижения геометрии, показанной на рис. 2.

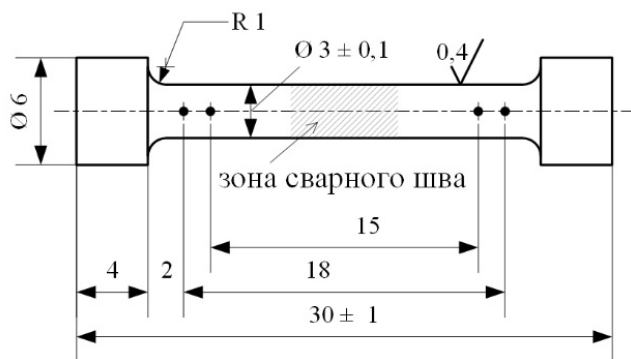


Рис. 2. Образец для испытаний на растяжение по ГОСТ 1497-84 (ISO 6892-84)

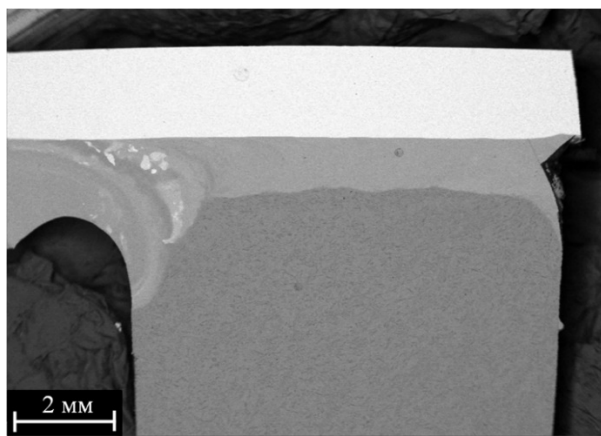


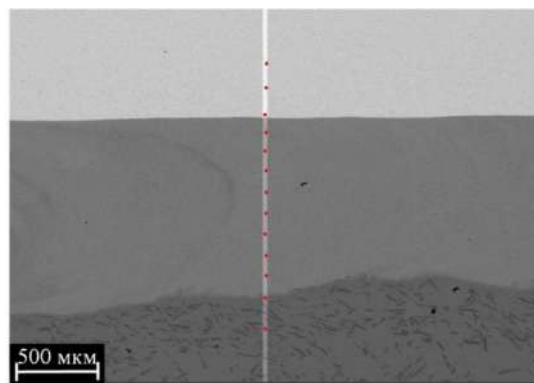
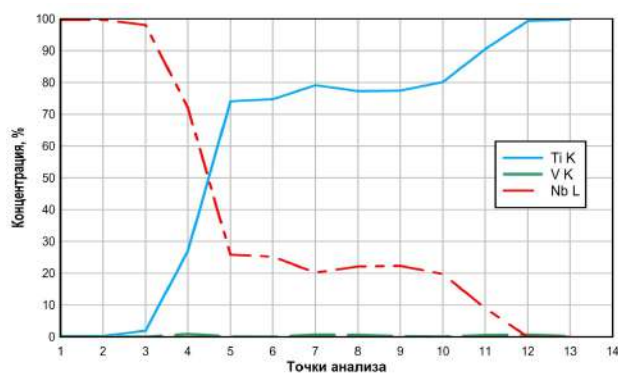
Рис. 3. Общий вид сварного соединения Ti-TiB-Nb ( $\times 10$ ),  $v_{\text{эл}} = 7 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$

Выполнение сварного соединения непосредственно в контакте Ti-TiB-12X18H10T приводило к формированию сварного шва с макротрещинами или к разрушению соединения в процессе остывания после сварки вследствие возникновения термонапряжения и отсутствия достаточного уровня механической прочности материала в зоне сварного соединения. Этот результат согласуется с результатами, представленными в других исследованиях [1–2].

Применение промежуточных прослоек из ниобия позволило выполнить сварные соединения Ti-TiB-Nb не имеющие внешних дефектов.

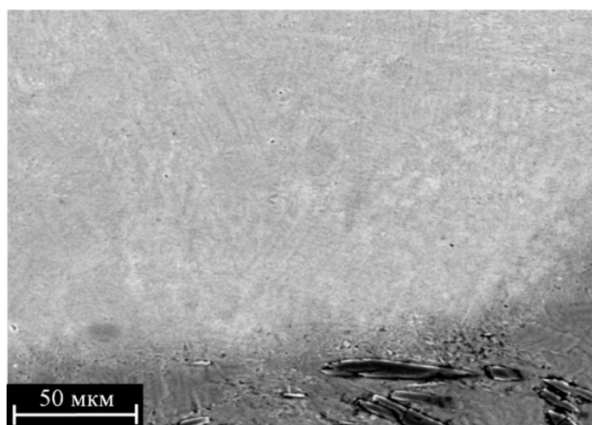
Общий вид сварного соединения Ti-TiB-Nb представлен на рис. 3. На рисунке видна сформировавшаяся зона смачивания, инициирующая формирование сварного шва.

Изменение концентрации Ti и Nb в сварном соединении представлено на рис. 4, а. Измерение концентрации проводилось по точкам, отмеченным на рис. 4, б. Для области границы шва со стороны Nb наблюдается диффузионный характер распределения Ti и Nb. Следы оплавления со стороны Ti четко выражены, это связано с тем, что температура плавления титана ( $\sim 1670^\circ\text{C}$ ) намного ниже температуры плавления ниобия ( $\sim 2468^\circ\text{C}$ ). Результаты измерений концентрации титана и ниобия по линии сканирования (рис. 4) показали, что в сварном соединении, выполненном электронно-лучевой сваркой при  $v_{\text{эл}} = 7 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ , Ti проникает в Nb на глубину 0,1 мм, толщина сварного шва составляет  $\sim 1,1$  мм.

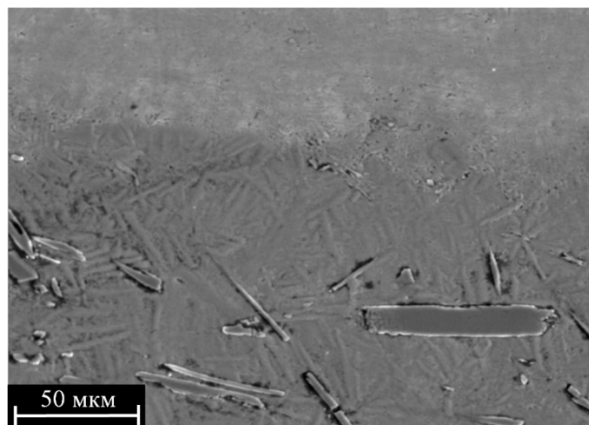


**Рис. 3.** Распределение элементов (Ti, Nb) по линии сканирования сварного шва соединения Ti-TiB-Nb-12X18H10T,  $v_{эл} = 7 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ : а – график распределения элементов в сварном соединении; б – участок сканирования распределение элементов по точкам

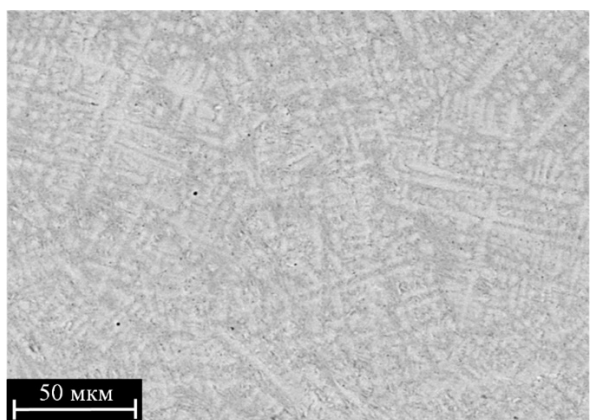
Микроструктура материала в области сварного шва представлена на рис. 5–8. Анализ этой переходной зоны показывает, что структура металла в области сварного шва однородна и соответствует смеси  $\alpha$ -Ti и  $\beta$ -Ti растворенных в Nb (рис. 5).



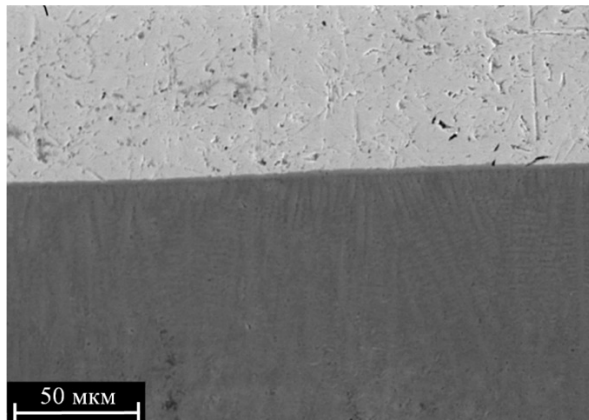
**Рис. 5.** Микроструктура материала сварного шва Ti-TiB-Nb вблизи с Ti-TiB,  $v_{эл} = 7 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$



**Рис. 6.** Микроструктура зоны контакта Ti-TiB со сварным швом Ti-TiB-Nb,  $v_{эл} = 7 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$



**Рис. 7.** Микроструктура зоны контакта Ti-TiB со сварным швом Ti-TiB-Nb,  $v_{эл} = 7 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$



**Рис. 8.** Микроструктура зоны контакта ниобия со сварным швом Ti-TiB-Nb,  $v_{эл} = 7 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$

Металлографический анализ материала сварного соединения показал, что наличие бора в сплаве Ti-TiB и растворение в расплаве сварного шва микроволокон TiB не приводит к образованию в зоне сварного шва интерметаллических прослоек, способных оказывать негативное влияние на механические свойства сварного соединения.

Для оценки механических свойств сварного соединения выполняли его разрушение и анализировали характер излома на различных участках сварного шва. В зоне сварного шва с 25 %Nb характер разрушения вязкий там наблюдается повышенное содержание титана (рис. 9).

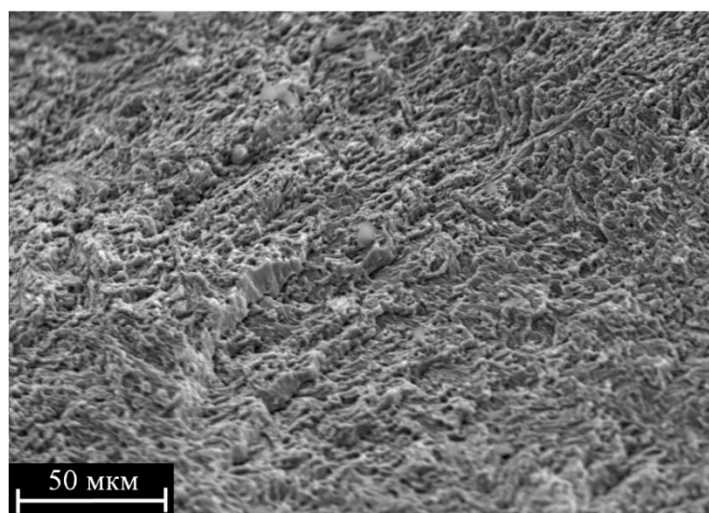


Рис. 9. Вязкий характер разрушения в зоне сварного шва с 25 % Nb

Анализ полученных результатов показал, что электронно-лучевая сварка в указанных параметрах выполнения процесса обеспечивает получение качественного сварного соединения Ti-TiB-Nb. С другой стороны, выполнение сварки пластин Ti-TiB-Nb-12X18H10T толщиной 10 мм во всем интервале скоростей перемещения электронного луча 7–13 мм·с<sup>-1</sup> приводило к формированию сварного шва с магистральной трещиной на границе Nb-12X18H10T (рис. 10).

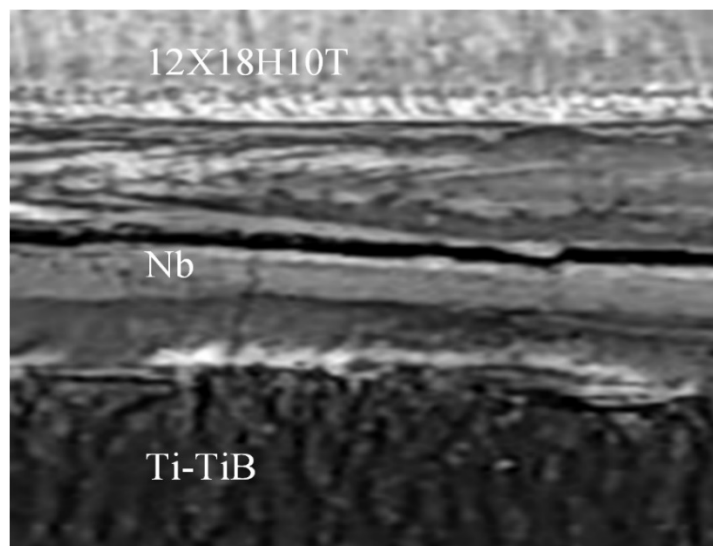


Рис. 10. Магистральная трещина в сварном шве на границе Nb-12X18H10T в сварном соединении Ti-TiB-Nb-12X18H10T, ( $\times 100$ ) где Ti-TiB–внизу; Nb (толщина 2 мм) – в центре; сталь 12X18H10T – сверху)

В отличие от сварки сварных образцов толщиной 10 мм, при сварке тонких пластин (толщиной 0,8–1,5 мм) близость свободных поверхностей облегчает разгрузку остаточных термических напряжений, вызываемых значительной разницей коэффициентов линейного расширения свариваемых материалов. Так



коэффициент линейного теплового расширения титана составляет  $8,6 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ , коэффициент линейного теплового расширения ниобия имеет близкие значения –  $7 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ , а нержавеющей аустенитной стали вдвое большие –  $16,4 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ . Величину остаточных напряжений в зоне соединения разнородных материалов можно оценить по формуле:  $\sigma_{\text{ос}} = E \Delta T (\alpha_1 - \alpha_2)$ , где  $\sigma_{\text{ос}}$  – остаточные напряжения;  $E$  – модуль Юнга,  $\Delta T$  – изменение температуры;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты линейного теплового расширения свариваемых материалов. Численные оценки величины остаточного напряжения в сварном соединении дают значения  $\sigma_{\text{ос}}$  (нержавеющая сталь – Ti)  $\approx 970$  МПа;  $\sigma_{\text{ос}}$  (Nb – нержавеющая сталь)  $\approx 1800$  МПа,  $\sigma_{\text{ос}}$  (Nb–Ti)  $\approx 146$  МПа. Даже учитывая приближенность сделанной оценки, всё равно требуется снижение величины остаточных напряжений в соединениях Nb – нержавеющая сталь и нержавеющая сталь – Ti. В свою очередь, величина оцененных остаточных напряжений в соединении Nb–Ti находится в пределах прочностных характеристик сплава Ti–TiB [10].

Для устранения такого критического дефекта, как высокий уровень остаточных напряжений, вызванного почти двукратным различием коэффициента теплового расширения стали 12X18H10T и ниобия, была использована дополнительная прокладка из стали 10Г2 с  $\alpha = 11,5 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ . В этом варианте сварного соединения оцениваемая величина остаточных напряжений не достигала критических значений ни в соединении с Nb, ни в соединениях со сталью 12X18H10T. Последовательное выполнение электронно-лучевой сварки при  $v_{\text{эл}} = 7 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ : сначала Ti–TiB–Nb, затем Nb–10Г2, после чего 10Г2–12X18H10T в результате позволила получить сварное соединение со сплошным швом (рис. 11) не содержащим макродефектов (см. рис. 10).

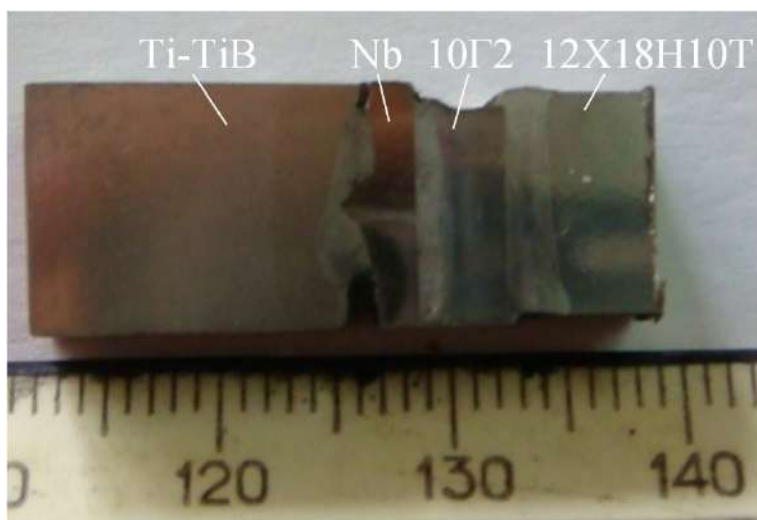


Рис. 11. Сварное соединение Ti–TiB–Nb–10Г2–12X18H10T, полученное электронно-лучевой сваркой,  $v_{\text{эл}} = 7 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$

В результате металлографического анализа области сварного шва в зоне взаимодействия ниобия со сталью 10Г2 была обнаружена прослойка эвтектики (см. рис. 12).

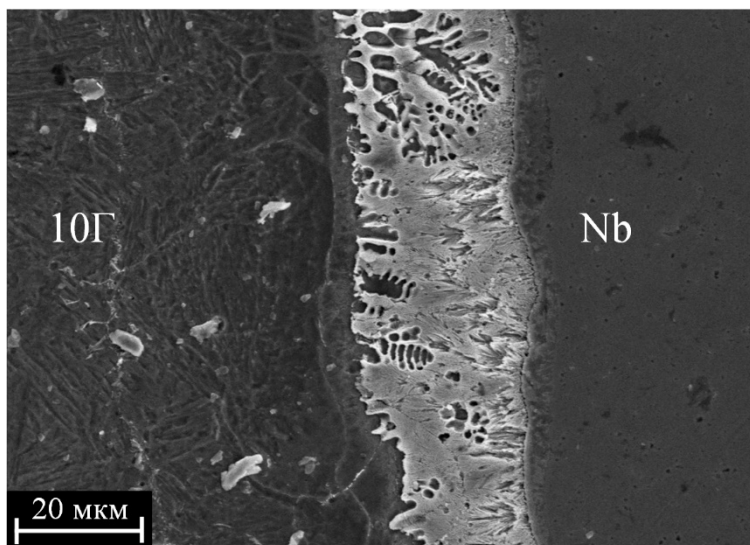


Рис. 12. Структура материала шва сварного соединения стали 10Г2 с ниобием

Эвтектика  $\text{Fe}_2\text{Nb} + \text{Fe}$  образуется при превышении концентрации Nb 5 % [12] и по результатам микрорентгеноспектрального анализа соответствует составу 93,37 %Fe; 6,63 %Nb. В соответствии с результатами других исследователей [7, 9], условием улучшения схватывания является образование эвтектики в виде прослойки между жидкой и твердой фазами при температуре 1400°C. При температуре до 1450°C интерметаллические фазы не образуются, и диффузионная зона в зоне сварного шва не превышает 30–35 мкм. При превышении температуры в зоне сварки 1700°C наблюдается формирование интерметаллической прослойки, охрупчивающей сварной шов.

Результаты механических испытаний образцов, изготовленных из сварного соединения Ti-TiB-Nb-10Г2-12Х18Н10Т, полученного электронно-лучевой сваркой при  $v_{\text{эл}} = 7 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ , выявили достигнутый уровень прочности, который составил  $\sigma_{\text{в}} = 263,6 \text{ МПа}$ , что значительно выше результатов электронно-лучевой сварки стали марки 321 (08Х18Н10Т) с ниобием [13], когда уровень достигнутой прочности составил  $\sigma_{\text{в}} = 170 \text{ МПа}$ .

Таким образом, было установлено, что при выполнении электронно-лучевой сваркой соединения пластин из сплава Ti-TiB и стали 12Х18Н10Т толщиной 10 мм благодаря неограниченной растворимости ниобия (Nb) и малоуглеродистой стали 10Г2 обеспечивается получение качественного сварного соединения с уровнем прочности, превышающем уровень  $\sigma_{0,2}$ , наименее прочного материала сварного соединения (стали 12Х18Н10Т).

### Выводы

1. Получение сварных соединений пластин толщиной 10 мм сплава Ti-TiB со сталью 12Х18Н10Т с использованием режимов электронно-лучевой сварки в  $U_{\text{уск}} = 60 \text{ кВ}$ ,  $I_{\text{л}} = 90 \text{ мА}$ ,  $v_{\text{эл}} = 7; 10 \text{ и } 13 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$  является эффективным при применении двойной прокладки из ниобия и стали 10Г2.
2. Для получения сварных соединений пластин толщиной 10 мм сплава Ti-TiB с Nb электронно-лучевой сваркой необходимо обеспечивать расплавление сплава Ti-TiB, условия смачивания ниобия полученным расплавом и предотвращать образование интерметаллической прослойки в сварном шве.
3. Сварное соединение пластин толщиной 10 мм Ti-TiB-Nb-10Г2-12Х18Н10Т, полученное электронно-лучевой сваркой, позволяет достигать уровень прочности не менее  $\sigma_{\text{в}} = 260 \text{ МПа}$ .

### References

1. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов / С. М. Гуревич, В. Н. Замков, В. Е. Блашук и др. // 2-е изд., доп. и перераб. – К.: Наук. думка, 1986. – 240 с.
2. Metzger G. Electron beam welding of dissimilar metals / G. Metzger; R. Lison // *Welding Journal*. – 1976. – Vol. 55, No. 8, – P. 230–240.
3. Гуревич С. М. Сварка титана со сталью / С. М. Гуревич, В. Н. Замков // Автоматическая сварка. – 1962. – № 8, – С. 21–27.
4. Рабкин Д. М. Сварка разнородных металлов / Д. М. Рабкин, В. Р. Рябов, С. М. Гуревич. – К.: Техніка, 1975. – 205 с.
5. Рябов В. Р. Сварка разнородных металлов и сплавов / Д. М. Рабкин, В. Р. Рябов, Р. С. Курочко, Л. Г. Стрижевская. – М.: Машиностроение, 1984. – 239 с.
6. Лариов Л. Н. Диффузионные процессы в твердой фазе при сварке / Л. Н. Лариов, В. Р. Рябов, В. М. Фальченко. – М.: Машиностроение, 1975. – 189 с.
7. Пацкевич, И. Р. Поверхностные явления при сварке металлов / И. Р. Пацкевич, В. Р. Рябов, Г. Ф. Деев; ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР. – Киев: Наук. думка, 1991. – 240 с.
8. Киреев Л. С. Сварка плавлением титана со сталью / Л. С. Киреев, В. Р. Замков // Автоматическая сварка. – №8, 2002. – С.31–33.
9. Никифоров Г. Д. Электроннолучевая сварка ниобия с коррозионностойкой сталью 12Х18Н10Т / Г. Д. Никифоров, Н. П. Крутоголов // Материалы VIII Всесоюзного совещания по сварке разнородных, многослойных и композиционных материалов. – Киев, 1983, С. 32–42.
10. Структура и свойства титанового сплава, легированного бором, полученного способом электронно-лучевого переплава / Г.М. Григоренко, С. В. Ахонин, П. И. Лобода, С. Г. Григоренко, А. Ю. Северин, В. А. Березос, Ю. И. Богомол // Современная электрометаллургия. – 2016, Т. 122, №1. – С. 22–25.
11. Petro Loboda, Constantine Zvorykin, Volodymyr Zvorykin, Eduard Vrzhyzhevskyi, Tatjana Taranova and Valery Kostin. Production and Properties of Electron-Beam-Welded Joints on Ti-TiB Titanium Alloys; *Metals*. – 2020. – 10(4), P. 522, DOI: doi:10.3390/met10040522
12. Стрoение и свойства двойных металлических систем (1962) / А. Е. Вол // Т. 2, М.: Государственное издательство физико-математической литературы. 1962, – 982 с.
13. Hajitabar A. Electron beam welding of difficult-to-weld austenitic stainless steel / Nb-based alloy dissimilar joints without interlayer / A. Hajitabar; A. Homam Naffakh-Moosavy // *Vacuum*. –Vol. 146, December 2017. – P. 170–178.

## Особливості електронно-променевого зварювання сплаву Ti-TiB зі сталлю 12X18H10T

П. І. Лобода, К. О. Зворикін, В. Л. Зворикін, Е. Л. Вржіжевський, Т. Г. Таранова, В. А. Костін

**Анотація.** Досліджувалися основні закономірності та шляхи оптимізації режимів отримання зварних з'єднань пластин сплаву Ti-TiB та сталі 12X18H10T. З'ясовувалися шляхи досягнення необхідних механічних характеристик зварних конструкцій з елементів товщиною 10 мм, одержуваних електронно-променевим зварюванням. Визначено, що електронно-променеве зварювання з'єднань сплаву Ti-TiB зі сталлю 12X18H10T є ефективним при застосуванні подвійної прокладки з ніобію і сталі 10Г2. Виявлено, що для отримання зварних з'єднань сплаву Ti-TiB з Nb електронно-променевим зварюванням необхідно забезпечувати розплавлення сплаву Ti-TiB, умови змочування ніобію отриманим розплавом та запобігати утворенню інтерметалевого прошарку в зварному шві. Показано, що зварне з'єднання Ti-TiB-Nb-10Г2-12X18H10T, отримане електронно-променевим зварюванням, дозволяє досягати рівня міцності не менше  $\sigma_s = 260$  МПа.

**Ключові слова:** титан; борид титану; металографічна структура; зварне з'єднання; електронно-променеве зварювання; параметри зварювання.

## Features of electron-beam welding of Ti-TiB alloy with 12X18H10T steel

P. I. Loboda, C. O. Zvorykin, V. L. Zvorykin, E. L. Vrzhyzhevskiy, T. G. Taranova, V. A. Kostin

**Abstract.** The basic regularities and ways of optimizing the production of welded joints of Ti-TiB alloy plates and 12X18H10T steel were studied. The ways to achieve the necessary mechanical characteristics of welded structures from elements with a thickness of 10 mm obtained by electron beam welding were found out. It was determined that electron beam welding of Ti-TiB alloy compounds with 12X18H10T steel is effective when using a double strip of niobium and 10Г2 steel. It was found that in order to obtain welded joints of the Ti-TiB alloy with Nb electron beam welding, it is necessary to ensure the melting of the Ti-TiB alloy, conditions for wetting niobium with the obtained melt, and to prevent the formation of an intermetallic layer in the weld. It is shown that the welded joint Ti-TiB-Nb-10Г2-12X18H10T obtained by electron beam welding allows to achieve a strength level of at least  $\sigma_s = 260$  MPa.

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

### References

- Gurevich, S.M., Zamkov, V.N., Blashhuk, V.E. and dr. (1986), *Metallurgija i tehnologija svarki titana i ego splavov*, 2 revised and supplemented, Nauk. dumka, Kyiv, Ukraine.
- Metzger, G. and Lison, R. (1976), "Electron beam welding of dissimilar metals", *Welding Journal*, vol. 55, no. 8, pp. 230–240.
- Gurevich, S.M. and Zamkov, V.N. (1962), "Svarka titana so stal'ju", *Avtomaticheskaja svarka*, no. 8, pp. 21–27.
- Rabkin, D.M., Rjabov, V.R. and Gurevich, S.M. (1975), *Svarka raznorodnyh metallov*, Tehnika, Kyiv, Ukraine.
- Rjabov, V.R., Rabkin, D.M., Kurochko, R.S. and Strizhevskaja, L.G. (1984), *Svarka raznorodnyh metallov i splavov*, Mashinostroenie, Moscow, Russia.
- Larikov, L.N., Rjabov, V.R. and Fal'chenko, V.M. (1975), *Diffuzionnye processy v tverdoj faze pri svarke*, Mashinostroenie, Moscow, Russia.
- Packevich, I.R. Rjabov, V.R. and Deev, G.F. (1991), *Poverhnostnye javlenija pri svarke metallov*, IJeS im. E.O. Patona AN USSR, Nauk. Dumka, Kiev, Ukraine.
- Kireev, L.S. and Zamkov, V.R. (2002), "Svarka plavleniem titana so stal'ju", *Avtomaticheskaja svarka*, no. 8, pp. 31–33.
- Nikiforov, G.D. and Krutogolovov, N.P. (1983), "Jelektronoluchevaja svarka niobija s korozionnostojkoj stal'ju 12H18N10T", *Materialy VIII Vsesojuznogo soveshhanija po svarke raznorodnyh, mnogoslojnyh i kompozicionnyh materialov*, Kyiv, pp. 32–42.
- Grigorenko, G.M., Ahonin, S.V., Loboda, P.I., Grigorenko, S.G., Severin, A.Ju., Berezos, V.A. and Bogomol, Ju.I. (2016), "Struktura i svojstva titanovogo сплава, legirovannogo borom, poluchennogo sposobom jelektronno-luchevogo pereplava", *Sovremennaja jelektrometallurgija*, vol. 122, no. 1, pp. 22–25.
- Loboda, Petro, Zvorykin, Constantine, Zvorykin, Volodymyr, Vrzhyzhevskiy, Eduard, Taranova, Tatjana and Kostin, Valery (2020), "Production and Properties of Electron-Beam-Welded Joints on Ti-TiB Titanium Alloys", *Metals*, vol. 4, no. 10, doi:10.3390/met10040522
- Vol, A.E. (1962), *Stroenie i svojstva dvojnyh metallicheskih system*, Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury, vol. 2, Mscow, Russia.
- Hajitabar, A., Homam A. Naffakh-Moosavy (2017), "Electron beam welding of difficult-to-weld austenitic stainless steel / Nb-based alloy dissimilar joints without interlayer", *Vacuum*, vol. 146, pp. 170–178.