



Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Особенности формирования сварного соединения сплава ВТ14 сваркой трением с перемешиванием с использованием жаропрочного инструмента из сплава ЖС6У

Алихан Амиров ^{a, *}, Евгений Москвичев ^b, Алексей Иванов ^c, Андрей Чумаевский ^d,
Владимир Белобородов ^e

Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, пр. Академический 2/4, г. Томск, 634055, Россия

^a <https://orcid.org/0000-0002-5143-8235>, amirov@ispms.tsc.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-9139-0846>, em_tsu@mail.ru,
^c <https://orcid.org/0000-0001-8959-8499>, ivan@ispms.tsc.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-1983-4385>, tch7av@gmail.com,
^e <https://orcid.org/0000-0003-4609-1617>, vabel@ispms.tsc.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.14

История статьи:

Поступила: 15 сентября 2022
Рецензирование: 29 сентября 2022
Принята к печати: 03 ноября 2022
Доступно онлайн: 15 декабря 2022

Ключевые слова:

Сварка трением с перемешиванием
Титановый сплав ВТ14
Микроструктура
Сварочный инструмент
Износ инструмента
Фрактография

Финансирование:

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда No. 22-29-01621.

Благодарности:

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034).

АННОТАЦИЯ

Введение. Технологический процесс изготовления изделий из титановых сплавов зачастую осложняется низким качеством сварных соединений при операциях электродуговой или газопламенной сварки из-за больших остаточных напряжений и деформаций. Примером успешного разрешения указанной проблемы является разработка и внедрение таких высокотехнологичных процессов стыкового соединения металлов, как сварка трением с перемешиванием, которая не относится к методам соединения плавлением. Сварка трением с перемешиванием как передовая технология применяется для получения соединений «мягких» металлических материалов, например таких, как алюминий. Для «твердых» металлических материалов работа по сварке трением с перемешиванием была ограниченной из-за высоких требований к сварочному инструменту. **Целью работы** является исследование возможности применения инструмента, изготовленного из жаропрочного сплава ЖС6У на основе никеля при сварке трением с перемешиванием титанового сплава ВТ14. **Результаты и обсуждение.** На основании данных оптической и сканирующей электронной микроскопии показано, что структура сварного шва является типичной для такого вида сварки, градиентной, состоящей из зоны термического воздействия, зоны термомеханического воздействия и зоны перемешивания с фрагментированной структурой. При варьировании параметров сварки было показано, что на дефектность сварного шва в большей степени влияет осевая нагрузка на инструмент, что обусловлено существенным различием в термическом воздействии на материал. Методами металлографического анализа в зоне перемешивания неразъемного соединения обнаружено растворение фрагментов материала сварочного инструмента. Фрактографический анализ поверхности изломов показывает, что разрыв в зоне шва был преимущественно вязким, что характерно для титановых сплавов, хотя в данном случае имелись перемины хрупкости. Варьирование параметров сварки трением с перемешиванием позволило получить неразъемное соединение, составляющее порядка 90 % прочности от основного металла.

Для цитирования: Особенности формирования сварного соединения сплава ВТ14 сваркой трением с перемешиванием с использованием жаропрочного инструмента из сплава ЖС6У / А.И. Амиров, Е.Н. Москвичев, А.Н. Иванов, А.В. Чумаевский, В.А. Белобородов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 53–63. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-53-63.

Введение

Титановые сплавы широко применяются в различных отраслях промышленности в связи с их свойствами: высокой удельной прочностью, термо- и коррозионной стойкостью, возможностью эксплуатации в агрессивных условиях

*Адрес для переписки

Амиров Алихан Ильнурович, м.н.с.
Институт физики прочности и материаловедения Сибирского
отделения Российской академии наук,
пр. Академический 2/4,
634055, г. Томск, Россия
Тел.: 8 (382) 228-68-63, e-mail: amirov@ispms.ru

и при знакопеременных нагрузках. Возможность создания сварных конструкций из титановых сплавов позволит существенно расширить технологические возможности производства изделий транспортного и аэрокосмического назначения, чем объясняется актуальность исследований в данном направлении. Однако широко применяемые методы сварки плавлением, такие как лазерная, электронно-лучевая сварка, сварка в защитных газах приводят к формированию пористости, растрескиванию, снижению коррозионной стойкости материала сварного соединения [1–3].

На сегодняшний день интенсивно ведутся исследования по сварке трением с перемешиванием (СТП) титановых сплавов, которая снижает факторы, формирующие дефекты сварного соединения и связанные с нагревом свариваемого материала до температуры плавления [4]. Ключевыми проблемами, возникающими в процессе СТП, являются оптимизация параметров сварки для получения бездефектных соединений с минимальной деградацией свойств, а также выбор инструментального материала, обеспечивающего минимизацию износа и высокую стойкость сварочного инструмента [5, 6].

Оптимизация параметров сварочного процесса титановых сплавов направлена на исследование влияния каждого из параметров, в основном скорости сварки и частоты вращения инструмента на прочностные свойства получаемых сварных соединений [7–9]. Кроме того, интенсивно исследуются процессы формирования структуры сварного соединения в результате термомеханического воздействия сварки [10–11]. Установлено, что в результате термомеханического воздействия сварки возникают синхронизированные процессы возврата и динамической рекристаллизации, приводящие к перераспределению α - и β -фаз, которое вносит значительный вклад в прочностные свойства получаемого неразъемного соединения [12–14]. При этом влиянию осевого усилия, определяющего степень деформации материала в условиях кручения под давлением, уделено гораздо меньше внимания.

В качестве инструментальных материалов для сварки титановых сплавов используются сплавы на основе молибдена, вольфрама, тантала, ниобия, кобальта, различные виды карбидов [15]. Широко используются инструменты на

основе вольфрамиевых сплавов, поскольку такие сплавы характеризуются высокой температурой рабочего процесса [16, 17]. Неплохую стойкость при сварке титановых сплавов показывают инструменты из вольфрамлантановых и кобальтовых сплавов [18, 19]. Широко распространено использование инструментов из карбида вольфрама [20, 21].

Однако несмотря на их достоинства, себестоимость изготовления таких инструментов достаточно высока и сложна технологически. Кроме того, возможно загрязнение свариваемого материала частицами износа инструмента, что негативно сказывается на свойствах неразъемных соединений. Все это требует поиска новых инструментальных материалов для сварки титановых сплавов. В этом качестве перспективным представляется жаропрочный сплав на основе никеля ЖС6У, который зарекомендовал себя при сварке высокопластичных (ВТ1-0, ОТ4-1) и среднепрочных (ВТ6) титановых сплавов [22, 23].

Таким образом, целью настоящей работы является исследование влияния осевого усилия на инструменте в процессе сварки трением с перемешиванием с использованием инструмента из жаропрочного сплава ЖС6У на прочностные свойства высокопрочного титанового сплава ВТ14.

Методика исследований

Сварка трением с перемешиванием выполнялась на специализированном экспериментальном оборудовании в Институте физики прочности и материаловедения СО РАН. В качестве заготовок использовали листовой прокат титанового сплава ВТ14 толщиной 2,5 мм с химическим составом, указанным в табл. 1.

При сварке использовался инструмент, изготовленный из жаропрочного сплава на основе никеля ЖС6У, химический состав сплава указан в табл. 2.

Для предотвращения интенсивного окисления титанового сплава в результате термомеханического воздействия инструмента сварку проводили в защитной атмосфере струи аргона, подаваемого под давлением через сопло в зону сварки. Для повышения стойкости инструмента в его внутреннюю полость производилась подача и отвод охлаждающей жидкости. Схема процесса сварки трением с перемешиванием представлена на рис. 1.

Таблица 1

Table 1

Химический состав сплава BT14, % масс.

Chemical composition of Ti-5Al-3Mo-1V alloy, wt. %

Fe	Si	N	Ti	Mo	V	Al	O	Прочие / Rest
≤ 0,25	≤ 0,15	≤ 0,05	86,85...92,8	2,5...3,8	0,9...1,9	3,5...6,3	≤ 0,15	0,3...0,4

Таблица 2

Table 2

Химический состав сплава ЖС6У, % масс.

Chemical composition of ZhS6U alloy, wt. %

Fe	Nb	Ti	Cr	Co	W	Ni	Al	Mo	Si	Прочие / Rest
≤ 1	0,8...1,2	2...2,9	8...9,5	9...10,5	9,5...11	54,3...62,7	5,1...6	1,2...2,4	≤ 0,4	≤ 0,6

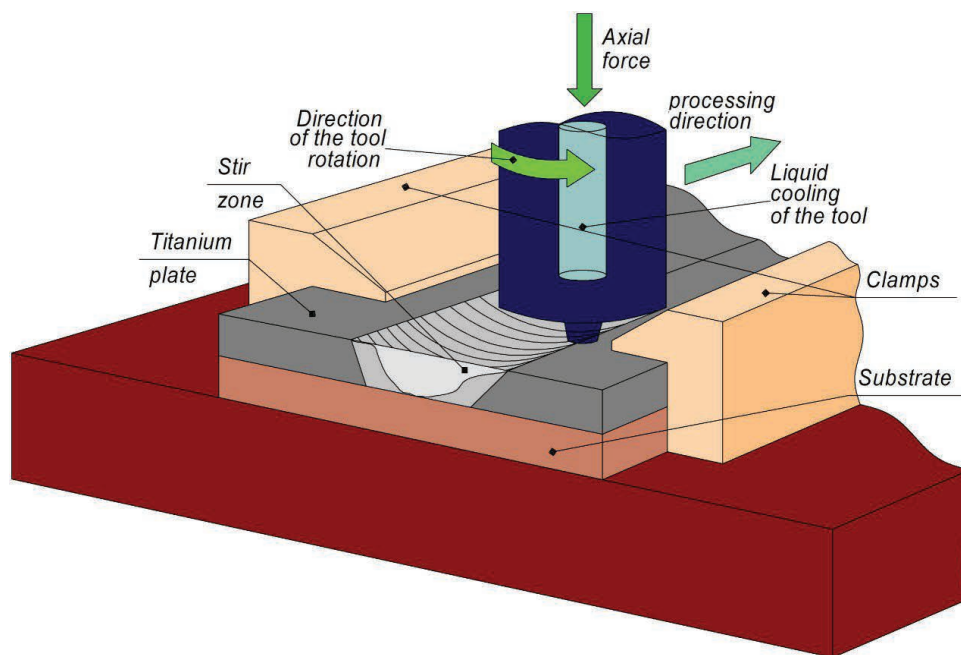


Рис. 1. Схема процесса сварки трением с перемешиванием

Fig. 1. Schematics of friction stir welding process

Сварка образцов выполнялась по режимам, приведенным в табл. 3. При переходе от режима к режиму изменяли осевые усилия на инструменте, при этом осевые усилия при внедрении инструмента в материал F_{PN} и его перемещении в направлении сварки в материале F_W отличались. Частота вращения инструмента ω и скорость сварки V при переходе от режима к режиму не изменялись. Длина получаемых сварных соединений для каждого режима составляла 100...180 мм.

Перед сваркой экспериментальных образцов был выполнен предварительный проход инструментом в свариваемом материале на длине 25 мм с целью формирования слоя титанового сплава на рабочей поверхности сварочного инструмента. Параметры процесса при предварительном проходе: осевые усилия $F_{PN}/F_W = 2300/2600$ кг, частота вращения инструмента $\omega = 375$ об/мин, скорость сварки $V = 86$ мм/мин.

Все исследуемые образцы сварных соединений вырезались электроэрозионным способом

Таблица 3

Table 3

Режимы сварки трением с перемешиванием сплава BT14

Modes of Ti-5Al-3Mo-1V alloy friction stir welding

Номер п/п	F_{PN} , кг / F_{PN} , kg	F_W , кг / F_W , kg	ω , об/мин / ω , rpm	V , мм/мин / V , mm/min
1	2300	2600	375	86
2	2500	2800	375	86
3	2700	3000	375	86

в направлении, поперечном сварному соединению, таким образом, чтобы оно располагалось в средней части образца. Образцы для металлографических исследований были подвергнуты шлифовке, полировке и травлению. Металлографические исследования проводили на металлографическом микроскопе Альтами MET-1C, конфокальном микроскопе Olympus LEXT OLS4000, а также на растровом электронном микроскопе Microtrac SEM с энергодисперсионным рентгеновским микроанализатором «IXRF systems». Испытания образцов на статическое растяжение осуществляли на универсальной испытательной машине UTC 110M-100 со скоростью деформации 1 мм/мин. При вырезке образцов для испытаний сварные соединения были

условно поделены по протяженности на 4 участка: 0...25 мм, 25...50 мм, 50...75 мм и 75...100 мм. Образцы для испытаний вырезались на каждом из указанных участков соединений.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 изображены макроструктуры сварных соединений в поперечном сечении, полученные методами металлографии. В структуре сварного соединения в результате травления явно выделяются три зоны материала: зона основного металла (BM), зона термического влияния (HAZ) и зона перемешивания (SZ). Зона термического влияния состоит из нерекристаллизованных и частично деформированных зерен.

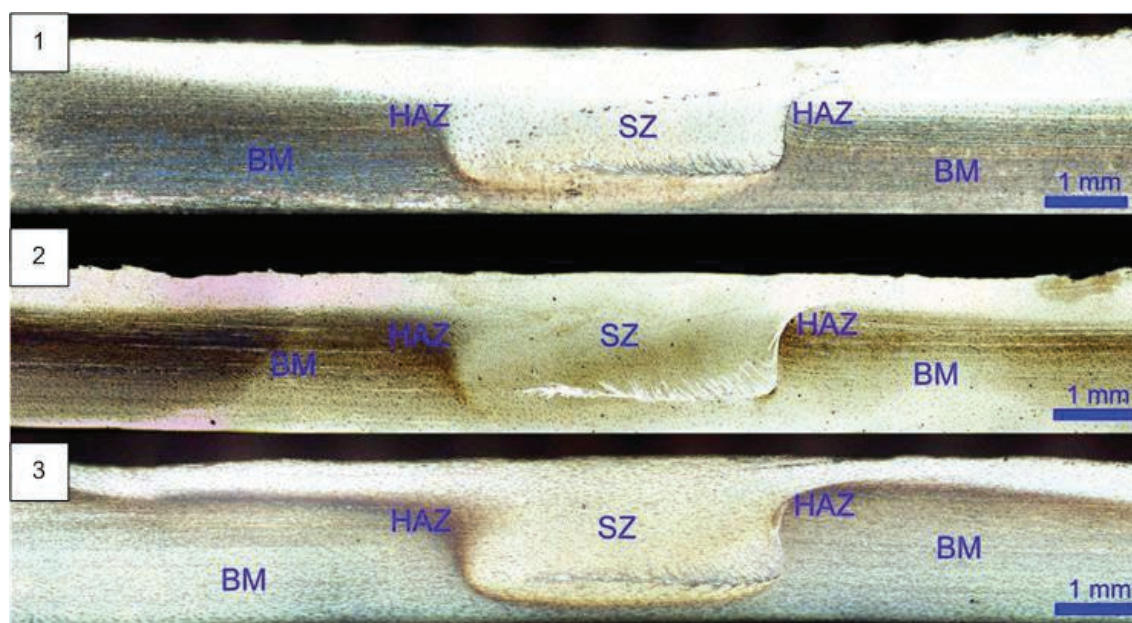


Рис. 2. Макроструктура СТП-соединений сплава BT14, полученных по режимам 1–3, в поперечном сечении

Fig. 2. Macrostructure of FSW joints of Ti-4Al-3Mo-1V alloy, obtained by modes 1–3, in the transverse direction

Анализ микроструктуры зоны перемешивания сварных соединений показал, что материал этой зоны состоит из фрагментированных и рекристаллизованных зерен титанового сплава. Кроме того, следует отметить, что при прочих постоянных параметрах режима сварки повышение осевого усилия на инструменте приводит к снижению размера зерна в зоне перемешивания (рис. 3). Это является положительным эффектом, способствующим упрочнению зоны перемешивания сварного соединения согласно механизму Холла–Петча.

Анализ микроструктуры сварных соединений также свидетельствует о наличии узкой зоны термомеханического воздействия (*TMAZ*), которая характеризуется наличием нерекристаллизованных зерен, сильно деформированных в направлении пластического течения металла (рис. 4). Следует отметить, что повышение осевого усилия на инструменте приводит к увеличению степени деформации структурных зерен в зоне *TMAZ*.

Линия, обозначающая границу между структурными зонами и отчетливо различимая на рис. 2, пролегает между зонами *TMAZ* и *HAZ* сварного соединения. Резкий переход между двумя структурными состояниями материала связан с низкой теплопроводностью титанового сплава, которая обеспечивает его локальный разогрев непосредственно в зоне контакта со сварочным инструментом и препятствует его пластификации, достаточной для формирования протяженной зоны термомеханического воздействия.

Различие между структурными состояниями в *HAZ* и *TMAZ* сварного соединения определяет резкое изменение прочностных характеристик его материала. Граница раздела характерных зон выступает в качестве фактора, определяющего прочность неразъемного соединения. Внешний вид образцов неразъемных соединений, испытанных на одноосное статическое растяжение, свидетельствует о том, что разрушение материала происходит по линии, соответствующей вышеуказанной границе раздела характерных зон (рис. 5).

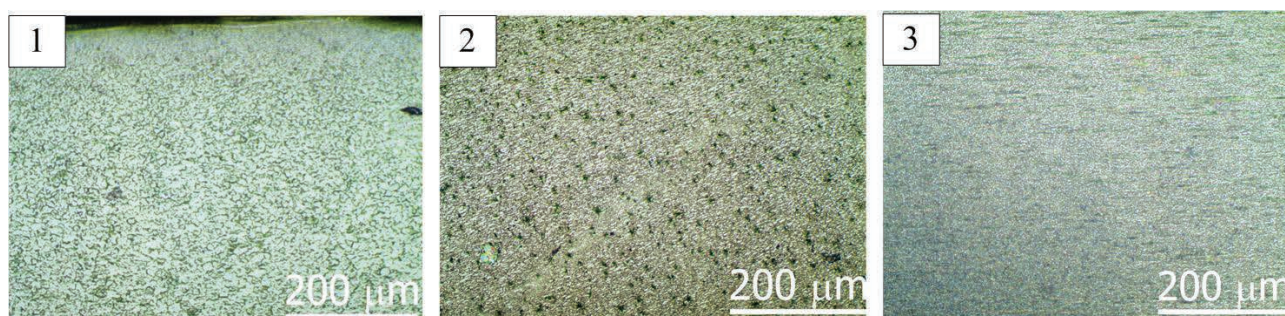


Рис. 3. Зона перемешивания (*SZ*) СТП-соединений сплава ВТ14, полученных по режимам 1–3

Fig. 3. Stirred zone (*SZ*) of FSW joints of Ti-4Al-3Mo-1V alloy, obtained by modes 1–3

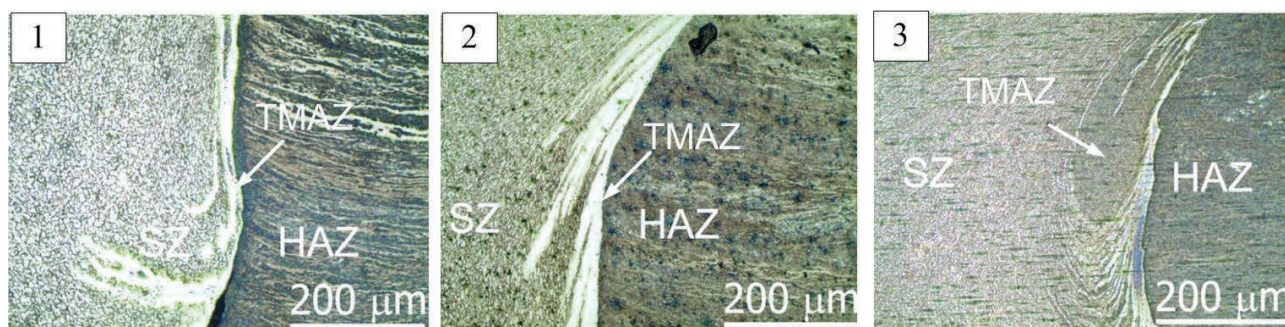


Рис. 4. Граница между структурными зонами СТП-соединений сплава ВТ14, полученных по режимам 1–3

Fig. 4. The boundary between structural zones of *FSW* joints of Ti-4Al-3Mo-1V alloy, obtained by modes 1–3



Рис. 5. Образцы СТП-соединений сплава ВТ14, полученных по режимам 1–3, после испытаний на одноосное растяжение

Fig. 5. Samples of FSW joints of Ti-4Al-3Mo-1V alloy, obtained by modes 1–3, after uniaxial tension tests

Фрактографические исследования показали, что при разрушении образцов формируется поверхность, схожая по текстуре с волокнистым изломом, с образованием резких переходов (рис. 6). При этом на поверхности разрушения формируется микрорельеф, соответствующий вязкому разрушению, с образованием ямок. Между ямками присутствуют достаточно крупные и разветвленные перемычки пластичности. Отмечено формирование небольших зон вытягивания ма-

териала. Таким образом, разрушение произошло в месте, содержащем большое количество низкоразмерных и деформированных структурных элементов, что соответствует частично фрагментированным и сильнодеформированным зернам зоны *TMAZ* неразъемного соединения.

По результатам испытаний образцов неразъемных соединений на одноосное статическое растяжение установлено, что величина предела прочности полученных сварных соединений снижается до 84...93 % от величины для исходного сплава ВТ14 (рис. 7).

Согласно результатам испытаний повышение осевого усилия на инструменте при сварке трением с перемешиванием приводит к снижению предела прочности результирующего неразъемного соединения сплава ВТ14. Данный эффект связан с увеличением степени деформации материала, которая способствует повышению градиента прочностных характеристик. При упрочнении зоны перемешивания идет разупрочнение зоны термомеханического воздействия за счет деформационно-индуцированных процессов перераспределения вторичных фаз [12, 14]. Кроме того, с ростом протяженности сварного соединения отмечено падение величины предела прочности по его длине. Это может быть связано с условиями отвода тепла, которое аккумулирует

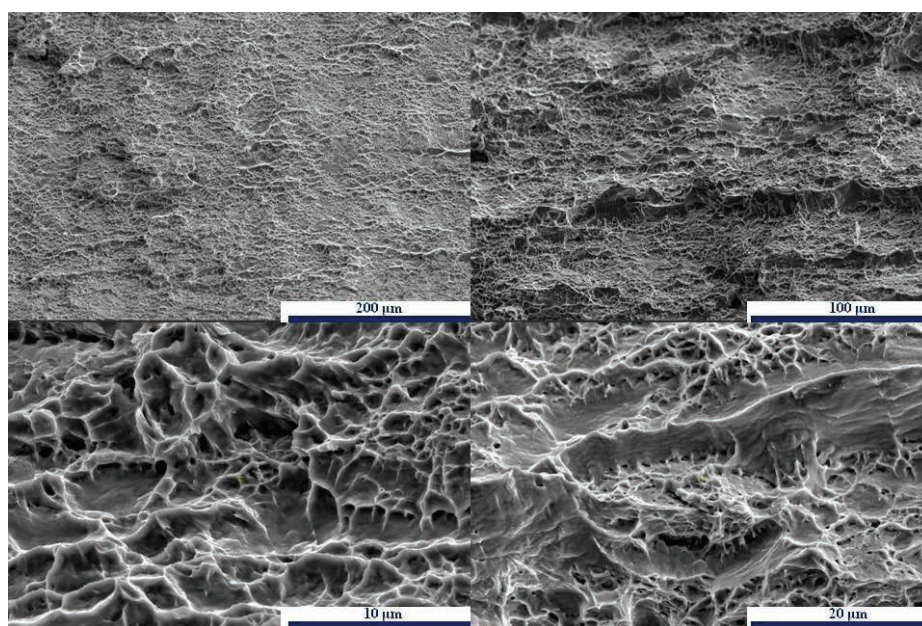


Рис. 6. Характеристические изображения поверхностей разрушения СТП-соединений сплава ВТ14

Fig. 6. Fracture surface characteristic images of FSW joints of Ti-4Al-3Mo-1V alloy

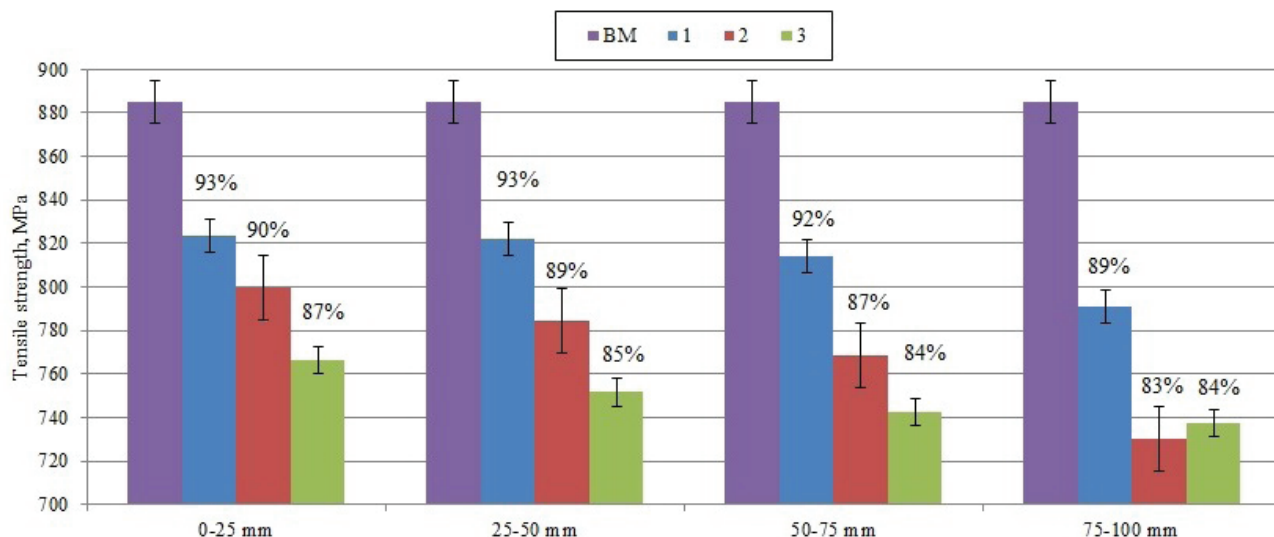


Рис. 7. Гистограммы предела прочности при растяжении СТП-соединений сплава ВТ14, полученных по режимам 1–3

Fig. 7. Tensile strength bar graphs of Ti-4Al-3Mo-1V alloy, obtained by modes 1–3

ется в связи с низкой теплопроводностью титановых сплавов либо с износом сварочного инструмента. Сохранение высокой температуры в зоне сварки обеспечивает рост числа и размера частиц вторичных фаз, которые способствуют разупрочнению материала. При этом влияние фактора износа инструмента в данном случае, является малозначительным, поскольку инструмент был предварительно покрыт слоем титанового сплава при проведении предварительного прохода. Кроме того, визуальный осмотр использованного при сварке инструмента показал, что следы износа на поверхности инструмента отсутствуют, наблюдается лишь слой титанового сплава, адгезионно связанный с инструментом (рис. 8).

Таким образом, инструмент из жаропрочного сплава ЖС6У после сварки сварных соединений из сплава ВТ14 общей протяженностью более 0,5 м показывает достаточно высокую стойкость к воздействию сопутствующих температурных и механических нагрузок и может эффективно использоваться при СТП титановых сплавов.

Заключение

Проведенные исследования показали, что при сварке трением с перемешиванием высокопрочного сплава ВТ14 повышение осевого усилия приводит к повышению степени деформации структурных элементов свариваемого



Рис. 8. Инструмент СТП из жаропрочного сплава ЖС6У:

а – до выполнения сварки; б – после выполнения сварки

Fig. 8. FSW tool made of heat-resisted alloy ZhS6U:

а – before welding; б – after welding

материала, что благоприятно сказывается на прочности зоны перемешивания. Однако это также приводит к разупрочнению сварного соединения, поскольку оказывает существенное влияние на структурно-фазовое состояние зоны термомеханического воздействия, являющейся наименее прочной. Низкая теплопроводность титановых сплавов обеспечивает формирование узкой зоны термомеханического воздействия, а также способствует деградации прочностных свойств сварного соединения с ростом его протяженности, поскольку аккумуляция тепла способствует росту количества крупных частиц

вторичных фаз в зоне термомеханического воздействия. Разупрочнение сварного соединения не связано с фактором разрушения сварочного инструмента из жаропрочного сплава ЖСБУ, который устойчив к нагрузкам процесса сварки и может быть эффективно использован в процессах сварки трением с перемешиванием титановых сплавов.

Список литературы

1. A systematic review of fatigue behaviour of laser welding titanium alloys / V. Paranthaman, V. Dhinakaran, M. Swapna Sai, A. Devaraju. // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 19, pt. 1. – P. 520–523. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.249.
2. Investigation of tensile and high cycle fatigue failure behavior on a TIG welded titanium alloy / D. Ren, Y. Jiang, X. Hu, X. Zhang, X. Xiang, K. Huang, H. Ling // *Intermetallics*. – 2021. – Vol. 132. – P. 107115. – DOI: 10.1016/j.intermet.2021.107115.
3. Very long life fatigue failure mechanism of electron beam welded joint for titanium alloy at elevated temperature / F. Liu, Y. Chen, C. He, C. Wang, L. Li, Y. Liu, Q. Wang // *International Journal of Fatigue*. – 2021. – Vol. 152. – P. 106446. – DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106446.
4. Gangwar K., Ramulu M. Friction stir welding of titanium alloys: a review // *Materials and Design*. – 2018. – Vol. 141. – P. 230–255. – DOI: 10.1016/j.matdes.2017.12.033.
5. Fatigue properties of friction stir welded joint of titanium alloy / F. Gao, Y. Guo, S. Yang, Y. Yu, W. Yu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2020. – Vol. 793. – P. 139819. – DOI: 10.1016/j.msea.2020.139819.
6. Mironov S., Sato Y.S., Kokawa H. Friction-stir welding and processing of Ti-6Al-4V titanium alloy: A review // *Journal of Materials Science and Technology*. – 2018. – Vol. 34, iss. 1. – P. 58–72. – DOI: 10.1016/j.jmst.2017.10.018.
7. Raut N., Yakkundi V., Vartak A. A numerical technique to analyze the trend of temperature distribution in the friction stir welding process for titanium Ti 6Al 4V // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 41, pt. 2. – P. 329–334. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.09.336.
8. Nirmal K., Jagadesh T. Numerical simulations of friction stir welding of dual phase titanium alloy for aerospace applications // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 46, pt. 10. – P. 4702–4708. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.300.
9. Evolution of microstructure, texture and mechanical properties of special friction stir welded T-joints for an α titanium alloy / Y. Su, W. Li, X. Liu, F. Gao, Y. Yu, A. Vairis // *Materials Characterization*. – 2021. – Vol. 177. – P. 111152. – DOI: 10.1016/j.matchar.2021.111152.
10. Microstructure evolution of friction stir welding of Ti6321 titanium alloy based on the weld temperature below microstructure transformation temperature / F. Gao, Y. Guo, W. Yu, P. Jiang, Z. Liao // *Materials Characterization*. – 2021. – Vol. 177. – P. 111121. – DOI: 10.1016/j.matchar.2021.111121.
11. Eliminating the cavity defect and improving mechanical properties of TA5 alloy joint by titanium alloy supporting friction stir welding / S. Du, H. Liu, M. Jiang, Y. Hu, L. Zhou // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – Vol. 69. – P. 215–222. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.07.044.
12. Liu H., Fujii H. Microstructural and mechanical properties of a beta-type titanium alloy joint fabricated by friction stir welding // *Materials Science and Engineering: A*. – 2018. – Vol. 177. – P. 140–148. – DOI: 10.1016/j.msea.2017.11.006.
13. A specific analytical study of friction stir welded Ti-6Al-4V grade 5 alloy: stir zone microstructure and mechanical properties / N. Raut, V. Yakkundi, V. Sunnapwar, T. Medhi, V.K.S. Jain // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2022. – Vol. 76. – P. 611–623. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.02.036.
14. Microstructure and mechanical properties of friction stir processed TA5 alloy / L. Zhou, M. Yu, W. Chen, Z. Zhang, S. Du, H. Liu, Y. Yu, F. Gao // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – 2021. – Vol. 31, iss. 2. – P. 404–415. – DOI: 10.1016/S1003-6326(21)65505-X.
15. An overview on friction stir welding/processing tools / P. Maji, R. Karmakar, R. Kanti Nath, P. Paul // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 58, pt. 1. – P. 57–64. – DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.009.
16. The heat treatment improving the mechanical and fatigue property of TA15 alloy joint by friction stir welding / X. Xu, Q. Liu, J. Wang, X. Ren, H. Hou // *Materials Characterization*. – 2021. – Vol. 180. – P. 111399. – DOI: 10.1016/j.matchar.2021.111399.
17. Friction stir welding of Ti-6Al-4V alloy: Friction tool, microstructure, and mechanical properties / J. Li, Y. Shen, W. Hou, Y. Qi // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2020. – Vol. 58. – P. 344–354. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.025.
18. Microstructure evolution and mechanical characterization of friction stir welded titanium alloy Ti-6Al-4V using lanthanated tungsten tool / P.M. Mashinini, I. Dinaharan, J. David Raja Selvam, D.G. Hattingh // *Materials Characterization*. – 2018. – Vol. 139. – P. 328–336. – DOI: 10.1016/j.matchar.2018.03.020.
19. The performance of a Co-based alloy tool in the friction stir welding of TA5 alloy / S. Du, H. Liu,

M. Jiang, L. Zhou, F. Gao // *Wear*. – 2022. – Vol. 488–489. – P. 204180. – DOI: 10.1016/j.wear.2021.204180.

20. *Vardak S., Shatooti S., Zangeneh S.* Manufacturing of porous titanium using friction stir welding // *Materials Letters*. – 2022. – Vol. 310. – P. 131430. – DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131430.

21. Evolution of microstructure and texture in the stir zone of commercially pure titanium during friction stir processing / A. Kumar Singh, L. Kaushik, J. Singh, H. Das, M. Mondal, S.-T. Hong, S.-H. Choi // *International Journal of Plasticity*. – 2022. – Vol. 150. – P. 103184. – DOI: 10.1016/j.ijplas.2021.103184.

22. Wear of ZhS6U nickel superalloy tool in friction stir processing on commercially pure titanium / A. Amirov, A. Eliseev, E. Kolubaev, A. Filippov, V. Rubtsov // *Metals*. – 2020. – Vol. 10 (6). – P. 799. – DOI: 10.3390/met10060799.

23. *Amirov A.I., Chumaevskii A.V., Vorontsov A.V.* Formation of ($\alpha + \beta$) titanium welds by friction stir welding using heat-resistant alloy tool // *AIP Conference Proceedings*. – 2020. – Vol. 2310 (1). – P. 020017. – DOI: 10.1063/5.0034654.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Formation features of a welding joint of alloy Ti-5Al-3Mo-1V by the friction stir welding using heat-resistant tool from ZhS6 alloy

Alihan Amirov^a, Evgeniy Moskvichev^b, Aleksey Ivanov^c, Andrey Chumaevskii^d, Vladimir Beloborodov^e

Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0002-5143-8235>, amirov@ispms.tsc.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0002-9139-0846>, em_tsu@mail.ru,
^c <https://orcid.org/0000-0001-8959-8499>, ivan@ispms.tsc.ru, ^d <https://orcid.org/0000-0002-1983-4385>, tch7av@gmail.com,
^e <https://orcid.org/0000-0003-4609-1617>, vabel@ispms.tsc.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 15 September 2022
 Revised: 29 September 2022
 Accepted: 03 November 2022
 Available online: 15 December 2022

Keywords:

Friction stir welding
 Titanium alloy Ti-5Al-3Mo-1V
 Microstructure
 Welding tool
 Tool wear
 Fractography

Funding

The work was performed under Russian science foundation grant No. 22-29-01621.

Acknowledgements

The investigations were carried out using the equipment of Share Use Centre “Nanotech” of the ISPMS SB RAS. Research were partially conducted at core facility “Structure, mechanical and physical properties of materials”.

ABSTRACT

Introduction. The technological process of fabrication products from titanium alloys is often complicated by low quality of welded joints during electric arc or gas-flame welding operations due to high residual stresses and deformations. An example of a successful solution to this problem is the development and implementation of such high-tech processes of metal joining as friction stir welding, which does not refer to the methods of fusion joining. Friction stir welding as an advanced technology is used to obtain joints of “soft” metallic materials, such as aluminum. For “hard” metallic materials, friction stir welding has been limited due to the high demands on welding tools. **The aim of this work** is investigation of the possibility of using a tool made of the nickel-based heat-resistant alloy ZhS6U in friction stir welding of the titanium alloy Ti-5Al-3Mo-1V. **Results and discussion.** Optical and scanning electron microscopy results revealed that the structure of the weld is typical of this type of welding, gradient, consisting of a heat-affected zone, thermo-mechanical affected zone and a stir zone with a fragmented structure. When varying welding parameters, it is shown that the defectiveness of the weld is affected to a greater extent by the axial load on the tool, which is caused by a significant difference in the thermal effect on the material. Metallographic analysis methods revealed dissolution of welding tool material fragments in the stir zone of the non-detachable joint. Fractographic analysis of the fracture surface shows that the fracture in the weld zone is ductile, although in this case there are brittle bridges. Varying the parameters of friction stir welding made it possible to obtain an indissoluble joint with at least 90 % of the strength of the base metal.

For citation: Amirov A.I., Moskvichev E.N., Ivanov A.N., Chumaevskii A.V., Beloborodov V.A. Formation features of a welding joint of alloy Ti-5Al-3Mo-1V by the friction stir welding using heat-resistant tool from ZhS6 alloy. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 53–63. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-53-63. (In Russian).

References

1. Paranthaman V., Dhinakaran V., Swapna Sai M., Devaraju A. A systematic review of fatigue behaviour of laser welding titanium alloys. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 19, pt. 1, pp. 520–523. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.08.249.
2. Ren D., Jiang Y., Hu X., Zhang X., Xiang X., Huang K., Ling H. Investigation of tensile and high cycle fatigue failure behavior on a TIG welded titanium alloy. *Intermetallics*, 2021, vol. 132, p. 107115. DOI: 10.1016/j.intermet.2021.107115.

* Corresponding author

Amirov Alihan I., Junior researcher
 Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch
 of Russian Academy of Sciences
 2/4, pr. Akademicheskii
 634055, Tomsk, Russian Federation
 Tel.: 8 (382) 249-11-60, e-mail: amirov@ispms.ru

3. Liu F., Chen Y., He C., Wang C., Li L., Liu Y., Wang Q. Very long life fatigue failure mechanism of electron beam welded joint for titanium alloy at elevated temperature. *International Journal of Fatigue*, 2021, vol. 152, p. 106446. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106446.
4. Gangwar K., Ramulu M. Friction stir welding of titanium alloys: a review. *Materials and Design*, 2018, vol. 141, pp. 230–255. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.12.033.
5. Gao F., Guo Y., Yang S., Yu Y., Yu W. Fatigue properties of friction stir welded joint of titanium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, vol. 793, p. 139819. DOI: 10.1016/j.msea.2020.139819.
6. Mironov S., Sato Y.S., Kokawa H. Friction-stir welding and processing of Ti-6Al-4V titanium alloy: a review. *Journal of Materials Science and Technology*, 2018, vol. 34, iss. 1, pp. 58–72. DOI: 10.1016/j.jmst.2017.10.018.
7. Raut N., Yakkundi V., Vartak A. A numerical technique to analyze the trend of temperature distribution in the friction stir welding process for titanium Ti 6Al 4V. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 41, pt. 2, pp. 329–334. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.09.336.
8. Nirmal K., Jagadesh T. Numerical simulations of friction stir welding of dual phase titanium alloy for aerospace applications. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 46, pt. 10, pp. 4702–4708. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.300.
9. Su Y., Li W., Liu X., Gao F., Yu Y., Vairis A. Evolution of microstructure, texture and mechanical properties of special friction stir welded T-joints for an α titanium alloy. *Materials Characterization*, 2021, vol. 177, p. 111152. DOI: 10.1016/j.matchar.2021.111152.
10. Gao F., Guo Y., Yu W., Jiang P., Liao Z. Microstructure evolution of friction stir welding of Ti6321 titanium alloy based on the weld temperature below microstructure transformation temperature. *Materials Characterization*, 2021, vol. 177, p. 111121. DOI: 10.1016/j.matchar.2021.111121.
11. Du S., Liu H., Jiang M., Hu Y., Zhou L. Eliminating the cavity defect and improving mechanical properties of TA5 alloy joint by titanium alloy supporting friction stir welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 69, pp. 215–222. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.07.044.
12. Liu H., Fujii H. Microstructural and mechanical properties of a beta-type titanium alloy joint fabricated by friction stir welding. *Materials Science and Engineering: A*, 2018, vol. 177, pp. 140–148. DOI: 10.1016/j.msea.2017.11.006.
13. Raut N., Yakkundi V., Sunnapwar V., Medhi T., Jain V.K.S. A specific analytical study of friction stir welded Ti-6Al-4V grade 5 alloy: stir zone microstructure and mechanical properties. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, vol. 76, pp. 611–623. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.02.036.
14. Zhou L., Yu M., Chen W., Zhang Z., Du S., Liu H., Yu Y., Gao F. Microstructure and mechanical properties of friction stir processed TA5 alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2021, vol. 31, iss. 2, pp. 404–415. DOI: 10.1016/S1003-6326(21)65505-X.
15. Maji P., Karmakar R., Kanti Nath R., Paul P. An overview on friction stir welding/processing tools. *Materials Today: Proceedings*, 2022, vol. 58, pt. 1, pp. 57–64. DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.009.
16. Xu X., Liu Q., Wang J., Ren X., Hou H. The heat treatment improving the mechanical and fatigue property of TA15 alloy joint by friction stir welding. *Materials Characterization*, 2021, vol. 180, p. 111399. DOI: 10.1016/j.matchar.2021.111399.
17. Li J., Shen Y., Hou W., Qi Y. Friction stir welding of Ti-6Al-4V alloy: Friction tool, microstructure, and mechanical properties. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 58, pp. 344–354. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.08.025.
18. Mashinini P.M., Dinaharan I., David Raja Selvam J., Hattingh D.G. Microstructure evolution and mechanical characterization of friction stir welded titanium alloy Ti-6Al-4V using lanthanated tungsten tool. *Materials Characterization*, 2018, vol. 139, pp. 328–336. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.03.020.
19. Du S., Liu H., Jiang M., Zhou L., Gao F. The performance of a Co-based alloy tool in the friction stir welding of TA5 alloy. *Wear*, 2022, vol. 488–489, p. 204180. DOI: 10.1016/j.wear.2021.204180.
20. Vardak S., Shatooti S., Zangeneh S. Manufacturing of porous titanium using friction stir welding. *Materials Letters*, 2022, vol. 310, p. 131430. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131430.
21. Kumar Singh A., Kaushik L., Singh J., Das H., Mondal M., Hong S.-T., Choi S.-H. Evolution of microstructure and texture in the stir zone of commercially pure titanium during friction stir processing. *International Journal of Plasticity*, 2022, vol. 150, p. 103184. DOI: 10.1016/j.ijplas.2021.103184.
22. Amirov A., Eliseev A., Kolubaev E., Filippov A., Rubtsov V. Wear of ZhS6U nickel superalloy tool in friction stir processing on commercially pure titanium. *Metals*, 2020, vol. 10 (6), p. 799. DOI: 10.3390/met10060799.
23. Amirov A.I., Chumaevskii A.V., Vorontsov A.V. Formation of ($\alpha + \beta$) titanium welds by friction stir welding using heat-resistant alloy tool. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2310 (1), p. 020017. DOI: 10.1063/5.0034654.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.