Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2025 Том 27 № 2 с. 43–56
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-43-56

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

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

Влияние режимов аргонодуговой сварки на структуру и свойства сварных соединений из сплава ВТИ-4 (Ti_2AlNb)

Станислав Наумов [1, a,*], *Дмитрий Панов* [1, b], *Виталий Соколовский* [1, c], *Руслан Черниченко* [1, d], *Геннадий Салищев* [1, e], *Дмитрий Белинин* [2, f], *Василий Лукьянов* [3, g]

[1] Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия
[2] Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр-т, 29, г. Пермь, 614990, Россия
[3] НПА «Технопарк АТ», ул. Трамвайная, 5, корп. 1, г. Уфа, 450027, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0002-4084-8861, NaumovStanislav@yandex.ru; [b] https://orcid.org/0000-0002-8971-1268, dimmak-panov@mail.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0001-5607-2765, sokolovskiy@bsuedu.ru; [d] https://orcid.org/0000-0002-8619-0700, rus.chernichenko@mail.ru;
[e] https://orcid.org/0000-0002-0815-3525, salishchev_g@bsuedu.ru; [f] https://orcid.org/0000-0001-5462-0908, 5ly87@mail.ru;
[g] https://orcid.org/0009-0006-3621-3966, lukianovv@bk.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.791.754.6, 620.172/.178.2

История статьи:
Поступила: 12 февраля 2025
Рецензирование: 01 марта 2025
Принята к печати: 21 марта 2025
Доступно онлайн: 15 июня 2025

Ключевые слова:
Аргонодуговая сварка
Ti_2AlNb
Сплав ВТИ-4
Растровая электронная микроскопия
Механические свойства

Финансирование
Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (Соглашение № 19-79-30066) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Технологии и Материалы НИУ “БелГУ”».

АННОТАЦИЯ

Введение. Аргонодуговая сварка (TIG-сварка) из-за своей доступности и технологической простоты является перспективным методом для формирования неразъемных соединений из сплавов на основе Ti_2AlNb, в том числе сплава ВТИ-4, в условиях авиакосмической промышленности. Однако для сплава ВТИ-4 существуют ограничения применения данного вида сварки из-за образования в сварном шве грубозернистой структуры, которая приводит к низкому уровню механических свойств. **Цель работы.** Изучение влияния режимов аргонодуговой сварки (на постоянных токах и с применением низко- и высокочастотного импульса) на микроструктуру и прочностные свойства сварных соединений из сплава ВТИ-4. **Методы исследования.** TIG-сварка пластин осуществлялась в диапазоне сварочных токов 80…150 А с применением низко- и высокочастотного импульса (> 100 Гц). Методами растровой электронной микроскопии изучено строение сварных швов. Оценка прочностных свойств проводилась при одноосном растяжении сварных соединений. **Результаты и обсуждение.** Изучено строение сварных швов, которое имеет структуру в виде вытянутых крупных дендритов в центральной части и области валика сварного шва и глобулярных β-зерен в корневой части зоны плавления. Механические испытания сварных соединений показали уровень прочности ≈ 90 % от основного металла при импульсном режиме (σ_B = 1100 МПа, δ = 1,1 %, 335…390 $HV_{0,2}$) и не ниже 80 % при режимах на постоянном токе. Такой уровень прочностных свойств сварных соединений достигается благодаря сварке с использованием высокочастотного импульса, где максимальная длина и ширина дендритов в сварном шве составляет 1,06 мм и 0,33 мм соответственно, а средний размер глобулярных зерен в нижней части сварного шва составляет ≈ 130 мкм, что меньше, чем при тех же параметрах на постоянном токе.

Для цитирования: Влияние режимов аргонодуговой сварки на структуру и свойства сварных соединений из сплава ВТИ-4 (Ti_2AlNb) / С.В. Наумов, Д.О. Панов, В.С. Соколовский, Р.С. Черниченко, Г.А. Салищев, Д.С. Белинин, В.В. Лукьянов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 43–56. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-43-56.

Введение

Титановые сплавы нашли широкое применение в различных отраслях промышленности, а именно в ракетостроении, машиностроении, медицине и других сферах деятельности, благодаря низкой плотности, высокой прочности, устойчивости к коррозии, высокой технологичности и другим полезным свойствам [1–4].

***Адрес для переписки**
Наумов Станислав Валентинович, к.т.н.,
Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
ул. Победы, 85,
308015, г. Белгород, Россия
Тел.: +7 912 580-55-68, **e-mail:** NaumovStanislav@yandex.ru

В то же время из-за стойкости к ползучести и окислению до 500…550 °С ограничено высокотемпературное применение титановых сплавов [5].

Решением проблемы эксплуатации при высоких температурах могут стать интерметаллические соединения и сплавы [6]. К таким перспективным материалам относятся сплавы на основе орторомбического интерметаллида титана (орто-сплавы Ti_2AlNb). Сплавы на основе Ti_2AlNb обладают низкой плотностью (5,1…5,4 г/см^3), высокими удельной прочностью, стойкостью к окислению и сопротивлению ползучести [7–10]. Однако в связи со сложностями при сварке практическое применение этих сплавов осложнено, что является одним из наиболее существенных ограничивающих факторов [11]. Прежде всего это связано с возникновением мощных упругих напряжений из-за каскада фазовых превращений в зонах плавления и термического влияния в процессе сварки из-за низкой теплопроводности (6,2 Вт/(м · К) [10]) и малой пластичности сплавов на основе Ti_2AlNb. Поэтому, варьируя режимы сварки для управления тепловложениями, необходимо обеспечить формирование оптимальной структуры сварного шва и создать условия замедленного охлаждения металла шва с целью предотвращения образования трещин [12–14].

Для решения указанных проблем применяются различные специальные методы сварки с дополнительными технологическими приемами, такими как нагрев заготовок перед сваркой и в ее процессе (предварительный и сопутствующий подогрев), а для улучшения механических свойств используется термическая обработка [15–18]. Несмотря на большое разнообразие методов, приемов и операций, при сварке титановых сплавов наиболее перспективной для промышленного применения остается TIG-сварка, что определяется формированием бездефектных сварных швов и ее широкой доступностью. Однако образование грубозернистой структуры и широкого шва ограничивают ее использование из-за обеспечения низкого уровня механических свойств, а именно предела прочности и относительного удлинения сварных соединений [19, 20].

В настоящее время благодаря накопленному мировому опыту в области TIG-сварки титановых сплавов можно повысить уровень механических свойств сварных соединений из сплава ВТИ-4 (Ti_2AlNb) за счет применения TIG-сварки на форсированных постоянных токах и с использованием низко- и высокочастотного импульса. Это позволит регулировать мощность пятна нагрева и, следовательно, тепловложения в изделие, создавая условия для предотвращения роста дендритной структуры в металле шва [21]. Поэтому ***целью настоящего исследования*** является изучение влияния условий TIG-сварки на микроструктуру и уровень механических свойств сварных соединений из сплава на основе орторомбического интерметаллида титана Ti_2AlNb (марки ВТИ-4). В работе предложено достигать поставленной цели в несколько этапов. Первая задача заключается в подборе условий TIG-сварки на постоянных токах и с применением низко- и высокочастотного импульса для получения бездефектных сварных соединений, последующие задачи заключаются в оценке микроструктуры, микротвердости и уровня прочностных свойств сварных соединений из сплава ВТИ-4 по сравнению с исходными свойствами материала.

Методика исследований

В работе использовали исходную заготовку из сплава ВТИ-4 (Ti_2AlNb), химический состав которой представлен в табл. 1. Заготовка из сплава ВТИ-4 в состоянии поставки, а именно горячекованая шайба, обладает следующими свойствами: σ_B = 1230 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 1190 МПа, δ = 3,5 %, $HV_{0,2}$ = 400 ± 10. Микроструктура исходной заготовки (рис. 1) представляет собой вытянутые перпендикулярно направлению ковки крупные β-зерна размером 300 ± 50 мкм. Кроме этого, по границам β-зерен располагается глобулярная α_2-фаза (Ti_3Al) размером 10 ± 5 мкм. Обнаружено также, что по всему объему исследуемого материала равномерно распределены частицы игольчатой O-фазы (Ti_2AlNb) длиной 8 ± 3 мкм и толщиной 1…3 мкм.

TIG-сварка проводилась на оборудовании INVERTEC V405-T pulse (Lincoln Electric, США) с использованием сварочной горелки WP-9 flex (Start, Россия) и электродов WT-20 (Start, Россия). В качестве защитного газа применялся аргон марки 5.0. Газовая защита осуществлялась при помощи газовой линзы диаметром 12 мм в месте сварки и дополнительного подду-

Таблица 1
Table 1

Химический состав сплава ВТИ-4
Chemical composition of Ti–Al–Nb–(Zr, Mo)–Si alloy

Элемент / Element	Al	Nb	V	Zr	Mo	Si	Ti
Ат. % / at. %	23,0	23,0	1,4	0,8	0,4	0,4	Основа / Base

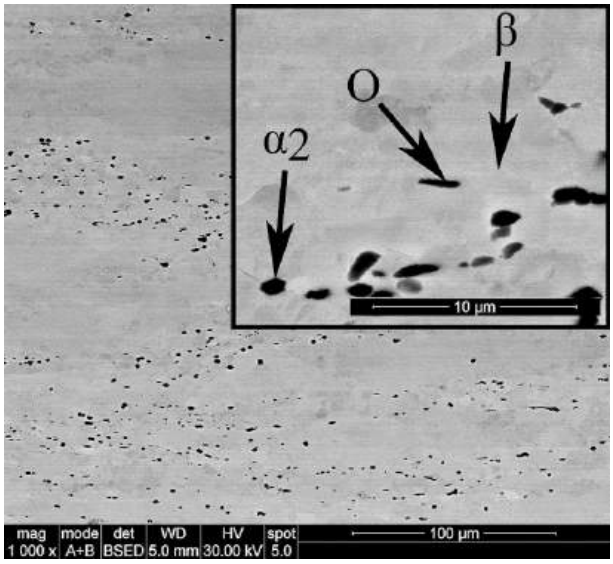


Рис. 1. Исходная микроструктура сплава ВТИ-4

Fig. 1. Initial microstructure of the *Ti–Al–Nb–(Zr, Mo)–Si* alloy

ва в корень шва с помощью газовой подушки (рис. 2, *а*). Расход защитного газа составлял 12 л/мин, расход газа на поддув – 2 л/мин.

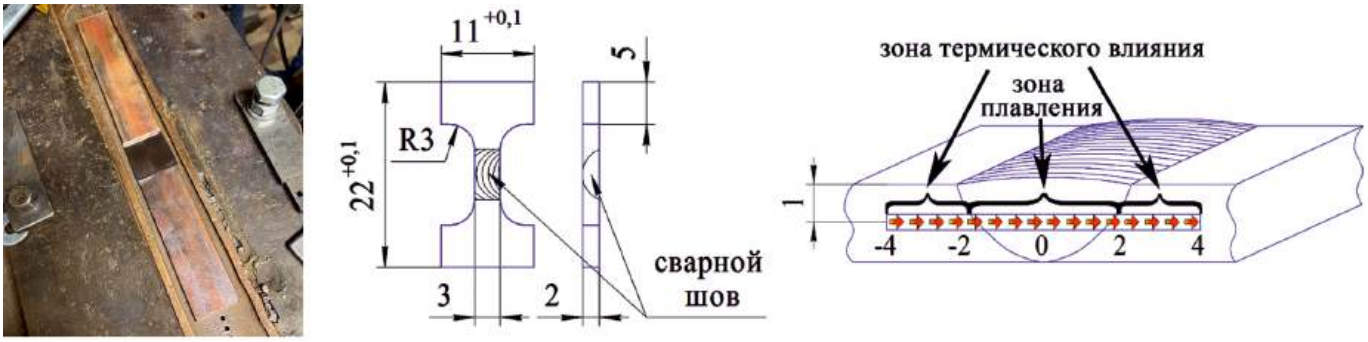
Свариваемые заготовки для TIG-сварки (25×15×2 мм) вырезались из поковки на электроэрозионных станках VL400Q и VL600Q (Sodick, Китай). Поверхность заготовок перед TIG-сваркой обрабатывалась наждачной бумагой: стыкуемые поверхности FEPA P1000 (18 мкм, ГОСТ М20), а остальные поверхности FEPA P220 (68 мкм, ГОСТ 6). Сварка образцов в виде пластин толщиной 2 мм осуществлялась в стык своим телом. Сварка производилась на форсированных режимах. В ходе исследований также применялась сварка с помощью низко- и высокочастотного импульса (табл. 2). Особенностью аргонодуговой сварки с применением низко- и высокочастотного импульса является то, что происходит наложение дополнительных импульсов с заданной амплитудой на действующий постоянный сварочный ток, при этом образуются пики энергии, которые превышают фоновый ток. В то же время формирование швов происходит последовательно капельным способом, что исключает разбрызгивание металла и позволяет получать тонкостенные сварные соединения без образования прожогов. Зажигание дуги осуществляли на краю свариваемых образцов вследствие отсутствия выводных планок. Диапазон сварочных токов составлял 80…150 А.

Образцы для испытаний на одноосное растяжение, микроструктурных исследований и микротвердости подвергались обработке абразивным материалом на основе карбида кремния FEPA P 220–2000 (Struers, Дания) на шлифовально-полировальном оборудовании (Chennai Metco BAINPOL, Индия). Операция полировки осуществлялась на полировальном круге диаметром 200 мм из ткани MD-Nap фирмы Struers с применением суспензии O.P.S (MetCata, Германия) или OP-S (Struers, Дания) 0,05 мкм.

С целью определения механических свойств сварных соединений из сплава ВТИ-4 были проведены испытания на одноосное растяжение с использованием универсальной испытательной машины 5882 (Instron, США). Температура испытаний соответствовала комнатной. Скорость деформации при испытаниях на растяжение была принята 10^{-4} $с^{-1}$. Форма и размеры образцов на одноосное растяжение представлены на рис. 2.

Дюраметрические исследования материала проводили в поперечном сечении сварных соединений с использованием микротвердомера 402MVD (Instron, Нидерланды), оснащенного алмазным индентором. Нагрузка на индентор соответствовала 200 г, время выдержки – 10 сек. При этом расстояние между измерениями соответствовало 100 мкм. Измерение проводилось вдоль одной дорожки по центру образца, т. е. на глубине 1 мм, как показано на рис. 2, *в*.

Методами растровой электронной микроскопии (BSE- и EBSD-исследования) осуществля-



а *б* *в*

Рис. 2. Внешний вид приспособления для аргонодуговой сварки (*а*), образцы для проведения механических испытаний (*б*) и исследования микротвердости (*в*) сварных соединений из сплава ВТИ-4

Fig. 2. GTAW welding fixture (*а*), specimens for mechanical testing (*б*) and microhardness testing specimens (*в*) of the welded joint of *Ti–Al–Nb–(Zr, Mo)–Si* alloy

лась оценка микроструктуры, а именно оценка наличия внутренних дефектов (пор, трещин, непроваров), идентификация фаз и геометрических размеров элементов микроструктуры в металле шва и зоне термического влияния (ЗТВ). BSE- и EBSD-анализ проводили на оборудовании Q600 3D (FEI, Чехия) с использованием программного обеспечения TSL OIM Analysis 9 при шаге сканирования 3 мкм и ускоряющем напряжении 30 кВ.

Результаты и их обсуждение

Опытным путем были подобраны режимы TIG-сварки, представленные в табл. 2, а на рис. 3 показаны внешние виды сварных соединений пластин из сплава ВТИ-4. Стоит отметить, что границы частот импульсов сварочного тока выбраны исходя из наличия и особенностей регулировок на источнике питания Lincoln INVERTEC V405-T pulse.

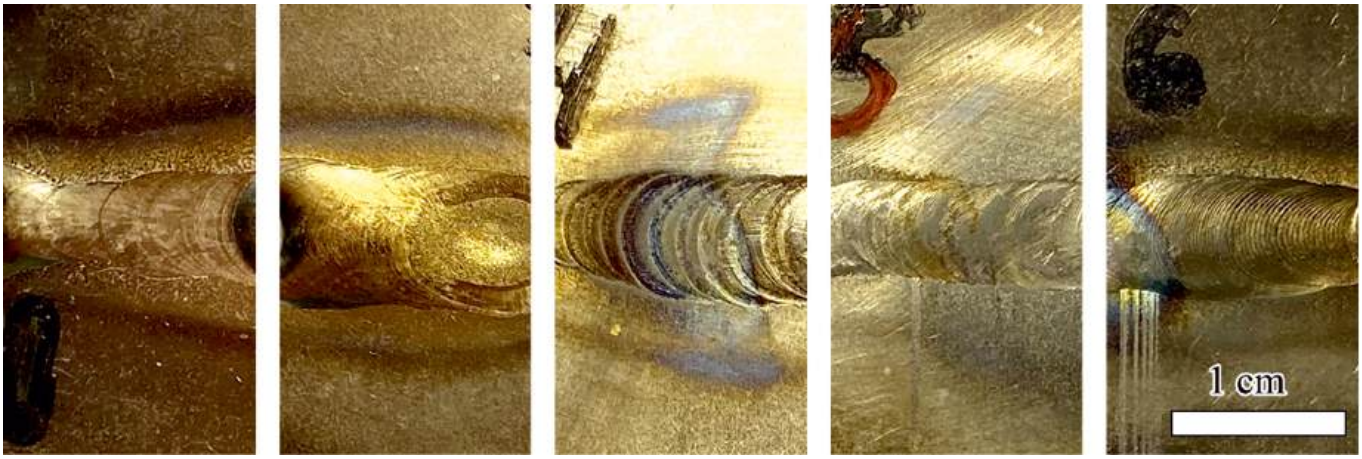
После сварки на выбранных режимах внешний вид сварных соединений не имел каких-либо наружных дефектов в виде трещин, пор и цветов побежалости. Наличие дефектов в начале и конце сварных швов объясняется отсутствием выводных планок (рис. 3). На токах 80…85 А (режим № 1) наблюдается мелкая чешуйчатость сварного шва. В корне сварного шва обнаружен локальный непровар, который возможно устранить более равномерной скоростью сварки. На форсированных режимах при $I_{св}$ = 150…155 А (режим № 2) формируется прожог пластин, а также локально жидкий металл скапливался под силой поверхностного натяжения и образовывался каплевидный сварной шов. Таким образом, на части пластины появлялся прожог, а на другой части пластины – широкий сварной шов. Данный режим не подходит для TIG-сварки пластин из сплава ВТИ-4 толщиной 2 мм. На повышенных токах 110…115 А (режим № 3) дефекты не образуются, обеспечивается равномерный сварной мелкочешуйчатый шов с полным проваром пластин (рис. 3, *б*). Однако ширина шва (режим № 3) по сравнению с режимом № 1 в 1,5 раза шире, а оплавление кромок по краям пластин более интенсивное. В среднем ширина швов, полученных на постоянном токе, составляет 5…8 мм.

При аргонодуговой сварке с низкочастотным импульсом 2 Гц на токах 80…85 А (режим № 4) формируется грубая чешуйчатость поверхности сварного шва под динамическим воздействием импульсного тока (рис. 3, *в*). Поскольку воздействие импульсного тока позволяет уменьшить скорость сварки, это способствует более интенсивному проплавлению корня шва на тех же значениях тока, что и при режиме № 1. Сварные соединения, полученные при режимах № 5 и 6, выполнялись с использованием высокочастотного импульса более 100 Гц. Данные режимы обеспечивают мелкую чешуйчатость поверхности сварного шва, однако при увеличении тока до 110…115 А происходит оплавление кромок пластин. Ширина швов, полученных на импульсных токах, составляет 5…7 мм. Уменьшение ширины сварного шва можно объяснить влиянием сва-

Таблица 2
Table 2

Режимы TIG-сварки пластин из сплава ВТИ-4
Modes of GTAW for Ti–Al–Nb–(Zr, Mo)–Si alloy plates

№ / No.	Ток, А / Current, A	Частота импульсов, Гц / Pulse frequency, Hz	Защитный газ, л/мин / Shielding gas, L/min	Поддув, л/мин / Blowing L/min	Примечания / Comments
1	80…85	–	12	2	Локальный непровар / Local lack of fusion
2	150…155	–	12	2	Прожог / Burn-through
3	110…115	–	12	2	–
4	80…85	2	12	2	Грубая чешуйчатость / Coarse scaling
5	80…85	> 100	12	2	Мелкая чешуйчатость / Fine scaling
6	110…115	> 100	15	2	Мелкая чешуйчатость / Fine scaling



а *б* *в* *г* *д*

Рис. 3. Внешний вид сварных соединений из сплава ВТИ-4, полученных TIG-сваркой при следующих условиях:

а – на постоянном токе № 1; *б* – на постоянном токе № 3; *в* – низкочастотный импульс (режим № 4); *г* – высокочастотный импульс (режим № 5); *д* – высокочастотный импульс (режим № 6)

Fig. 3. Appearance of *Ti–Al–Nb–(Zr, Mo)–Si* alloy weld joints produced by *GTAW* under:

а – direct current (mode No.1); *б* – direct current (mode No.3); *в* – low-frequency pulse (mode No.4); *г* – high-frequency pulse (mode No.5); *д* – high-frequency pulse (mode No.6)

рочного тока, а именно тем, что воздействие импульсного тока уменьшает среднюю мощность в пятне нагрева [22].

Типичная морфология поперечного сечения сварного шва представлена на рис. 4 с указанием места съемки при BSE- и EBSD-исследованиях. В верхней части сварного шва образуется широкая зона плавления (ЗП) металла вследствие воздействия электрической дуги [23]. Металл шва состоит полностью из β-зерен (рис. 4, *б*). Интенсивный нагрев металла шва, вызванный воздействием электрической дуги, и, как следствие, широкий шов (5…8 мм) приводят к образованию также широкой зоны термического влияния (ЗТВ). В зависимости от фазового состава ЗТВ можно разделить на ЗТВ1, которая состоит из

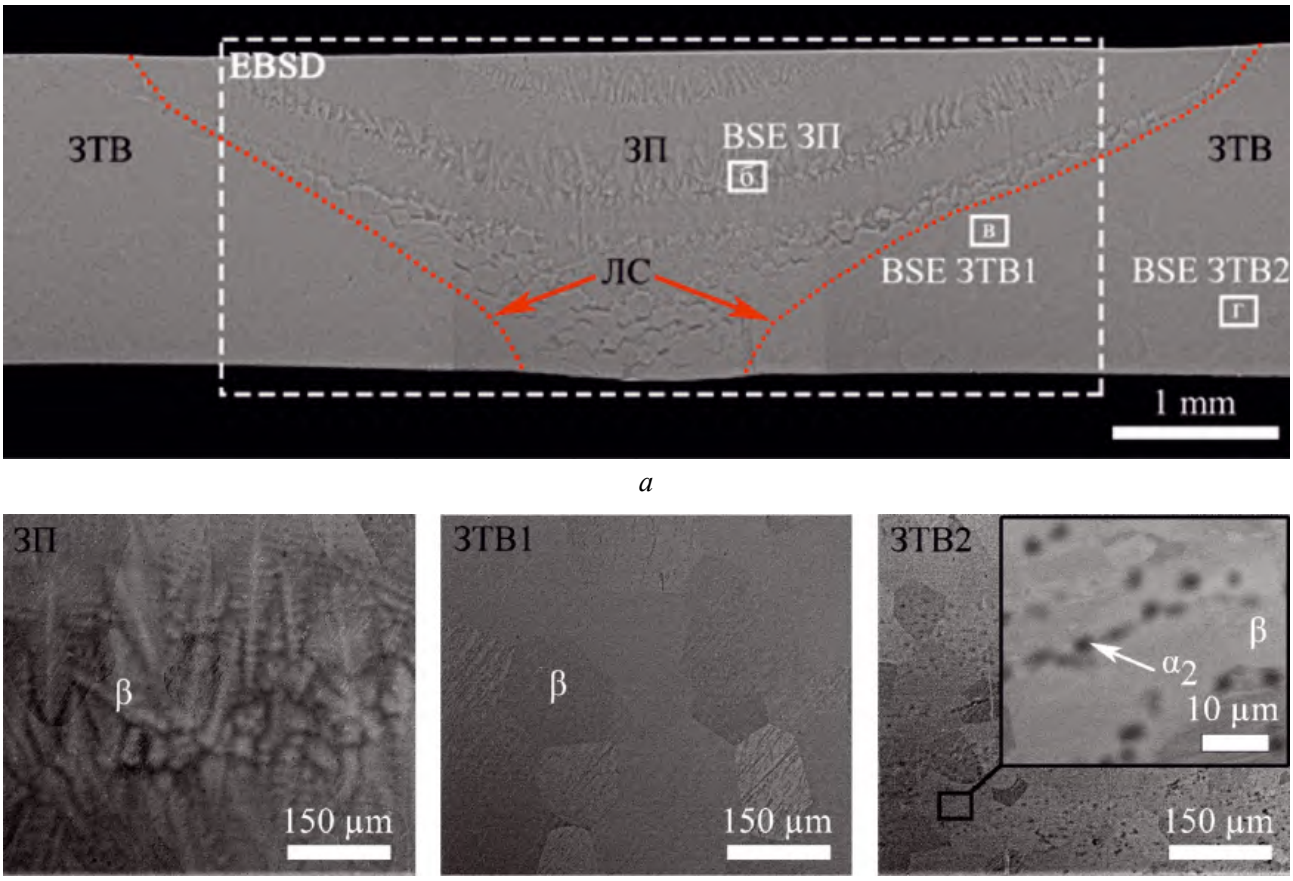


Рис. 4. BSE-анализ сварного шва из сплава ВТИ-4, полученного TIG-сваркой при условиях № 4:

а – общий вид с местом съемки BSE- и EBSD-анализов (ЛС – линия сплавления; ЗП – зона плавления; ЗТВ – зона термического влияния); *б* – ЗП; *в* – ЗТВ с крупными β-зернами (ЗТВ1); *г* – ЗТВ фазового состава β + α_2 (ЗТВ2)

Fig. 4. BSE-analysis of a *Ti–Al–Nb–(Zr, Mo)–Si* alloy weld joint obtained by *GTAW* according to mode No.4:

a – general view showing the locations of *BSE* and *EBSD* analyses (*FL* – fusion line; *FZ* – fusion zone; *HAZ* – heat-affected zone); *б* – *FZ*; *в* – *HAZ* with coarse β-grains (*HAZ1*); *г* – *HAZ* with β + α_2 phase composition (*HAZ2*)

крупного зерна β-фазы 150 ± 50 мкм (рис. 4, *в*), и на ЗТВ2, состоящую из зерен β (80 ± 30 мкм) + α_2 (4 ± 2 мкм). Известно, что при большем отдалении от ЗП фазовый состав в ЗТВ (β + α_2) также дополнительно содержит О-фазу [24].

Металл шва, образованный при постоянных и импульсных токах, имеет микроструктуру в виде столбчатых зерен у валика и глобулярных зерен в корневой части сварного шва (рис. 5). Первичная кристаллизация начинается при отводе тепла в основной материал, зарождаясь по линии сплавления. Первичная кристаллизация металла шва протекает периодически, и можно обнаружить слоистое строение (рис. 4, *а*). Основной объем жидкой ванны сосредоточен вблизи воздействия сварочной дуги, поэтому столбчатые дендриты образовывались в центральной и верхней части сварного шва, где наблюдается максимальный отвод тепла.

Максимальная длина и ширина дендритов в сварных швах, выполненных на токах 110…115 А, составляет ≈ 1,39 и 0,43 мм (режим № 3), с уменьшением токов (режим № 1) максимальная длина и ширина дендритов составляет ≈ 0,99 и 0,23 мм соответственно (табл. 3). С увеличением величины сварочного тока ширина зоны с глобулярными зернами уменьшается, однако средний размер зерен при этом не изменяется и находится в пределах 140 ± 50 мкм (рис. 5, *а*, *б*). При условиях сварки № 3 наблюдается локальный непровар в корне шва (рис. 5, *а*), что было подтверждено ранее при визуальном контроле внешнего вида сварного шва.

Таблица 3

Table 3

Максимальная длина и ширина дендритов (L_{max}, H_{max}) и средний размер глобулярных зерен в металле шва в зависимости от условий TIG-сварки

Maximum dendrite length and width (L_{max}, H_{max}) and average globular grain size in the weld joint metal as a function of GTAW modes

Условия сварки / Welding modes	№ 1 / No.1	№ 2 / No.2	№ 3 / No.3	№ 4 / No.4	№ 5 / No.5	№ 6 / No.6
L_{max}, мм / (mm)	0,99	–	1,39	0,98	0,61	1,06
H_{max}, мм / (mm)	0,23	–	0,43	0,27	0,23	0,33
Средний размер глобулярных зерен, мкм / Average globular grain size (μm)	140 ± 50	–	140 ± 50	190 ± 40	140 ± 40	130 ± 45

При сварке на низкочастотных импульсных режимах структура зоны плавления не отличается от структуры швов, выполненных при режимах № 1 и 3. Максимальная длина и ширина дендритов в сварном шве, полученном при режиме с использованием низкочастотного импульса (режим № 4), составляют ≈ 0,98 и 0,27 мм, а средний размер глобулярных зерен ≈ 190 мкм (рис. 5, *в*). Однако при использовании высокочастотного импульсного тока (режим № 5) максимальная длина и ширина дендритов в сварном шве уменьшается до ≈ 0,61 и 0,23 мм, а средний размер глобулярных зерен составляет ≈ 140 мкм (рис. 5, *г*). При условиях сварки № 5 может наблюдаться локальный непровар 100…150 мкм (рис. 5, *г*), который меньше при тех же параметрах сварочного тока при условии сварки № 1 (300…500 мкм). С увеличением значений высокочастотных токов (режим № 6) максимальная длина (1,06 мм) и ширина (0,33 мм) дендритов β-фазы увеличивается, при этом средний размер глобулярных β-зерен в нижней части сварного шва находится на уровне ≈ 130 ± 45 мкм (рис. 5, *д*), что меньше, чем при тех же токах без импульсного режима № 3. Приведенные выше результаты показывают, что импульсный сварочный ток демонстрирует периодические изменения динамического воздействия дуги, это может усилить эффект перемешивания расплавленной ванны и тем самым уменьшить размер зерна в шве [25].

Оценка профиля микротвердости в поперечном сечении сварных соединений, выполненных на постоянном токе по всей длине, находится на одном уровне, так как ширина шва варьируется в пределах 5…8 мм и значения соответствуют микротвердости зоны плавления и ЗТВ1 с глобулярным зерном β-фазы (рис. 6, *а*, *б*). Диапазон значений варьируется в пределах 335…390 $HV_{0,2}$. Диапазон значений микротвердости сварных швов, выполненных импульсными токами, находится в пределах 340…380 $HV_{0,2}$ (рис. 6, *в*, *д*).

Испытания на растяжение сварных соединений из сплава ВТИ-4, полученных TIG-сваркой, показали (рис. 7), что уровень прочности от основного металла достигает ≈ 90 % при режиме сварки № 6 (σ_B = 1100 МПа, δ = 1,1 %) и не ниже 80 % при режимах № 4 и 5 (σ_B = 1070 МПа, δ = 1,49 %) (рис. 7, *а*). Однако пластичность при режиме № 5 отсутствует (σ_B = 960 МПа, δ = 0 %), а при режимах № 4 и 6 падает в 2–3 раза по отношению к основному металлу и составляет не более 2 % (рис. 7, *б*).

В сварных соединениях, выполненных сваркой на постоянных токах, пластичность отсутствует, а уровень прочностных свойств не достигает 80 %. В сварных швах, выполненных при условиях сварки № 1, наблюдался локальный непровар, что привело к снижению прочности менее 80 %. Кроме того, прочность сварного соединения, выполненного при режимах № 3, составляет ≈ 40 % от прочности основного металла. Это обусловлено тем, что при данном режиме было обнаружено максимальное зерно дендритной структуры зоны плавления, которое превышает в 1,5 раза максимальные размеры дендритов зоны плавления сварных соединений,

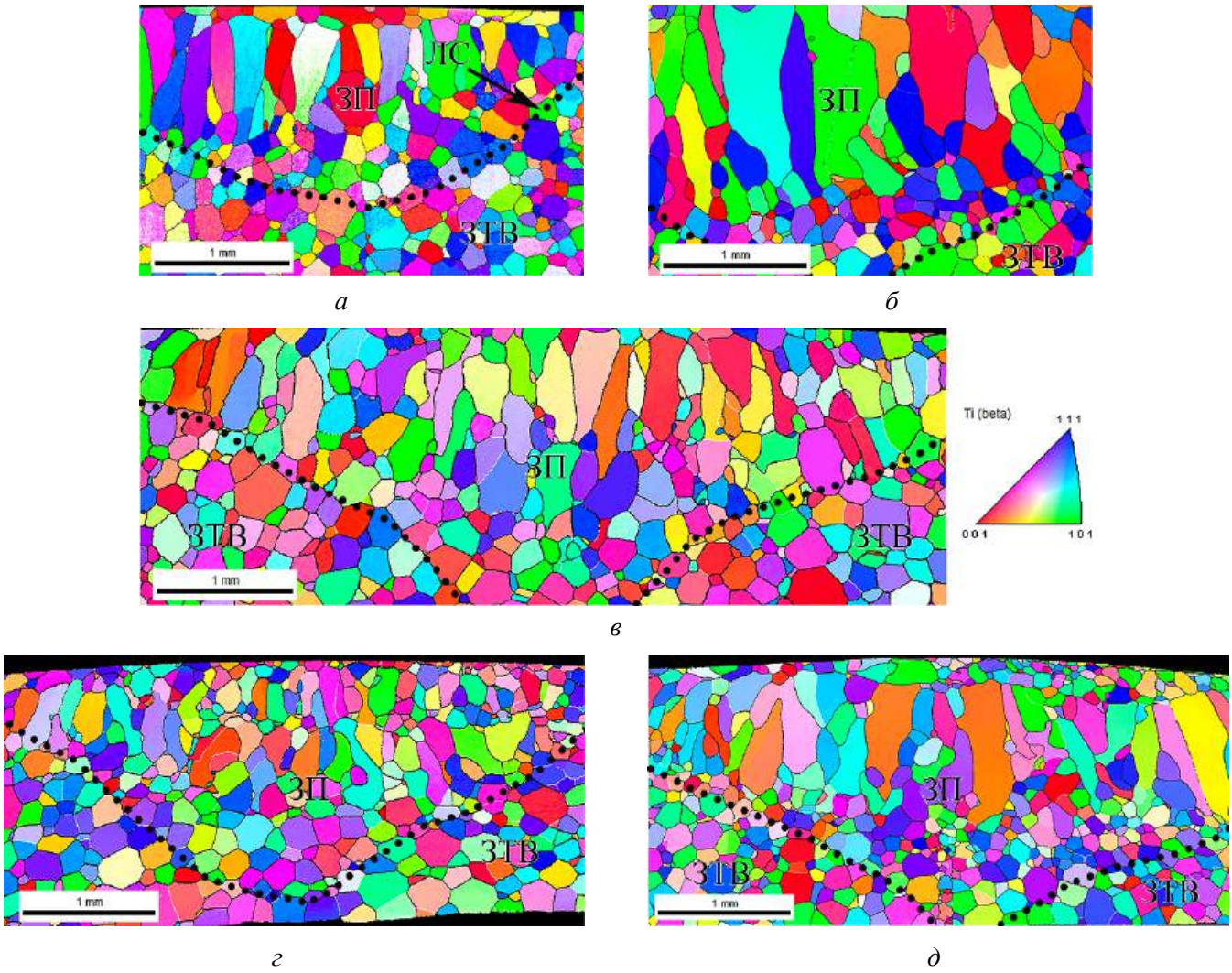


Рис. 5. EBSD-карты в поперечном сечении сварных швов из сплава ВТИ-4, полученных TIG-сваркой при следующих условиях:

а – № 1; *б* – № 3; *в* – № 4; *г* – № 5; *д* – № 6

Fig. 5. EBSD maps in cross-section of *Ti–Al–Nb–(Zr, Mo)–Si* alloy weld joints, obtained by *GTAW* according to:

а – mode No.1; *б* – mode No.3; *в* – mode No.4; *г* – mode No.5; *д* – mode No.6

выполненных при низко- и высокочастотных импульсных режимах. При сварке по режиму № 5 снижение прочностных свойств сварного соединения, возможно, связано с локальным непроваром, который был обнаружен в корневой части сварного шва (рис. 5, *г*).

Разрушение сварных соединений всегда происходит по линии сплавления, а на поверхности излома виден ручьистый узор, в основном вызванный разрушением крупных β-зерен (рис. 8). Фрактография излома образца, сваренного при режиме № 6, имеет две зоны: область ручьистого излома крупных (дендритной структуры зоны плавления) и мелких зерен. Это свидетельствует о разрушении глобулярных β-зерен, которые образовывались в корневой области сварного шва (рис. 8). На остальных образцах наблюдается аналогичный характер излома.

Выводы

Проведено исследование влияния режимов TIG-сварки на качество сварного соединения из сплава ВТИ-4 (Ti_2AlNb), а именно осуществлена оценка геометрических размеров и наличия дефектов сварных швов, микроструктуры и механических свойств. По полученным в данной работе результатам можно сделать следующие выводы.

– Бездефектный сварной шов формируется при режимах сварки на постоянных и импульс-

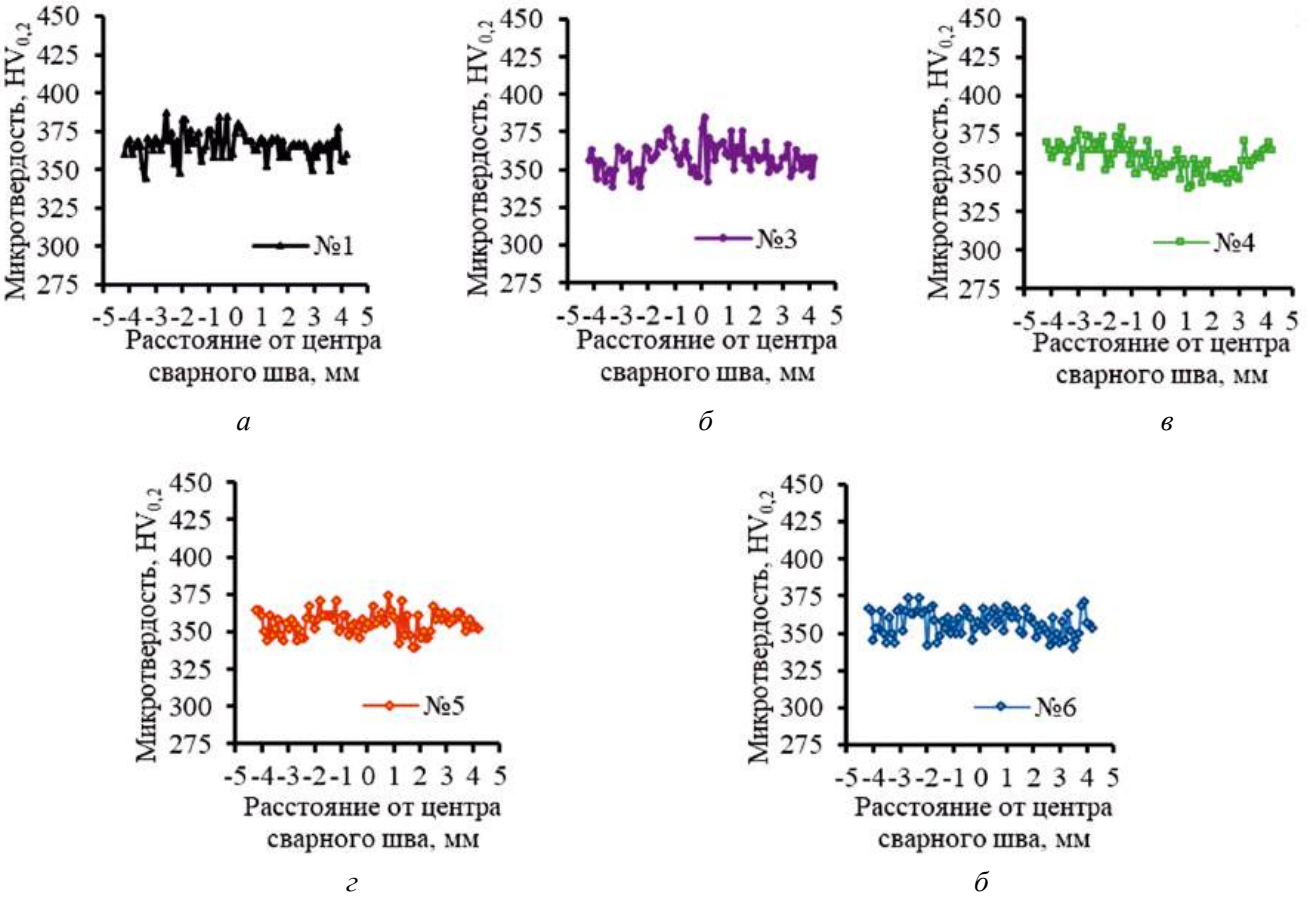
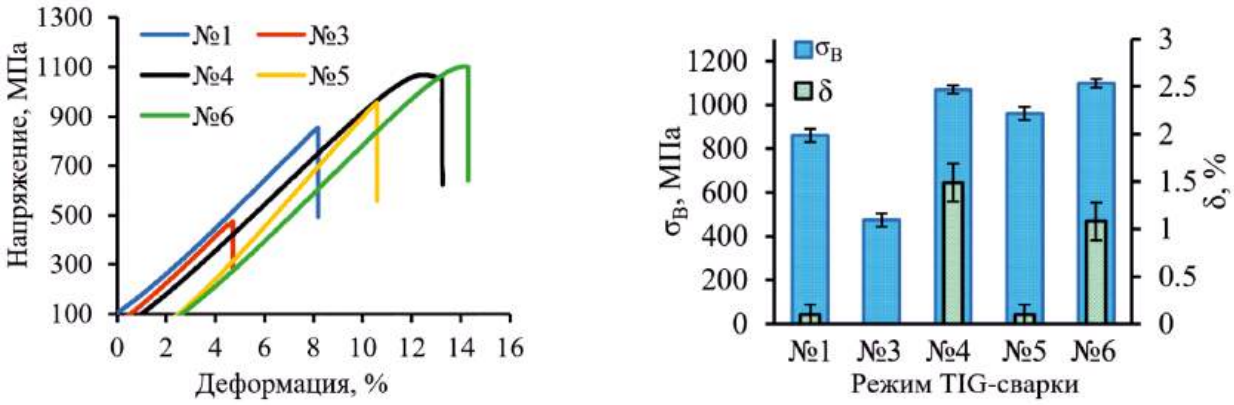


Рис. 6. Микротвердость сварного шва из сплава ВТИ-4 в поперечном сечении, полученного TIG-сваркой:

а, *б* – на постоянных токах; *в*, *д* – в импульсных режимах

Fig. 6. Cross-sectional microhardness profiles of *Ti–Al–Nb–(Zr, Mo)–Si* alloy *GTAW* joints according to:

а–б – *DC* mode; *в–д* – pulsed mode



а *б*

Рис. 7. Результаты проведенных испытаний на одноосное растяжение сварных соединений из сплава ВТИ-4 в зависимости от условий TIG-сварки:

а – диаграмма растяжения; *б* – график механических свойств

Fig. 7. Results of uniaxial tensile testing of *Ti–Al–Nb–(Zr, Mo)–Si* alloy weld joints as a function of *GTAW* modes:

а – tensile stress-strain diagram; *б* – graph of mechanical properties

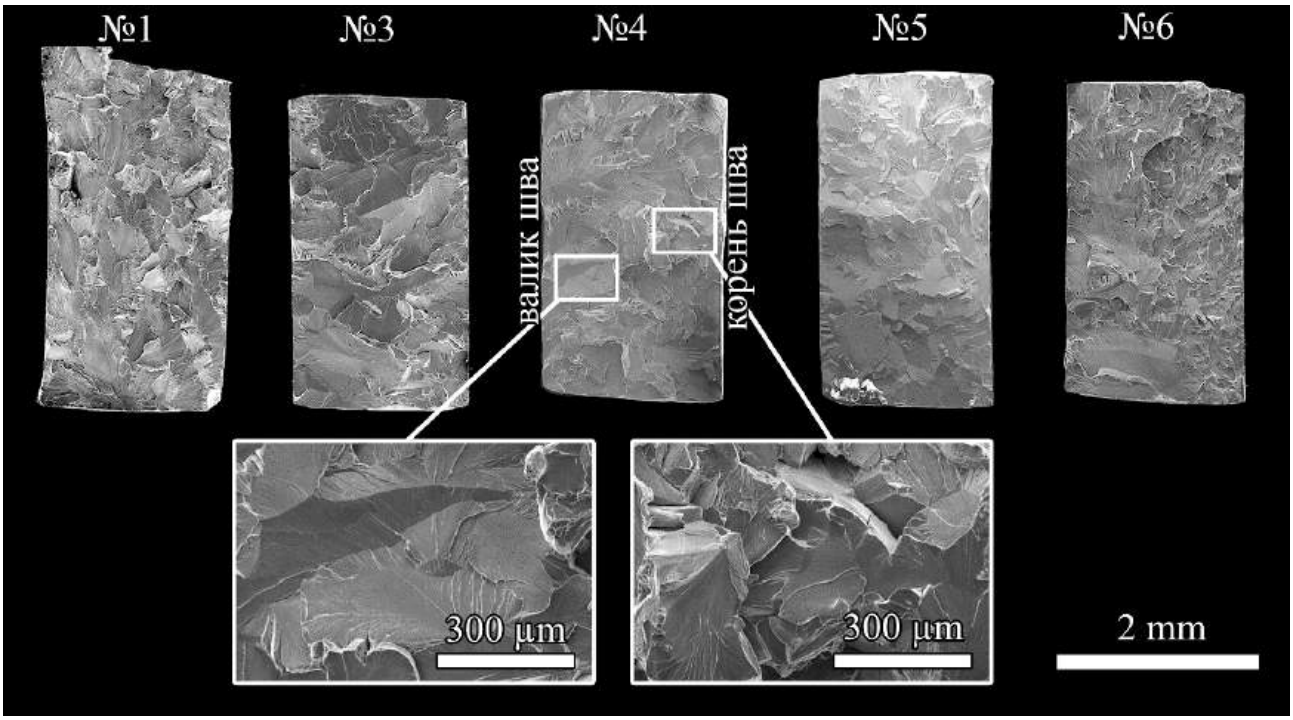


Рис. 8. Морфология поверхности излома образцов после одноосного растяжения в зависимости от условий TIG-сварки сплава ВТИ-4

Fig. 8. Fracture surface morphology of specimens after uniaxial tensile testing as a function of *Ti–Al–Nb–(Zr, Mo)–Si* alloy *GTAW* mode

ных токах в диапазоне 80…115 А и при подаче газа со скоростью 12…15 л/мин. При более низких сварочных токах обнаружены непровары, при более высоких токах – прожоги.

– Сварные швы в зависимости от режимов сварки имеют следующую структуру: в центре шва – вытянутые крупные дендриты размером 0,23…1,39 мм; в корневой части шва – глобулярные β-зерна размером 130…190 мкм. Основной объем жидкой ванны сосредоточен вблизи воздействия сварочной дуги, поэтому столбчатые дендриты образовывались в центральной и верхней части сварного шва, где наблюдается максимальный отвод тепла.

– Механические испытания сварных соединений сплава ВТИ-4 показали высокий уровень прочности: ≈ 90 % от уровня исходного металла при импульсном режиме сварки (σ_B = 1100 МПа, δ = 1,1 %, 340…380 $HV_{0,2}$) и не ниже 80 % при режимах на постоянных токах (σ_B = 1070 МПа, δ = 1,49 %, 335…390 $HV_{0,2}$).

Список литературы

1. High-strength titanium alloys for aerospace engineering applications: a review on melting-forging process / Q. Zhao, Q. Sun, S. Xin, Y. Chen, C. Wu, H. Wang, J. Xu, M. Wan, W. Zeng, Y. Zhao // Materials Science and Engineering: A. – 2022. – Vol. 845. – P. 143260. – DOI: 10.1016/j.msea.2022.143260.

2. *Marin E., Lanzutti A.* biomedical applications of titanium alloys: a comprehensive review // Materials (Basel). – 2024. – Vol. 17 (2). – P. 114. – DOI: 10.3390/ma17010114.

3. *Ezugwu E.O., Wang Z.M.* Titanium alloys and their machinability – a review // Journal of Materials Processing Technology. – 1997. – Vol. 68 (3). – P. 262–274. – DOI: 10.1016/S0924-0136(96)00030-1.

4. Welding of titanium alloys / T. Pasang, Y. Tao, M. Azizi, O. Kamiya, M. Mizutani, W. Misiolek // MATEC Web of Conferences: Proceedings. – 2017. – Vol. 123. – P. 1–8. – DOI: 10.1051/matecconf/201712300001.

5. *Veiga C., Davim J.P., Loureiro A.* Properties and applications of titanium alloys: a brief review // Reviews on Advanced Materials Science. – 2012. – Vol. 32 (2). – P. 133–148.

6. *Kim Y.-W., Dimiduk D.M.* Progress in the understanding of gamma titanium aluminides // JOM. – 1991. – Vol. 43 – P. 40–47.

7. *Shagiev M.R., Galeyev R.M., Valiakhmetov O.R.* Ti_2AlNb-based intermetallic alloys and composites // Materials Physics and Mechanics. – 2017. – Vol. 33 (1). – P. 12–18. – DOI: 10.18720/MPM.3312017_2.

8. *Nandy T.K., Banerjee D.* Creep of the orthorhombic phase based on the intermetallic Ti_2AlNb //

Intermetallics. – 2000 – Vol. 8 (8). – P. 915–928. – DOI: 10.1016/S0966-9795(00)00059-5.

9. Short- and long-term oxidation behaviour of an advanced Ti2AlNb alloy / M. Dadé, V.A. Esin, L. Nazé, P. Sallot // Corrosion Science. – 2019. – Vol. 148. – P. 379–387. – DOI: 10.1016/j.corsci.2018.11.036.

10. Tool wear investigation in high-pressure jet coolant assisted machining Ti_2AlNb intermetallic alloys based on FEM / J. Xu, L. He, H. Su, L. Zhang // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. – 2018. – Vol. 1 (4). – P. 219–228. – DOI: 10.1016/j.ijlmm.2018.08.007.

11. Development of Ti2AlNb alloys: opportunities and challenges / W. Chen, J.W. Li, L. Xu, B. Lu // AM&P Technical Articles. – 2014. – Vol. 172 (5). – P. 23–27. – DOI: 10.31399/asm.amp.2014-05.p023.

12. Cracking of Ti_2AlNb-based alloy after laser beam welding / D.O. Panov, S.V. Naumov, V.S. Sokolovsky, E.I. Volokitina, N. Kashaev, V. Ventzke, R. Dinse, S. Riekehr, E.A. Povolyaeva, E.B. Alekseev, N.A. Nochovnaya, S.V. Zherebtsov, G.A. Salishchev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1014. – P. 012035. – DOI: 10.1088/1757-899X/1014/1/012035.

13. Mechanism of reheat cracking in electron beam welded Ti_2AlNb alloys / Y.-J. Li, Ai-P. Wu, Q. Li, Y. Zhao, R.-C. Zhu, G.-Q. Wang // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2019. – Vol. 29 (9). – P. 1873–1881. – DOI: 10.1016/S1003-6326(19)65095-8.

14. Reheat cracking in Ti_2AlNb alloy resistance spot weldments / D. Cai, J. Chen, X. Mao, C. Hao // Intermetallics. – 2013. – Vol. 38. – P. 63–69. – DOI: 10.1016/j.intermet.2013.02.013.

15. Effects of welding condition on weld shape and distortion in electron beam welded Ti2AlNb alloy joints / Y. Li, Y. Zhao, Q. Li, A. Wu, R. Zhu, G. Wang // Materials & Design. – 2017. – Vol. 114. – P. 226–233. – DOI: 10.1016/j.matdes.2016.11.083.

16. *Shao L., Cui E.* Joining of Ti-22Al-25Nb alloy using different welding methods // Materials China. – 2019. – Vol. 38 (3). – P. 286–290. – DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2019.03.11.

17. Effect of pre-heating and post-weld heat treatment on structure and mechanical properties of laser beam-welded Ti_2AlNb-based joints / D. Panov, S. Naumov, N. Stepanov, V. Sokolovsky, E. Volokitina, N. Kashaev, V. Ventzke, R. Dinse, S. Riekehr, E. Povolyaeva, N. Nochovnaya, E. Alekseev, S. Zherebtsov, G. Salishchev // Intermetallics. – 2022. – Vol. 143. – P. 107466. – DOI: 10.1016/j.intermet.2022.107466.

18. *Zou J., Li H.* Review on weldability of Ti_2AlNb-based alloy // Materials China. – 2019. – Vol. 38 (7). – P. 710–716. – DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.201803012.

19. Ultrasonic frequency pulse tungsten inert gas welding of Ti_2AlNb-based alloy / X. Liu, S. Wu, Y. Ji, L. Shao, H. Zhao, X. Wan // Xiyou Jinshu / Chinese Journal of Rare Metals. – 2014. – Vol. 38 (4). – P. 541–547. – DOI: 10.13373/j.cnki.cjrm.2014.04.001.

20. Gas tungsten arc welding of Ti_2AlNb based alloy sheet / B. Lu, J. Yin, Y. Wang, R. Yang // Ti 2011: Proceedings of the 12th World Conference on Titanium. – Beijing, 2012. – Vol. 1. – P. 816–818.

21. Elimination of pores and microstructural characterization in Ti-6Al-4V alloy welds using fast-frequency double pulse TIG welding / Y. Kuang, J. Hu, W. Su, Z. Zhu, H. Liao, Z. Wang // Materials Today Communications. – 2024. – Vol. 41. – P. 110516. – DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.110516.

22. A review on high-frequency pulsed arc welding / Z. Wang, D. Jiang, J. Wu, M. Xu // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 60. – P. 503–519. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.10.054.

23. *Karpagaraj A., Siva Shanmugam N., Sankaranarayanasamy K.* Some studies on mechanical properties and microstructural characterization of automated TIG welding of thin commercially pure titanium sheets // Materials Science and Engineering: A. – 2015. – Vol. 640. – P. 180–189. – DOI: 10.1016/j.msea.2015.05.056.

24. Structure and mechanical properties of welded joints from alloy based on VTI-4 orthorhombic titanium aluminide produced by pulse laser welding / S.V. Naumov, D.O. Panov, R.S. Chernichenko, V.S. Sokolovsky, E.I. Volokitina, N.D. Stepanov, S.V. Zherebtsov, E.B. Alekseev, N.A. Nochovnaya, G.A. Salishchev // Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy. – 2023. – Vol. 29 (2). – P. 57–73. – DOI: 10.17073/0021-3438-2023-2-57-73.

25. Study on arc shape, weldment microstructure, and mechanical properties of Ti-6Al-4V welded by FFDP TIG waveform / Y. Kuang, J. Jia, Z. Zhu, Z. Gui, J. Tian, Z. Wang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – Vol. 130. – P. 5269–5284. – DOI: 10.1007/s00170-024-13067-z.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 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 (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2025 vol. 27 no. 2 pp. 43–56
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-43-56

NSTU NETI

Obrabotka metallov -
Metal Working and Material Science

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

Microstructure and mechanical properties of Ti_2AlNb-based alloy weld joints as a function of gas tungsten arc welding parameters

Stanislav Naumov [1, a,*], ***Dmitrii Panov*** [1, b], ***Vitaly Sokolovsky*** [1, c], ***Ruslan Chernichenko*** [1, d], ***Gennady Salishchev*** [1, e], ***Dmitry Belinin*** [2, f], ***Vasilii Lukianov*** [3, g]

[1] Belgorod National Research University, 85 Pobedy Str., Belgorod, 308015, Russian Federation
[2] Perm National Research Polytechnic University, 29 Komsomolskiy Prosp., Perm, 614990, Russian Federation
[3] NPA "Technopark AT", 5 Tramvaynaya Str. (bld. 1), Ufa, 450027, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0002-4084-8861, NaumovStanislav@yandex.ru; [b] https://orcid.org/0000-0002-8971-1268, dimmak-panov@mail.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0001-5607-2765, sokolovskiy@bsuedu.ru; [d] https://orcid.org/0000-0002-8619-0700, rus.chernichenko@mail.ru;
[e] https://orcid.org/0000-0002-0815-3525, salishchev_g@bsuedu.ru; [f] https://orcid.org/0000-0001-5462-0908, 5ly87@mail.ru;
[g] https://orcid.org/0009-0006-3621-3966, lukianovv@bk.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 12 February 2025
Revised: 01 March 2025
Accepted: 21 March 2025
Available online: 15 June 2025

Keywords:
Gas tungsten arc welding (*GTAW, TIG*)
Ti_2AlNb
Ti–Al–Nb–(Zr, Mo)–Si
Scanning electron microscopy (*SEM*)
Mechanical properties

Funding
This work was supported by the Russian Science Foundation (Agreement No. 19-79-30066) using the equipment of BSU Shared Research Facilities "Technologies and Materials".

ABSTRACT

Introduction. Gas tungsten arc welding (*GTAW*), also known as tungsten inert gas (*TIG*) welding, is a promising welding method for *Ti_2AlNb*-based alloys, including *Ti–Al–Nb–(Zr, Mo)–Si* alloy, due to its accessibility and relative simplicity, making it attractive for aerospace applications. However, the application of *GTAW* to *Ti–Al–Nb–(Zr, Mo)–Si* alloy is limited by the formation of a coarse-grained microstructure in the weld, leading to reduced mechanical properties of weld joints. **Purpose of the work.** This study investigates the influence of *GTAW* modes (using direct current with low- and high-frequency pulses) on the microstructure and tensile properties of *Al–Nb–(Zr, Mo)–Si* alloy weld joints. **Methods.** *GTAW* of plates was carried out using welding currents ranging from 80 to 150 A, employing both low- and high-frequency (>100 Hz) pulses. The microstructure of the weld joints was examined using scanning electron microscopy (SEM). The tensile properties were evaluated through uniaxial tensile testing of the welded joints. The shielding gas flow rate was 12 L/min, while a separate gas flow of 2 L/min was used for blowing. The microstructure of the weld joints was examined using scanning electron microscopy (*BSE-EBSD* analysis). The tensile properties were evaluated through uniaxial tensile testing of the weld joints. **Results and discussion.** The weld joints microstructure is characterized by elongated, coarse dendrites in the central and weld bead regions and globular β-grains in the root part of the fusion zone. Tensile testing of the weld joints revealed a strength level approximately 90% of that of the base metal when using pulse mode (σ_u = 1100 MPa, δ = 1.1 %, 335–390 $HV_{0.2}$) and not less than 80% when using direct current modes. This level of mechanical properties is achieved using high-frequency pulsed welding, where the maximum length and width of dendrites in the weld joint are 1.06 mm and 0.33 mm, respectively, and the average size of globular grains in the lower part of the weld joint is approximately 130 µm, which is less than that observed when utilizing the same modes, but direct current.

For citation: Naumov S.V., Panov D.O., Sokolovsky V.S., Chernichenko R.S., Salishchev G.A., Belinin D.S., Lukianov V.V. Microstructure and mechanical properties of Ti_2AlNb-based alloy weld joints as a function of gas tungsten arc welding parameters. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 2, pp. 43–56. DOI:10.17212/1994-6309-2025-27.2-43-56. (In Russian).

References

1. Zhao Q., Sun Q., Xin S., Chen Y., Wu C., Wang H., Xu J., Wan M., Zeng W., Zhao Y. High-strength titanium alloys for aerospace engineering applications: a review on melting-forging process. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, vol. 845, p. 143260. DOI: 10.1016/j.msea.2022.143260.

2. Marin E., Lanzutti A. Biomedical applications of titanium alloys: a comprehensive review. *Materials (Basel)*, 2024, vol. 17 (2), p. 114. DOI: 10.3390/ma17010114.

*** Corresponding author**
Naumov Stanislav V., Ph.D. (Engineering),
Belgorod National Research University,
85 Pobedy Str.,
308015, Belgorod, Russian Federation
Tel.: +7 912 580-55-68, **e-mail:** NaumovStanislav@yandex.ru

3. Ezugwu E.O., Wang Z.M. Titanium alloys and their machinability – a review. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, vol. 68 (3), pp. 262–274. DOI: 10.1016/S0924-0136(96)00030-1.

4. Pasang T., Tao Y., Azizi M., Kamiya O., Mizutani M., Misiolek W. Welding of titanium alloys. *MATEC Web of Conferences*, 2017, vol. 123, pp. 1–8. DOI: 10.1051/matecconf/201712300001.

5. Veiga C., Davim J.P., Loureiro A. Properties and applications of titanium alloys: a brief review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2012, vol. 32 (2), pp. 133–148.

6. Kim Y.-W., Dimiduk D.M. Progress in the understanding of gamma titanium aluminides. *JOM*, 1991, vol. 43, pp. 40–47.

7. Shagiev M.R., Galeyev R.M., Valiakhmetov O.R. Ti_2AlNb-based intermetallic alloys and composites. *Materials Physics and Mechanics*, 2017, vol. 33 (1), pp. 12–18. DOI: 10.18720/MPM.3312017_2.

8. Nandy T.K., Banerjee D. Creep of the orthorhombic phase based on the intermetallic Ti_2AlNb. *Intermetallics*, 2000, vol. 8 (8), pp. 915–928. DOI: 10.1016/S0966-9795(00)00059-5.

9. Dadé M., Esin V.A., Nazé L., Sallot P. Short- and long-term oxidation behaviour of an advanced Ti2AlNb alloy. *Corrosion Science*, 2019, vol. 148, pp. 379–387. DOI: 10.1016/j.corsci.2018.11.036.

10. Xu J., He L., Su H., Zhang L. Tool wear investigation in high-pressure jet coolant assisted machining Ti_2AlNb intermetallic alloys based on FEM. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2018, vol. 1 (4), pp. 219–228. DOI: 10.1016/j.ijlmm.2018.08.007.

11. Chen W., Li J.W., Xu L., Lu B. Development of Ti2AlNb alloys: opportunities and challenges. *AM&P Technical Articles*, 2014, vol. 172 (5), pp. 23–27. DOI: 10.31399/asm.amp.2014-05.p023.

12. Panov D.O., Naumov S.V., Sokolovsky V.S., Volokitina E.I., Kashaev N., Ventzke V., Dinse R., Riekehr S., Povolyaeva E.A., Alekseev E.B., Nochovnaya N.A., Zherebtsov S.V., Salishchev G.A. Cracking of Ti_2AlNb-based alloy after laser beam welding. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1014, p. 012035. DOI: 10.1088/1757-899X/1014/1/012035.

13. Li Y.-J., Wu Ai-P., Li Q., Zhao Y., Zhu R.-C., Wang G.-Q. Mechanism of reheat cracking in electron beam welded Ti_2AlNb alloys. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2019, vol. 29 (9), pp. 1873–1881. DOI: 10.1016/S1003-6326(19)65095-8.

14. Cai D., Chen J., Mao X., Hao C. Reheat cracking in Ti_2AlNb alloy resistance spot weldments. *Intermetallics*, 2013, vol. 38, pp. 63–69. DOI: 10.1016/j.intermet.2013.02.013.

15. Li Y., Zhao Y., Li Q., Wu A., Zhu R., Wang G. Effects of welding condition on weld shape and distortion in electron beam welded Ti2AlNb alloy joints. *Materials & Design*, 2017, vol. 114, pp. 226–233. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.11.083.

16. Shao L., Cui E. Joining of Ti-22Al-25Nb alloy using different welding methods. *Materials China*, 2019, vol. 38 (3), pp. 286–290. DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2019.03.11.

17. Panov D., Naumov S., Stepanov N., Sokolovsky V., Volokitina E., Kashaev N., Ventzke V., Dinse R., Riekehr S., Povolyaeva E., Nochovnaya N., Alekseev E., Zherebtsov S., Salishchev G. Effect of pre-heating and post-weld heat treatment on structure and mechanical properties of laser beam-welded Ti_2AlNb-based joints. *Intermetallics*, 2022, vol. 143, p. 107466. DOI: 10.1016/j.intermet.2022.107466.

18. Zou J., Li H. Review on weldability of Ti_2AlNb-based alloy. *Materials China*, 2019, vol. 38 (7), pp. 710–716. DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.201803012.

19. Liu X., Wu S., Ji Y., Shao L., Zhao H., Wan X. Ultrasonic frequency pulse tungsten inert gas welding of Ti_2AlNb-based alloy. *Xiyou Jinshu / Chinese Journal of Rare Metals*, 2014, vol. 38 (4), pp. 541–547. DOI: 10.13373/j.cnki.cjrm.2014.04.001.

20. Lu B., Yin J., Wang Y., Yang R. Gas tungsten arc welding of Ti_2AlNb based alloy sheet. *Ti-2011: Proceedings of the 12th World Conference on Titanium.* Beijing, 2012, vol. 1, pp. 816–818.

21. Kuang Y., Hu J., Su W., Zhu Z., Liao H., Wang Z. Elimination of pores and microstructural characterization in Ti-6Al-4V alloy welds using fast-frequency double pulse TIG welding. *Materials Today Communications*, 2024, vol. 41, p. 110516. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.110516.

22. Wang Z., Jiang D., Wu J., Xu M. A review on high-frequency pulsed arc welding. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, vol. 60, pp. 503–519. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.10.054.

23. Karpagaraj A., Siva Shanmugam N., Sankaranarayanasamy K. Some studies on mechanical properties and microstructural characterization of automated TIG welding of thin commercially pure titanium sheets. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, vol. 640, pp. 180–189. DOI: 10.1016/j.msea.2015.05.056.

24. Naumov S.V., Panov D.O., Chernichenko R.S., Sokolovsky V.S., Volokitina E.I., Stepanov N.D., Zherebtsov S.V., Alekseev E.B., Nochovnaya N.A., Salishchev G.A. Structure and mechanical properties of welded joints from alloy based on VTI-4 orthorhombic titanium aluminide produced by pulse laser welding. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*, 2023, vol. 29 (2), pp. 57–73. DOI: 10.17073/0021-3438-2023-2-57-73.

25. Kuang Y., Jia J., Zhu Z., Gui Z., Tian J., Wang Z. Study on arc shape, weldment microstructure, and mechanical properties of Ti-6Al-4V welded by FFDP TIG waveform. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, vol. 130, pp. 5269–5284. DOI: 10.1007/s00170-024-13067-z.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).