

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(НИУ «БелГУ»)

ЛАБОРАТОРИЯ ОБЪЕМНЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ОРТО- И ГАММА-АЛЮМИНИДОВ ТИТАНА

доц. каф. Материаловедения и нанотехнологий НИУ БелГУ,
старший научный сотрудник лаборатории Объемных наноструктурных материалов НИУ БелГУ,
канд. техн. наук

Наумов Станислав Валентинович

2023 г.

Актуальность исследования

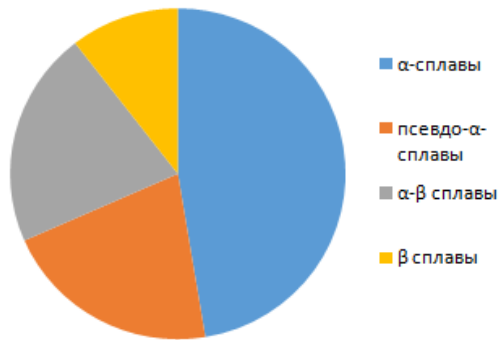


Рисунок – 1. Доля мирового рынка различных титановых сплавов по микроструктуре в 2020 году (%)

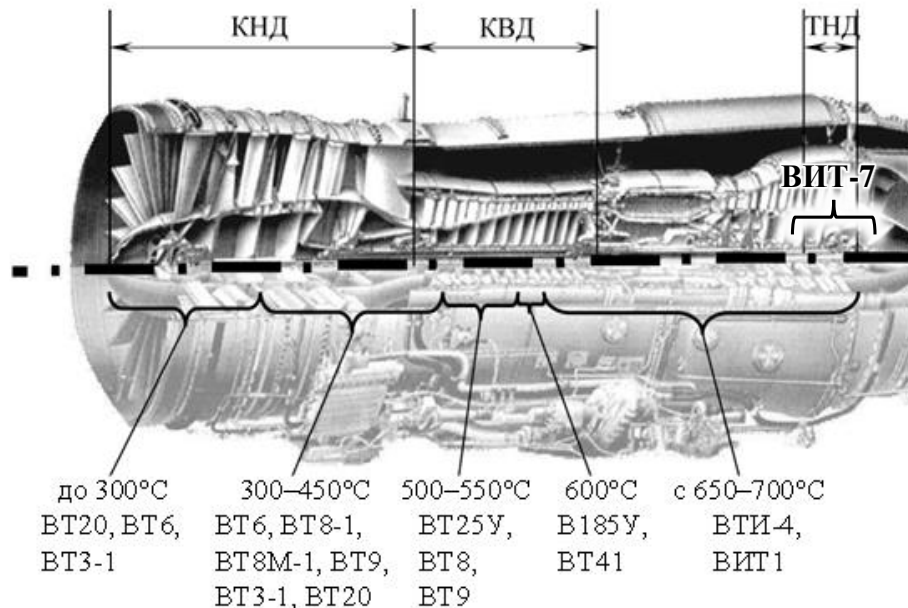


Рисунок – 2. Области применения жаропрочных титановых сплавов в конструкции ГТД

Таблица – 1. Сравнение различных сплавов по свойствам материалов

сплавы на основе	Рабочая температура (°C)	Плотность (г/см ³)	Свариваемость
(α+β) Ti	550-600	4,51	Удовлетворительная
γ-TiAl	500-550	4	Ограниченная
α ₂ -Ti ₃ Al	<650	4,2	Удовлетворительная/ограниченная
α-Ti ₂ AlNb	700	5,39	Ограниченная
Суперсплавы на Ni-основе	1050-1100	8,5	Удовлетворительная

Ti₂AlNb

Актуальность исследования

γ-TiAl

Размер колоний - D

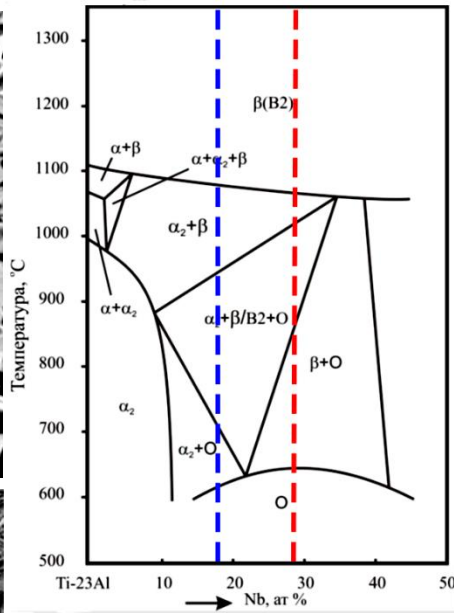
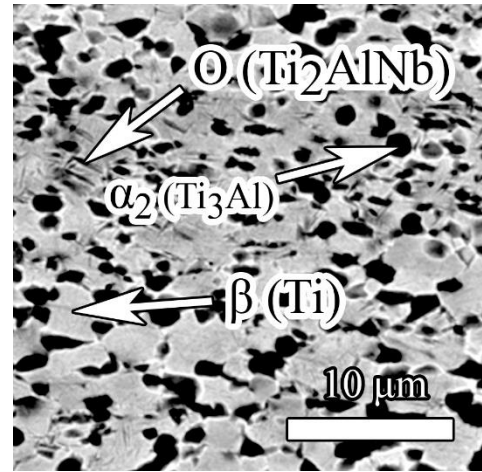


Рисунок – 2. Диаграмма состояния сплавов системы Ti-Al-Nb

Теплопроводность*	Вт/(м·К)
при 25 °С	6,2

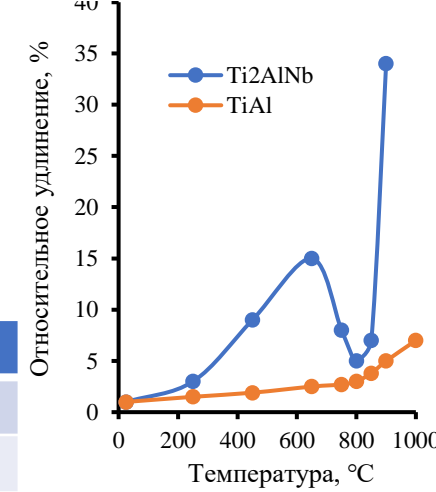
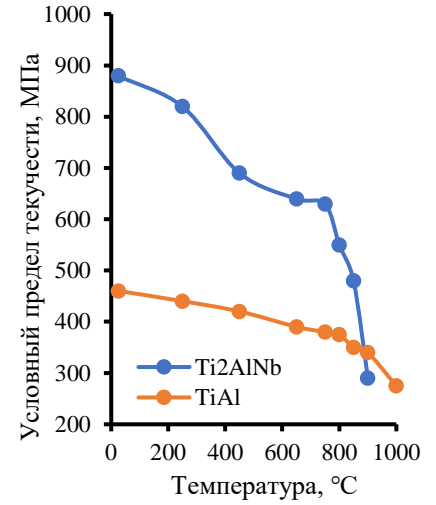


Рисунок – 3. Механические свойства сплавов на основе орто- и гамма алюминидов титана

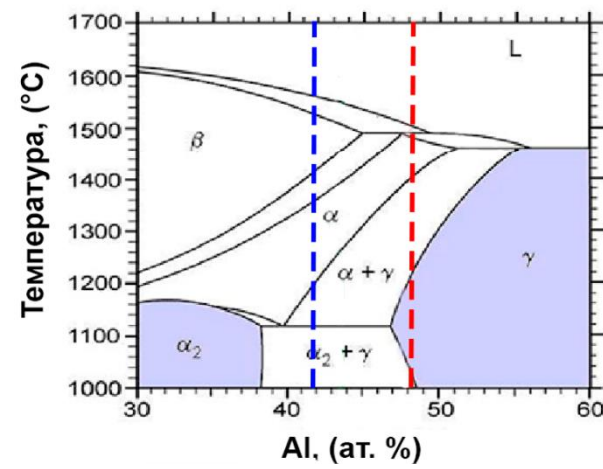
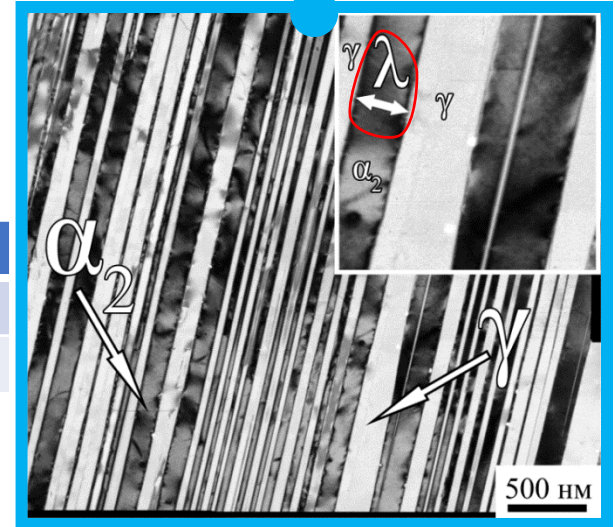
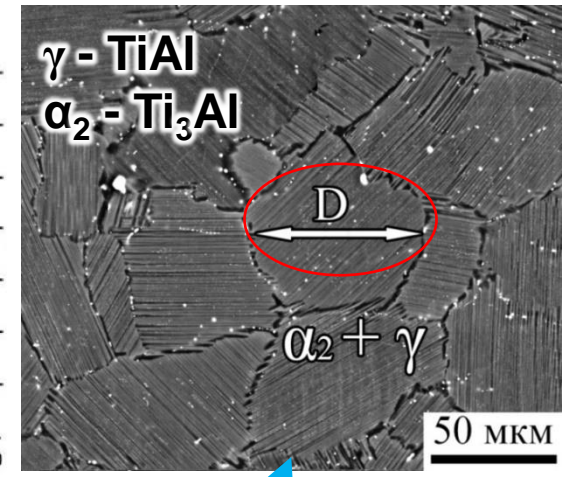


Рисунок – 4. Диаграмма состояния сплавов системы Ti-Al

Теплопроводность**	Вт/(м·К)
при 25 °С	12-14



Межпластинчатое расстояние - λ
Рисунок – 5. Типичная микроструктура сплава на основе гамма алюминидов титана

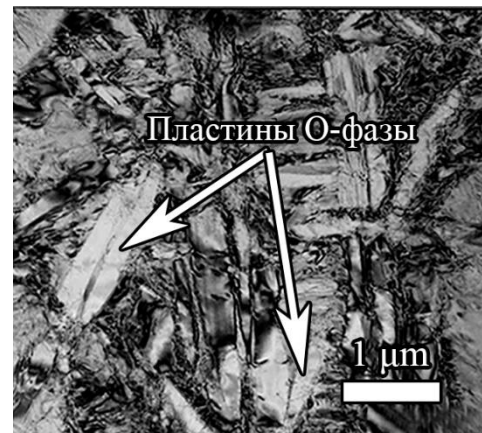


Рисунок – 1. Типичная микроструктура сплава на основе орторомбического алюминидов титана

Факторы, влияющие на свариваемость: состав, ↑ упругие напряжения из-за каскада фазовых превращений в ходе кристаллизации расплава и охлаждения зоны термического влияния, ↓ пластичность, ↓ теплопроводность

*Xu J. et al. Tool wear investigation in high-pressure jet coolant assisted machining Ti₂AlNb intermetallic alloys based on FEM // International Journal of Lightweight Materials and Manufacture (2018) 219-228
 **Lundström D. Anisotropy in Thermal Transport Properties of Cast gamma-TiAl Alloys // Zeitschrift für Metallkunde 92(11):1203-1212

Основные методы сварки сплавов на основе алюминидов титана

№	Способ сварки	Особенности сварки сплавов на основе Ti_2AlNb и $\gamma-TiAl$	Свариваемость
1	Аргонодуговая сварка	универсальность, доступность. ↓ токи, малая ЗТВ, ↓ разбрызгивание металла	Прочность сварного соединения < 80% от основного металла, ↓ пластичность сварного шва, вероятность образования трещин, пористости, имеет место образование крупной (грубой) структуры сварного шва, воздействие электрической дуги формирует широкую зону плавления (ЗП) и ЗТВ
2	Плазменная сварка	↑ производительность, сварка ↑ толщин, ↓ дефектность сварного шва	Прочность сварного соединения < 80% от основного металла, образование крупной (грубой) структуры сварного шва, ↓ пластичность сварного шва
3	Лазерная сварка	Автоматизация, высокоточные конструкции без доп. мех. правок, ↓ЗТВ	Образование крупной (грубой) структуры сварного шва, что приводит без доп. операций к ↓ пластичности сварного шва, возникновение пористости и трещинообразования.
4	Электронно-лучевая сварка	↑ эффективность, автоматизация, высококонцентрированный источник энергии (↓ЗТВ)	Образование крупной (грубой) структуры сварного шва, что приводит без доп. операций к ↓ пластичности сварного шва, возникновение пористости, трещинообразования, требуется вакуум, что ↓ технологичность изделия
5	Электрическая контактная сварка	высокоэффективный и высокоавтоматизированный метод	↓ мех. свойства сварных соединений. Остаточные напряжения могут приводить к растрескиванию сварной точки
6	Сварка трением с перемешиванием	↑ эффективность и ↓ энергоемкость	↓ стойкости рабочего инструмента и ограничения размеров сварной конструкции
7	Диффузионная сварка	↑ качество сварного соединения, нет ЗТВ.	Равнопрочное соединение. Вероятность образования несплошности из-за нарушения режимов сварки и пробоподготовки, нежелательные интерметаллидные соединения при разнородной сварке
8	Пайка	↓ давления, малое время, экономичный процесс	Низкие механические свойства паянных соединений. В составе паянного соединения часто присутствуют нежелательные интерметаллиды.

Факторы влияющие на качество соединения: свариваемая толщина, качество защиты (газ, вакуум), параметры сварки, предварительный и сопутствующий подогрев, термическая обработка после сварки

Целью данной работы является определение влияния режимов и технологических особенностей различных способов сварки на качество сварного соединения из сплавов на основе алюминидов титана.

Материал и методы исследования сплавов на основе алюминидов титана

Ti₂AlNb

Таблица – 1. Химический состав сплава ВТИ-4 (Ti₂AlNb), ат. %

Ti	Al	Nb	V	Zr	Mo	Si
Основа	23	23	1.4	0,8	0,4	0,4

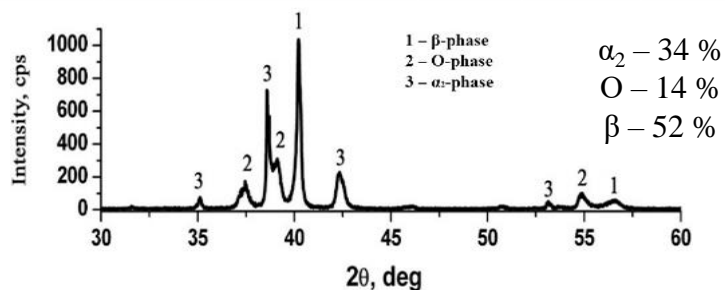


Рисунок – 1. Рентгенофазовый анализ ламельного структурного состояния сплава ВТИ-4

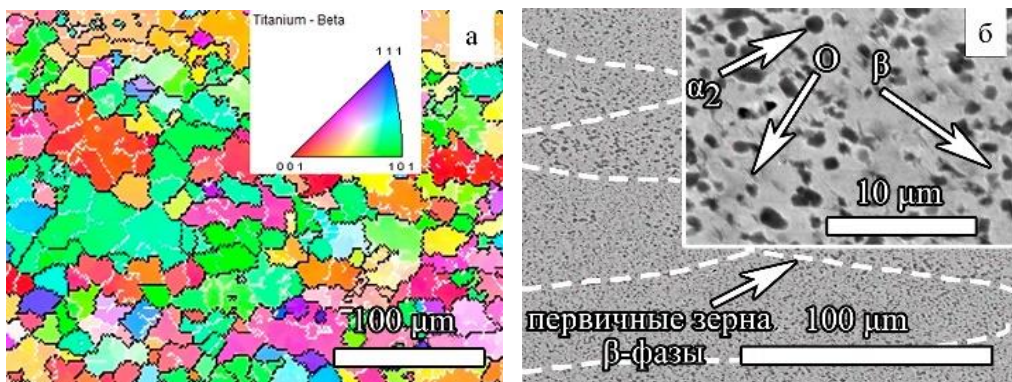


Рисунок – 2. Исходная структура сплава ВТИ-4 (Ti₂AlNb) а) карта распределения ориентировок; б) BSE-SEM-снимки микроструктуры после мультиосевой деформации

γ-TiAl

Таблица – 2. Химический состав сплава на основе γ-TiAl, ат. %

Ti	Al	Cr	Nb	Si	B
Основа	42	2,5	1.0	0,7	0,5

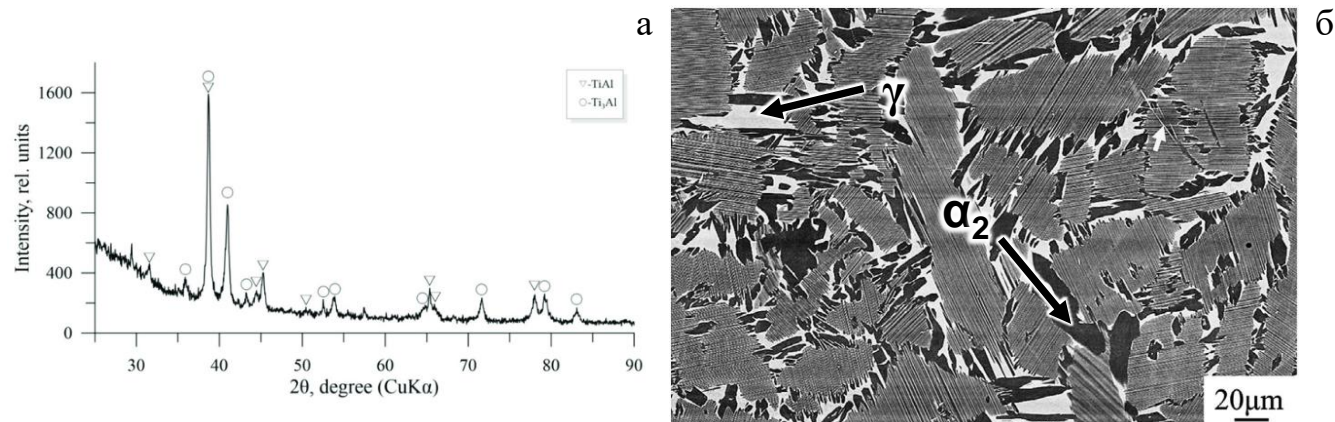


Рисунок – 3. Рентгенофазовый анализ (а) и исходная структура (б) сплава на основе γ-TiAl

Методы исследования:

- Структурные: BSE, EBSD-анализы, рентгенофазовый анализ;
- Механические испытания: на одноосное растяжение, измерение микротвердости.

Методы сварки:

- Аргодуговая сварка;
- Плазменная сварка проникающей дугой;
- Лазерная сварка постоянного действия;
- Лазерная сварка импульсно-периодического действия;
- Электронно-лучевая сварка;
- Диффузионная сварка;
- Электрическая сварка сопротивлением.

Аргонодуговая (АДС) и плазменная (ПС) сварка сплава на основе Ti_2AlNb (ВТИ-4)

Таблица – 1. Режимы аргонодуговой сварки пластин толщиной 2 мм из сплава ВТИ-4

№ режима	Ток, А	Частота, Гц	Поддув/горелка, л/мин	Примечание
1	80-85	-	15/15	-
2	150-155	-	15/15	прожог
3	110-115	-	15/15	-
4	80-85	2	15/15	низкочастотный
5	80-85	100+	15/15	высокочастотный
6	110-115	100+	15/15	высокочастотный

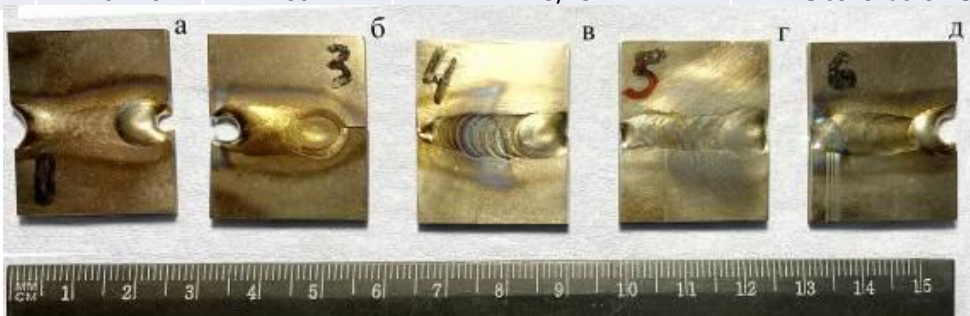


Рисунок – 1. Внешний вид сварных соединений из сплава ВТИ_4 полученных АДС на режимах: а) №1 на постоянном токе; б) №3; в) низкочастотный режим №4; г) высокочастотный режим №5; д) №6

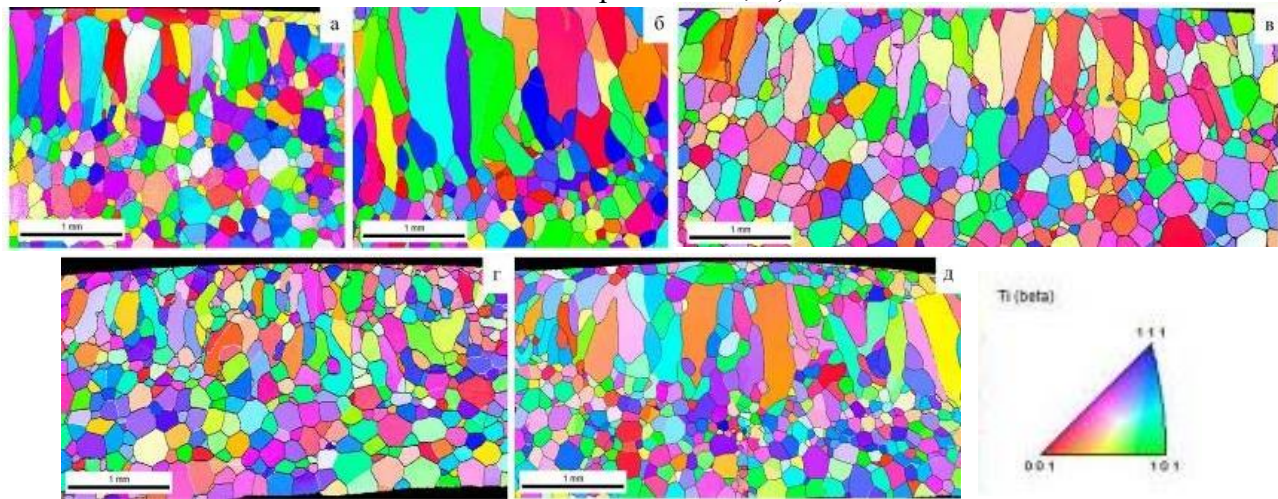


Рисунок – 2. EBSD карты сварных соединений из сплава ВТИ-4 в поперечном сечении сварного шва, полученных ТIG-сваркой в зависимости от режимов: а) №1; б) №3; в) №4; г) №5; д) №6

Таблица – 2. Режимы плазменной сварки пластин толщиной 4 мм из сплава ВТИ-4

№ режима	Ток проплавления, А	Осн. свар. ток, А	Ток в конце сварки, А	Расход плазмообр. и магистр. газа, л/мин
1	150	140	15	3/3
2	160	140	15	3/3
3	150	150	20	3/3
4	160	150	20	3/3

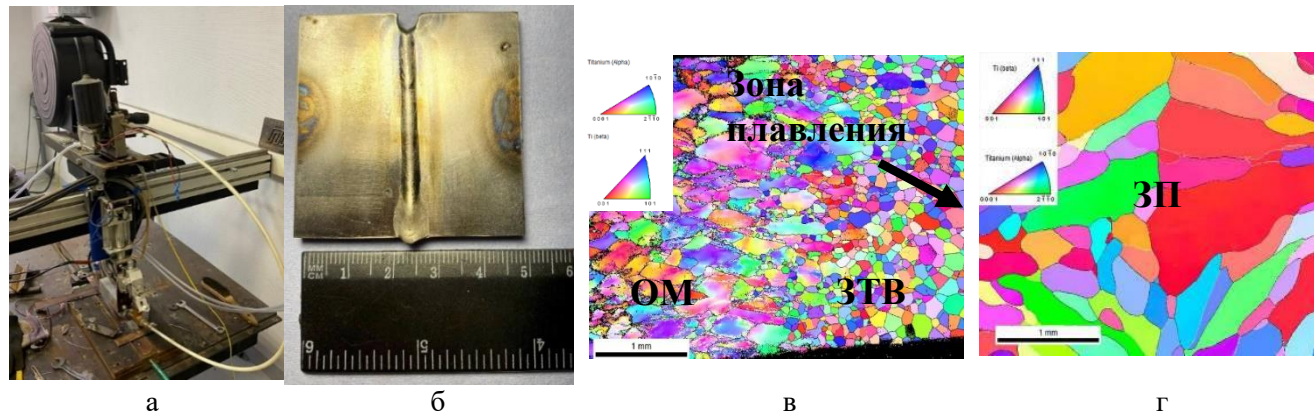


Рисунок – 3. Оборудование для ПС (а) и внешний вид сварного соединения толщиной 4 мм (б), а также EBSD карты сварного соединения из сплава ВТИ-4 в поперечном сечении сварного шва, полученного плазменной сваркой проникающей дугой: от ЗТВ до зоны сплавления (в); центр сварного шва (г)

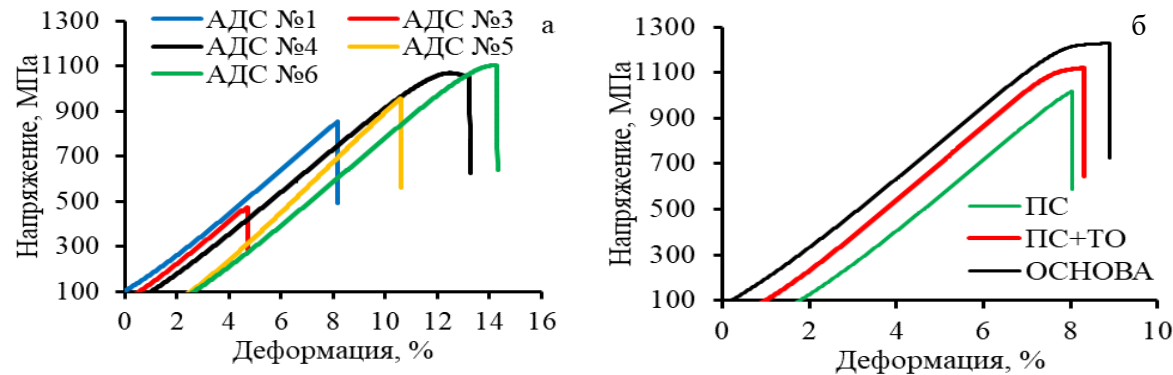


Рисунок – 4. Мех. свойства сварных соединений из сплава ВТИ-4: а) АДС, б) ПС

Лазерные методы сварки сплава на основе Ti₂AlNb (ВТИ-4).

Лазерная сварка постоянного действия (ЛС)

Лазерная сварка импульсно-периодического действия (ИЛС)

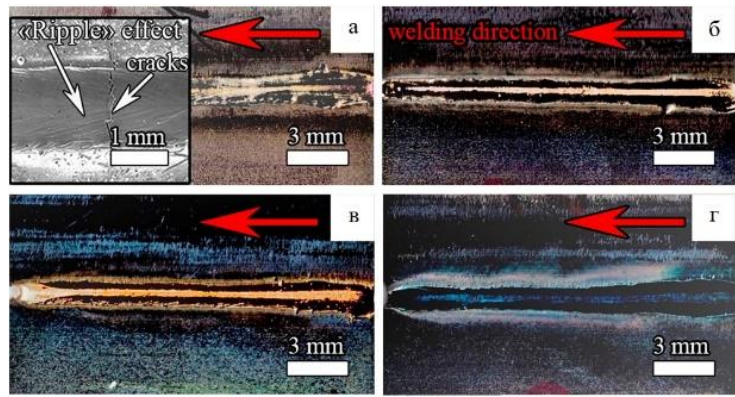


Рисунок – 1. Внешний вид сварных швов, полученных при: а) комнатной температуре; б) предварительный нагрев до 400 °С; в) 600 °С; г) 800 °С. Красные стрелки указывают направление сварки лазерным лучом*

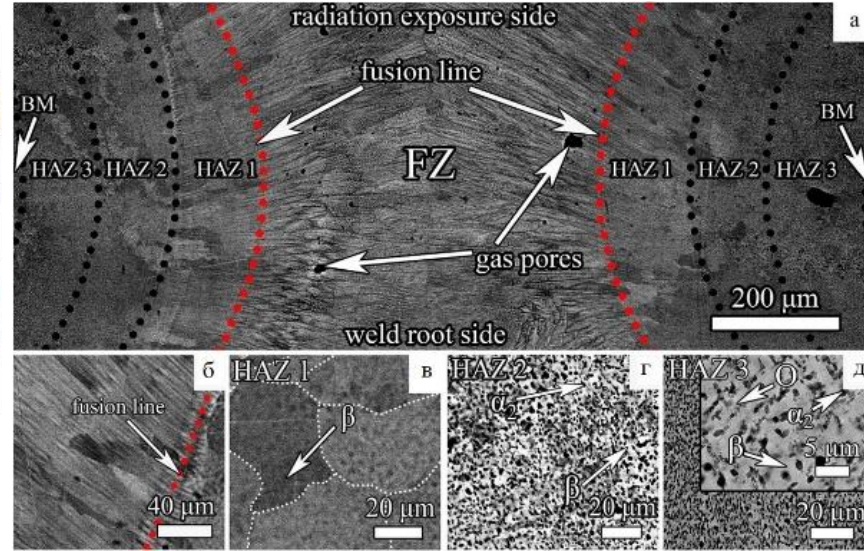


Рисунок – 2. Поперечная структура шва после ЛС при комнатной температуре: а) макроструктура; б) ЗП; в) ЗТВ1; г) ЗТВ2; д) ЗТВ3*

Таблица – 1. Режимы ИЛС пластин толщиной 2 мм**

№ режима	Напряжение U, В	Длит. имп. τ мс
1	280	3
2	300	3
3	320	3
4	280	6
5	300	6
6	320	6

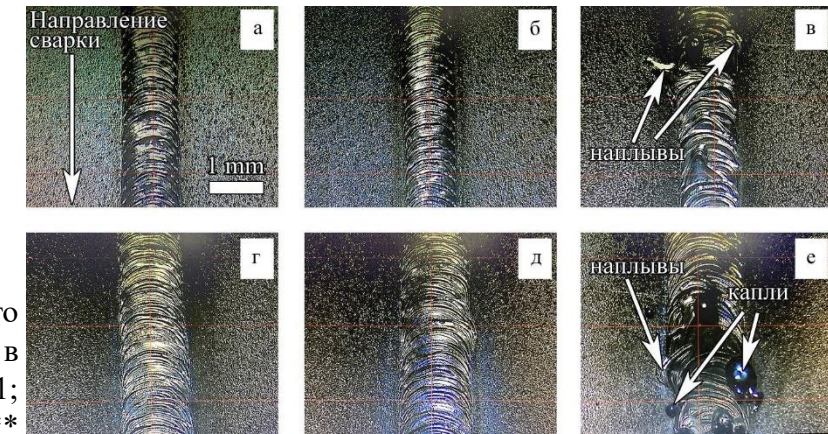


Рисунок – 4. Внешний вид сварного соединения из сплава ВТИ-4 в зависимости от режимов ИЛС: а) 1; б) 2; в) 3; г) 4; д) 5; е) 6**

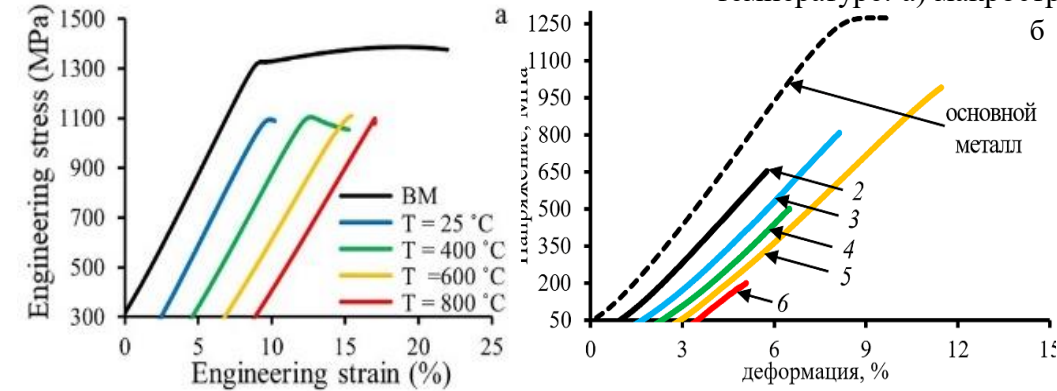
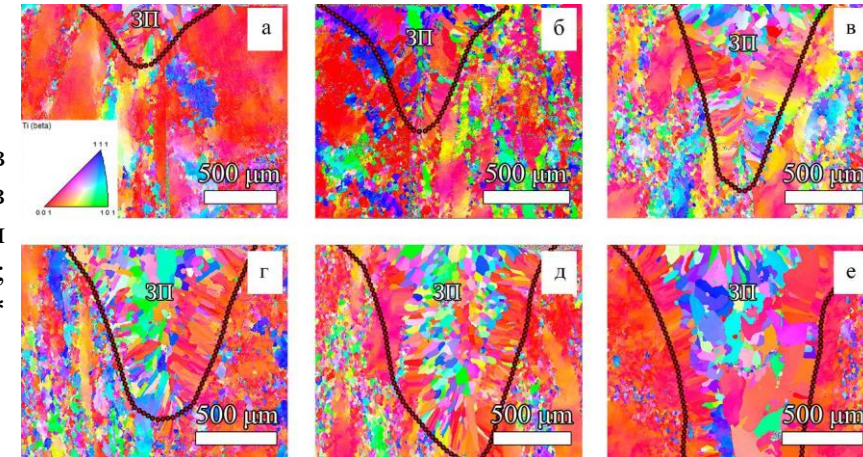


Рисунок – 3. Мех. свойства сварных соединений, полученных:

- а) ЛС: кривые деформации исходного состояния и сварных соединений; б) зависимость свойств от температуры предварительного нагрева
 б) ИЛС: основной металл (пунктирная линия); № линии соответствует режиму сварки

Рисунок – 5. EBSD-анализ сварных соединений из сплава ВТИ-4 в зависимости от режимов ИЛС: а) 1; б) 2; в) 3; г) 4; д) 5; е) 6**



*Panov D. et al. Effect of pre-heating and post-weld heat treatment on structure and mechanical properties of laser beam-welded Ti₂AlNb-based joints // Intermetallics (2022) Vol. 143, № 107466

Наумов С.В. и др. Структура и механические свойства сварных соединений из сплава на основе орторомбического алюминид титана ВТИ-4, полученных импульсной лазерной сваркой // Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy (2023) Vol. 30

Электронно-лучевая сварка сплава на основе Ti_2AlNb (ВТИ-4)

Таблица – 1. Режимы ЭЛС пластин толщиной 2 мм из сплава ВТИ-4

Скорость сварки, м/мин	Ток сварки, мА	Ток фокусировки, мА	Частота импульса, Гц	Фокусировка луча, мм
0,67	18	530	25	0.0 (на поверх.)

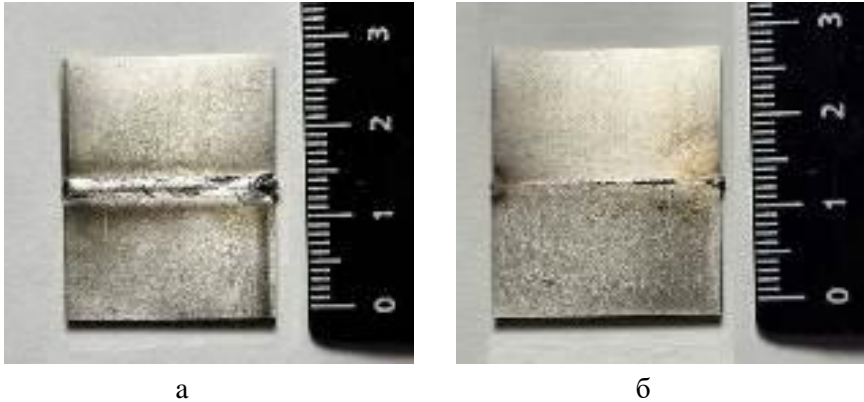


Рисунок – 1. Внешний вид сварного соединения из сплава ВТИ-4, полученного электронно-лучевой сваркой: а) валик сварного шва; б) корень сварного шва.

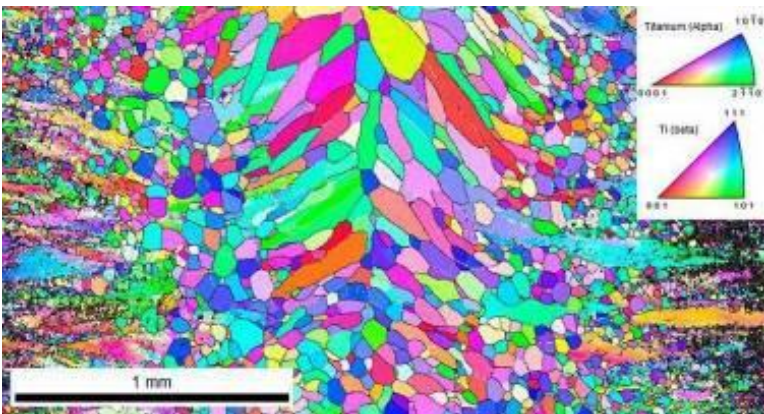


Рисунок – 3. EBSD карта сварного соединения из сплава ВТИ-4 в поперечном сечении сварного шва, полученного ЭЛС

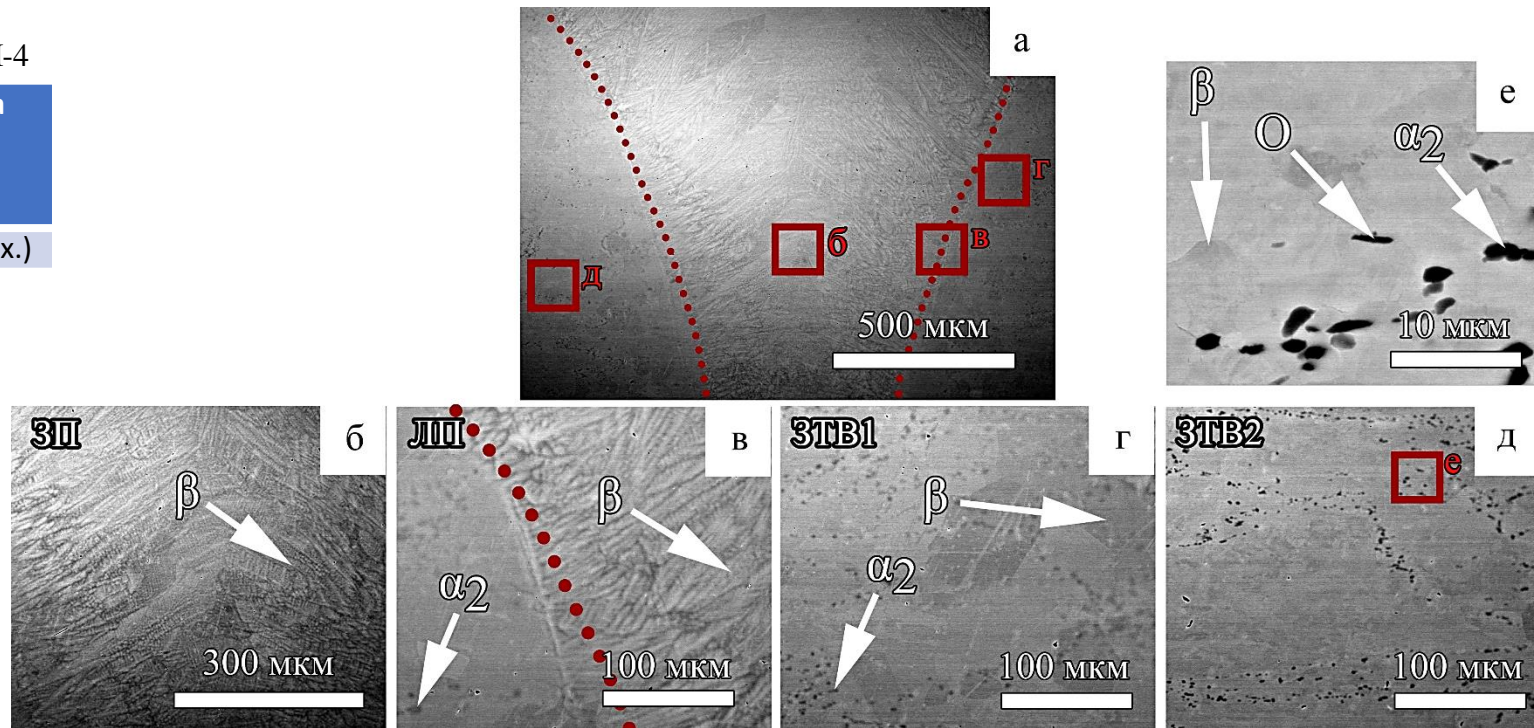


Рисунок – 2. BSE-анализ микроstructures сварного соединения из сплава ВТИ-4, полученного электронно-лучевой сваркой: а) общий вид сварного соединения в поперечном сечении; б) зона плавления; в) линия плавления; г) первая зона термического влияния; д) вторая зона термического влияния; е) ЗТВ2, x10000



Рисунок – 4. Микротвердость в поперечном сечении и механические свойства сварного соединения из сплава ВТИ-4, полученного электронно-лучевой сваркой (ЭЛС) и основного материала

Диффузионные методы проведения сварки сплава ВТИ-4



Рисунок – 1. Оборудование SPS 10-3 для проведения диффузионной сварки в вакуум (10^{-4} торр).

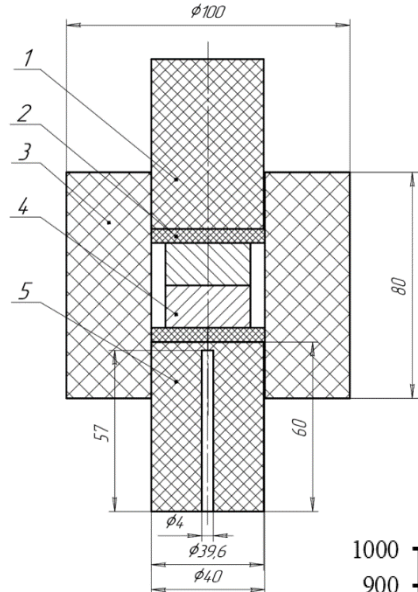


Рисунок – 2. Схема размещения образцов внутри матрицы с пуансонами: 1 – верхний пуансон; 2 – корундовая электроизолирующая шайба; 3 – матрица; 4 – свариваемые образцы; 5 – нижний пуансон с технологическим отверстием под термопару.

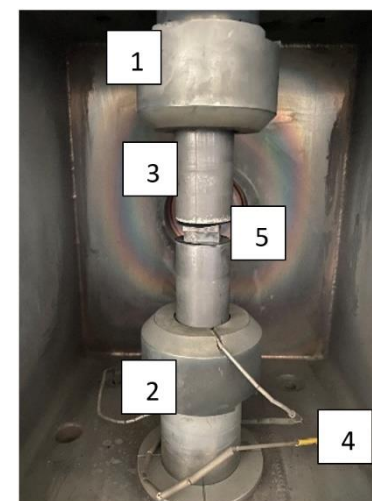


Рисунок – 3. схема размещения заготовок перед электрической сваркой сопротивлением: 1 – гидравлический цилиндр, 2 – графитовая вставка, 3 – пуансоны, 4 – термопара, 5 – свариваемые заготовки.

Таблица – 1. Режимы диффузионной сварки.

Температура, °С	Время выдержки, мин	Давление, МПа	Скорость нагрева, °С/минут	Скорость охлаждения, °С/минут
920	120	15±1	15	15
940	120	15±1	15	15
960	120	15±1	15	15
980	120	15±1	15	15
920	120	25±1	15	15
940	120	25±1	15	15
960	120	25±1	15	15
980	120	25±1	15	15

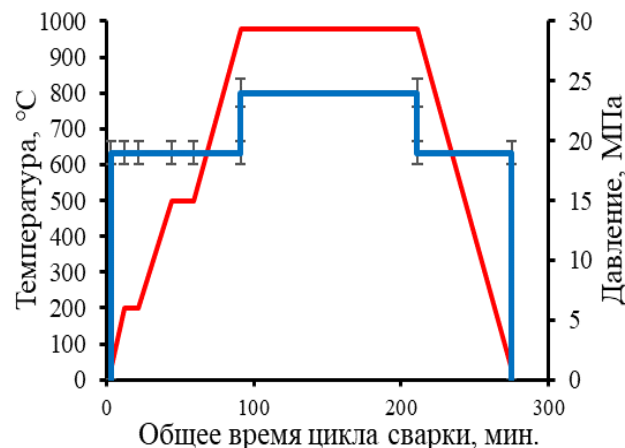


Рисунок – 4. Циклограмма диффузионной сварки на оборудовании SPS 10-3.

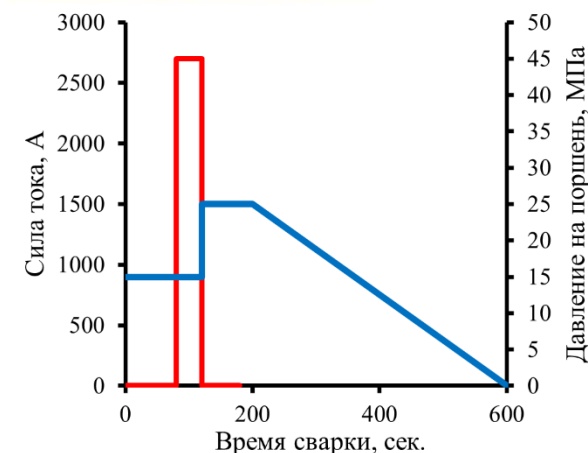


Рисунок – 5. Циклограмма сварки сопротивлением на оборудовании SPS 10-3.

Режимы термической обработки:

1. «закалка+старение» (ТО1) при температуре 920 °С, выдержкой 2 ч и охлаждением на воздухе, с последующей выдержкой 6 ч при температуре 800 °С, дальнейшее охлаждение происходило на воздухе;
2. «закалка+старение» (ТО2) при температуре 960 °С, выдержкой 2 ч и охлаждением на воздухе, с последующей выдержкой 6 ч при температуре 800 °С, дальнейшее охлаждение происходило на воздухе.

Микроструктура и свойства сплава ВТИ-4 в зависимости от режимов сварки

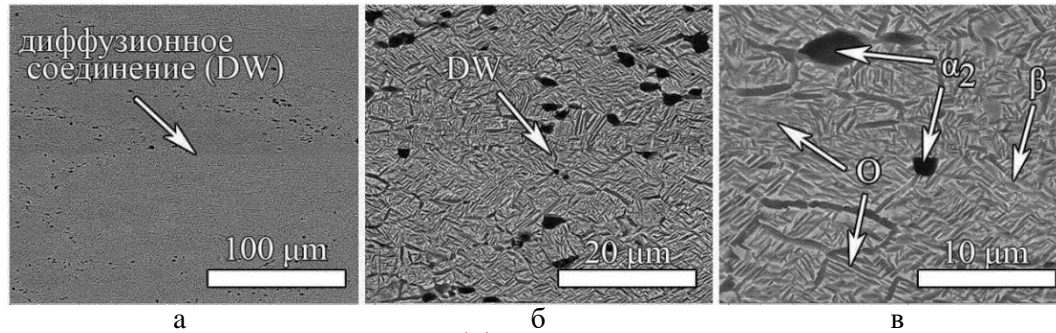


Рисунок – 1. BSE анализ диффузионного соединения полученного при 940 °С, 15 МПа: а) x500; б) x5000; в) x10000
44,58 % O-фазы, 6,45 % α₂-фазы

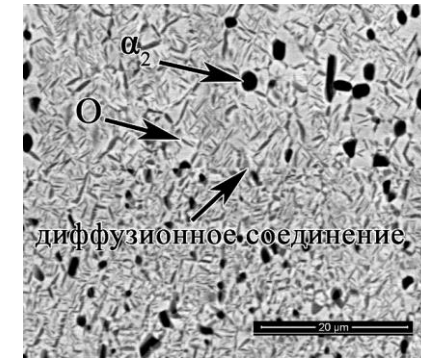


Рисунок – 4. Микроструктура диффузионного соединения сплава после электрической контактной сварки сопротивлением на основе Ti₂AlNb, x5000.

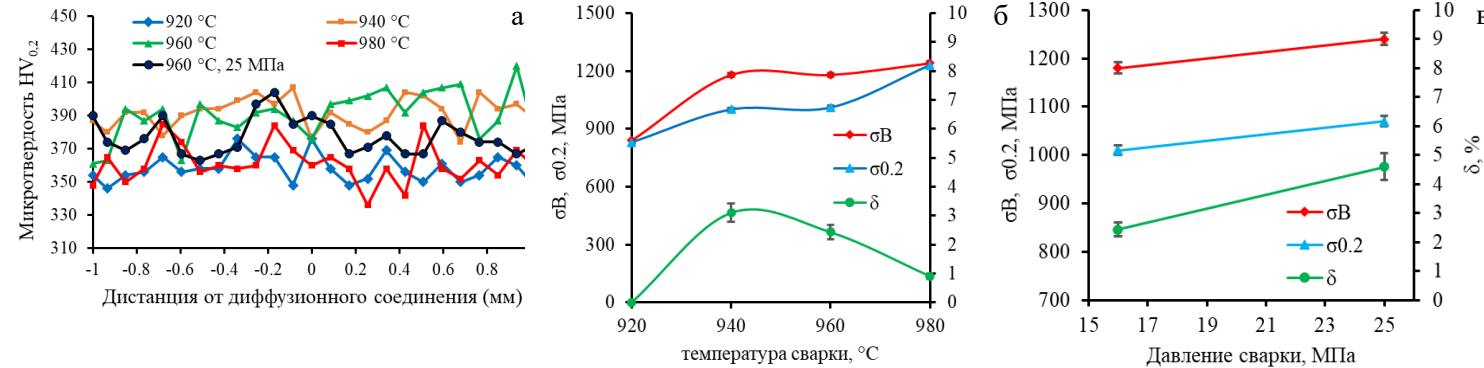


Рисунок – 2. а) микротвердость диффузионного соединения; б) график мех. свойств диф. соединений в зависимости от температуры сварки; в) мех. свойства диф. соединения при температуре 960 °С в зависимости от давления сварки

Таблица – 1. Фазовый состав сплава ВТИ-4 (Ti₂AlNb) до и после сварки сопротивлением.

Зона	до сварки		сварной шов	
фаза	α ₂ -фаза	O-фаза	α ₂ -фаза	O-фаза
доля фазы, %	34	14	15	37

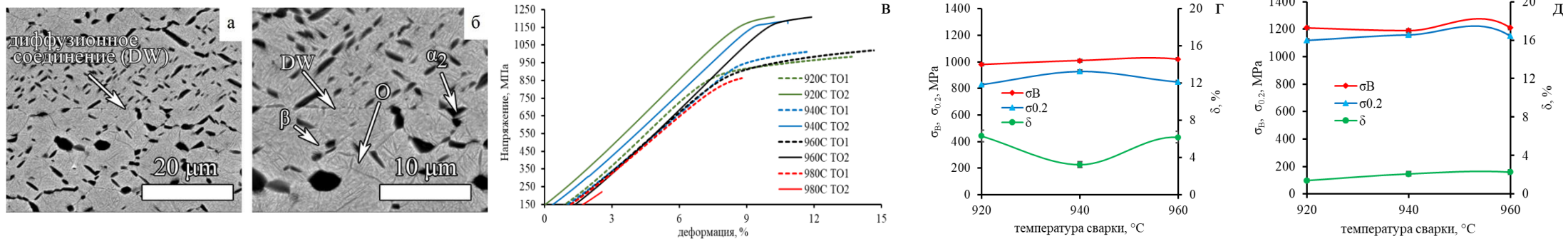


Рисунок – 3. BSE-анализ диффузионного соединения полученного после TO2 при условиях сварки 940 °С, 15 МПа (а, б) и графики мех. свойств диф. соединений ВТИ-4 в зависимости от температуры сварки: диаграмма растяжения (в), мех. свойства после TO1 (г); мех. свойства после TO2 (д)

Аргонодуговая (АДС) и плазменная (ПС) сварки сплавов на основе γ -TiAl

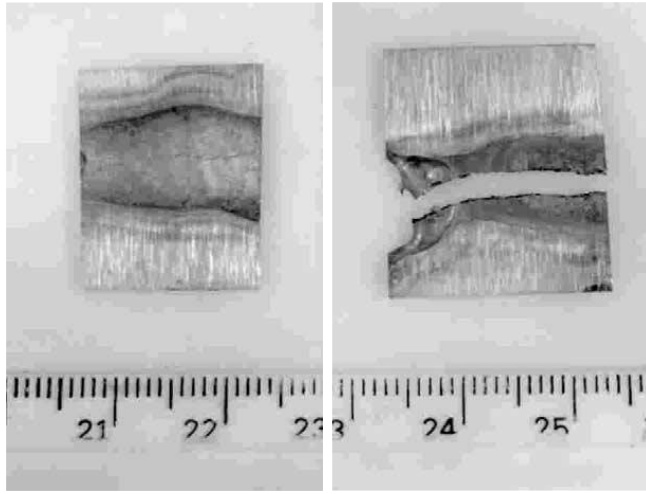


Рисунок – 1. Внешний вид сварных соединений образцов, сваренных АДС поперек направления прокатки. (а) Образец с макроскопической трещиной вблизи центра зоны сплавления «ЗС» (б) растрескивание в ЗС некоторых образцов*



Рисунок – 2. На фото показан образец, сваренный АДС поперек направления прокатки. Направление прокатки горизонтальное*

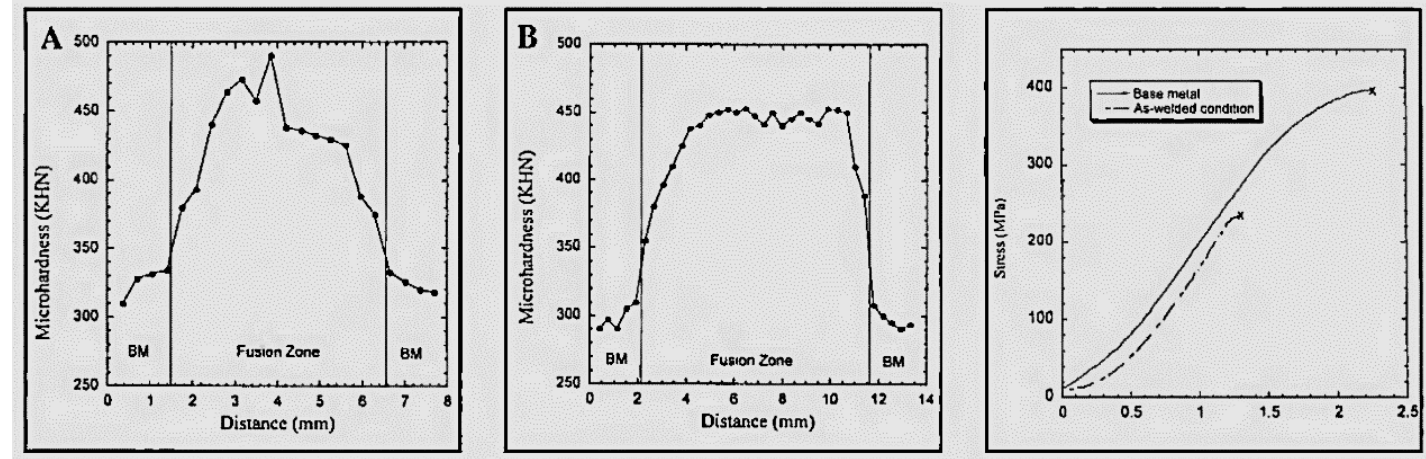


Рисунок – 3. Профили микротвердости для сварных швов, изготовленных АДС на А - 75А; В - 115А и кривые деформации основного металла и образца, сваренного при 75 А**

Известны работы по исследованию свариваемости сплава на основе γ -TiAl с использованием импульсной и непрерывной плазменной сварки с сквозным проплавлением***

*Acoff V.L., Wilkerson S., Arenas M. The effect of rolling direction on the weld structure and hardness of gamma-TiAl sheet material // Materials Science and Engineering A329–331 (2002) 763–767

**Arenas M.F., Acoff V.L. Analysis of Gamma Titanium Aluminide Welds Produced by Gas Tungsten Arc Welding // Welding Research (2003) 110-115

***Smith L.S., Threadgill P.L. Keyhole Plasma Welding of a Cast Gamma Titanium Aluminide Alloy, TWI Industrial Member Report Summary 659/1998

Лазерная, электронно-лучевая и диффузионная сварки сплавов на основе γ -TiAl

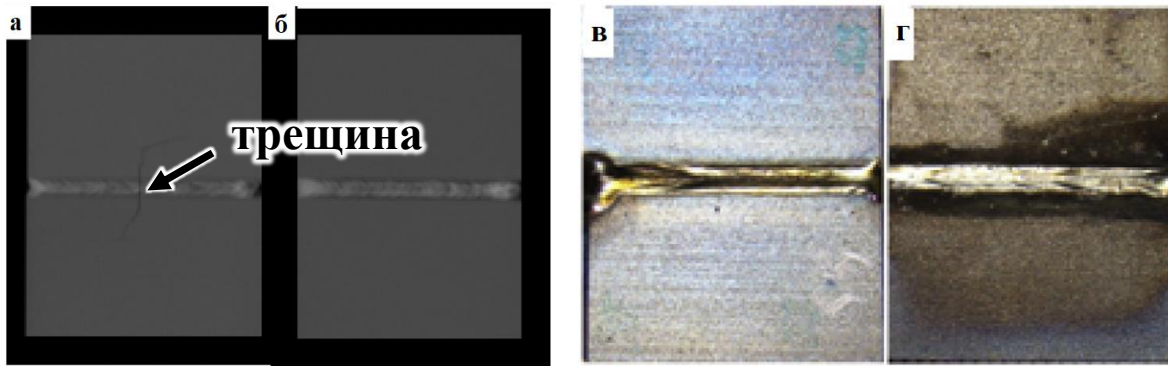


Рисунок – 1. (а) Типичная рентгенограмма сварного соединения ЛС с дефектом; (б) рентгенограмма соединения без трещин, верхняя (в) и нижняя (г) стороны сваренных образцов из сплава на основе γ -TiAl*

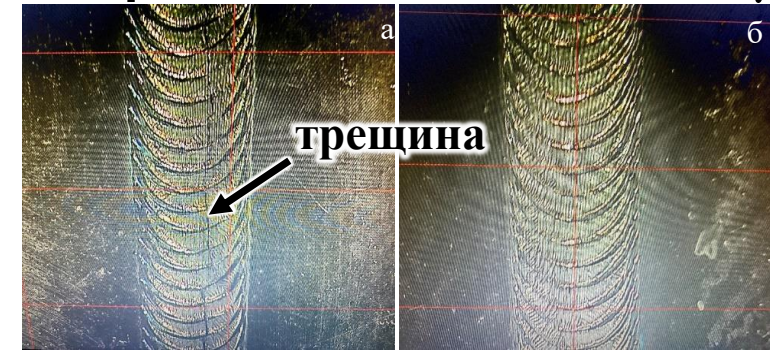


Рисунок – 2. Внешний вид сварных соединений из сплава на основе γ -TiAl, полученных без предварительного подогрева (а) и с подогревом (б) импульсной лазерной сваркой

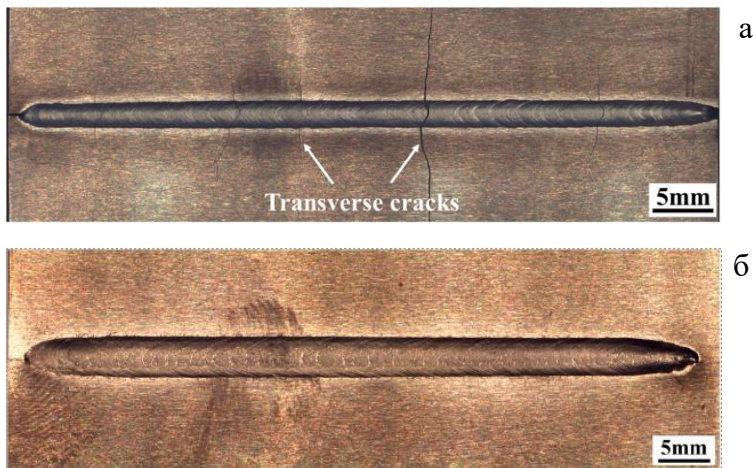


Рисунок – 3. Макроскопический профиль соединения из сплава на основе γ -TiAl, сваренного электронно-лучевой сваркой: а – без подогрева; б – подогрев до и после сварки при помощи луча**

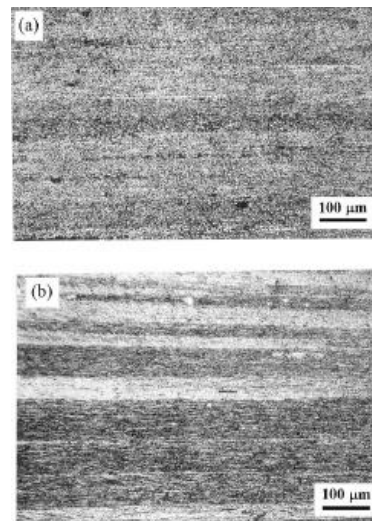


Рисунок – 4. Микроструктура сплава Ti-46Al: а - после SP-деформирования $\epsilon = 6,4 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ и отжига при $1100 \pm 0^{\circ}\text{C}$ в течение 30 мин; б - после деформация при $T = 800^{\circ}\text{C}$ $\epsilon = 6,4 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$

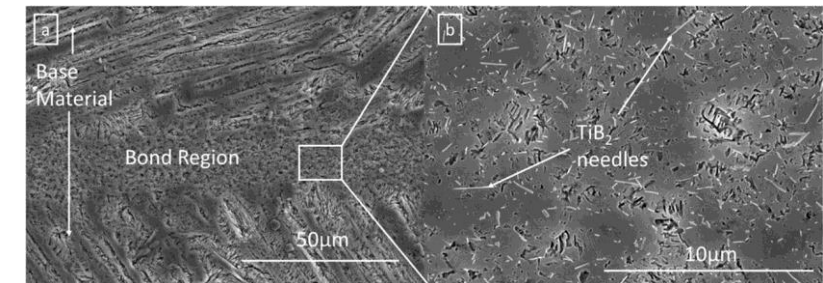


Рисунок – 5. Соединение гамма-алюминидов титана методом порошковой межслойной сварки****

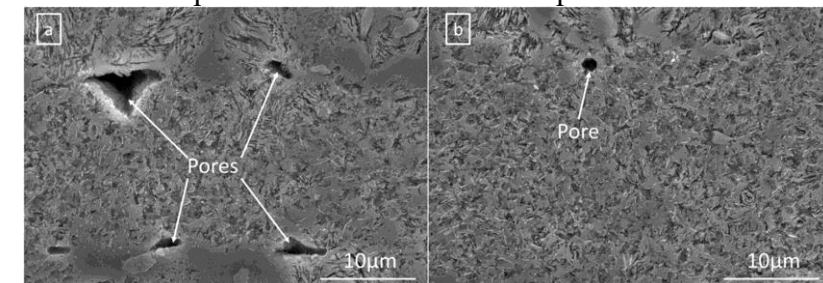


Рисунок – 6. Соединение гамма-алюминидов титана методом порошковой межслойной сварки с дефектами****

*Liu J. , Dahmen M., Ventzke V., Kashaev N., Poprawe R. The effect of heat treatment on crack control and grain refinement in laser beam welded β -solidifying TiAl-based alloy // *Intermetallics* (2013) Vol. 40, 65-70

**Chen G., Zhang G., Yin Q., Zhang B. Investigation of cracks during electron beam welding of γ -TiAl based alloy // *Journal of Materials Processing Technology* (2020) Vol. 283, 116727

*** Salishchev G.A. et al. Processing and Deformation Behavior of Gamma TiAl Alloys with Fine-Grained Equiaxed Microstructures // *Advanced Performance Materials* (1999) 107–116

****Davies P.D., Davies H.M., Watkins I., Britton D.A. The joining of gamma titanium aluminides via the powder interlayer bonding method // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* volume (2020) Vol. 109, 2049–2054

Механические свойства сварных соединений из сплава ВТИ-4 (Ti_2AlNb), полученные различными методами сварки

Таблица – 1. Механические свойства сварных соединений из сплава ВТИ-4, полученные различными методами сварки.

Способ сварки	ТО, °С, ч.	Толщина металла, мм	Механические свойства основного металла/сварного соединения:	Сравнительные показатели
1) Аргонодуговая сварка (постоянный ток)	-	~0,5 до 4,0	$\sigma_B = 1230/960$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1190/940$ МПа, $\delta = 3,5/0$ %	Прочность 70-80% от ОМ, δ отсутствует.
2) Аргонодуговая сварка (импульсный ток)	-	~0,5 до 4,0	$\sigma_B = 1230/1100$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1190/1030$ МПа, $\delta = 3,5/1,1$ %	Прочность ~90% от ОМ
3) Плазменная сварка проникающей дугой	-	2,0 до 18,0	$\sigma_B = 1230/1020$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1190/1010$ МПа, $\delta = 3,5/0,5$ %	Прочность ~80% от ОМ, δ отсутствует.
	920 °С, 2 ч, 800 °С, 6 ч		$\sigma_B = 1230/1120$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1190/1090$ МПа, $\delta = 3,5/2,1$ %	Прочность ~90% от ОМ
4) Лазерная сварка непрерывного действия с предварительным подогревом	-	~0,5 до ~10,0	$\sigma_B = 1390/1110$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1320/1100$ МПа, $\delta = 11,3/0,8$ %	Прочность ~80% от ОМ, δ отсутствует.
	800 °С, 6 ч		$\sigma_B = 1390/1140$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1320/1070$ МПа, $\delta = 11,3/0,2$ %	Прочность ~80% от ОМ, δ отсутствует.
	920 °С, 2 ч, 800 °С, 6 ч		$\sigma_B = 1390/1190$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1320/1190$ МПа, $\delta = 11,3/6,5$ %	Прочность ~90% от ОМ
5) Лазерная сварка импульсно-периодического действия	-	~0,5 до ~5,0	$\sigma_B = 1250/992$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1200/990$ МПа, $\delta = 2,07/0,8$ %	Прочность ~80% от ОМ, δ отсутствует.
6) Электронно-лучевая сварка	-	~0,5 до >20,0	$\sigma_B = 1230/1080$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1190/1070$ МПа, $\delta = 3,5/2,8$ %	Прочность ~90% от ОМ.
7) Диффузионная сварка	-	<0,1 до >20,0	$\sigma_B = 1390/1180$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1320/1010$ МПа, $\delta = 11,3/1,0$ %	Прочность ~90% от ОМ, δ отсутствует.
	920 °С, 2 ч, 800 °С, 6 ч		$\sigma_B = 1390/1020$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1320/930$ МПа, $\delta = 11,3/6,2$ %	Прочность ~80% от ОМ
	960 °С, 2 ч, 800 °С, 6 ч		$\sigma_B = 1390/1210$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1320/1160$ МПа, $\delta = 11,3/2,3$ %	Прочность ~90% от ОМ

Заключение

Рассмотрены различные виды сварки, влияние режимов сварки на структуру и свойства сварных соединений из сплавов на основе орторомбического алюминиды титана. Предложены способы сварки, обеспечивающие получение качественных соединений с требуемыми характеристиками на уровне 90 % от прочности основного металла. Наибольший интерес представляют процессы аргонодуговой, плазменной, электронно-лучевой, лазерной и диффузионной сварки при которых формируется бездефектный сварной шов с оптимальной структурой благодаря высокой скорости и концентрации тепловой энергии или отсутствию необходимости расплавления металла.

Источник финансирования:

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (Соглашение №19–79–30066) с использованием оборудования Центра коллективного пользования "Технологии и Материалы НИУ "БелГУ".

Статьи по проекту:

1. Cracking of Ti₂AlNb-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. Zhherebtsov, G.A. Salishchev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 1014 (2021) 012035. – doi:10.1088/1757-899X/1014/1/012035.
2. Effect of pre-heating and post-weld heat treatment on structure and mechanical properties of laser beam-welded Ti₂AlNb-based joints / D. Panov, S. Naumov, N. Stepanov [et al.] // Intermetallics. – 2022. – Vol. 143. – P. 107466. – DOI 10.1016/j.intermet.2022.107466.
3. 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 [et al.] // Izvestiya Non-Ferrous Metallurgy. – 2023. – Vol. 29 (2). – P. 1-16. – DOI 10.17073/0021-3438-2023-2-57-73.
4. Patent RU 2744292 Panov D.O., Naumov S.V., Sokolovsky V.S., Zhherebtsov S.V., Salishchev G.A., Povolyaeva E.A., Kashaev N.S., Ventzke F., Dinse R., Riekehr S. Method of laser welding of alloys based on orthorhombic titanium aluminide Ti₂AlNb.
5. Structure and mechanical properties of Ti₂AlNb-based joints produced by gas tungsten arc welding / S. Naumov, D. Panov, D. Belinin, V. Sokolovsky, E. Volokitina, G. Salishchev // XIII Russian-Chinese Symposium AMP2023 (in progress)

Спасибо за внимание!

доц. каф. Материаловедения и нанотехнологий НИУ БелГУ,
старший научный сотрудник лаборатории Объемных наноструктурных материалов НИУ БелГУ,
канд. техн. наук

Наумов Станислав Валентинович

Naumov_s@bsu.edu.ru