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

КАФЕДРА МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

# Методы получения сварных соединений из сплавов на основе алюминида титана

доцент каф. Материаловедения и нанотехнологий,
с.н.с. лаборатории Объемных наноструктурных материалов,
канд. техн. наук

**Наумов Станислав Валентинович**

Международная научно-практическая конференция
«Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование 2022»
(ICMSSTE 2022)

**Ялта, 2022**

# Актуальность исследования

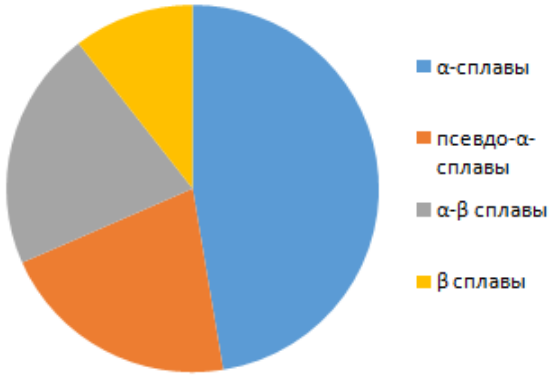



Рисунок – 1. Доля мирового рынка различных титановых сплавов по микроструктуре в 2020 году (%)

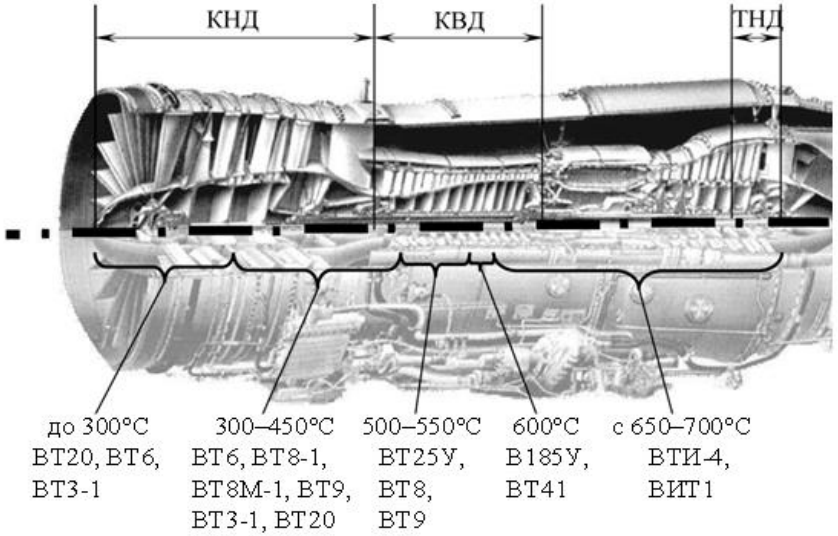



Рисунок – 2. Области применения жаропрочных титановых сплавов в конструкции ГТД

Таблица – 1. Сравнение различных сплавов по свойствам материалов

| Материалы | Рабочая температура (°С) | Плотность (г/см³) | Свариваемость |
|---|---|---|---|
| (α+β) Ti | 550-600 | 4,51 | Удовлетворительная |
| γ-TiAl | 500-550 | 4 | Удовлетворительная/ ограниченная |
| $\alpha_2$-$Ti_3Al$ | не больше 650 | 4,2 | Удовлетворительная/ ограниченная |
| $Ti_2AlNb$ (Ti–25Al–27Nb, at. %) | 700 | 5,39 | Удовлетворительная/ ограниченная |
| Суперсплавы на Ni-основе | 1050—1100 | 8,5 | Удовлетворительная |

# Особенности свариваемости сплавов на основе $Ti_2AlNb$

| № | Способ сварки | Примущества | Недостатки |
|---|---|---|---|
| 1 | Аргонодуговая сварка | универсальность, доступность. Малые токи, малая ЗТВ, минимнальное разбрызгивание металла по сравнению с ММА сваркой | проблемы с пористостью, снижение прочности и пластичности соединения, образование микротрещин, а также насыщение сварного шва газами. |
| 2 | Лазерная сварка | высокая эффективность, автоматизация процесса, высокоточные конструкции без дополнительных механических правок, высококонцентрированный источник энергии (↓ЗТВ) | снижение прочности и пластичности соединения, образование микротрещин и пор, а также насыщение сварного шва газами. |
| 3 | Электронно-лучевая сварка | высокая эффективность, автоматизация процесса, высококонцентрированный источник энергии (↓ЗТВ) | способ менее производительный, требует сложное оборудование, снижение прочности и пластичности соединения, нежелательные структурные изменения в ЗТВ |
| 4 | Точечная электрическая сварка | высокоэффективный и высокоавтоматизированный метод | остаточные напряжения могут приводить к растрескиванию литого ядра |
| 5 | Сварка трением | высокая эффективность и низкая энергоемкость | ограничения по стойкости рабочего инструмента и размерам сварной конструкции |
| 6 | Диффузионная сварка | высокое качество сварного соединения, нет ЗТВ. | низкая производительность, требуется тщательный контроль режимов сварки |
| 7 | Пайка | низкие давления, малое время, экономичный процесс | присутствуют нежелательные интерметаллиды |

# Цель исследования

Целью данной работы является определение влияния режимов диффузионной и электрической сварки сопротивлением на установке SPS 10–3 на качество сварного соединения из сплава на основе орторомбического алюминида титана $Ti_2AlNb$.

# Материал исследования

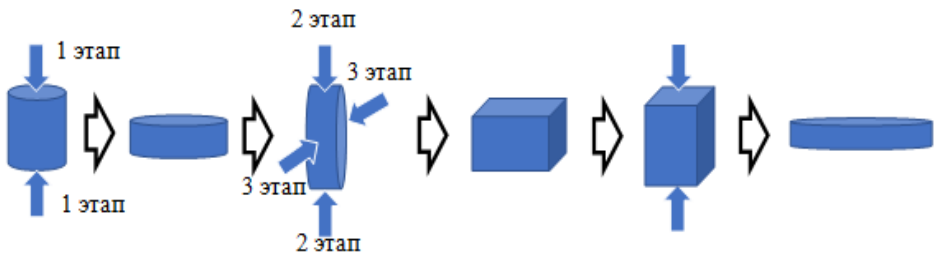



Рисунок – 1. Схема мультиосевой ковки.

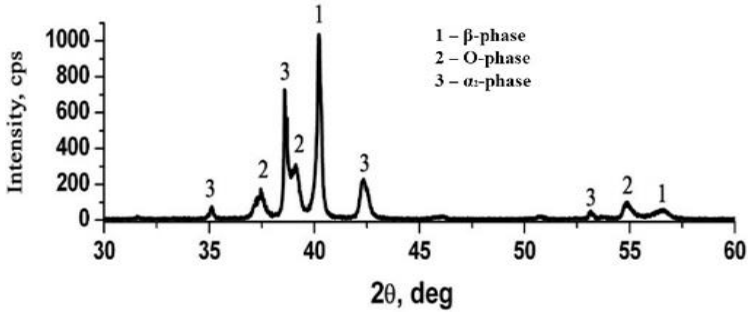
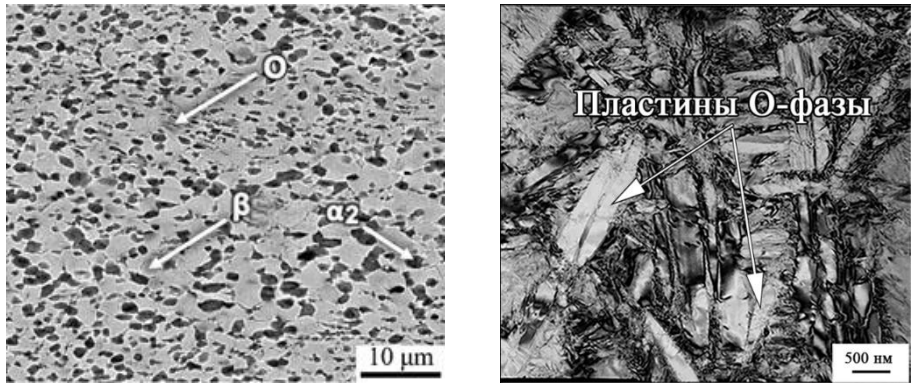



Рисунок – 2. Рентгенофазовый анализ ламельного структурного состояния сплава ВТИ-4.

Таблица – 2. Химический состав сплава ВТИ-4 ($Ti_2AlNb$).

| Ti (at.%) | Al (at.%) | Nb (at.%) | V (at.%) | Zr (at.%) | Mo (at.%) | Si (at.%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Основа | 23 | 23 | 1.4 | 0,8 | 0, 4 | 0,4 |




а б

Рисунок – 3. Исходная структура: а - BSE анализ, б - TEM анализ.

Таблица – 1. Состояние механических свойства ВТИ-4 ($Ti_2AlNb$).

| Состояние | $\sigma_{0.2}$, МПа | $\sigma_B$, МПа | δ,% |
|---|---|---|---|
| ламельная структура (исходная) | 1320 | 1390 | 11,3 |

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.

# Диффузионные методы проведения сварки

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

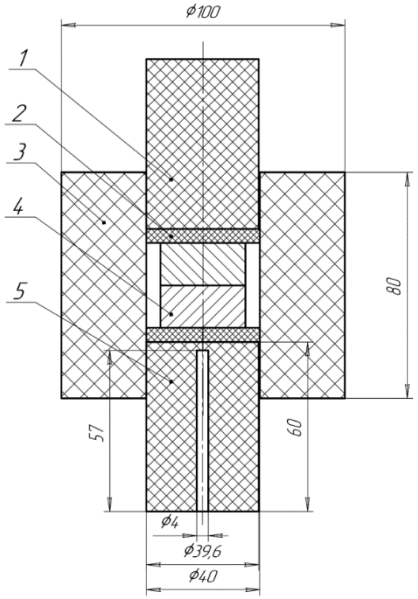



Рисунок – 2. Схема размещения образцов внутри матрицы с пуансонами: 1 – верхний пуансон; 2 – корундовая электроизолирующая шайба; 3 – матрица; 4 – свариваемые образцы; 5 нижний пуансон с технологическим отверстием под термопару.

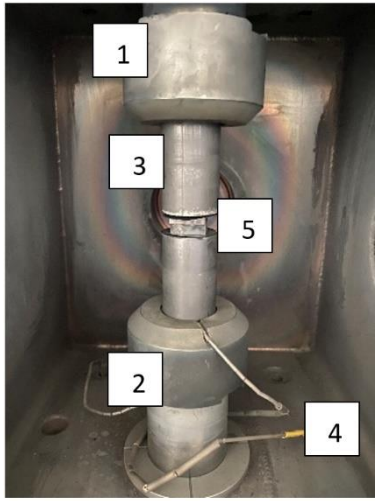



Рисунок – 3. схема размещения заготовок перед электрической сваркой сопротивлением: 1 – гидравлический цилиндр, 2 – графитовая вставка, 3 – пуансоны, 4 – термопара, 5 – свариваемые заготовки.

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 |

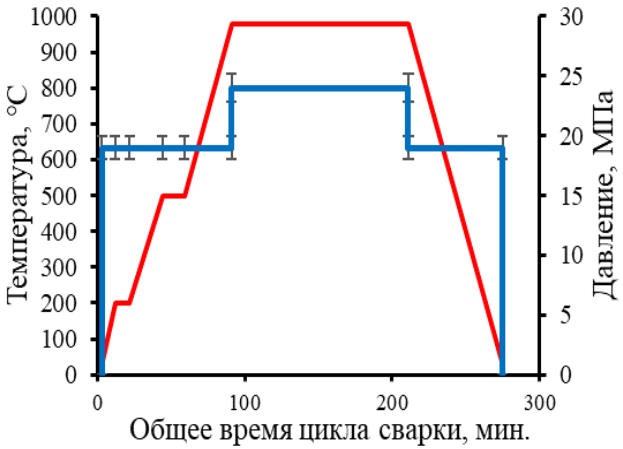



Рисунок – 4. Циклограмма диффузионной сварки на оборудовании SPS 10-3.

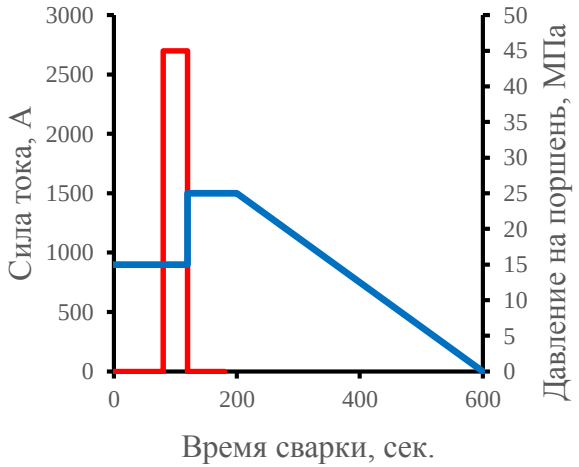



Рисунок – 5. Циклограмма сварки сопротивлением на оборудовании SPS 10-3.

# Микроструктура соединения $Ti_2AlNb$ в зависимости от режимов сварки

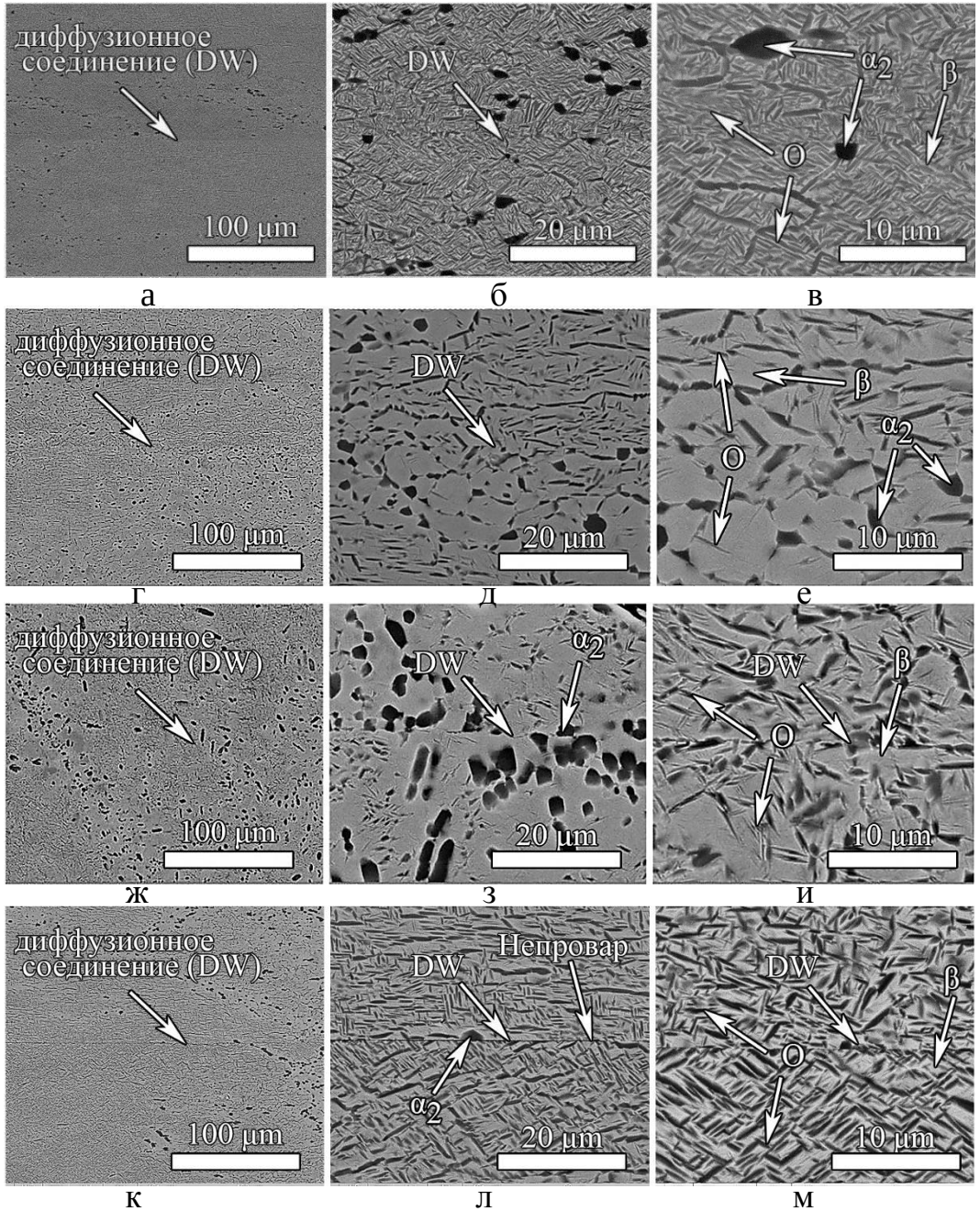



Рисунок 1 – BSE анализ диффузионного соединения полученного при: а-в) 920 °С, 15 МПа; г-е) 940 °С, 15 МПа; ж-и) 960 °С, 15 МПа; к-м) 980 °С, 15 МПа

940 °С: 44,58 % О-фазы, 6,45 % $\alpha_2$-фазы;
960 °С: 54,05 % О-фазы, 9,9 % $\alpha_2$-фазы

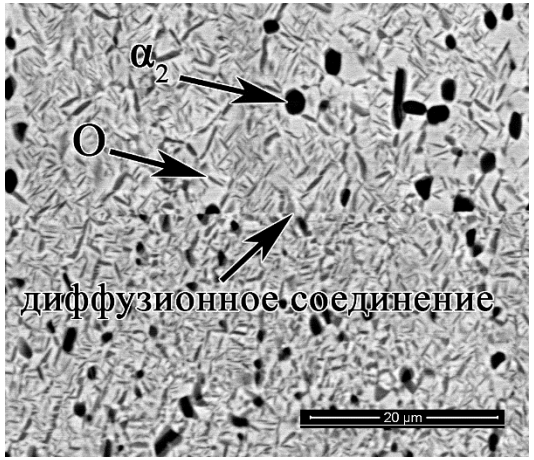



Рисунок – 2. Микроструктура диффузионного соединения сплава после электрической контактной сварки сопротивлением на основе $Ti_2AlNb$, x5000.

Таблица – 1. Фазовый состав ВТИ-4 ($Ti_2AlNb$) до и после сварки сопротивлением.

| Зона | До сварки | | Сварной шов | |
|---|---|---|---|---|
| фаза | $\alpha_2$-фаза | О-фаза | $\alpha_2$-фаза | О-фаза |
| доля фазы, % | 34 | 14 | 15 | 37 |

# Исследование влияния температуры диффузионной сварки $Ti_2AlNb$ на механических свойств полученных диффузионных соединений

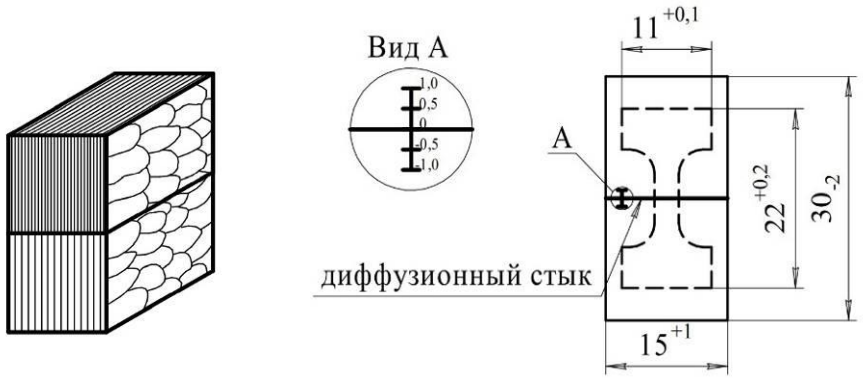
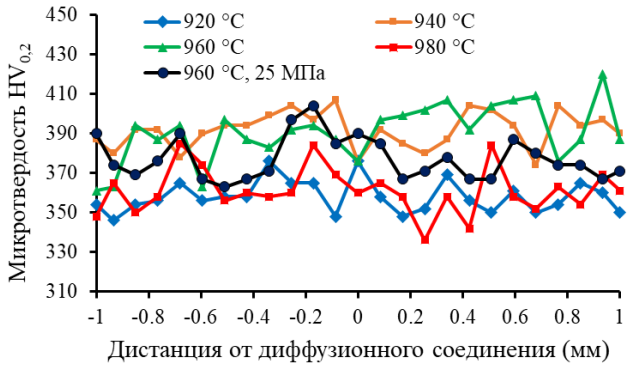
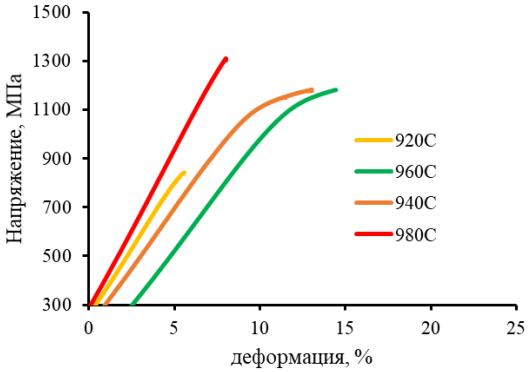


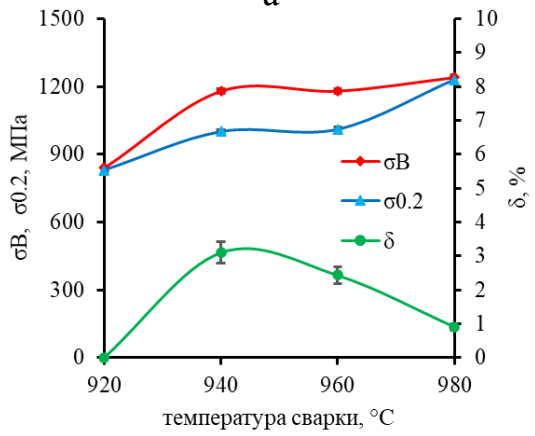

Рисунок 1 – а) образцы перед диффузионной сваркой с ориентацией зерна вдоль диффузионного соединения; б) схема вырезки нестандартного образца для одноосного растяжения и измерения микротвердости (Вид А)



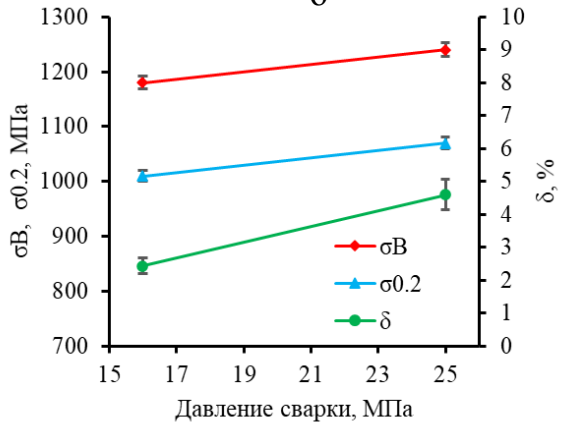

а




б




в




г

Рисунок 2 – а) микротвердость диффузионного соединения; б), в) графики механических свойств диффузионных соединений в зависимости от температуры сварки; г) механические свойства диффузионного соединения при температуре 960 °C в зависимости от давления сварки

# Фрактография изломов диффузионных соединений $Ti_2AlNb$ после механических испытаний

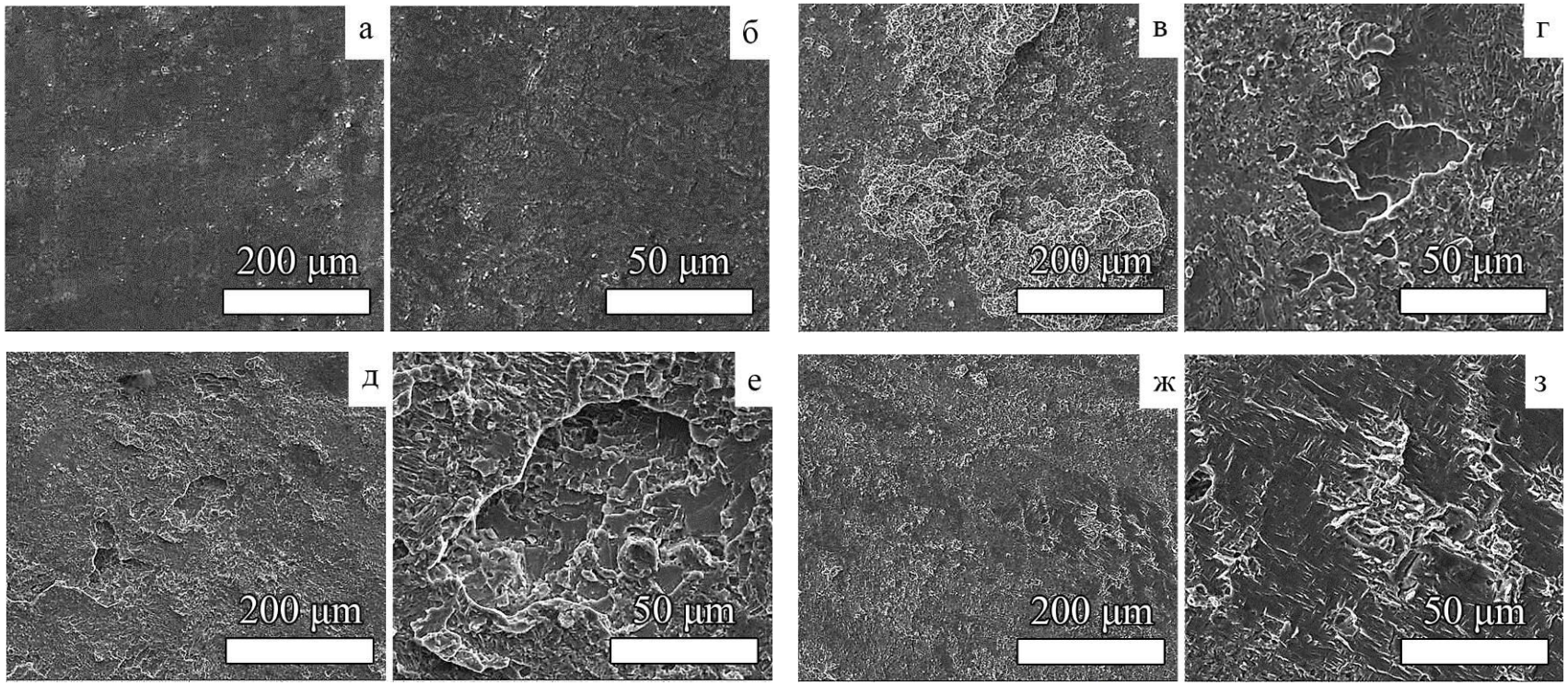



Рисунок 1 – Фрактография изломов диффузионного соединения полученного при условиях сварки: а-б) 920 °С, 15 МПа; в-г) 940 °С, 15 МПа; д-е) 960 °С, 15 МПа; ж-з) 980 °С, 15 МПа

# Исследование влияния термической обработки на микроструктуру и свойства диффузионных соединений $Ti_2AlNb$

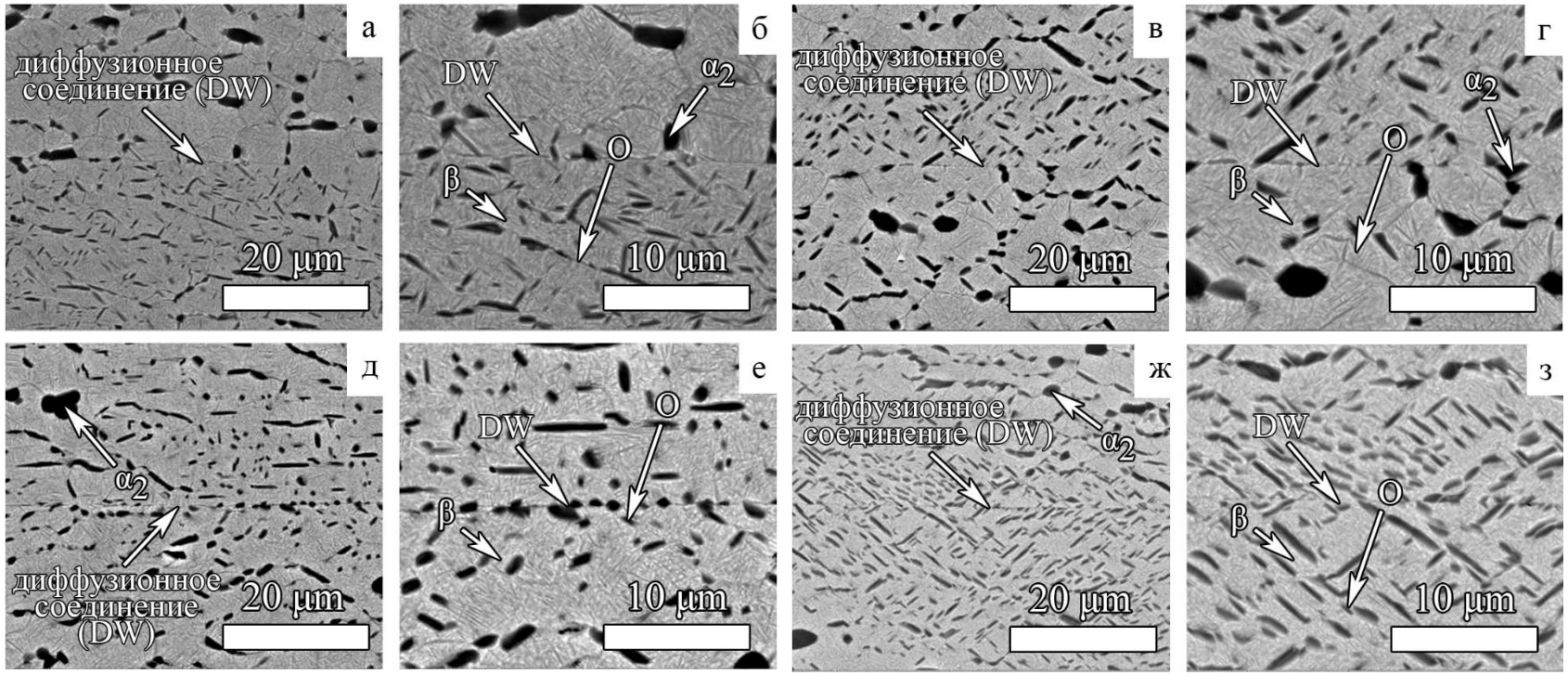



Рисунок 1 - BSE-анализ диффузионного соединения полученного после ТО2 при условиях сварки: а-б) 920 °С, 15 МПа; в-г) 940 °С, 15 МПа; д-е) 960 °С, 15 МПа; ж-з) 980 °С, 15 МПа

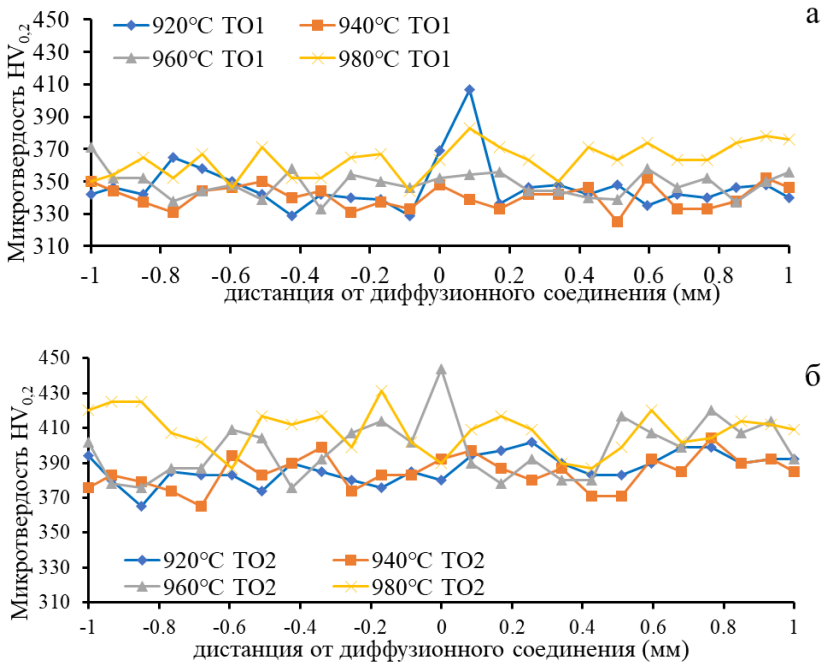



Рисунок 2 – Микротвердость диффузионного соединения после: а) ТО1; б) ТО2

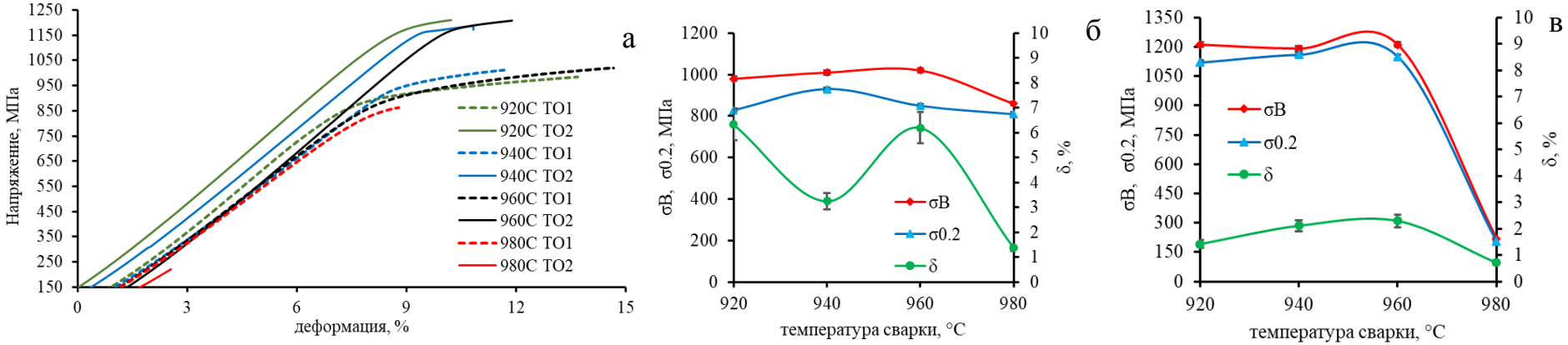



Рисунок 3 – Графики механических свойств диффузионных соединений ВТИ-4 в зависимости от температуры сварки: а) диаграмма растяжения, б) механические свойства после ТО1; в) механические свойства после ТО2

# Выводы

Диффузионные методы сварки на установке искрового плазменного спекания SPS 10–3 при температуре сварки 940-960 °С, времени до 2 ч, давлении до 25 МПа с последующим охлаждением со скоростью 15 °С/мин и последующей термической обработкой (закалка + старение) позволяют обеспечить равнопрочность диффузионного соединения на уровне 90 % от основного металла. Показана возможность проведения электрической контактной сварки сопротивлением для сплавов на основе $Ti_2AlNb$ на установке SPS 10–3, обеспечивающей необходимые уровень вакуума, нагрузки, время и температуры, мощность источника питания с целью получения качественных сварных соединений.

**Источник финансирования:**

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

# Спасибо за внимание!

доцент каф. Материаловедения и нанотехнологий,
с.н.с. лабораторииОбъемных наноструктурных материалов,
канд. техн. наук

**Наумов Станислав Валентинович**

NaumovStanislav@yandex.ru, Naumov_S@edu.bsu.ru

**+79125805568**