

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 537.611.44,537.611.45

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.013

## ВЛИЯНИЕ ТЕКСТУРЫ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТВЕРДОФАЗНОГО СОЕДИНЕНИЯ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT6 В УСЛОВИЯХ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ

Миннаул Хидиятович Мухаметрахимов

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина, 39, 450001 Уфа, Россия  
msia@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5079-7420>

**Аннотация.** Приведены результаты экспериментального исследования твердофазной свариваемости титанового сплава VT6 при температуре 900 °С в условиях сверхпластичности. В проведенных экспериментах по сварке изучены условия достижения качественного твердофазного соединения в различных структурных состояниях. При соединении образцов с микрокристаллическими и крупнокристаллическими структурами на качество сварных соединений оказывает влияние текстура материала. Известно, что анизотропия напряжений течения, обусловленная наличием металлографической текстуры, является отрицательным фактором при изготовлении и эксплуатации изделий. Металлографические исследования показали, что протяженность пор относительно межфазных границ в зоне соединения с увеличением угла наклона кристаллитов относительно направления деформации уменьшается. Если кристаллиты ориентированы перпендикулярно действующей нагрузке, формоизменение при образовании физического контакта осуществляется главным образом, за счет внутризернового скольжения. Для обеспечения активизации контактирующих поверхностей кристаллы следует ориентировать с учетом действующих систем скольжения. С повышением угла разворота  $\alpha$ -пластин относительно направления деформации в одинаковых условиях сверхпластической деформации повышается качество сварного соединения путем заполнения и деления пластичной  $\beta$ -фазой.

**Ключевые слова:** титановый сплав, сварка давлением, твердофазное соединение, сверхпластичность, механические свойства.

**Благодарности:** Работа выполнена в рамках государственного задания ИПСМ РАН, № НИОКТР 124022900007–9.

**Для цитирования:** Мухаметрахимов М.Х. Влияние текстуры на формирование твердофазного соединения титанового сплава VT6 в условиях сверхпластичности // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21, № 3. С. 389–395. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.013.

Original article

## THE INFLUENCE OF TEXTURE ON THE FORMATION OF A SOLID-PHASE COMPOUND OF TITANIUM ALLOY VT6 UNDER CONDITIONS OF SUPERPLASTICITY

Minnaul Kh. Mukhametrakhimov

Institute for Metals Superplasticity Problems of Russian Academy of Sciences, Khalturina St., 39, Ufa, 450001, Russia  
msia@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5079-7420>

**Abstract.** Results of experimental study of solid-phase weldability of titanium alloy VT6 at temperature 900 °C under conditions of superplasticity are given. Welding experiments have studied the conditions for achieving a high-quality solid-phase joint in various structural states. When connecting samples with microcrystalline and large crystal structures, the quality of welded joints is influenced by the texture of the material. It is known, the anisotropy of flow stresses due to the presence of metallographic texture is a negative factor in the manufacture and operation of products. Metallographic studies have shown, the extent of the pores relative to the interfacial boundaries in the junction zone decreases. The greater the angle of inclination of the crystallite relative to the direction of deformation, the smaller the pore length. When the crystallites are oriented perpendicularly to the acting load, the shape

change in the formation of physical contact is carried out due to internal sliding. To ensure the activation of the contact surfaces, the crystals should be oriented taking into account the existing sliding systems. As angle of turn of  $\alpha$ -plates increases relative to direction of deformation under similar conditions of superplastic deformation, quality of welded joint increases. The quality of the welded joint is improved by filling and dividing the plastic  $\beta$ -phase.

**Keywords:** titanium alloy, pressure welding, solidphase joining, superplasticity, mechanical properties.

**Acknowledgements:** The work was carried out within the framework of the state assignment of the IPSP RAS, No. NIOKTR 124022900007–9.

**For citation:** Mukhametrakhimov, M. Kh. (2024). The influence of texture on the formation of a solid-phase compound of titanium alloy VT6 under conditions of superplasticity. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(3), 389–395. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.013.

## Введение

Титан и его сплавы занимают одно из ведущих мест среди конструкционных материалов наряду со сплавами на основе алюминия и железа. Уникальное сочетание высокой удельной прочности и вязкости разрушения, коррозионной стойкости, немагнитности и высокой температуры плавления определило их широкое применение в различных областях энергетического машиностроения [1]. Значительные внутренние напряжения в титановых сплавах возникают при металлургическом переделе, под влиянием термических и механических воздействий (при горячей прокатке, ковке, штамповке, в сварочном цикле). При этом особый интерес представляет изучение зарождения дефектов и пластического отеснения материала при нагружении отдельных структурных элементов сплава, поскольку они в значительной степени определяют механическое поведение материала в целом [2-5]. В силу низкой теплопроводности и значительной анизотропии термического расширения титана, а также из-за высокого химического сродства к кислороду в процессе горячей деформации и теплосмен по сечению титановых заготовок возникает повышенная склонность металла к деформационной и температурной неоднородности. Данное явление способствует образованию значительной неоднородности как распределения концентрации легирующих элементов, так и протекания структурных и фазовых превращений. В результате в объеме деформированных титановых заготовок формируются неравновесные твердые растворы со структурной и многокомпонентной кристаллографической текстурованностью, которые приводят к усилению анизотропии механических свойств, к разбросу результатов механических испытаний и снижению их уровня, особенно вязко-пластических свойств крупногабаритных деформированных заготовок [6].

С учетом изложенного выше проблема повышения стабильности механических свойств является актуальной для крупногабаритных титановых полуфабрикатов, предназначенных для конструкционных изделий [7, 8].

Одним из важнейших свойств титановых сплавов, предназначенных для сварных конструкций, является свариваемость. Проблемы свариваемости титановых сплавов несколько отличаются от проблем свариваемости других конструкционных материалов (сталей, алюминиевых и магниевых сплавов).

Известно, [9], что для получения твердофазных соединений (ТФС) металлов и сплавов в различных изделиях используются различные методы получения неразъемных соединений: сварка давлением (СД), сварка трением, сварка плавлением и др. Наиболее перспективным методом получения качественных соединений является СД [10]. СД в вакууме обладает целым рядом достоинств: она не требует дорогостоящих припоев, электродов, флюсов, защитных газов. При нагреве и принудительном давлении в вакууме и из-за способности титана растворять кислород происходит очищение от оксидных пленок на поверхности. А главное достоинство – СД может соединять материалы, которые практически невозможно соединить сваркой плавлением, более того, термический цикл СД способен не только соединять материалы, но и проводить термическую обработку на заданные или требуемые свойства соединения [11].

Основная проблема свариваемости титановых сплавов - получение сварных соединений с хорошей пластичностью, зависящей от качества защиты, чувствительности металла и термическому циклу и заметное насыщение металла шва кислородом, азотом и водородом. Это резко снижает пластичность и длительную прочность сварных конструкций. Поэтому зона сварки при температурах выше 350 °С должна быть тщательно защищена от взаимодействия с

воздухом путем сварки в среде инертных защитных газов или в вакууме.

Еще одной из причин, сдерживающих широкое применение СД при изготовлении конструкций из титановых сплавов, является трудность получения качественного соединения при малой накопленной деформации свариваемых элементов. Факторами, влияющими на длительность стадии образования физического контакта и, как следствие этого, величины накопленной деформации свариваемых элементов является размер зерна, структура и геометрия микровыступов на контактных поверхностях [12, 13].

Значительный объем исследований позволил установить, что ускоренное образование ТФС происходит при деформационном соединении в состоянии сверхпластичности (СП) по сравнению с традиционной диффузионной сваркой [14, 15]. Однако использование результатов исследований для разработки прорывных ресурсосберегающих технологий изготовления

полых изделий СД для предприятий авиационного машиностроения сдерживает низкие эксплуатационные свойства и долговечность конструкционных материалов.

В связи с этим основной задачей работы являлась исследование влияние текстуры на формирование ТФС титанового сплава ВТ6 различных структурных состояниях при температуре 900 °С в условиях СП.

### Материал и методика исследования

Материалом для исследования был выбран широко используемый в авиакосмическом машиностроении промышленный двухфазный титановый сплав ВТ6 (производства ВСМПО-АВИСМА, г. Верхняя Салда) стандартного химического состава по ГОСТ 19807–91, являющийся аналогом не менее популярного за рубежом сплава Ti–6Al–4V. Химический состав исследуемого сплава ВТ6 приведен в таблице 1.

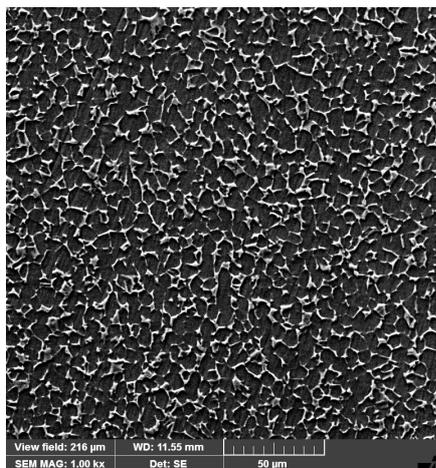
Таблица 1. Химический состав исследуемого сплава ВТ6

Table 1. Chemical composition of the studied VT6 alloy

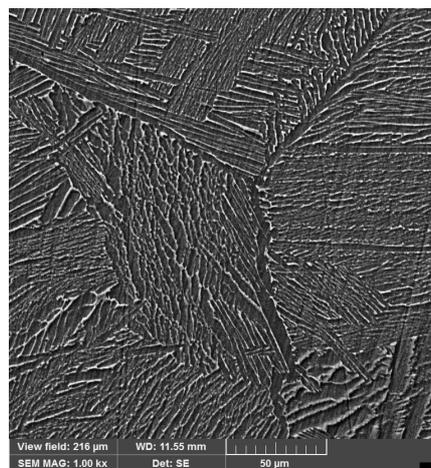
Марка	Химический состав, вес. %								
	Ti	Al	V	Zr	Fe	O	C	N	H
ВТ6	Основа	5,3÷6,5	3,5÷5,1	0,3	0,25÷0,3	0,15÷0,2	0,1	0,05	0,015

Исследуемые образцы имели микрокристаллическую (МК) глобулярную структуру и крупнокристаллическую (КК) пластинчатую структуру. МК структура со средним размером  $\alpha$ -фазы 3-5 мкм была получена отжигом в вакууме  $2 \times 10^{-3}$  Па в печи СНВЭ-1,3.1/16-ИЗ-

УХЛЧ.1 при температуре 900 °С (рис.1а), а КК структура со средним размером  $\beta$ -превращенных зерен более 300 мкм была получена вакуумным отжигом в  $\beta$ -области при температуре 1000 °С (рис.1б).



а)



б)

Рис.1. Микроструктура исходных состояний исследуемого сплава ВТ6: а) с МК; б) с КК структурой

Fig.1. Microstructure of the initial states of the studied VT6 alloy: а) with MC; б) with CC structure

Результаты проведенных механических испытаний при одноосном растяжении образцов из титанового сплава ВТ6 с различным типом структуры представлены в таблице 2.

**Таблица 2.** Механические свойства образцов исследуемого сплава ВТ6 в исходных состояниях при комнатной температуре

**Table 2.** Mechanical properties of samples of the studied VT6 alloy in initial states at room temperature

ВТ6	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
МК	1083	1028	14
КК	953	910	9

Из таблицы видно, что значения характеристик прочности и пластичности сплава ВТ6 зависят типа структур. У образца с МК структурой предел прочности существенно выше ( $\sigma_b = 1083$  МПа), чем с КК структурой ( $\sigma_b = 953$  МПа).

Для определения СП проводили механические испытания на растяжение в интервале скоростей деформации  $10^{-5} \dots 10^{-3} \text{ с}^{-1}$  на универсальном динамометре фирмы «INSTRON-1185» при температуре 900 °С.

Коэффициент скоростной чувствительности напряжений течения  $m$  образца с МК структурой определяли методом ступенчатого переключения скоростей деформации  $m = d(\log \sigma) / d(\log \dot{\epsilon})$  и из наклона кривых  $\log \sigma - \log \dot{\epsilon}$  [16].

Наибольшая величина коэффициента скоростной чувствительности  $m$  для сплава ВТ6 с МК структурой отмечается при температуре 900 °С и скорости деформации  $\dot{\epsilon} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ , а для КК –  $\dot{\epsilon} = 7,1 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ .

**Таблица 3.** Режим приготовления прицельных фольг

**Table 3.** Mode for preparing aiming foils

Толщина пластины, мм	Температура, °С	Напряжение, В	Сила тока, А	Напор струи электролита, единиц по шкале прибора
0,1-0,2	-35	25-30	40-55	3,4

Состав электролита: 300 мл метанола, 175 мл  $n$  – бутилового спирта и 30 мл хлорной кислоты ( $\rho = 1,56-1,60 \text{ г/см}^3$ ) [18, 19].

Тонкие прицельные фольги, приготовленные из сварных соединений сплава ВТ6, исследовали на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) – «JEM – 2000 EX» при ускоряющем напряжении микроскопа 120-160 кВ.

### Результаты и их обсуждение

Сварку в твердом состоянии титанового сплава ВТ6 с различными структурными состоя-

ниями осуществляли осадкой установленных друг на друга образцов на вакуумной установке ИМАШ 20 - 78 при температуре 900 °С в различных сочетаниях в условиях СП (для МК  $\dot{\epsilon} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  и для КК  $\dot{\epsilon} = 7,1 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ ). Глубину вакуума в процессе эксперимента поддерживали не хуже  $2 \cdot 10^{-3}$  Па.

Металлографические исследования проводили с помощью растрового (сканирующего) электронного микроскопа (РЭМ) – «TESCAN MIRA3 LMU» и «JSM – 6400» по относительной объемной доле (протяженности) пор в поперечном сечении зоны соединения. Средний размер зерен определяли методом секущих [17].

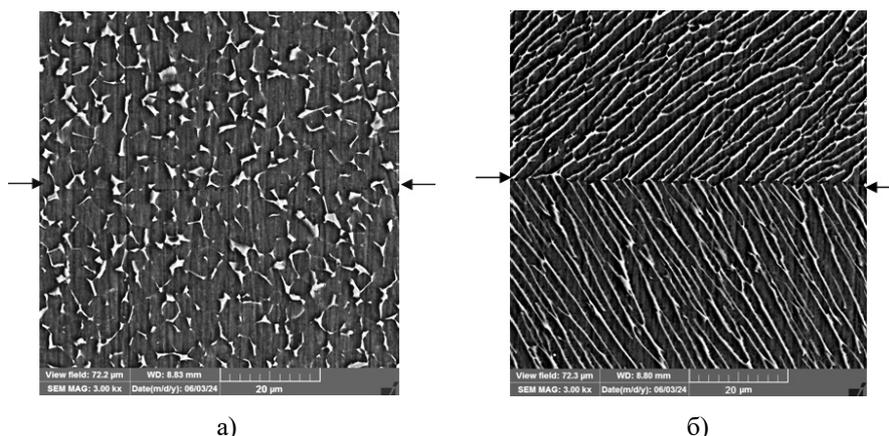
Механические испытания образцов проводили по схеме “растяжение” при комнатной температуре со скоростью деформирования 1 мм/мин на универсальном динамометре фирмы «INSTRON-1185». Зону сварного соединения располагали в центральной части испытываемого образца поперек оси растяжения.

Для исследования тонкой структуры были изготовлены прицельные фольги из сварных соединений. Приготовление фольг состояло из двух этапов: предварительное утонение заготовок в виде дисков до толщины приблизительно 0,1-0,2 мм и окончательное утонение заготовок методом струйной полировки на установке «Тепурол-2», пригодных для получения клиновидных участков вокруг дырок, прозрачных для электронов в микроскопе. Режим приготовления фольг приведен в таблице 3.

ниями (между МК с МК и КК с КК) осуществляли при традиционной температуре проявления СП – 900 °С.

На металлографических изображениях в зоне ТФС микроструктура соответствует исходному материалу, которая не претерпевает заметных изменений в процессе сварки давлением (рис.2а,б).

Протяженность пор относительно межфазных границ в зоне ТФС с увеличением степени СП деформации уменьшается от 18 до 1,5 %.



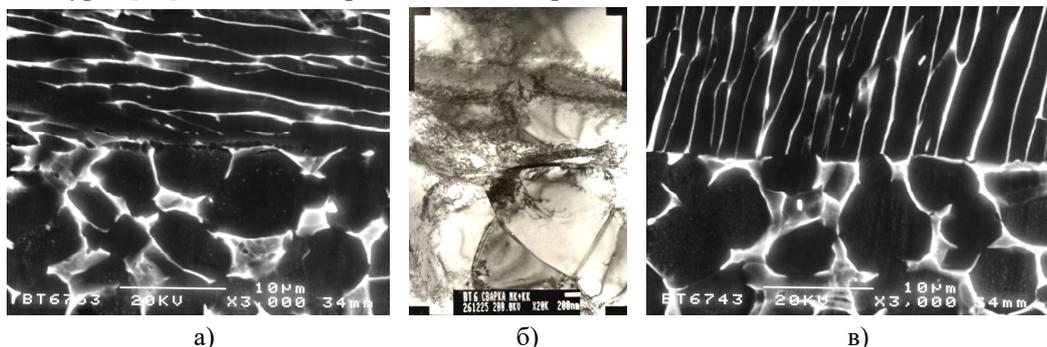
**Рис.2.** Микроструктура зоны ТФС: а) между МК и МК структурами; б) КК и КК структурами  
**Fig.2.** Microstructure of the TPS zone: a) between MC and MC structures; b) CC and CC structures

В этой связи интересными представляются результаты по сварке при температуре 900 °С сплава ВТ6 между МК и КК структурами. При соединении образцов с КК структурой на качество сварных соединений оказывает влияние текстура материала.

Известно, что анизотропия напряжений течения, обусловленная наличием металлографической текстуры [20], является отрицательным

фактором при изготовлении и эксплуатации изделий. Для обеспечения активизации контактирующих поверхностей кристаллы следует ориентировать с учетом действующих систем скольжения.

На рисунке 3 представлена микроструктура ТФС сплава ВТ6 после сварки давлением при температуре 900 °С между МК и КК структурами.



**Рис.3.** Микроструктура зоны ТФС после сварки давлением между МК и КК структурами: а) и в) РЭМ; б) ПЭМ (прицельная фольга)

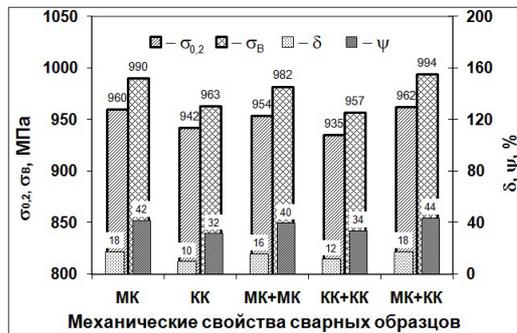
**Fig.3.** Microstructure of the TPS zone after pressure welding between MC and CC structures: a) and c) SEM; b) TEM (target foil)

В результате металлографических исследований соединенных в твердом состоянии образцов из ВТ6 с разными структурами (МК и КК) в зонах ТФС было выявлено наличие пор, однако с увеличением степени деформации меняется характер распределения пор и их общая протяженность. Если кристаллиты в крупнокристаллическом сплаве ориентированы перпендикулярно действующей нагрузке, формоизменение при образовании физического контакта осуществляется главным образом, за счет внутризеренного скольжения (рис.3а,б), что не обеспечивает эффективного «залечивания» остаточных микропор.

С повышением угла разворота  $\alpha$ -пластин относительно направления деформации в одинаковых условиях СП деформации повышается качество сварного соединения путем заполнения и деления пластичной  $\beta$ -фазой (рис.3в).

В начальном этапе деформируются наиболее благоприятно ориентированные зерна КК сплава т.е. зерна, плоскости скольжения в которых составляют с направлением усилия 45°. При этом протяженность пор относительно межфазных границ в зоне соединения с увеличением угла наклона кристаллита относительно направления деформации уменьшается.

Механические свойства ТФС образцов из сплава ВТ6 с различными структурами при комнатной температуре представлена на рис.4.



**Рис.4.** Механические свойства ТФС образцов из сплава ВТ6 с различными структурами \*МК и КК – образцы-свидетели, полученные в тех же условиях что сваренные образцы

**Fig.4.** Mechanical properties of TPS samples from VT6 alloy with different structures \*МК and КК are witness samples obtained under the same conditions as welded samples

Как мы видим из рисунка 4, использование сплава ВТ6 в различных структурных сочетаниях (МК и КК) позволяет обеспечить в сваренных образцах максимальные прочностные и пластические свойства. Особенностями ТФС в условиях СП деформации является незначительное снижение получаемого соединения при росте пластичности сваренных образцов, обусловленное ростом зерен.

Из проведенных экспериментов следует, что количество пор и их распределение в зоне ТФС титанового сплава ВТ6 зависит от типа структуры.

Полученные результаты могут использоваться при проектировании сварных конструкций, состоящих из деталей, изготовленных из отечественных материалов с различными типами структуры.

### Выводы

Экспериментально показана возможность получения качественного ТФС образцов из сплава ВТ6 с различными типами структуры при температуре 900 °С в условиях СП.

Микроструктурный анализ показал, что количество пор и их распределение в зоне ТФС титанового сплава ВТ6 зависит не только времени сварки, степени и скорости СП деформации, но и от структурного состояния материала.

Механические испытания на растяжения показали, что с увеличением степени СП деформации до 15 % при температуре 900 °С относительная протяженность составила менее 1,5 % и разрушение происходило по основному материалу.

### Список литературы

1. Колачев Б.А., Елисеев Ю.С., Братухин А.Г., Талалаев В.Д. Титановые сплавы в конструкциях и производстве авиадвигателей и авиационно-космической технике. М.: Изд-во МАИ, 2001. 416 с.
2. Кайбышев О.А., Валиев Р.З. Границы зерен и свойства металлов. М.: Metallurgiya, 1987. 212 с.
3. Galieva E.V., Klassman E.Yu., Valitov V.A., Musabirov I.I. Pressure welding of heat-resistant EK61 and EP975 nickel-based superalloys at a temperature of 900 °C // Letters on Materials. 2023. V. 13, N 4. P. 347–352.
4. Скворцова С.В., Шалин А.В., Гвоздева О.Н., Степушин А.С., Гуртовая Г.В. Формирование пластинчатой структуры в ( $\alpha+\beta$ )-титановых сплавах // Деформация и разрушение материалов. 2023. № 7. С. 29–35.
5. Коллеров М Ю., Гусев Д.Е., Лукина Е.А., Шинаева Е.В. Влияние структуры на механизмы деформации титанового сплава ВТ 22 и при реализации эффекта памяти формы // Деформация и разрушение материалов. 2022. № 1. С. 11–18.
6. Sarkeeva A.A., Kruglov A.A. Characteristics of the mechanical behavior of a near-alpha multilayer laminate under impact loading // Letters on Materials. 2023. V. 13, N 4s. P. 488–492.
7. Соколов С.А., Тулин Д.Е. Влияние собственных остаточных напряжений на сопротивление сварного соединения хрупкому разрушению // Деформация и разрушение материалов. 2023. № 1. С. 2–10.
8. Круглов А.А., Лутфуллин Р.Я., Мухаметрахимов М.Х., Руденко О.А., Саркеева А.А., Сафиуллин Р.В. Роль противосварочного покрытия в трехслойных гофрированных конструкциях из титановых сплавов // Письма о материалах. 2021. Т. 11, В. 4. С. 457–461.
9. Кайбышев О.А. Пластичность и сверхпластичность металлов. М.: Metallurgiya, 1975. 280 с.
10. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка материалов. М.: Машиностроение, 1976. 312 с.
11. Каракозов Э.С., Орлова Л.М., Пешков В.В., Григорьевский В.И. Диффузионная сварка титана. М.: Metallurgiya, 1977. 272 с.
12. Лутфуллин Р.Я., Мухаметрахимов М.Х. Оксидный поверхностный слой и твердофазная свариваемость титановых сплавов // Письма о материалах. 2021. Т. 11, В. 3. С. 363–366.
13. Мухаметрахимов М.Х. Влияние термообработки на структуру и механические свойства твердофазного сварного соединения сплава ВТ6 с применением ультрамелкозернистой прослойки из сплава ВТ22 // Деформация и разрушение материалов. 2021. № 11. С. 23–27.
14. Гореликов В.Я., Сомов А.И. Применение профильных соединений различных видов и типоразмеров // Вестник машиностроения. 2020. № 10. С. 8–10.
15. Мовчан А.А., Казарина С.А., Сильченко А.Л. Экспериментальное определение напряже-

ния начала структурного перехода в никелиде титана после ориентированного превращения // Деформация и разрушение материалов. 2022. № 12. С. 2–9.

16. Грабский М.В. Структурная сверхпластичность металлов. М.: Metallurgia, 1975. 270 с.

17. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. М.: Metallurgia, 1976. 272 с.

18. Утевский Л.М. Дифракционная электронная микроскопия. М.: Metallurgia, 1973. 583 с.

19. Авдеев В.М., Кошелев В.М., Черненко В.С. // Заводская лаборатория. 1980. № 7. Р. 619.

20. Partridge P.G., McDermid D.S., Bowen A.W. // Acta Metall. 1985. V. 33, N 4. P. 571–577.

### Информация об авторах

М. Х. Мухаметрахимов – кандидат технических наук, научный сотрудник Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

### References

1. Kolachev, B. A., Yeliseyev, Yu. S., Bratukhin, A. G. & Talalayev, V. D. (2001). Titanovyye splavy v konstruktsiyakh i proizvodstve aviadvigateley i aviatsionno-kosmicheskoy tekhnike. M.: Izd-vo MAI. P. 416. (In Russ.).

2. Kaybyshev, O. A. & Valiyev, R. Z. (1987). Granitsy zeren i svoystva metallov. M.: Metallurgiya. P. 212. (In Russ.).

3. Galieva, E. V., Klassman, E. Yu., Valitov, V. A. & Musabirov, I. I. (2023). Pressure welding of heat-resistant EK61 and EP975 nickel-based superalloys at a temperature of 900 °C. *Letters on Materials*, 13(4), 347–352.

4. Skvortsova, S. V., Shalin, A. V., Gvozdeva, O. N., Stepushin, A. S. & Gurtovaya, G. V. (2023). Formirovaniye plastinchatoy struktury v ( $\alpha$ + $\beta$ )-titanovykh splavakh. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, (7), 29–35. (In Russ.).

5. Kollerov, M. Yu., Gusev, D. E., Lukina, E. A. & Shinayeva, E. V. (2022). Vliyaniye struktury na mekhanizmy deformatsii titanovogo splava VT 22 i pri realizatsii efekta pamyati formy. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, (1), 11–18. (In Russ.).

6. Sarkeeva, A. A. & Kruglov, A. A. (2023). Characteristics of the mechanical behavior of a near-alpha multilayer laminate under impact loading. *Letters on Materials*, 13(4s), 488–492.

7. Sokolov, S. A. & Tulin, D. E. (2023). Vliyaniye sobstvennykh ostatochnykh napryazheniy na soprotivleniye svarnogo soyedineniya khrupkomu razrusheniyu. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, (1), 2–10. (In Russ.).

8. Kruglov, A. A., Lutfullin, R. Ya., Mukhametrakhimov, M. Kh., Rudenko, O. A., Sarkeeva, A. A. & Safullin, R. V. (2021). Rol' protivosvarochnogo pokrytiya v trekhsloynnykh gofirovannykh konstruktsiyakh iz ti-tanovykh splavov. *Pis'ma o materialakh*, 11(4), 457–461. (In Russ.).

9. Kaybyshev, O. A. (1975). Plastichnost' i sverkhplastichnost' metallov. M.: Metallurgiya. P. 280. (In Russ.).

10. Kazakov, N. F. (1976). Diffuzionnaya svarka materialov. M.: Mashinostroyeniye. P. 312. (In Russ.).

11. Karakozov, E. S., Orlova, L. M., Peshkov, V. V. & Grigor'yevskiy, V. I. (1977). Diffuzionnaya svarka titana. M.: Metallurgiya. P. 272. (In Russ.).

12. Lutfullin, R. Ya. & Mukhametrakhimov, M. Kh. (2021). Oksidnyy poverkhnostnyy sloy i tverdo-faznaya svarivayemost' titanovykh splavov. *Pis'ma o materialakh*, 11(3), 363–366. (In Russ.).

13. Mukhametrakhimov, M. Kh. (2021). Metod termoobrabotki struktury i mekhanicheskikh svoystv tverdofaznogo svarnogo soyedineniya splava VT6 s primeneniye ul'tramelkozernistoy prosloyki iz splava VT22. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, (11), 23–27. (In Russ.).

14. Gorelikov, V. Ya. & Somov, A. I. (2020). Primeneniye profil'nykh soyedineniy razlichnykh vidov i tiporazmerov. *Vestnik mashinostroyeniya*, (10), 8–10. (In Russ.).

15. Movchan, A. A., Kazarina, S. A. & Sil'chenko, A. L. (2022). Eksperimental'noye opredeleniye napryazheniya nachala struktornogo perekhoda v nikelide titana posle oriyentirovannogo prevrashcheniya. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*, (12), 2–9. (In Russ.).

16. Grabskiy, M. V. (1975). Strukturnaya sverkhplastichnost' metallov. M.: Metallurgiya. P. 270. (In Russ.).

17. Saltykov, S. A. (1976). Stereometricheskaya metallografiya. M.: Metallurgiya. P. 272. (In Russ.).

18. Utevskiy, L. M. (1973). Difraktsionnaya elektronnaya mikroskopiya. M.: Metallurgiya. P. 583. (In Russ.).

19. Avdeyev, V. M., Koshelev, V. M. & Chernenko, V. S. (1980). *Zavodskaya laboratoriya*, (7), 619. (In Russ.).

20. Partridge, P. G., McDermid, D. S. & Bowen, A. W. (1985). *Acta Metall.*, 33(4), 571–577.

### Information about the authors

M. Kh. Mukhametrakhimov – Candidate of Technical Sciences, Researcher of the Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 06.05.2024; одобрена после рецензирования 10.06.2024; принята к публикации 12.08.2024.  
The article was received by the editorial board on 06 May 24; approved after reviewing 10 June 24; accepted for publication 12 Aug. 24.