

РАЗДЕЛ 2. МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Научная статья

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

УДК 621. 791.4:669.295

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.009

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРХПЛАСТИЧНЫХ ПРОКЛАДOK В ТЕХНОЛОГИИ ТВЕРДОФАЗНОЙ СВАРКИ

Рамиль Яватович Лутфуллин^{1,2}, Миннауль Хидиятович Мухаметрахимов¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, 450001 Уфа, ул. Ст. Халтурина, 39

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1

¹ lutfullin.ramil@imsp.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4638-3206>

Аннотация. Наивысшая эффективность применения сверхпластичности (СП) в технологии твердофазной сварки определяется возможностью ее реализации в сварной зоне. При этом наиболее рационально, чтобы сверхпластической деформации подвергались не сами свариваемые заготовки, а что более технологично, если ее ограничить в узкой соединяемой зоне. Такая возможность управления локальностью протекания сверхпластической деформации возможна в случае использования промежуточных сверхпластичных прокладок между соединяемыми заготовками. Рассмотрены результаты экспериментальных работ по твердофазной сварке заготовок из промышленного титанового сплава ВТ6 с использованием мелкозернистых и ультрамелкозернистых (УМЗ) прокладок из разноименных титановых сплавов. Применение мелкозернистой прокладки позволяет в режиме традиционной СП успешно сваривать крупнозернистые заготовки, неспособные к сверхпластической деформации. При использовании наноструктурированных или УМЗ прокладок становится возможным успешная сварка мелкозернистых и крупнозернистых заготовок в температурных режимах проявления как традиционной, так и низкотемпературной СП при пониженных температурах. Перспективным представляется твердофазная сварка жаропрочных никелевых сплавов через сверхпластичную прокладку. В этом случае наряду с достижением высокого качества сварного соединения, устраняется технологически сложная проблема подготовки мелкозернистой или УМЗ структуры в соединяемых крупногабаритных заготовках.

Ключевые слова: титановые сплавы, сверхпластичная прокладка, структура, твердофазная сварка.

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания № НИОКТР 124022900007-9.

Для цитирования: Лутфуллин Р.Я., Мухаметрахимов М.Х. Использование сверхпластичных прокладок в технологии твердофазной сварки // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 3. С. 335-341. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.009.

Original article

THE USE OF SUPERPLASTIC FILLINGS IN SOLID-PHASE WELDING TECHNOLOGY

Ramil Ya. Lutfullin^{1,2}, Minnaul Kh. Mukhametrakhimov¹¹ Institute for Metals Superplasticity Problems, Russian Academy of Sciences, 39 Khalturin St., Ufa 450001, Russia² Ufa State Oil Technical University, 1 Kosmonavtov St., Ufa 450064, Russia¹ lutfullin.ramil@imsp.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4638-3206>

Abstract. The highest efficiency of using superplasticity in solid-phase welding technology is determined by the possibility of its implementation in the welded zone. It is most rational that the superplastic deformation should not be subjected to the welded workpieces themselves, but what is more technologically advanced if it is limited in a narrow-connected zone. This possibility of controlling the locality of the superplastic deformation is possible if intermediate superplastic interlayers are used between the workpieces to be connected. The results of experimental work on solid-phase welding of blanks made of industrial titanium alloy VT6 using fine-grained and ultrafine-grained interlayers made of titanium alloys of different names are considered. The use of fine-grained interlayers makes it possible to successfully weld coarse-grained blanks that are incapable of superplastic deformation in the traditional joint venture mode. When using nanostructured or ultrafine-grained interlayers, it becomes possible to successfully weld fine-grained and coarse-grained workpieces in temperature conditions of both traditional and low-temperature superplasticity. Solid-phase welding of heat-resistant nickel alloys through a superplastic interlayer seems promising. In this case, along with achieving high quality of the welded joint, the technologically complex problem of preparing an ultrafine-grained structure in large-sized workpieces is avoided.

Keywords: titanium alloys, superplastic interlayer, structure, solid phase welding

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state task No. R&D 124022900007-9.

For citation: Lutfullin R.Ya., Mukhametrakhimov M.Kh. (2025). The use of superplastic interlayers in solid-phase welding technology. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(3), 335-341. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.009.

Введение

Одним из наиболее эффективных методических приемов использования сверхпластичности (СП) при проведении твердофазной сварки является применение сверхпластичных прокладок между соединяемыми заготовками [1,2]. Ранее было известно о применении обычных пластичных промежуточных прокладок при сварке давлением, например, об этом упоминается в монографии Э.С. Каракозова [3], изданной в 1986 году. Развитие методического приема сварки давлением с использованием промежуточных прокладок связано с применением в технологии явления структурной СП. Изучение деформационного эффекта СП, позволило экспериментально выявить его влияние на механизм и ускоренную кинетику формирования твердофазного соединения при сварке мелкозернистых материалов [4,5]. Этот фундаментальный результат лег в основу для разработок технологий твердофазной сварки сверхпластичных материалов и, как показали дальнейшие исследования, носит универсальный ха-

рактер [6]. Расширение технологических возможностей деформационной обработки стало возможным с выявлением при пониженных температурах так называемой «низкотемпературной» СП [7,8] в нано- и ультрамелкозернистых (УМЗ) сплавах.

Успешная твердофазная сварка в режиме СП возможна в случае реализации сверхпластической деформации прежде всего в сварной зоне [6]. При этом наиболее рационально, чтобы сверхпластической деформации подвергались не сами свариваемые заготовки, а что более технологичнее, если она была бы ограничена узкой соединяемой зоной. Такая идея твердофазной сварки через промежуточную сверхпластичную прокладку была изложена в патентах РФ №2291019 [1] и №2415738 [2].

Целью данной статьи является краткий обзор экспериментальных результатов, связанных с твердофазной сваркой, основанной на использовании промежуточных сверхпластичных прокладок между соединяемыми материалами.

Материал и методики эксперимента

Объектом исследования были широко используемые в авиакосмической промышленности отечественные двухфазные титановые сплавы типа ВТ6, ВТ8 и ВТ14 в различных структурных состояниях – ультрамелкозернистом (УМЗ), мелко- и крупнозернистом. Рассмотренные мелкозернистые титановые сплавы проявляют традиционную СП [9], а УМЗ титановые сплавы кроме традиционной, также способны также к «низкотемпературной СП» при пониженных температурах [10,11].

Сварку давлением с использованием сверхпластичных листовых прокладок между соединяемыми заготовками осуществляли согласно методикам, представленным в работах [12,13].

Изучение микроструктуры сварных образцов проводили на растровых и просвечивающих электронных микроскопах [12-14].

Механические испытания при комнатной температуре сварных образцов осуществляли по известным и стандартным методикам [12-14].

Результаты и обсуждение

Эксперименты, проведенные по твердофазной сварке двух крупнозернистых заготовок, показали возможность достижения качественного соединения (рис.1). При этом основная деформация была сосредоточена в узкой мелкозернистой прокладке, что обеспечивает в целом незначительные изменения геометрических размеров свариваемых заготовок. Это обстоятельство представляется весьма привлекательным для технологии, так как значительные деформации при твердофазной сварке со значительным изменением габаритных размеров сварного полуфабриката в ряде случаев являются технически неприемлемыми [15].

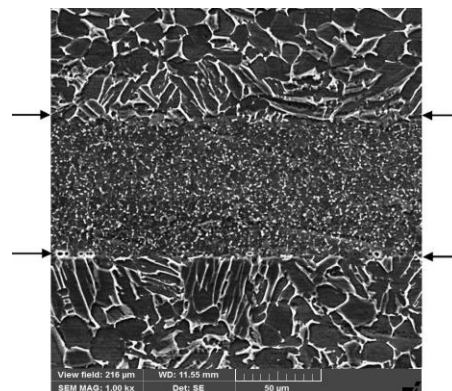


Рис.1. Микроструктура зоны твердофазного соединения крупнозернистого сплава ВТ6 после сварки (осадки) при температуре 750 °С через УМЗ прокладку из того же сплава

Fig.1. Microstructure of the zone of solid-phase joint of coarse-grained VT6 alloy after welding (upsetting) at a temperature of 750 °C through an UFG interlayer made of the same alloy

Использование промежуточных УМЗ прокладок позволяет успешно сваривать при пониженных температурах, в частности, при температуре 700 °С заготовки из промышленного проката титанового сплава ВТ6 (рис. 2), что делает процесс твердофазной сварки экономически более предпочтительным для применения в промышленных технологиях по сравнению с традиционной диффузионной сваркой при температурах 900 – 950 °С.

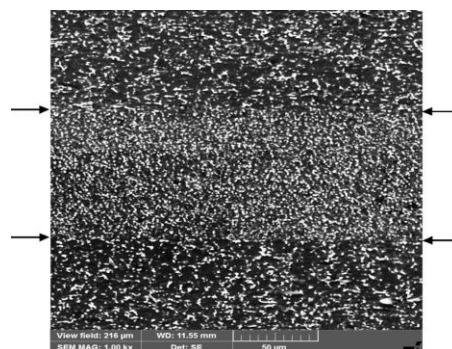


Рис.2. Микроструктура зоны твердофазного соединения микрокристаллического сплава ВТ6 после сварки осадкой при температуре 700 °С через промежуточную УМЗ прокладку из того же сплава

Fig.2. The microstructure of the zone of solid-phase joint of the microcrystalline alloy VT6 after welding by upsetting at a temperature of 700 °C through an UFG interlayer made of the same alloy

За счет использования УМЗ прокладок из высокопрочных сплавов возможно, в частности, успешное решение нетривиальной задачи достижения повышенных механических свойств сварных образцов по сравнению с базовым материалом. Такие эксперименты по сварке давлением проводили следующим образом. Соединяли листовые заготовки из титанового сплава ВТ6 через промежуточный сверхпластичный лист из более высокопрочного титанового ВТ14. В результате соединения получается, по сути, слоистый композит, в котором содержатся две зоны раздела металлов – между титановыми сплавами ВТ6 и ВТ14 (зона соединения ВТ6 + ВТ14 и зона соединения ВТ14 + ВТ6).

Во втором случае соединяли листовые заготовки из титанового сплава ВТ6 между собой без промежуточного листа. На рис. 3 представлена микроструктура сварного соединения промышленного титанового сплава ВТ6 с применением промежуточной сверхпластичной (при 700 °С) прокладки из УМЗ сплава ВТ14.

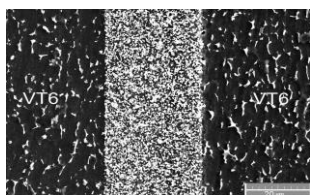


Рис.3. Микроструктура зоны ТФС с промежуточной УМЗ прокладкой из сплава ВТ14 после сварки давлением сплава ВТ6 при температуре $T=700\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig.3. Microstructure of the SPJ zone with an intermediate UMZ interlayer out of VT14 alloy after welding pressure of VT6 alloy at a temperature of $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$

Согласно исследованиям фазового состава титановых сплавов типа ВТ6 известно [9], что после нагрева и выдержки при температуре СП происходит заметное повышение количества объемно-центрированной кубической (ОЦК) β -фазы, которая обладает более высокой диффузионной проницаемостью, чем гексагональная плотноупакованная (ГПУ) α -фаза [16], приводящее к росту эффективного коэффициента диффузии сплава. Кроме того, в двухфазном титановом сплаве ВТ6 пластичная β -фаза, имеющая объемно-центрированную кубическую (ОЦК) решетку, может играть заметную роль в деформационном «залечивание» пор [17]. В процессе СП деформации β -фаза, являясь более пластичной, чем гексагональная плотноупакованная (ГПУ) α -фаза, проникая в полость пор, разделяет их на более мелкие и/или полностью заполняет их с повышением степени деформации [17].

С уменьшением размера зерен увеличивается суммарная протяженность их границ, повышается значимость механизма зернограницного проскальзывания (ЗГП) [9-11] и создаются условия для проявления низкотемпературной СП сплавов [7,10,11].

Анализ результатов механических испытаний на растяжения показал, что сварка давлением при $T = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ листовых заготовок мелкозернистого сплава ВТ6 через сверхпластичную УМЗ прокладку из сплава ВТ14 приводит к повышению механических свойств и качества соединения (рис. 3) [18].

Результаты механических испытаний при комнатной температуре на растяжение и на сдвиг образцов, приведены в таблице 1 [18].

Таблица 1. Результаты механических испытаний сварных образцов

Table 1. Results of mechanical tests of welded samples

№	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	$T_{ср}$, МПа	Вариант соединения
1	989	1007	17,2	528	Сварка при $T=700\text{ }^{\circ}\text{C}$ сплава ВТ6 без промежуточного листа
2	1008	1025	19,4	649	Сварка при $T=700\text{ }^{\circ}\text{C}$ через СП лист из УМЗ сплава ВТ14

Из таблицы 1 видно, что использование промежуточного, сверхпластичного при $T=700\text{ }^{\circ}\text{C}$ листа из ВТ14 приводит к увеличению прочности сварных образцов при фиксируемой тенденции к повышению пластичности.

Как показывают результаты экспериментов, использование УМЗ сплава ВТ14 приводит к твердофазному соединению с мелкозерни-

стым сплавом ВТ6 при более низкой температуре, соответствующей низкотемпературной СП сплава ВТ14.

Сварка разноструктурных титановых сплавов может быть востребованной в промышленности при создании металлических слоистых композитов с уникальными свойствами [19,20].

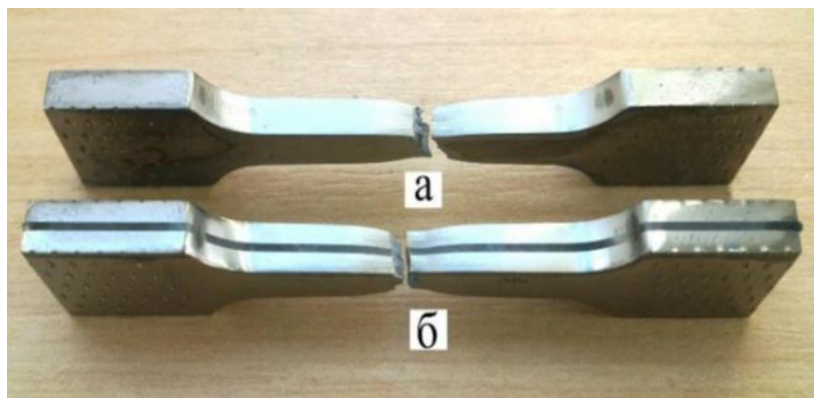


Рис.4. Внешний вид разрушенных сварных образцов, после испытания на растяжение: а) сварка без промежуточного листа и б) сварка через промежуточный сверхпластичный лист [17].

Fig.4. Appearance of destroyed welded samples, after tensile testing: a) welding without an intermediate sheet and b) welding through an intermediate superplastic sheet [17].

Метод твердофазной сварки через сверхпластичную прокладку является универсальным, позволяющим успешно соединять, в частности, крупнозернистые заготовки из жаропрочных никелевых сплавов, которые невозможно сварить традиционной диффузионной сваркой [21]. В работе [21], например, представлены результаты экспериментов по успешной твердофазной сварке при 800 °С крупнозернистых заготовок из жаропрочного никелевого сплава 58Ni-Cr-Mo-V-Al-Cu с использованием УМЗ сверхпластичной прокладки из того же сплава.

Заключение

1. Деформация в режиме сверхпластичности позволяет успешно применять промежуточные сверхпластичные прокладки для твердофазной сварки без специальной подготовки регламентированной структуры в свариваемых заготовках.

2. Использование в процессе сварки давлением промежуточных прокладок с УМЗ структурой открывает перспективу снижения температуры твердофазного соединения за счет реализации при деформации эффекта низкотемпературной сверхпластичности.

3. Метод сварки давлением через сверхпластичную прокладку универсален для титановых и жаропрочных никелевых сплавов и может использоваться при соединении разноименных сплавов, а также при создании слоистых металлических композитов.

Список литературы

1. Кайбышев О.А., Круглов А.А., Лутфуллин Р.Я. Способ изготовления изделия путем сверхпластической формовки и диффузионной сварки // Патент РФ № 2291019 от 10.01.2007.
2. Мулюков Р.Р., Рыбин В.В., Валиахметов О.Р. и др. Сварка давлением заготовок из титанового сплава // Патент РФ № 2415738 от 10.04.2011.
3. Каракозов Э.С. Сварка давлением. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
4. Шоршоров М.Х., Дзенадзе Э.М., Тихонов А.С. и др. Сварка титановых сплавов OT4, BT6 и BT15 в твердом состоянии в режиме сверхпластичности // Сварочное производство. 1975. №11. С. 20–21.
5. Кайбышев О.А., Лутфуллин Р.Я., Бердин В.К. Механизм формирования твердофазного соединения в состоянии сверхпластичности // Доклады Академии наук. 1991. Т. 319. № 3. С. 615–618.
6. Лутфуллин Р.Я. Влияние сверхпластичности на твердофазную свариваемость кристаллических материалов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20. № 1. С. 132–133.
7. Валиев Р.З., Кайбышев О.А., Кузнецов Р.И. и др. Низкотемпературная сверхпластичность металлических материалов // Доклады академии наук. 1988. Т. 301. № 4. С. 864–866.
8. Лутфуллин Р.Я. Сверхпластичность и твердофазное соединение наноструктурированных материалов. Часть II. Физическая модель формирования твердофазного соединения в титановом сплаве в условиях низкотемператур-

ной сверхпластичности // Письма о материалах. 2011. Т. 1. № 2. С. 88–91.

9. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. М.: Металлургия, 1984. 264 с.

10. Мулюков Р.Р., Имаев Р.М., Назаров А.А. и др. Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: Эксперимент, теория, технологии. М.: Наука, 2014. 284 с.

11. Salishchev G.A., Galeev R.M., Valiakhmetov O.R., Safiullin R.V., Lutfullin R.Ya., Senkov O.N., Froes F. H., Kaibyshev O.A. Development of Ti-6Al-4V sheet with low temperature superplastic properties // Journal of Materials Processing Technology. 2001. V. 116(2-3). P. 265–268.

12. Мухаметрахимов М.Х. Получение высокопрочных слоистых композитных материалов из титанового сплава ВТ6 в условиях низкотемпературной сверхпластичности // Булатовские чтения. 2018. Т. 6. С. 65–69.

13. Mukhametrakhimov M. Mechanical properties and structure of welded joints of VT6 alloy through nanocrystalline interlayer of VT22 // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1008 (2020) 012039.

14. Мухаметрахимов М.Х. Получение сварных соединений из разнородных титановых сплавов в условиях низкотемпературной сверхпластичности // Информационные технологии. Проблемы и решения. 2022. Т. 1. № 18. С. 48–54.

15. Булков А.Б., Пешков В.В., Петренко В.Р., Балбеков Д.Н. Анализ деформации металла в зоне соединений при диффузионной сварке титановых оболочковых конструкций // Сварочное производство. 2011. № 11. С. 18–24.

16. Бокштейн С.З., Зюлина Н.П., Маркович О.В. Диффузионные особенности внутренних поверхностей раздела в титановых сплавах // Физика металлов и металловедение. 1989. Т. 68. Вып. 1. С. 104–109.

17. Kaibyshev O.A., Safiullin R.V., Lutfullin R.Y. and Astanin V.V. On the model of solid-state joint formation under superplastic forming conditions // J. Mater. Eng. Performance. 1999. V. 8. No. 2. P. 205–210.

18. Мухаметрахимов М.Х. Получение сварных соединений из разнородных титановых сплавов в условиях низкотемпературной сверхпластичности // Письма о материалах. 1917. Т. 7. № 2. С. 193–197.

19. Ганеева А.А., Круглов А.А., Лутфуллин Р.Я. Свойства слоистого композиционного материала и перспективы его использования // Деформация и разрушение материалов. 2011. №7. С. 38–40.

20. Sarkeeva A.A., Kruglov A.A. Characteristics of the mechanical behavior of a near-alpha multilayer laminate under impact loading // Letters on Materials. 2023. T. 13. № 4s. C. 488–492.

21. Valitova E.V., Lutfullin R.Ya., Mukhametrakhimov M.Kh. et al. Pressure welding of nickel-based 58Ni-Cr-Mo-B-Al-Cu alloy under low-temperature superplasticity conditions // Letters on materials. 2014. V. 4. No. 4. P. 291–294.

Информация об авторах

Р. Я. Лутфуллин – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института проблем сверхпластичности металлов РАН. Телефон: +7 (347) 282-38-54

М. Х. Мухаметрахимов – кандидат технических наук, научный сотрудник Института проблем сверхпластичности металлов РАН. Телефон: +7 (347) 282-38-54

References

1. Kaibyshev, O. A., Kruglov, A. A. & Lutfullin, R. Ya. A method of manufacturing an article by superplastic forming and diffusion welding. *Patent of the Russian Federation No. 2291019 dated 10.01.2007.*

2. Mulyukov, R. R., Rybin V. V., Valiakhmetov, O. R. et al. Pressure welding of titanium alloy workpieces. *Patent of the Russian Federation No. 2415738 dated 10.04.2011.*

3. Karakozov, E. S. (1986). Pressure welding. M: Mashinostroyeniye. P. 280. (In Russ.).

4. Shorshorov, M. Kh., Dzeladze, E. M. & Tkhonov, A. S. et al. (1975). Welding of titanium alloys OT4, VT6 and VT15 in the solid state in the superplasticity mode. *Svarochnoye proizvodstvo*, (11). 20–21. (In Russ.).

5. Kaibyshev, O. A., Lutfullin, R. Ya. & Berdin, V. K. (1991). The mechanism of formation of a solid-phase joint in a state of superplasticity. *Doklady Akademii nauk*, 319 (3). 615–618. (In Russ.).

6. Lutfullin, R. Ya. (2023). The effect of superplasticity on the solid-phase weldability of crystalline materials. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of*

- Material Science (BPMS)*), 20(1), 132–138. (In Russ.).
7. Valiev, R. Z., Kaibyshev, O. A. & Kuznesov, R. I. et al. (1988). Low-temperature superplasticity of metal materials. *Doklady Akademii nauk*, 301 (4). 864–866. (In Russ.).
8. Lutfullin, R. Ya. (2011). Superplasticity and solid-phase bonding of nanostructured materials. Part II. A physical model of the formation of a solid-phase compound in a titanium alloy under conditions of low-temperature superplasticity. *Letters on Materials*, 1 (2). 88–91. (In Russ.).
9. Kaibyshev, O. A. (1984). Сверхпластичность промышленных сплавов. М: Metallurgiya. P. 264. (In Russ.).
10. Mulyukov, R. R., Imayev, R. M. Nazarov, A. A., Imayev, M. F. & Imayev, V. A. et al. (2014). Superplasticity of ultrafine-grained alloys: Experiment, theory, technology. М: Nauka. P. 284. (In Russ.).
11. Salishchev, G. A., Galeev, R. M., Valiakhmetov, O. R., Safiullin, R. V., Lutfullin, R. Ya., Senkov, O. N., Froes, F. H. & Kaibyshev, O. A. (2001). Development of Ti-6Al-4V sheet with low temperature superplastic properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 116 (2-3). P. 265–268.
12. Mukhametrakhimov, M. Kh. (2018). Production of high-strength layered composite materials from titanium alloy VT6 under conditions of low-temperature superplasticity. *Bulatov's readings*, 6. P. 65–69. (In Russ.).
13. Mukhametrakhimov, M. (2020). Mechanical properties and structure of welded joints of VT6 alloy through nanocrystalline interlayer of VT22. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 1008 (2020) 012039.
14. Mukhametrakhimov, M. Kh. (2022). Production of welded joints from dissimilar titanium alloys under conditions of low-temperature superplasticity. *Information technology. Problems and solutions*, 1 (18). P. 48–54. (In Russ.).
15. Bulkov, A. B., Peshkov, V. V., Petrenko, V. R. & Balbekov, L. N. (2011). Analysis of metal deformation in the joint area during diffusion welding of titanium shell structures. *Welding production*, 11. P. 18–24. (In Russ.).
16. Bokshtein, S. Z., Zyulina, N. P. & Markovich, O. V. (1989). Diffusion features of internal interfaces in titanium alloys. *The Physics of Metals and Metallography*, 68 (1). P. 104–109. (In Russ.).
17. Kaibyshev, O. A., Safiullin, R. V., Lutfullin, R. Y. and Astanin, V. V. (1999). On the model of solid-state joint formation under superplastic forming conditions. *J. Mater. Eng. Performance*. 8 (2). P. 205–210.
18. Mukhametrakhimov, M. Kh. (2017). Making weld joints of dissimilar titanium alloys under low-temperature superplasticity conditions. *Letters on Materials*, 7 (2). P. 193–197. (In Russ.).
19. Ganeeva, A. A., Kruglov, A. A. & Lutfullin, R. Ya. (2011). Properties of a layered composite material and prospects for its use. *Deformation and destruction of materials*. 7. P. 38–40. (In Russ.).
20. 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). P. 488–492.
21. Valitova, E. V., Lutfullin, R. Ya. & Mukhametrakhimov, M. Kh. et al. (2014). Pressure welding of nickel-based 58Ni-Cr-Mo-B-Al-Cu alloy under low-temperature superplasticity conditions. *Letters on materials*. 4 (4). P. 291–294.

Information about the authors

R. Ya. Lutfullin – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher at the Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences. Telephone: +7 (347) 282-38-54

M. Kh. Mukhametrakhimov – Ph. D., Research Scientist at the Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences. Telephone: +7 (347) 282-38-54

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

Статья поступила в редакцию 08.08.2025; одобрена после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 01.09.2025.

The article was received by the editorial board on 08 Aug. 2025; approved after reviewing 25 Aug. 2025; accepted for publication 01 Sep. 2025.