

Научная статья

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

УДК 621. 791.4:669.295

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.016

ВЛИЯНИЕ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ НА ТВЕРДОФАЗНУЮ СВАРИВАЕМОСТЬ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Рамиль Яватович Лутфуллин

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина, 39, 450001, Уфа, Россия
Уфимский государственный нефтяной технический университет, ул. Космонавтов, 1, 450064, г. Уфа, Россия
lutfullin.ramil@imsp.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4638-3206>

Аннотация. Классическая диффузионная сварка, осуществляемая при температуре, близкой к $0,8T_{пл}$ кристаллического сплава, под действием напряжений ниже напряжения течения и без осуществления макропластической деформации фактически является структурно-неконтролируемым технологическим процессом. Это обстоятельство часто приводит к невозможности достижения гарантированного качества твердофазного соединения (ТФС) после диффузионной сварки. Кардинальное решение проблемы обеспечения высокого качества твердофазного соединения достижимо при использовании эффекта структурной сверхпластичности (СП). Впервые, влияние СП на повышение технологичности сварки в твердом состоянии труднообрабатываемых титановых сплавов, обнаружили и опубликовали советские исследователи в 1975 году. На сегодняшний день твердо установлена определяющая роль сверхпластической деформации в достижении требуемого качества сварки при температурах $0,6-0,4$ от $T_{пл}$ на примере целого ряда титановых, алюминиевых, жаропрочных никелевых сплавов и сталей. При этом, влияние низкотемпературной СП при температурах, составляющих $0,4$ от $T_{пл}$ на твердофазную свариваемость материалов, вызывает научно-практический интерес у исследователей и инженеров, оставаясь актуальной научно-технической задачей.

Ключевые слова: сверхпластичность, твердофазная свариваемость, кристаллические материалы.

Благодарности: Работа выполнена в рамках госзадания № НИОКТР 122011900474-5.

Для цитирования: Лутфуллин Р.Я. Влияние сверхпластичности на твердофазную свариваемость кристаллических материалов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 1. С. 132–138. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.016.

Original article

THE EFFECT OF SUPERPLASTICITY ON THE SOLID-PHASE WELDABILITY OF CRYSTALLINE MATERIALS

Ramil Ya. Lutfullin

Institute for Problems of Superplasticity of Metals of the Russian Academy of Sciences, Stepan Khalturina Str., 39, Ufa, 450001, Russia
Ufa State Oil Technical University, Kosmonavtov St., 1, Ufa, 450064, Russia
lutfullin.ramil@imsp.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4638-3206>

Abstract. Classical diffusion bonding, carried out at a temperature close to $0.8 T_{melting}$ of a crystalline alloy, under the influence of stresses below the flow voltage without macroplastic deformation, is actually a structurally uncontrolled technological process. This circumstance often leads to uncertainty in achieving guaranteed quality of the solid-phase joint (SPJ) after diffusion bonding. A cardinal solution to the problem of ensuring high quality of a SPJ is possible by using the effect of structural superplasticity (SP). For the first time, the influence of the joint venture on the possibility of improving the manufacturability of welding in the solid state of hard-to-process titanium alloys was discovered and published by Soviet researchers in 1975. To date, the determining role of superplastic deformation in achieving the required bonding quality at temperatures of $0.6-0.4$ of $T_{melting}$ has been experimentally firmly proven for a number of titanium, aluminum, heat-resistant nickel alloys and steels. At the same time, the influence

of low-temperature SP at temperatures of 0.4 of T_{melting} on the formation of a reliable SPJ is of both scientific and practical interest to researchers and engineers, being an urgent scientific and technical task.

Keywords: superplasticity, solid-phase weldability, crystalline materials.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the state task No. R&D 122011900474-5.

For citation: 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.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.01.016.

Введение

Твердофазная сварка кристаллических материалов в состоянии сверхпластичности (СП) – инновационный технологический метод обработки, основанный на использовании эффекта структурной СП [1]. Физическая основа этого метода – сверхпластическая деформация [2].

Впервые, влияние СП на возможность повышения технологичности сварки в твердом состоянии труднообрабатываемых титановых сплавов обнаружили и опубликовали советские исследователи [3] в 1975 году. Авторы [3] показали существенное (в 4 раза) снижение необходимого сварочного усилия и сокращение (6...30 раз) длительности процесса по сравнению с традиционной сваркой давлением.

Необходимо отметить, что классическая диффузионная сварка [4], по сути, являющаяся разновидностью сварки давлением [5], проводится при температурах, близких к 0,8 от температуры плавления свариваемых сплавов при ограниченной пластической деформации. В этой связи, на практике, процесс диффузионной сварки сверхпластичных сплавов реализует начальную стадию сверхпластического течения. Следовательно, понимание механизма влияния структурной СП на кинетику формирования твердофазного соединения (ТФС) может быть полезным для расширения технологических возможностей, например, температурного интервала свариваемости кристаллических материалов при сварке давлением.

Целью данной статьи является краткий обзор исследований, связанных с выявлением влияния структурной СП на твердофазную свариваемость кристаллических материалов и поиск перспектив дальнейшего использования СП в инновационных технологиях твердофазной сварки материалов.

Материал и методики эксперимента

В качестве объектов исследования были рассмотрены мелкозернистые и ультрамелкозернистые (УМЗ) материалы, относящиеся к различным классам и проявляющие в опреде-

ленных температурно-скоростных условиях сверхпластическое течение, в частности, титановые, алюминиевые, никелевые сплавы, стали, интерметаллиды и керамика [1, 2, 6-11].

Основной метод исследования – физическое моделирование процесса твердофазной сварки давлением [9, 10].

Исследования микроструктуры сварных образцов проводили с использованием растровых и просвечивающих электронных микроскопов [10, 12-14].

Механические испытания осуществляли по известным и стандартным методикам [9, 10, 12-14].

Результаты и обсуждение

Влияние скорости деформации на твердофазную свариваемость

Наиболее удобными объектами для исследования твердофазной свариваемости служат двухфазные титановые сплавы, проявляющие «природную» СП [8] и в которых возможно относительно легко получить широкий спектр структур от крупнозернистых до УМЗ, включая нанокристаллические [1].

Рассмотрим известные [10] зависимости сдвиговой прочности твердофазного соединения в мелкозернистых (тип А) и крупнозернистых образцах (тип Б) сплава ВТ14 от времени (t) деформации, которые представлены на рис.1. Для формирующегося твердофазного соединения в образцах А типа наиболее сильная зависимость прочности сдвиговой прочности от времени характерна для деформации, близкой к оптимальной со скоростью $\xi = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$, соответствующая II (оптимальной) области СП [11] (кривая А₂). Деформация образцов в III (высокая скорость) области СП (кривая А₃) не приводит к существенному изменению прочности ТФС. Кривая А₁, отражающая зависимость прочности среза от времени при деформации образцов в I области (ползучесть) СП, занимает промежуточное положение между кривыми А₂

и А₃. В образцах типа Б, деформированных со скоростью деформации $\xi = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ (имитация условий традиционной горячей деформации) прочность ТФС на начальной стадии деформации изменяется слабо и только после 300 секунд, что соответствует деформации $\varepsilon = 5 \dots 10 \%$, наблюдается тенденция к ее росту (кривая Б₂). Результаты структурных изменений (изменение пористости и площади схваты-

вания) коррелируют с эволюцией механических свойств. Аналогичные результаты по влиянию скорости деформации были получены и при твердофазном соединении модельной мелкозернистой керамики Vi_2O_3 (рис.2). Видно, что свойства основного материала достигаются при осуществлении деформации в условиях, соответствующих оптимуму СП.

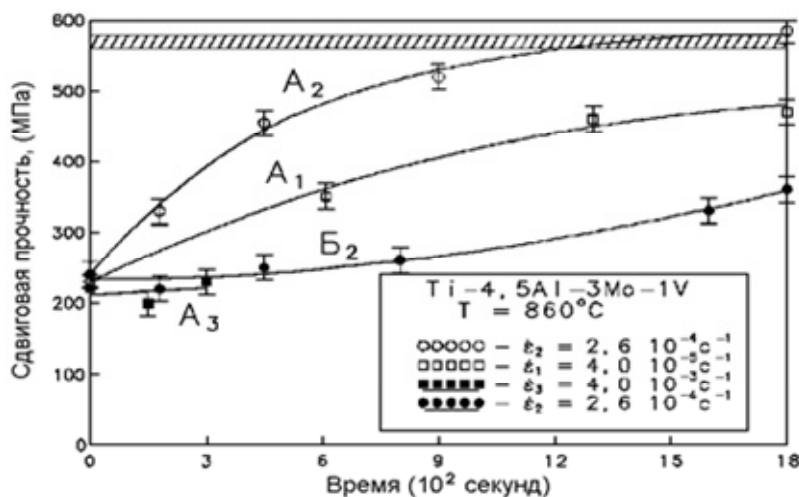


Рис.1. Зависимость прочности ТФС τ_{cp} от времени деформации образцов А (микрокристаллическая структура) и Б (крупнозернистая пластинчатая структура) типа из сплава ВТ14 при $T = 860 \text{ }^\circ\text{C}$. А₁ (□) – $\xi = 4,0 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$; А₂ (○) – $\xi = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$; Б₂ (●) – $\xi = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$; А₃ (■) – $\xi = 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ c}^{-1}$

Fig.1. Dependence of the TFS strength τ_{av} on the deformation time of samples A (microcrystalline structure) and B (coarse-grained lamellar structure) of the VT14 alloy type at $T = 860 \text{ }^\circ\text{C}$. А₁ (□) – $\xi = 4,0 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; А₂ (○) – $\xi = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$; Б₂ (●) – $\xi = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$; А₃ (■) – $\xi = 4,0 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

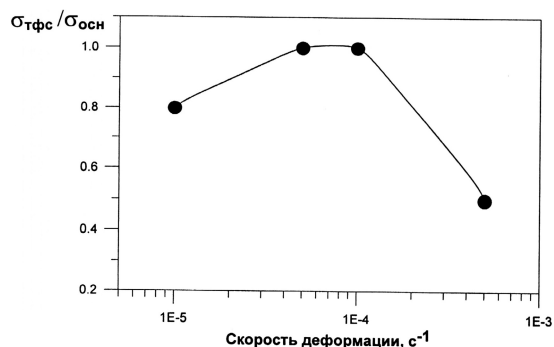


Рис.2. Изменение отношения $\sigma_{тфс}/\sigma_{осн}$ для Bi_2O_3 керамики в зависимости от скорости деформации при температуре сварки $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ и степени деформации $\varepsilon = 15 \%$

Fig.2. Change in the ratio $\sigma_{tfs}/\sigma_{base}$ for Bi_2O_3 ceramics depending on the strain rate at the welding temperature $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ and the degree of deformation $\varepsilon = 15 \%$

Влияние степени деформации на твердофазную свариваемость

Положительное влияние степени сверхпластической деформации на качество ТФС показано на примере сварки большого количества

кристаллических материалов – алюминиевых сплавов, титановых сплавов, сталей, жаропрочных никелевых сплавов, интерметаллидов и керамики [5, 7, 9, 10, 12-21]. Особенности твердофазной сварки в условиях сверхпластической деформации является незначительное снижение

прочности получаемого соединения при росте пластичности сваренных образцов и ударной вязкости, обусловленное ростом зерен [18-21]. Эта особенность особенно наглядно проявляется при переходе к УМЗ материалам [18-21]. На примере титановых сплавов установлена необходимость существенно меньшей степени деформации при сварке УМЗ образцов для достижения равнопрочного соединения [18-21].

Влияние отжига на заличивание пор в сварных соединениях

Отжиг активизирует диффузионные процессы в пределах зоны твердофазного соединения и его роль неоднозначна по формированию механических свойств. Для титановых сплавов отжиг практически не влияет на уменьшение размеров пор, сопоставимых или больше среднего размера зерен [20, 21], в жаропрочных никелевых сплавах возможно проявление эффекта Киркендала, но самым неблагоприятным фактором может служить выделение вторичных интерметаллидных фаз по границе твердофазного соединения, например при сварке разнородных сплавов [5, 22].

Универсальность влияния сверхпластичности на твердофазную свариваемость

Повышение качества ТФС при сварке давлением в режиме проявления сверхпластической деформации отмечено для большинства кристаллических материалов, включая металлические сплавы [7, 9-21], интерметаллиды [7, 9, 12] и керамику [7, 9]. Наиболее ярко воздействие СП на твердофазную свариваемость выявлено при сварке двухфазных титановых сплавов, которые склонны к проявлению «природной СП» [8] при хорошей растворимости оксидной пленки в процессе нагрева в вакууме [22]. Сложнее обстоят дела с твердофазной сваркой алюминиевых сплавов. Для разрушения прочной поверхностной оксидной пленки алюминиевых сплавов, обычно требуется значительная деформация [7, 9].

Влияние размера зерен на твердофазную свариваемость

Результаты механических испытаний твердофазного соединения на сдвиговую прочность в зависимости от температуры сварки и исходного структурного состояния титанового сплава ВТ14 с исходной мелкозернистой (1,5 мкм) и крупнозернистой (300 мкм) структурой представлены на рис.1. Условия твердофазной сварки отличались лишь по температуре, сварочное давление было постоянным и составляло

2,0 МПа, длительность сварки также была постоянной и равнялась $3,6 \cdot 10^2$ секундам. Результаты механических испытаний наглядно иллюстрируют, что наиболее качественное соединение достигается в температурных условиях, близких к оптимальному проявлению сверхпластичности. При уменьшении среднего размера зерен от более 300 мкм до 1,5 мкм фиксируемая температура схватываемости сплава ВТ14 понижается примерно на 120 °С, достигая нижнего температурного значения $T = 700$ °С. Как известно [22], при температуре 700 °С диффузионные процессы в титановых сплавах существенно подавлены и наблюдаемый эффект схватывания вероятнее всего определяется особенностями механизма деформации микрокристаллических материалов, важную роль в котором играет зернограничное проскальзывание [2, 6, 8, 11]. Действительно, как показали результаты фрактографических исследований излома ТФС, первичные очаги схватывания наблюдаются по локальным группам зерен, вероятно, участвующих в зернограничном проскальзывании. При этом, резкая активизация диффузии по границам зерен при развитии ЗГП [1, 2, 6, 11], по всей видимости, обеспечивает эффективную локальную «очистку» поверхности соединяемого сплава до ювенильного состояния, в которых и наблюдаются первичные очаги схватывания [9, 13]. Таким образом, при уменьшении размера зерен и обеспечения условий развития в материале ЗГП, возможно ожидать определенного понижения температуры схватывания. В этой связи представляется интересным рассмотрение результатов экспериментов по твердофазной сварке УМЗ материалов в условиях проявления низкотемпературной СП.

Впервые, для сверхпластичных двухфазных титановых сплавов результаты по успешной твердофазной сварке УМЗ сплавов при пониженной температуре, составляющей 650 °С были опубликованы соответственно в 1994 (титановый сплав ВТ8) [24] и 1996 (титановый сплав ВТ6) [25] годах.

Серьезной научно-технической проблемой в авиационном машиностроении является твердофазная сварка жаропрочных никелевых сплавов, широко применяемых в турбореактивных двигателях гражданского назначения, включая ракетные двигатели [14]. Эта проблема, в первую очередь, определяется высокой температурой сварки и вытекающими из нее технологическими трудностями. Однако перевод жаропрочных никелевых сплавов Инконель 718 и его отечественного аналога сплава ЭК61 в

сверхпластичное состояние с исходным средним размером зерен $\sim 0,5$ мкм позволило успешно осуществить твердофазную сварку цилиндрических образцов при пониженных температурах, начиная с $T = 850$ °С [14, 26-27].

Уменьшение зерен до УМЗ состояния в интерметаллиде TiAl приводит к проявлению в нем признаков низкотемпературной СП и позволяет успешно, уже при относительно низкой температуре 850 °С, сваркой давлением соединить в твердом состоянии цилиндрические образцы [12].

Опубликованные экспериментальные результаты успешной твердофазной сварки [7, 9, 12-21] прямо подтверждают выдвинутое ранее предположение об универсальном характере влияния СП на свариваемость в твердом состоянии однородных сверхпластичных материалов. В этой связи, на основе вышеизложенного и, принимая во внимание единую природу СП течения в металлах, интерметаллидах и керамике [1, 2, 6, 11], представляется справедливым утверждение о единой и, преимущественно деформационной, природе механизма формирования твердофазного соединения для любых неорганических материалов, соединяемых в СП состоянии.

Выводы

1. Влияние сверхпластичности на твердофазную свариваемость кристаллических материалов носит универсальный характер и приводит к повышению качества сварки с увеличением степени деформации.

2. Перспективным представляется использование эффекта низкотемпературной сверхпластичности в технологиях твердофазной сварки при пониженных температурах ультрамелкозернистых и нанокристаллических материалов, прежде всего применительно к труднообрабатываемым титановым и жаропрочным никелевым сплавам.

Список литературы

1. Мулюков Р.Р., Имаев Р.М., Назаров А.А. и др. Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: Эксперимент, теория, технологии. М.: Наука, 2014. 284 с.
2. Кайбышев О.А. Пластичность и сверхпластичность металлов. М.: Металлургия, 1975. 280 с.
3. Шоршоров М.Х., Дзнецладзе Э.М., Тихонов А.С. и др. Сварка титановых сплавов ОТ4, ВТ6 и ВТ 15 в твердом состоянии в режиме сверхпластичности // Сварочное производство. 1975. № 11. С. 20–21.

4. Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка в вакууме. М.: Машиностроение, 1968. 331 с.

5. Каракозов Э.С. Сварка давлением. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.

6. Kaibyshev O.A. Superplasticity of alloys, intermetallics and ceramics. Berlin; New York.: Springer-Verlag, 1992. 317 p.

7. Lutfullin R.Ya., Kaibyshev O.A. Superplasticity and Solid State Bonding of Materials // Materials Science Forum. 1997. V. 243–245. P. 681–686.

8. Новиков И.И., Портной В.К. Сверхпластичность сплавов с ультрамелким зерном. М.: Металлургия, 1981. 168 с.

9. Lutfullin R.Ya. Superplasticity and solid-state bonding of materials. Chapter 4.3. in Severe Plastic Deformation. Towards Bulk Production of Nanostructured materials. Ed. Burnhanrttin S. Altan. Nova Science Publishers. New York, 2006. P. 381–398.

10. Kaibyshev O.A., Lutfullin R.Ya., Berdin V.K. The effect of superplasticity on the solid state weldability of the titanium alloy Ti-4,5Al-3Mo-1V // Acta Metall. Mater. 1994. V. 42, N 8. P. 2609–2615.

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

12. Lutfullin R.Ya., Imaev R.M., Kaibyshev O.A., Hismatullin F.N., Imaev V.M. Superplasticity and solid state bonding of intermetallic compound with micro- and submicrocrystalline structure // Scripta Met. et Mat. 1995. V. 33, N 9. P. 1445–1449.

13. Kaibyshev O.A., Safiullin R.V., Lutfullin R.Y., Astanin V.V. On the Model of Solid State Joint Formation under Superplastic Forming Conditions // J. Mater. Eng. Perform. 1999. V. 8, N 2. P. 205–210.

14. Валитов В.А., Лутфуллин Р.Я., Мухтаров Ш.Х., Мухаметрахимов М.Х. Сварка давлением в состоянии сверхпластической деформации никелевого сплава Inconel 718 // Перспективные материалы. 2004. № 6. С. 78–82.

15. Ridley N., Wang Z.C., Lorimer G.W. Diffusion Bonding of a Superplastic Near-Alpha Titanium Alloy // Titanium'95: Sci. and Technol., Proc. 8 Int. Conf., London, 1995. P. 604–611.

16. Wang Z.C., Ridley N., Lorimer G.W., Knauss D., Briggs G.A.D. Evaluation of diffusion bonds formed between superplastic sheet materials // Journal of Materials Science. 1996. V. 31. P. 5199–5206.

17. Sherby O.D., Wadsworth J., Caligiuri R.D. et al. Superplastic Bonding of Ferrous Laminates // Scripta Met. 1979. V. 13. P. 941–946.

18. Лутфуллин Р.Я. Сверхпластичность и твердофазное соединение наноструктурированных материалов. Часть I. Влияние размера зерна на твердофазную свариваемость сверхпластичных сплавов // Письма о материалах. 2011. Т. 1. С. 59–64.
19. Lutfullin R.Ya., Kaibyshev O.A., Safiullin R.V., Valiakhmetov O.R., Mukhametrahimov M.H. Superplasticity and solid state bonding of titanium alloys // *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 2000. V. 13, N 2. P. 561–566.
20. Лутфуллин Р.Я., Мухаметрахимов М.Х. Влияние исходной структуры на механические свойства соединенных в сверхпластичном состоянии образцов титанового сплава ВТ6 // *Металловедение и термическая обработка материалов*. 2006. № 2. С. 11–13.
21. Лутфуллин Р.Я., Мухаметрахимов М.Х. Твердофазное соединение образцов наноструктурированного титанового сплава ВТ6 при пониженных температурах // *Перспективные материалы*. 2009. № 7. С. 189–193.
22. Хазгалиев Р.Г., Мухаметрахимов М.Х., Лутфуллин Р.Я., Мулюков Р.Р. Твердофазное соединение титанового сплава с нержавеющей сталью через наноструктурированную прослойку из никелевого сплава // *Перспективные материалы*. 2011. № 12. С. 529–534.
23. Cambell E.C. Manufacturing technology for aerospace structural materials. Amsterdam. Boston. Heidelberg. London. New York. Oxford. Paris. San Diego. San Francisco. Singapore. Sidney. Tokyo. Elsevier Ltd. 2006.
24. Kaibyshev O.A., Lutfullin R.Ya., Safiullin R.V., Fatkullin S.N. Problems and promises of integral technology based on the combination of superplastic forming and diffusion bonding (SPF/DB) // *Materials Science Forum*. 1994. V. 170–172. P. 737–742.
25. Kaibyshev O.A., Lutfullin R.Ya., Safiullin R.V. The effect of superplasticity on the solid state weldability of the titanium base materials // *Proc. of Confer. Current Advances in Mechanical Design and Production, Sixth Cairo University International MDP Conference, Cairo, 1996*. P. 73–80.
26. Валитова Э.В., Лутфуллин Р.Я., Мухаметрахимов М.Х., Валитов В.А. Влияние скорости и температуры деформации на микроструктуру и свойства ультрамелкозернистого свариваемого сплава ХН58МБЮД // *Перспективные материалы. Специальный выпуск*. Т. 15. 2013. С. 35–39.
27. Valitova E.V., Lutfullin R.Ya., Mukhametrakhimov M.Kh., Valitov V.A., Akhunova A.Kh., Dmitriev S.V. Pressure welding of nickel-based 58Ni-Cr-Mo-B-Al-Cu alloy under low-temperature superplasticity conditions // *Письма о материалах*. 2014. Т. 4. С. 291–294.

Информация об авторах

Р. Я. Лутфуллин – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

References

1. Mulyukov, R. R., Imayev, R. M. & Nazarov, A. A. et al. (2014). Sverkhplastichnost' ul'tramelkozernistykh splavov: Eksperiment, teoriya, tekhnologii. M: Nauka. P. 284. (In Russ.).
2. Kaybyshev, O. A. (1975). Plastichnost' i sverkhplastichnost' metallov. M: Metallurgiya. 280 c. (In Russ.).
3. Shorshorov, M. Kh., Dzeladze, E. M. & Tikhonov, A. S. et al. (1975). Svarka titanovykh splavov OT4, VT6 i VT 15 v tverdom sostoyanii v rezhime sverkhplastichnosti. *Svarochnoye proizvodstvo*, 11, 20–21. (In Russ.).
4. Kazakov, N. F. (1968). Diffuzionnaya svarka v vakuume. M: Mashinostroyeniye. P. 331. (In Russ.).
5. Karakozov, E. S. (1986). Svarka davleniyem. M: Mashinostroyeniye. P. 280. (In Russ.).
6. Kaibyshev, O. A. (1992). Superplasticity of alloys, intermetallides and ceramics. Berlin; New York: Springer-Verlag. P. 317.
7. Lutfullin, R. Ya. & Kaibyshev, O. A. (1997). Superplasticity and Solid State Bonding of Materials. *Materials Science Forum*, (243–245), 681–686.
8. Novikov, I. I. & Portnoy, V. K. (1981). Sverkhplastichnost' splavov s ul'tramelkim zernom. M: Metallurgiya. P. 168. (In Russ.).
9. Lutfullin, R. Ya. (2006). Superplasticity and solid-state bonding of materials. Chapter 4.3. in *Severe Plastic Deformation. Towards Bulk Production of Nanostructured materials*. Ed. Burnhanrttin S. Altan. Nova Science Publishers. New York. P. 381–398.
10. Kaibyshev, O. A., Lutfullin, R. Ya. & Berdin, V. K. (1994). The effect of superplasticity on the solid state weldability of the titanium alloy Ti-4,5Al-3Mo-1V. *Acta Metall. Mater.*, 8(42), 2609–2615.
11. Kaybyshev, O. A. (1984). Sverkhplastichnost' promyshlennykh splavov. M: Metallurgiya. P. 264. (In Russ.).
12. Lutfullin, R. Ya., Imayev, R. M., Kaibyshev, O. A., Hismatullin, F. N. & Imayev, V. M. (1995). Superplasticity and solid state bonding of intermetallic compound with micro- and submicro-

- crystalline structure. *Scripta Met. et Mat.*, 9(33), 1445–1449.
13. Kaibyshev, O. A., Safiullin, R. V., Lutfullin, R. Y. & Astanin, V. V. (1999). On the Model of Solid State Joint Formation under Superplastic Forming Conditions. *J. Mater. Eng. Perform.*, 2(8), 205–210.
14. Valitov, V. A., Lutfullin, R. Ya., Mukhtarov, Sh. Kh. & Mukhametrakhimov, M. Kh. (2004). Svarka davleniyem v sostoyanii sverkhplasticheskoy deformatsii nikelovogo splava Inconel 718. *Perspektivnyye materialy*, 6, 78–82. (In Russ.).
15. Ridley, N., Wang, Z. C. & Lorimer, G. W. (1995). Diffusion Bonding of a Superplastic Near-Alpha Titanium Alloy. *Titanium '95: Sci. and Technol., Proc. 8 Int. Conf., London*, 604–611.
16. Wang, Z. C., Ridley, N., Lorimer, G. W., Knauss, D. & Briggs, G. A. D. (1996). Evaluation of diffusion bonds formed between superplastic sheet materials. *Journal of Materials Science*, (31), P. 5199–5206.
17. Sherby, O. D., Wadsworth, J. & Caligiuri, R. D. et al. (1979). Superplastic Bonding of Ferrous Laminates. *Scripta Met.*, (13), 941–946.
18. Lutfullin, R. Ya. (2011). Sverkhplastichnost' i tverdogaznoye soyedineniye nanostrukturirovannykh materialov. Chast' I. Vliyaniye razmera zerna na tverdogaznyuyu svarivayemost' sverkhplastichnykh splavov. *Pis'ma o materialakh*, (1), 59–64. (In Russ.).
19. Lutfullin, R. Ya., Kaibyshev, O. A., Safiullin, R. V., Valiakmetov, O. R. & Mukhametrakhimov, M. H. (2000). Superplasticity and solid state bonding of titanium alloys. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2(13), 561–566.
20. Lutfullin, R. Ya. & Mukhametrakhimov, M. Kh. (2006). Vliyaniye iskhodnoy struktury na mekhanicheskiye svoystva soyedinennykh v sverkhplastichnom sostoyanii obratsov titanovogo splava VT6. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka materialov*, 2, 11–13. (In Russ.).
21. Lutfullin, R. Ya. & Mukhametrakhimov, M. Kh. (2009). Tverdogaznoye soyedineniye obratsov nanostrukturirovannogo titanovogo splava VT6 pri ponizhennykh temperaturakh. *Perspektivnyye materialy*, 7, 189–193. (In Russ.).
22. Khazgaliyev, R. G., Mukhametrakhimov, M. Kh., Lutfullin, R. Ya. & Mulyukov, R. R. (2011). Tverdogaznoye soyedineniye titanovogo splava s nerzhavayushchey stal'yu cherez nanostrukturirovannuyu prosloyku iz nikelovogo splava. *Perspektivnyye materialy*, 12, 529–534. (In Russ.).
23. Cambell, E. C. (2006). Manufacturing technology for aerospace structural materials. Amsterdam. Boston. Heidelberg. London. New York. Oxford. Paris. San Diego. San Francisco. Singapore. Sidney. Tokyo. Elsevier Ltd.
24. Kaibyshev, O. A., Lutfullin, R. Ya., Safiullin, R. V. & Fatkullin, S. N. (1994). Problems and promises of integral technology based on the combination of superplastic forming and diffusion bonding (SPF/DB). *Materials Science Forum*, (170–172), 737–742.
25. Kaibyshev, O. A., Lutfullin, R. Ya. & Safiullin, R. V. (1996). The effect of superplasticity on the solid state weldability of the titanium base materials. Proc. of Confer. Current Advances in Mechanical Design and Production, Sixth Cairo University International MDP Conference, Cairo. P. 73–80.
26. Valitova, E. V., Lutfullin, R. Ya., Mukhametrakhimov, M. Kh. & Valitov, V. A. (2013). Vliyaniye skorosti i temperatury deformatsii na mikrostrukturu i svoystva ul'tramelkozernistogo svarivayemogo splava KHN58MBYUD. *Perspektivnyye materialy. Spetsial'nyy vypusk*, (15), 35–39. (In Russ.).
27. Valitova, E. V., Lutfullin, R. Ya., Mukhametrakhimov, M. Kh., Valitov, V. A., Akhunova, A. Kh. & Dmitriev, S. V. (2014). Pressure welding of nickel-based 58Ni-Cr-Mo-B-Al-Cu alloy under low-temperature superplasticity conditions. *Pis'ma o materialakh*, (4), 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.

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

Статья поступила в редакцию 08.12.2022; одобрена после рецензирования 11.01.2023; принята к публикации 31.01.2023.

The article was received by the editorial board on 08 Dec. 22; approved after reviewing 11 Jan. 23; accepted for publication 31 Jan. 23.