

Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21. № 1. С. 75-81
Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS)). 2024; 1(21): 75-81

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.1811-1416.2024.01.009

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ТИТАНОВОГО СПЛАВА В ИЗДЕЛИЯХ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

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. Использование сверхпластической деформации (СПД) позволяет технологически успешно решать проблемы формообразования при изготовлении изделий сложного профиля, в частности, полых конструкций. Успешность изготовления деталей определяется не только высокой точностью воспроизведения геометрической формы, но и достижением заданных механических свойств материала в готовом изделии. Свойства титановых сплавов определяются не только структурой, но и химическим составом. Особенностью СПД является ускоренный рост зерен за счет существенной активизации диффузионных процессов по границам зерен, выравнивание зерен по размеру, сохранение их равноосности, повышение однородности распределения легирующих элементов внутри зерен и фаз, размытие кристаллографической структуры. Между тем, не только структура, но и химическая композиция сплава непрерывно эволюционируют в процессе его технологической обработки. Для ответственных авиационных деталей вопрос локальной или общей загрязненности титанового сплава легкими элементами, такими как азот, углерод, кислород, водород, может оказаться критичным с точки зрения достижения необходимого качества. В этой связи пути гарантированного обеспечения высокого качества деталей, полученных с использованием сверхпластичности (СП) связаны в первую очередь предотвращением загрязненности титанового сплава указанными вредными примесями. Такими путями являются – снижение температуры СПД за счет использования ультрамелкозернистых (УМЗ) исходных заготовок, а также существенное сокращение длительности нахождения титанового сплава при повышенных температурах на всех технологических этапах с обязательным применением защитной атмосферы или вакуума.

Ключевые слова: титановый сплав, полая конструкция, сверхпластичность, структура, химический состав, механические свойства.

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

Для цитирования: Лутфуллин Р.Я. Формирование структуры и свойств титанового сплава в изделиях, изготовленных с применением сверхпластической деформации // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21, № 1. С. 75-81. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.01.009.

Original article

FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF TITANIUM ALLOY IN PARTS MANUFACTURED USING SUPERPLASTIC DEFORMATION

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. The use of superplastic deformation (SPD) makes it possible to technologically successfully solve the problems of shaping of complex profile products, in particular, hollow structures. The success of manufacturing parts is determined not only by the high accuracy of reproducing the geometric shape, but also by achieving the specified mechanical properties of the material. The properties of alloys are determined not only by the structure, but also by the chemical composition. A feature of the SPD is accelerated grain growth due to the significant activation of diffusion along grain boundaries, grain size alignment, preservation of their equiaxed, increased uniformity of the distribution of alloying elements within grains, blurring of the crystallographic structure. Meanwhile, not only the structure, but also the chemical alloy composition is continuously evolving during its processing. For aircraft parts, the issue of contamination of titanium alloy with light elements, such as nitrogen, carbon, oxygen, hydrogen, may be decisive in terms of achieving the required quality. The ways to guarantee the high part quality are primarily related to the prevention of titanium alloy contamination with these harmful impurities. Such ways are – a decrease of the SPD temperature due to the use of ultrafine-grained (UFG) materials and reduction of the time spent on the workpieces at the processing temperature with the use of a protective atmosphere or vacuum.

Keywords: titanium alloy, hollow part, superplasticity, structure, chemical composition, mechanical properties.

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

For citation: Lutfullin, R. Ya. (2024). Formation of the structure and properties of titanium alloy in parts manufactured using superplastic deformation. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(1), 75-81. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.01.009.

Введение

Использование сверхпластической деформации (СПД) позволяет технологически успешно решать проблемы формообразования при изготовлении изделий сложного профиля, в том числе и полых конструкций [1, 2]. При этом широко востребованы технологические методы сверхпластической формовки (СПФ) и сварки давлением (СД), а также интегральные схемы СПФ/СД на основе их совмещения [1, 2].

Сверхпластичность (СП) [2, 3] обеспечивает изготовление заготовки детали с высокой точностью формы и малыми допусками перед окончательной механической обработкой [3-5]. Важным технологическим преимуществом СП в сравнении с традиционной пластической деформацией является отсутствие возникновения дополнительных внутренних напряжений и наклепа в кристаллическом материале после его деформационной обработки [3, 5], что определяется релаксационной природой механизма ее осуществления, в частности, развитием зернограничного проскальзывания [2, 3].

Несмотря на высокие формообразующие возможности технологий на основе СП титановых сплавов, экономически привлекательными они становятся только в случае существенного снижения традиционной температуры СПД [6], например, за счет использования полуфабрикатов с нано- или ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой [2, 6, 7].

Изделия, изготовленные сверхпластическим формоизменением, востребованы и ис-

пользуется в первую очередь в отраслях, связанных с авиакосмическим машиностроением [1, 2, 4-7].

Успешность изготовления деталей определяется не только высокой точностью воспроизведения геометрической формы, но и достижением заданных механических свойств материала в готовом изделии.

Целью данной статьи является краткий обзор исследований, связанных с выявлением влияния определенных факторов, влияющих на механическое качество деталей из титанового сплава ВТ6, изготовленных с использованием технологических методов сверхпластической формовки (СПФ) и сварки давлением (СД), а также интегральных схем СПФ/СД на основе их совмещения.

Материал и методики эксперимента

В качестве объекта исследования был рассмотрен, главным образом, проявляющий структурную СП мелкозернистый и УМЗ двухфазный титановый сплав ВТ6 [1, 2, 5-8], являющийся ближайшим аналогом популярного зарубежного сплава Ti-6Al-4V, широко используемого в авиакосмическом машиностроении [1, 5, 6].

Основной метод исследования – физическое моделирование процессов СПФ, СД и их совмещения СПФ/СД [1, 2, 5, 9, 10], а также структурные исследования и механические испытания сплава в полуфабрикатах и готовых изделиях [1, 2, 4, 5, 7, 9, 10].

Исследования микроструктуры сварных образцов проводили с использованием растровых и просвечивающих электронных микроскопов [1, 2, 10].

Механические испытания осуществляли по известным и стандартным методикам [1, 2, 5, 7, 10-13].

Результаты и обсуждение

Сверхпластическая формовка

СПФ полуфабрикатов изделий ответственного назначения из двухфазных титановых сплавов типа ВТ6 обычно проводят при температуре проявления традиционной СП, составляющей 900-927 °С со скоростью деформации в интервале $5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ [1, 2, 3, 9, 13] в вакууме [1, 13] или защитной атмосфере, например инертного газа аргона [1, 10]. Относительно высокая температура и длительность процесса формообразования приводят к заметному росту зерен, что приводит к определенному снижению прочности и пластичности сплава при нормальной температуре по отношению исходному полуфабрикату [1, 2, 5, 13]. С другой стороны, развитие основного деформационного механизма СП-зернограничного проскальзывания, обеспечивает однородность формирующейся структуры и равноосность зерен [3, 5, 8, 14]. Важным фактором достижения изотропности свойств в изделиях является размытие исходной кристаллографической текстуры [2, 8, 14] при ее наличии в исходном полуфабрикате. Сравнительные эксперименты по отжигу показали, что длительное нахождение титанового сплава ВТ6 при температуре деформации приводит к снижению его прочностных свойств и пластичности при комнатной температуре [15], что объясняется ростом зерен.

Между тем, следует признать, что не только исходная структура, но и химическая композиция титанового сплава непрерывно эволюционируют в процессе его термомеханической обработки [16]. Конкретно для титана (и его сплавов), как химически активного элемента, важно особо тщательно учитывать его интенсивное взаимодействие с окружающей средой в условиях повышенных температур при длительных временных циклах технологического процесса [16, 17], что характерно, в частности, при использовании СПД. При СП, как известно

[2, 8], резко активизируются диффузионные процессы вследствие активного развития зернограничного проскальзывания – основного механизма осуществления СПД.

Традиционно вредными примесями для титановых сплавов являются легкие элементы, образующие ограниченные твердые растворы внедрения, такие как азот, углерод, кислород, водород [16, 17], которые могут при определенных концентрациях как по отдельности, так и суммарно существенно, если не катастрофично, снижать пластичность при повышении твердости (прочности), и, что действительно опасно – снижать конструкционную прочность, а именно – усталостные свойства и трещиностойкость [16, 17]. Это обстоятельство определяет технологическую необходимость осуществления сверхпластического формообразования в защитной окружающей среде или в вакууме.

Таким образом, путями повышения качества деталей, полученных с использованием СП являются снижение температуры СПД за счет перехода к исходным ультрамелкозернистым (УМЗ) или наноструктурированным исходным заготовкам [1, 2, 5-7], а также существенное сокращение длительности нахождения титанового сплава при повышенных температурах на всех технологических этапах. Необходимо использование надежной защитной атмосферы, а еще лучше вакуума в технологии формообразования изделий из титановых сплавов с предельно малыми припусками на механическую обработку. При этом должна применяться регламентированная технология нанесения сертифицированных противосварочных и защитных покрытий [18] для исключения активного химического взаимодействия легких элементов с титановым сплавом. На завершающем этапе изготовления детали ответственного назначения важен строгий химический контроль, гарантирующий отсутствие нарушений химического состава титанового сплава в готовой детали по пределу содержания каждой примеси в отдельности и суммарно, причем как на локальных поверхностных участках, так и в объеме.

Сварка давлением

Твердо установлено [1, 2, 20, 21], что СП обеспечивает ускоренное формирование качественного твердофазного соединения (ТФС) при сварке в твердом состоянии. Такое влияние СПД характерно как при сварке в твердом состоянии объемных титановых полуфабрикатов

[2, 5, 20, 21], так и в процессе формовки листовых титановых заготовок [1, 2, 5, 7, 10]. Качество сварки давлением является важным для успешной последующей формовки сферических изделий из пакета сварных заготовок [13].

Для достижения качественного ТФС на уровне основного сплава, как показали эксперименты по соединению осадкой объемных мелкозернистых образцов в режиме СП, требуется гарантированная деформация не менее 20 % [13]. При использовании УМЗ титанового сплава, наблюдается снижение необходимой степени деформации до 10 % с повышением температуры начиная с 700 °С. Вероятно, схема деформации также влияет на завершение формирования ТФС. Об этом свидетельствует получение высококачественных соединений в ячеистых и гофровых многослойных панелях [1, 5, 7, 10], полученных при встречной формовкой листовых заготовок, в частности и такого изделия как полая лопатка вентилятора авиадвигателя [19]. Степень локальной деформации в зоне ТФС при получении полых панелей совмещенным методом СПФ/СД не может

превышать 10 % с учетом шероховатости свариваемых поверхностей после СПФ [1, 9, 10].

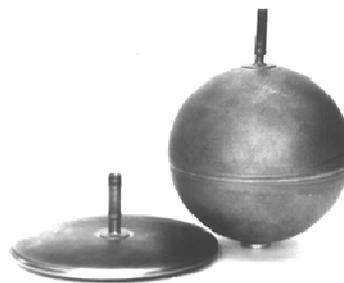
Совмещенная сверхпластическая формовка и сварка давлением

Независимо от последовательности проведения СПФ и СД в процессе СПФ/СД, СПД является фундаментальной физической основой не только формообразования сложной пространственной конфигурации получаемого изделия, но и обеспечивает формирование конечной однородной структуры в изделии [19].

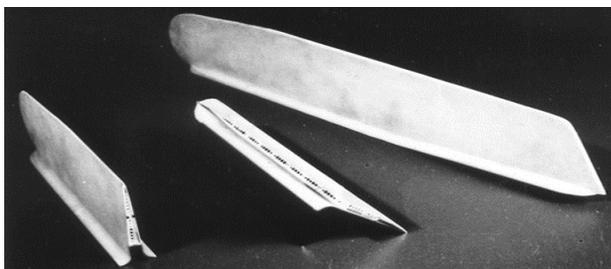
На рис.1 приведены примеры изготовленных изделий сложной конфигурации для авиакосмического использования [1, 2, 19]. Однако, как было сказано выше, взаимодействие титанового сплава с окружающей средой и с защитными покрытиями, например противосварочными, определяет возможность его загрязнения вредными примесями и деградацию механических свойств, снижающих конструкционную прочность детали, полученной из полуфабриката даже после окончательной механической обработки.



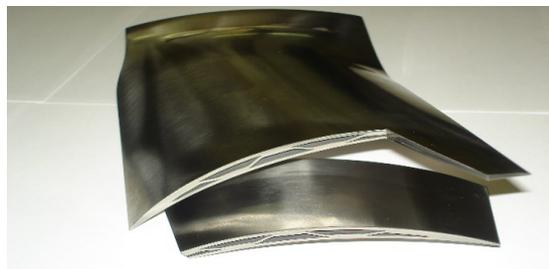
а)



б)



в)



г)

Рис.1. Модели образцов полых изделий из титановых сплавов, изготовленных методом СПФ/СД: а – корпус [1], б – шаробаллон [2], в – ребро [1], г – полая лопатка-имитатор [19]

Fig.1. Models of samples of hollow products made of titanium alloys manufactured by the SPF/SD method: а – body [1], б – ballon [2], с – rib [1], d – hollow simulator blade [19]

Фактор взаимодействия с окружающей средой многократно усиливается при высокой температуре процесса обработки и его значительной продолжительности. В этой связи решением проблемных вопросов достижения высоких механических свойств изделия может оказаться резкое снижение температуры и длительности технологического процесса его формообразования [1, 2, 7], что технологически осуществимо при переходе к использованию эффекта низкотемпературной СП. Необходимость снижения температуры формообразования полых титановых изделий авиакосмического назначения во многом определяется и экономическими факторами. Согласно зарубежным исследованиям [6], рентабельность использования СП в технологии формообразования титановых изделий для авиационной промышленности ограничивается повышением температуры нагрева заготовки не выше 760 °С.

Выводы

1. Сверхпластическая деформация обеспечивает формирование однородной структуры и высокого комплекса механических титанового сплава типа ВТ6 при формообразовании изделий в защитной среде инертных газов или в вакууме.

2. Перспективно внедрение в технологию формообразование ультрамелкозернистых заготовок из титановых сплавов за счет проявления эффекта низкотемпературной сверхпластичности при пониженных температурах.

3. Для обеспечения высокого уровня механических свойств следует контролировать в готовых деталях из титанового сплава содержание легких примесей, не допуская их превышения по техническим условиям или сертификату на исходный полуфабрикат.

Список литературы

1. Петров Е.Н., Родионов В.В., Кузьмин Э.Н., Лутфуллин Р.Я., Сафиуллин Р.В. Ячеистые конструкции. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2008. 176 с.

2. Мулюков Р.Р., Имаев Р.М., Назаров А.А., Имаев М.Ф. Имаев В.А. и др. Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: эксперимент, теория, технологии. М.: Наука, 2014. 284 с.

3. Кайбышев О.А. Пластичность и сверхпластичность металлов. М.: Металлургия, 1975. 280 с.

4. Салищев Г.А., Лутфуллин Р.Я., Разуваев Е.И., Силина С.Г., Аржаков В.М. Изотермическая штамповка двухфазных титановых сплавов с различной исходной структурой // Вопросы авиационной науки и техники. Серия Авиационные материалы. 1986. № 1. С. 46–52.

5. Ermachenko A.G., Lutfullin R.Ya., Mulyukov R.R. Advanced technologies of processing titanium alloys and their applications in industry // Reviews on Advanced Materials Science. 2011. V. 29, N 1. P. 68–82.

6. Comley P.N. Lowering the heat – the development of reduced SPF temperature titanium alloys for aircraft production // Materials Science Forum. 2004. V. 447–448. P. 233–238.

7. Лутфуллин Р.Я., Круглов А.А., Мухаметрахимов М.Х., Руденко О.А. Низкотемпературная сверхпластичность и изготовление полых конструкций из титанового сплава ВТ6 // Письма о материалах. 2015. Т. 5, № 2. С. 185–188.

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

9. Кайбышев О.А., Сафиуллин Р.В., Лутфуллин Р.Я., Фаткуллин С.Н. Исследование и разработка технологии сверхпластической формовки многослойных ячеистых конструкций // Кузнечно-штамповочное производство. 1994. № 4. С. 10–12.

10. Acharyulu S.L.N., Kaibyshev O.A., Sundaresun R., Bhatia M.L., Safiullin R.V., Lutfullin R.Ya. Mechanical properties of the wing slat produced by SPF/DB technology // Materials Science Forum. 1997. V. 243–245. P. 695–700.

11. Круглов А.А., Еникеев Ф.У., Лутфуллин Р.Я. Расчетная модель процесса сверхпластической формовки сферической оболочки из листового проката // Кузнечно-штамповочное производство. 2000. № 10. С. 6–9.

12. Кайбышев О.А., Петров Е.Н., Лутфуллин Р.Я., Кузьмин Э.Н., Сафиуллин Р.В., Родионов В.В. Характеристики конструктивной прочности компонентов пустотелой лопатки, полученных из сплава ВТ6. Исследование усталостной прочности титанового сплава ВТ6 // В сборнике трудов Международной научной конференции «Современное состояние теории и практики сверхпластичности материалов», Уфа, 2000. С. 314–318.

13. Лутфуллин Р.Я., Круглов А.А., Мухаметрахимов М.Х., Валиахметов О.Р. Сварка давлением при изготовлении сферических сосудов из титановых сплавов в состоянии сверхпластичности // Сварочное производство. 2004. № 3. С. 17–23.
14. Shagiev M.R., Kruglov A.A., Rudenko O.A., Murzinova M.A. Superplastic forming of titanium alloys at 700 °C // Письма о материалах. 2022. Т. 12, № 4. С. 332–335.
15. Лутфуллин Р.Я. Трофимов Е.А., Кашаев Р.М., Ситдииков В.Д., Лутфуллин Т.Р. Нормальный модуль упругости титанового сплава ВТ6С и его чувствительность к изменению структуры // Письма о материалах. 2017. Т. 7, № 1. С. 12–16.
16. 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. 617 p.
17. Колачев Б.А. Физическое металловедение титана. М.: Металлургия, 1976. 184 с.
18. 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, № 4. С. 457–461.
19. Сафиуллин Р.В., Круглов А.А., Руденко О.А. и др. Разработка конструкции и технологии изготовления облегченной широкохордной лопатки вентилятора авиадвигателя из титанового сплава // Титан. 2009. № 4. С. 34–39.
20. Шоршоров М.Х., Дзнеладзе Э.М., Тихонов А.С. и др. Сварка титановых сплавов ОТ4, ВТ6 и ВТ15 в твердом состоянии в режиме сверхпластичности // Сварочное производство. 1975. №11. С. 20–21.
21. Каракозов Э.С. Сварка давлением. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
2. Mulyukov, R. R., Imayev, R. M. Nazarov, A. A., Imayev, M. F. & Imayev, V. A. et al. (2014). Sverkhplastichnost' ul'tramelkozernistykh splavov: Eksperiment, teoriya, tekhnologii. M: Nauka. P. 284. (In Russ.).
3. Kaybyshev, O. A. (1975). Plastichnost' i sverkhplastichnost' metallov. M: Metallurgiya. P. 280. (In Russ.).
4. Salishchev, G. A., Lutfullin, R. Ya., Razuvaev, E. I., Silina, C. G., & Arjakov, V. M. (1986). Isotermicheskaya shtampovka dvukhfaznykh titanovykh splavov s razlichnoy iskhodnoy strukturoy. *Voprosy aviasionnoy nauki i tekhniki. Seriya Aviasionnye materialy*, 1, 46–52. (In Russ.).
5. Ermachenko, A. G., Lutfullin, R. Ya. & Mulyukov, R. R. (2011). Advanced technologies of processing titanium alloys and their applications in industry. *Reviews on Advanced Materials Science*, 29(1), 68–82.
6. Comley, P. N. (2004). Lowering the heat – the development of reduced SPF temperature titanium alloys for aircraft production. *Materials Science Forum*, (447–448), 233–238.
7. Lutfullin, R. Ya., Kruglov, A. A., Mukhametrakhimov, M. Kh. & Rudenko, O. A. (2015). Low temperature superplasticity and production of hollow structures out of VT6 titanium alloy. *Pis'ma o materialakh*, 5(2), 185–188. (In Russ.).
8. Kaibyshev, O. A. (1984). Sverkhplastichnost' promyshlennykh splavov. M: Metallurgiya. P. 264. (In Russ.).
9. Kaibyshev, O. A., Safiullin, R. V., Lutfullin, R. Ya. & Fatkullin, S. N. (1994). Issledovaniye i razrabotka tekhnologii sverkhplasticheskoy formovki mnogoslonykh yacheistykh konstruksiy. *Kuznechno-shtampovnoye proizvodstvo*, 4, 10–12. (In Russ.).
10. Acharyulu, S. L. N., Kaibyshev, O. A., Sundaresun, R., Bhatia, M. L., Safiullin, R. V. & Lutfullin, R. Ya. (1997). Mechanical properties of the wing slat produced by SPF/DB technology. *Materials Science Forum*, (243–245), 695–700.
11. Kruglov, A. A., Enikeev, F. U. & Lutfullin, R. Ya. (2000). Rachehnaya model' prosessa sverkhplasticheskoy formovki sfericheskoy obolochki iz listovogo prokata. *Kuznechno-shtampovnoye proizvodstvo*, 10, 6–9. (In Russ.).
12. Kaibyshev, O. A., Petrov, E. N., Lutfullin, R. Ya., Kuz'min, E. N., Safiullin, R. V. & Rodionov, V. V. (2000). Kharakteristiki konstruktivnoy prochnosti komponentov pustotelay lopatki,

Информация об авторах

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

References

1. Petrov, E. N., Rodionov, V. V., Kuz'min E. N., Lutfullin R. Ya. & Safiullin R. V. (2008). Yacheistye konstruksii. Snejinsk: RFYS-VNIITF. P. 176. (In Russ.).

poluchennykh iz splava VT6. Issledovanie ustalostnoy prochnosti titanovogo splava VT6. V sbornike trudov Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Sovremennoye sostoyaniye teorii i praktiki sverkhplastichnosti materialov», Ufa, 314–318. (In Russ.).

13. Lutfullin, R. Ya., Kruglov, A. A., Mukhametrakhimov, M. Kh. & Valiakhmetov, O. R. (2004). Svarka davleniem pri izgotovlenii sfericheskikh sosudov iz titanovykh splavov v sostoyanii sverkhplastichnosti. *Svarochnoe proizvodstvo*, 3, 17–23. (In Russ.).

14. Shagiev, M. R., Kruglov, A. A., Rudenko, O. A. & Murzinova, M. A. (2022). Superplastic forming of titanium alloys at 700 °C. *Letters on Materials*, 12(4), 332–335.

15. Lutfullin, R. Ya., Trofimov, E. A., Kashaev, R. M., Sitdikov, V. D. & Lutfullin, T. R. (2017). Normal'nyi modul' uprugosti titanovogo splava VT6S i ego chuvstvitel'nost' k izmeneniyu struktury. *Pis'ma o materialakh*, 7(1), 12–16. (In Russ.).

16. 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. P. 617.

17. Kolachev, B. A. (1976). Fizicheskoye metallovedeniye titana. M: Metallurgia. P. 184. (In Russ.).

18. Kruglov, A. A., Lutfullin, R. Ya., Mukhametrakhimov, M. Kh., Rudenko, O. A., Sarkeeva, A. A. & Safiullin, R. V. (2021). Rol' protivosvarochnogo pokrytiya v trekhsloynnykh gofrirovannykh konstruksiyakh iz titanovykh splavov. *Pis'ma o materialakh*, 11(4), 457–461. (In Russ.).

19. Safiullin, R. V., Kruglov, A. A. & Rudenko, O. A. et al. (2009). Razrabotka konstruksii i tekhnologii izgotovleniya oblegchennoy shirokikhordnoy lopatki ventilyatora aviadvigatelya iz titanovogo splava. *Titan*, 4, 34–39. (In Russ.).

20. Shorshorov, M. Kh., Dzeladze, E. M. & Tkhnov, A. S. et al. (1975). Svarka titanovykh splavov OT4, VT6 i VT15 v tverdom sostoyanii v rezhime sverkhplastichnosti. *Svarochnoye proizvodstvo*, 11, P. 20–21. (In Russ.).

21. Karakozov, E. S. (1986). Svarka davlenniym. M: Mashinostroyeniye. P. 280. (In Russ.).

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 14.11.2023; одобрена после рецензирования 17.01.2024; принята к публикации 01.02.2024.

The article was received by the editorial board on 14 Nov. 23; approved after reviewing 17 Jan. 24; accepted for publication 01 Feb. 24.