

Научная статья

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

УДК 669.245

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.012

ФОРМИРОВАНИЕ ТВЕРДОФАЗНОГО СОЕДИНЕНИЯ ИЗ РАЗНОИМЕННЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ ЭК61 и ЭП975**Эльвина Венеровна Галиева^{1†}, Аэрика Артуровна Бикмухаметова²,
Венер Анварович Валитов³**^{1, 2, 3} Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина 39, 450001, Уфа, Россия¹ galieva_elvina_v@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-1074-6274>² bikmukhametova_aa@mail.ru³ valitov_va@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1349-6047>

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследования микроструктуры, энергодисперсионного анализа и механических свойств твердофазных соединений после сварки давлением разноименных сплавов на основе никеля в комбинации ЭК61//ЭП975. Сварка давлением проводилась в вакууме при температуре 925 °С и начальной скорости деформации 10^{-4} с⁻¹ по схеме одноосного сжатия. Условия сварки давлением соответствовали условиям проявления низкотемпературной сверхпластичности для сплава ЭК61. По результатам исследований было установлено, что между сплавами в результате взаимной диффузии элементов формируется переходная зона диффузионного взаимодействия протяженностью до 20 мкм. Прочность сварных образцов при температуре 650 °С составляет 0,51 от прочности никелевого сплава ЭК61, а при комнатной температуре 0,64. В структуре сплава ЭК61 после сварки давлением наблюдались существенные изменения: произошло частичное растворение δ-фазы и укрупнение матричных зерен γ-фазы. В более жаропрочном сплаве ЭП975 структура стабильна. Изменений не произошло, размер матричных зерен γ-фазы и относительно крупных частиц γ'-фазы остается неизменным. Таким образом, показано, что метод сварки давлением является эффективным методом получения твердофазных соединений из жаропрочных сплавов с различным типом упрочнения.

Ключевые слова: микроструктура, ультрамелкозернистый, сверхпластичность, сварка давлением, твердофазное соединение, жаропрочный никелевый сплав.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Стипендии Президента РФ (СП-4002.2022.1). Микроструктурные исследования и эксперименты проводились на базе центра коллективного пользования ИПСМ РАН "Структурные и физико-механические исследования материалов".

Для цитирования: Галиева Э.В. Бикмухаметова А.А., Валитов В.А. Формирование твердофазного соединения из разноименных сплавов на основе никеля ЭК61 и ЭП975 // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2022. Т. 19, № 3. С. 394–401. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.012.

Original article

FORMATION OF SOLID-PHASE JOINT FROM EK61 AND EP975 NICKEL-BASED SUPERALLOYS**Elvina V. Galieva^{1†}, Aerika A. Bikmukhametova², Vener A. Valitov³**^{1, 2, 3} Institute for Metals Superplasticity Problems of the RAS, 39, Khalturina Str., Ufa, 450001, Russia¹ galieva_elvina_v@mail.ru[†], <https://orcid.org/0000-0002-1074-6274>² bikmukhametova_aa@mail.ru³ valitov_va@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1349-6047>

Abstract. This paper presents the results of a study of the microstructure, energy dispersive analysis, and mechanical properties of solid-state joints after pressure welding of dissimilar nickel-based superalloys in the EK61//EP975 combination. Pressure welding was carried out in vacuum at a temperature of 925 °C and an initial strain rate of 10^{-4} s^{-1} according to the uniaxial compression scheme. The pressure welding conditions correspond to the conditions for the manifestation of low-temperature superplasticity for the EK61 superalloy. According to the results of the studies, it was found that a transition zone of diffusion interaction with a length of up to 20 μm is formed between the alloys as a result of mutual diffusion of elements. The strength of welded samples at a temperature of 650 °C is 0.51 of the strength of the EK61, and at room temperature 0.64. Significant changes are observed in the structure of the EK61 superalloy after pressure welding: the dissolution of the δ -phase and the coarsening of the matrix grains of the γ -phase occur. As for the more heat-resistant EP975 superalloy, the structure is stable. There were no changes, the size of the matrix grains of the γ -phase and relatively large particles of the γ' -phase remains unchanged. Thus, it has been shown that the pressure welding is an effective method for obtaining solid-state joints from heat-resistant superalloys with different types of hardening.

Keywords: microstructure, ultrafine-grained, superplasticity, pressure welding, solid-state joint, heat-resistant nickel-based superalloy.

Acknowledgments: This work was financially supported by a Scholarship of the Russian Federation President (SP-4002.2022.1). Electron microscopic studies and experiments were carried out on the facilities of shared services center of IMSP RAS "Structural and Physical-Mechanical Studies of Materials".

For citation: Galieva, E. V., Bikmukhametova, A. A. & Valitov, V. A. (2022). Formation of solid-phase joint from EK61 and EP975 nickel-based superalloys. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 3(19), 394–401. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.012.

Введение

Известно [1-14], что из жаропрочных никелевых сплавов изготавливают большинство рабочих и сопловых лопаток, дисков и других деталей, которые широко применяются в авиационных газотурбинных двигателях. Выделение в таких сложнолегированных сплавах когерентных частиц упрочняющих фаз, например, типа Ni_3Nb , или $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ обеспечивает достижение требуемого уровня жаропрочности, но приводит к резкому снижению технологической пластичности. Поэтому для изготовления деталей из жаропрочных никелевых сплавов целесообразно применение перспективной технологии сверхпластической деформации, реализация которой возможна посредством формирования в сплавах ультрамелкозернистой структуры [5-7, 9].

Анализ современных тенденций развития мирового и российского авиадвигателестроения свидетельствует, что наиболее актуальными являются проблемы повышения экономичности производства и энергоэффективности газотурбинных двигателей. Первая проблема в значительной степени может быть решена за счет разработки и внедрения новых ресурсосберегающих технологий, в том числе, основанных на использовании эффекта сверхпластичности. Другая проблема повышения энергоэффективности может быть решена не только за счет создания новых композиций высокотемпера-

турных материалов с повышенными характеристиками жаропрочных свойств [15-23], но и за счет разработки и внедрения новых технических решений, связанных с применением в конструкции газотурбинного двигателя биметаллических деталей, например, «диск-вал», что позволит повысить энергоэффективность [20-23].

Одним из наиболее перспективных методов получения биметаллических соединений является сварка давлением (СД) с использованием сверхпластической деформации, которая позволяет получать твердофазные соединения из различных сплавов [21-25]. При этом достаточным условием, для получения качественного соединения, является проявление эффекта СП хотя бы в одном из соединяемых материалов [21-25]. Использование сварных конструкций приводит не только к экономии металла, но и к снижению веса получаемых деталей. Однако, существует проблема соединения разноименных сплавов, так как возможно появление хрупких включений в зоне шва [19, 20]. В связи с этим большое внимание уделяется исследованиям, которые направлены на получение качественных неразъемных соединений из жаропрочных никелевых сплавов, а также на разработку инновационных методов изготовления биметаллических деталей с требуемым комплексом эксплуатационных свойств.

В связи с вышеизложенным целью данной работы является исследование микроструктуры

и свойств твердофазных соединений, полученных методом СД в условиях сверхпластичности из разноименных жаропрочных никелевых сплавов в сочетании ЭК61 и ЭП975.

Материалы и методики исследований

Материалами для исследований были выбраны жаропрочные деформируемые поликристаллические никелевые сплавы ЭК61 и ЭП975. Химический состав указанных сплавов приведен в таблице 1 [22, 23]. Необходимо отметить, что отечественный деформируемый сплав ЭК61 (ХН58МБЮД) является представителем жаропрочных сплавов, упрочняемых γ'' -фазой [26-28]. Этот сплав является наиболее близким по химическому и фазовому составу аналогом зарубежного сплава Inconel 718, который согласно работе [2] относится к железоникелевым сплавам из-за высокого содержания железа, хотя в обоих сплавах ЭК61 и Inconel 718 содержание никеля составляет более 50 %. Сплав ЭП975 – является одним из самых жаропроч-

ных деформируемых никелевых сплавов, не имеющий аналогов [8, 29]. В заготовках из сплава ЭК61 методом всесторонней изотермическойковки с понижением температуры обработки в интервале 950-850 °С была сформирована ультрамелкозернистая структура типа субмикродуплекс с размером зерен γ (твердый раствор легирующих элементов в никеле) и δ (интерметаллидная фаза Ni_3Nb)-фаз менее 1 мкм (рис.1а) [25]. Объемная доля δ -фазы составляет 25 %. При этом необходимо отметить, что в исходном состоянии в крупных зернах матричной γ -фазы равномерно выделены частицы упрочняющей γ'' -фазы (интерметаллидная фаза Ni_3Nb). Далее при деформационно-термической обработки она трансформируется в термически более стабильную δ -фазу. В заготовках из сплава ЭП975 было сформировано мелкозернистое состояние типа микродуплекс в результате проведения предварительной высокотемпературной деформационной термической обработки в интервале температур 1130-1100 °С.

Таблица 1. Химический состав исследуемых сплавов ЭК61 и ЭП975

Table 1. Chemical composition of the studied alloys EK61 and EP975 [20, 21]

Сплав	Co	Cr	Mo	W	Al	Nb	Ti	Fe	V	Cu	Ni
ЭК61	–	16,6	3,9	–	1	5	0,8	15	0,5	0,4	Осн.
ЭП975	15,5	8,2	1,2	10,2	4,8	1,5	2,4	–	–	–	Осн.

Размер зерен γ и γ' (интерметаллидная фаза $\text{Ni}_3\text{Al}(\text{Ti})$)-фаз составляет 7-8 мкм и 2-3 мкм соответственно (рис.1в). В теле зерен матричной γ -фазы в процессе охлаждения с температуры

деформации до комнатной дополнительно выделены когерентные дисперсные ($\sim 0,4$ мкм) частицы γ' -фазы, которые являются упрочняющими.

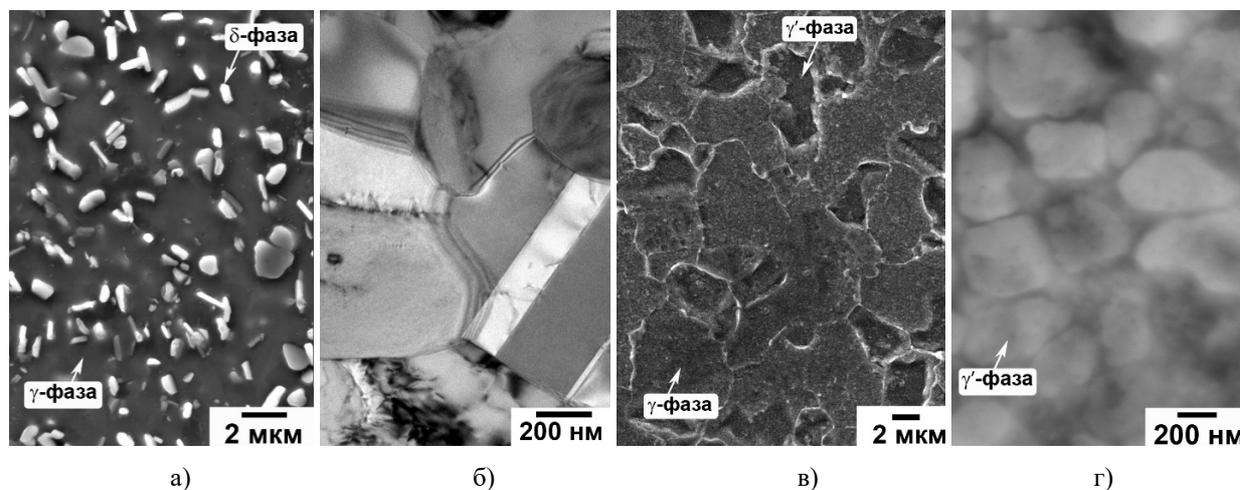


Рис.1. Исходная микроструктура сплавов ЭК61 (а, б) и ЭП975 (в, г)

Fig.1. The initial microstructure of the EK61 (a, b) and EP975 (c, d) superalloys

Эксперименты по сварке давлением в условиях сверхпластичности одного из соединяемых материалов осуществляли на образцах цилиндрической формы с размерами: диаметром $d_0 = 15,7$ мм для обоих сплавов и высотой $h_0 = 20$ мм для сплава ЭК61 и 15 мм для сплава ЭП975. Химический состав сплавов представлен в таблице 1.

Микроструктурные исследования проводили на растровом электронном микроскопе Mira 3LMH (TESCAN, Чехия).

Сварку давлением проводили на испытательной машине Shenck Trebel типа RMS100, оснащенной оригинальной установкой для высокотемпературной сварки давлением УВСД-1, при температуре 925 °С и начальной скорости деформации 10^{-4} с⁻¹. Образцы пар ЭК61/ЭП975 помещали в герметичный контейнер из нержавеющей стали, в котором был создан вакуум ($2 \cdot 10^{-3}$ Па).

Тонкую структур изучали с использованием просвечивающего электронного микроскопа JEM-2000EX при ускоряющем напряжении

160 кВ. Энергодисперсионный анализ (ЭДА) проводили на растровом электронном микроскопе Vega 3SBH (TESCAN, Чехия).

Прочность твердофазных соединений ЭК61/ЭП975 при повышенной (650 °С) и комнатной температурах оценивалась в сравнении с менее прочным сплавом. Механические испытания проводили на испытательной машине INSTRON.

Результаты и их обсуждение

На рис.2а представлена микроструктура зоны твердофазного соединения (ТФС) из разноименных никелевых сплавов в сочетании ЭК61/ЭП975, полученного СД при $T = 925$ °С. В зоне твердофазного соединения, обозначенного белыми стрелками на рис.2а, в местах, где со стороны сплава ЭП975 в контакт приходит γ -фаза линия соединения на шлифе незначительно изгибается, а где более прочная γ' -фаза линия прямая (рис.2а).

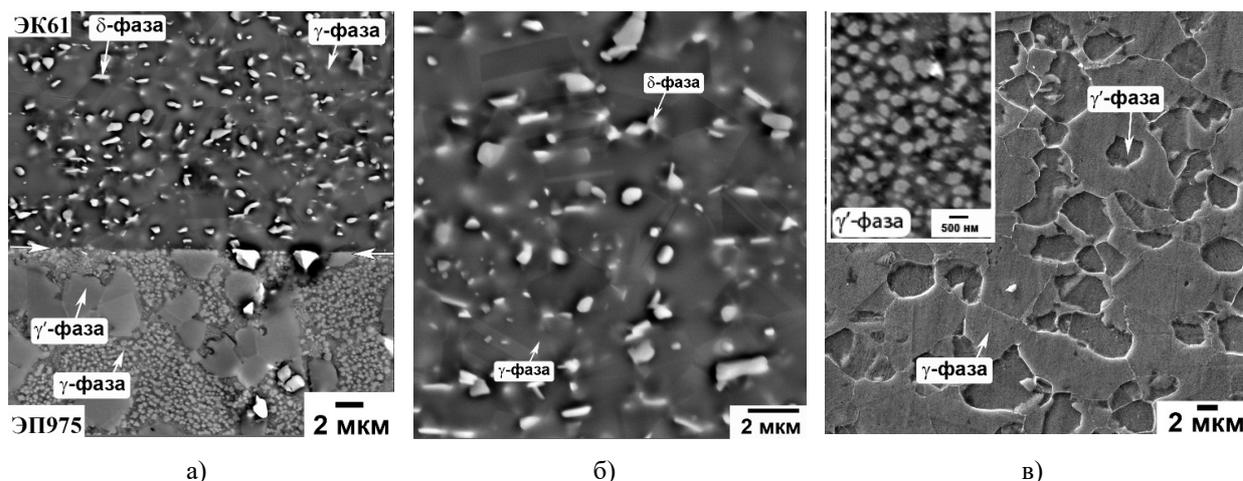


Рис.2. Микроструктура сварных образцов сплавов в сочетании ЭК61/ЭП975: а) зона ТФС, б) ЭК61, в) ЭП975

Fig.2. Microstructure of welded samples in combination of EK61/EP975: a) solid-phase joint, b) EK61, c) EP975

В целом в основном вся деформация локализуется в менее прочном сплаве ЭК61, в котором перед сваркой была сформирована ультрамелкозернистая структура (размер зерен и фаз менее 1 мкм). Сверхпластичность в сплаве ЭК61 с такой структурой в этом случае проявляется в интервале температур $T = 750-925$ °С. То есть температура сварки давлением соответствует верхней температурной границе проявления сверхпластичности в сплаве ЭК61 с УМЗ структурой.

После сварки давлением были обнаружены следующие изменения микроструктуры в сплаве ЭК61. Произошло частичное растворение δ -фазы, относительная доля которой после сварки уменьшилась в 2 раза по сравнению с исходным состоянием. По-видимому, это привело к укрупнению зерен γ -фазы, средний размер которых составил 1,5 мкм.

В структуре сохранились отдельные крупные частицы δ -фазы, их размер не превышал 1,2 мкм в длину и 0,8 мкм в ширину (рис.2б). Таким образом, успешно удалось соединить два

жаропрочных никелевых сплава, имеющих различный тип упрочняющей фазы.

Более жаропрочный сплав ЭП975 практически не деформировался, морфология и размер фаз в сплаве ЭП975 не изменились по сравнению с исходной структурой (рис.2в). Вероятно, это связано с тем, что температура сварки ($T = 925 \text{ }^\circ\text{C}$) на $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ниже стандартной температуры старения сплава ЭП975 ($T=950 \text{ }^\circ\text{C}$).

В теле зерен γ -фазы также, как и в исходном состоянии после охлаждения с температуры сварки давлением до комнатной температуры аналогично, как и для исходного состояния наблюдаются вторичные частицы γ' -фаз (рис.2в в белой рамке).

В твердофазном соединении ЭК61/ЭП975 в зоне шва были обнаружены округлые поры,

выделенные в виде отдельных цепочек, относительная протяженность которых не превышает 20%. На рис.3 представлены результаты энергодисперсионного анализа, по данным которого установлено, что наблюдается диффузия кобальта и алюминия из сплава ЭП975 в сплав ЭК61 и встречная диффузия железа и хрома. Таким образом, формируется зона диффузионного взаимодействия, ширина которой не превышает 20 мкм. Анализ результатов механических испытаний показал, что прочность твердофазных соединений из разноименных сплавов ЭК61/ЭП975 составляет 0,64 от прочности сплава ЭК61 при комнатной температуре ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) и 0,51 при $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ (Таблица 2). Разрушение в сварных образцах произошло по зоне ТФС.

Таблица 2. Механические свойства сварных соединений и сплавов ЭК61 и ЭП975

Table 2. Mechanical properties of welded joints and alloys EK61 and EP975

	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	T, $^\circ\text{C}$
ТФС	908	633	1	650
ЭК61	1418	1166	18	
ЭП975	1459	916	7	
ТФС	664	621	1	20
ЭК61	1299	783	12	
ЭП975	1687	1000	14	

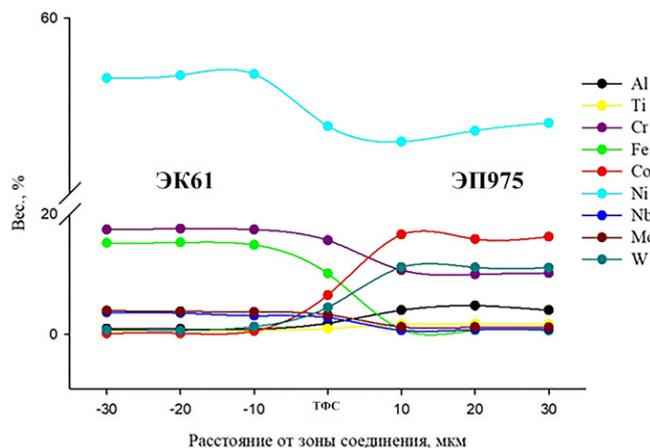


Рис.3. Распределение легирующих элементов в зоне ТФС сплавов в сочетании ЭК61//ЭП975

Fig.3. Microstructure of the solid-state joint of superalloys in EK61//EP975 combination

Заключение

Экспериментально установлено, что сварка давлением в условиях сверхпластичности является эффективным методом для получения неразъемных соединений из разноименных жаро-

прочных никелевых сплавов ЭК61 и ЭП975 с различным типом упрочняющей фазы.

Показано, что между сплавами, в результате взаимной диффузии элементов, формируется переходная зона диффузионного взаимодействия, ширина которой составляет 20 мкм.

Установлено, что прочность полученного ТФС в сочетании сплавов ЭК61//ЭП975 при комнатной температуре составляет ~ 0,64, а при 650 °С равно 0,51 от прочности сплава ЭК61.

Список литературы

1. Кишкин С.Т. Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов: Избранные труды (К 100-летию со дня рождения). М. Наука, 2006. 407 с.
2. Симс Ч., Столофф Т., Хагель В. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок. М. Металлургия, 1995. 568 с.
3. Reed R.C. The superalloys: Fundamentals and Applications. Cambridge University Press, 2006. 372 p.
4. Логунов А.В. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин. М. ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2017. 854 с.
5. Кайбышев О.А. Сверхпластичность промышленных сплавов. М.: Металлургия, 1984. 280 с.
6. Мулюков Р.Р., Имаев Р.М., Назаров А.А. и др. Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: эксперимент, теория, технологии. М.: Наука, 2014. 284 с.
7. Кайбышев О.А., Утяшев Ф.З. Сверхпластичность, измельчение структуры и обработка труднодеформируемых сплавов М.: Наука, 2002. 438 с.
8. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакградзе М.М., Летников М.Н., Мазлов И.С. Применение новых деформируемых никелевых сплавов для перспективных газотурбинных двигателей // Авиационные материалы. 2017. № 5. С. 116–129.
9. Валитов В.А. Деформационно-термическая обработка – эффективный метод получения ультрамелкозернистой и нанокристаллической структуры в жаропрочных никелевых сплавах // Письма о материалах. Т. 3, № 1. С. 50–55.
10. Оспенникова О.Г. Тенденции создания жаропрочных никелевых сплавов низкой плотности с поликристаллической и монокристаллической структурой (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2016. Т. 40, № 1. С. 3–19.
11. Ehsan Ghassemali Encyclopedia of Materials // Metals and Alloys. 2022. V. 4. P. 129.
12. Chamanfar A., Valberg H.S., Templin B., Plumeri J.E., Misiolek W.Z. Development and validation of a finite-element model for isothermal forging of a nickel-base superalloy // Materialia. 2019. V. 6. 100319.
13. Satheesh Kumar S.S., Raghu T., Bhat-tacharjee P.P., Appa Rao G., Borah U. Evolution of microstructure and microtexture during hot deformation in an advanced P/M nickel base superalloy // Materials Characterization. 2018. V. 146. P. 217–236.
14. Akca E., Gursel A. A review on superalloys and IN718 nickel-based INCONEL superalloy // Periodicals of engineering and natural sciences, 2015. V. 3, N 1. P. 15–27.
15. Каракозов Э.С. Сварка металлов давлением. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
16. Магеррамова Л.А. Применение биметаллических блисков, изготавливаемых методом ГИП из гранулируемых и литейных никелевых суперсплавов, для увеличения надежности и ресурса газовых турбин // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15, № 4(44). С. 33–38.
17. Бычков В.М., Селиванов А.С., Медведев А.Ю., Супов В.А., Большаков Б.О., Гринь Р.Р., Мусин Ф.Ф. Исследование свариваемости жаропрочного никелевого сплава ЭП742 методом линейной сварки трением // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 7(52). С. 112–116.
18. Люшинский А.В. Диффузионная сварка разнородных материалов. М.: Академия, 2006. 208 с.
19. Люшинский А.В., Николитч Е.В., Жлоба А.А., Харьковский С.В. Диффузионная сварка жаропрочных сплавов на никелевой основе // Сварочное производство. 2014. № 5. С. 25–28.
20. 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.
21. Лутфуллин Р.Я. Мухаметрахимов М.Х., Валитов В.А., Мухтаров Ш.Х., Классман П.А., Астанин В.В. Наноструктурирование и твердофазная сварка труднообрабатываемых сплавов // Перспективные материалы. 2011. № 12. С. 295–300.
22. Поварова К.Б., Валитов В.А., Овсепян С.В., Дроздов А.А., Базылева О.А., Валитова Э.В. Изучение свойств и выбор сплавов для дисков с лопатками («Блисков») и способа их соединения // Металлы. 2014. № 5. С. 61–70.
23. Valitova E.V., Lutfullin R.Ya., Mukhametrahimov 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 Letters on materials. 2014. V. 4, N 4. P. 291–294.

24. Бикмухаметова А.А., Галиева Э.В., Ахунова А.Х. Физическое и компьютерное моделирование влияния рельефа поверхности при сварке давлением никелевых сплавов // Сборник трудов секции «Механика и моделирование материалов и технологий» Международной молодёжной научной конференции «XLV Гагаринские чтения», 2019. С. 23–25.

25. Валитова, Э.В., Лутфуллин Р.Я., Мухаметрахимов М.Х., Валитов В.А. Формирование ультрамелкозернистой и нанокристаллической структуры методами интенсивной пластической деформации в никелевом сплаве ХН58МБЮД // Перспективные материалы, 2013. № 15. С. 35–39.

26. Шлямнев А.П. Коррозионностойкие, жаростойкие и высокопрочные стали и сплавы: Справочник / А. П. Шлямнев [и др.]. М.: Проммет-сплав, 2008. 336 с.

27. Дисперсионно-твердеющий свариваемый сплав на основе никеля [Текст] : пат. 99111620 Рос. Федерация : МПК, С22С 19/05 (2000.01) / Ю. А. Пестов, В. Н. Семенов, В. И. Новиков, Б. А. Козыков, К. И. Недашковский, Е. А. Кукин, Г. Г. Деркач, Ю. В. Мовчан, Б. И. Каторгин, В. К. Чванов, Н. А. Сорокина, В. П. Степанов, Л. С. Булавина, Ю. И. Русинович, И. А. Расторгуева, В. П. Пономарева ; заявитель и патентообладатель ОАО «Научно-производственное объединение энергетического машиностроения им. академика В. П. Глушко ; N 99111620/02 ; заявл. 02.06.99, опубл. 27.04.01.

28. Полянский А.М. Полянский В.М. Структурные изменения в сплаве ЭК-61 в условиях циклической деформации при повышенной температуре // Новости Материаловедения. Наука и техника, 2015. № 6. С. 44–53.

29. Ломберг Б.С. Жаропрочные деформируемые сплавы для дисков ГТД и перспективы их развития // Авиационная промышленность, 1984. № 5.

Информация об авторах

Э. В. Галиева – кандидат технических наук, научный сотрудник Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

А. А. Бикмухаметова – аспирант Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

В. А. Валитов – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

References

1. Kishkin, S. T. (2006). Creation, research and application of heat-resistant alloys: Selected works (To the 100th anniversary of the birth). M.: Nauka. P. 407. (In Russ.).

2. Sims, C., Stoloff, T. & Hagel, W. (1987). Superalloys II: High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power. New York NY: Wiley. P. 640.

3. Reed, R. C. (2006). The superalloys: Fundamentals and Applications. Cambridge University Press. P. 372.

4. Logunov, A.V. (2017). Heat-resistant nickel alloys for blades and disks of gas turbines. Moscow, LLC Publishing House Gas Turbine Technologies. P. 854. (In Russ.).

5. Kaibyshev, O. A. (1984). Superplasticity of industrial alloys. M.: Metallurgy. P. 280. (In Russ.).

6. Mulyukov, R. R., Imayev, R. M., Nazarov, A. A. & et al. (2014). Superplasticity of ultrafine-grained alloys: Experiment, theory, technologies. M. Nauka. P. 284 (In Russ.).

7. Kaibyshev, O. A. & Utyashev, F. Z. (2002). Superplasticity, structure refinement and processing of hard-to-form alloys. M.: Nauka. P. 438. (In Russ.).

8. Lomberg, B. S., Ovsepyan, S. V., Bakgradze, M. M., Letnikov, M. N., & Mazlov I. S. (2017). Application of new wrought nickel alloys for advanced gas turbine engines. *Aviation materials*, (S), 116–129.

9. Valitov, V. A. (2013). Deformational heat treatment – as an effective way for producing ultrafinegrained and nanocrystalline structures in heat-resistant nickel based alloys. *Letters on Materials*, 3(1), 50–55. (In Russ.).

10. Ospennikova, O. G. (2016). Trends in the creation of low-density heat-resistant nickel alloys with polycrystalline and single-crystal structure (review). *Aviation materials and technologies*, 40(1), 3–19. (In Russ.).

11. Ehsan Ghassemali (2022). Encyclopedia of Materials. *Metals and Alloys*, 4, 129.

12. Chamanfar, A., Valberg, H. S., Templin, B., Plumeri, J. E. & Misiolek, W. Z. (2019). Development and validation of a finite-element model for isothermal forging of a nickel-base superalloy. *Materialia*, 6, 100319.

13. Satheesh Kumar, S. S., Raghu, T., Bhattacharjee, P. P., Appa Rao, G. & Borah, U. (2018). Evolution of microstructure and microtexture during hot deformation in an advanced P/M nickel base superalloy. *Materials Characterization*, 146, 217–236.

14. Akca, E. & Gursel, A. (2015). A review on superalloys and IN718 nickel-based INCONEL superalloy. *Periodicals of engineering and natural sciences*, 3 (1), 15–27.
15. Karakozov, E. S. (1986). Pressure welding of metals. M.: Mashinostroenie. P. 280. (In Russ.).
16. Magerramova, L. A. (2011). The use of bimetallic blisks, produced by HIP from granulated and cast nickel superalloys, to increase the reserve of resources and gas turbines. *Vestnik USATU*, 15(4), 33–38. (In Russ.).
17. Bychkov, V. M., Selivanov, A. S., Medvedev, A. Yu., Supov, V. A., Bolshakov, B. O., Grin, R. R. & Musin, F. F. (2012). Investigation of the weldability of the heat-resistant nickel alloy EP742 by the method of linear friction welding. *Vestnik USATU*, 16(7), 112–116. (In Russ.).
18. Lyushinsky, A.V. (2006). Diffusion welding of dissimilar materials. M.: Academy. P. 208. (In Russ.).
19. Lyushinsky, A. V., Nikolic, E. V., Zhloba, A. A. & Kharkovsky, S. V. (2014). Diffusion welding of nickel-based heat-resistant alloys. *Welding production*, (5), 25–28. (In Russ.).
20. Lutfullin, R. Ya. (2011). Superplasticity and solid-phase bonding of nanostructured materials. Part I. Influence of grain size on solid-phase weldability of superplastic alloys. *Letters on Materials*, (1), 59–64. (In Russ.).
21. Lutfullin, R. Ya. Mukhametrakhimov, M. Kh., Valitov, V. A., Mukhtarov, Sh. Kh., Klassman, P. A. & Astanin, V. V. (2011). Nanostructuring and solid-phase welding of hard-to-machine alloys. *Perspektivnye materialy*, (12), 295–300. (In Russ.).
22. Povarova, K. B. Valitov, V. A., Obsepyan, S. V., Drozdov, A. A., Bazyleva, O. A. & Valitova, E. V. (2014). Study of the properties and the choice of alloys for bladed disks (Blisks) and a method for their joining. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2014(9), 733–741.
23. 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. *Letters on materials*, 4(4), 291–294.
24. Bikmukhametova, A. A. Galieva, E. V. & Akhunova, A. Kh. (2019). Physical and computer modeling of the effect of surface relief in pressure welding of nickel alloys. *Proceedings of the section "Mechanics and modeling of materials and technologies » International Youth Scientific Conference «XLV Gagarin Readings»*, 23–25. (In Russ.).
25. Valitova, E. V. Lutfullin, R. Ya., Mukhametrakhimov, M. Kh. & Valitov, V. A. (2013). Formation of ultrafine-grained and nanocrystalline structure by methods of severe plastic deformation in nickel alloy XN58MBYuD. *Perspective materials*, 15, 35–39. (In Russ.).
26. Shlyamnev, A. P. & et al. (2008). Corrosion-resistant, heat-resistant and high-strength steels and alloys: a Handbook. M.: Prommet-alloy, P. 336. (In Russ.).
27. Dispersion-hardening weldable nickel-based alloy: Pat. 99111620 Ros. Federation: IPC, C22C 19/05 (2000.01) / Yu. A. Pestov, V. N. Semenov, V. I. Novikov, B. A. Kozykov, K. I. Neshkovsky, E. A. Kukin, G. G. Derkach, Yu. V. Movchan, B. I. Katorgin, V. K. Chvanov, N. A. Sorokina, V. P. Stepanov, L. S. Bulavina, Yu. I. Rusinovich, I. A. & Rastorguev, V. P. Ponomarev; applicant and patent holder JSC "Scientific and production association of power engineering them. Academician V.P. Glushko; N 99111620/02; dec. 06/02/99, publ. 04/27/01. (In Russ.).
28. Polyansky, A. M. & Polyansky, V. M. (2015). Structural changes in the EK–61 alloy under conditions of cyclic deformation at elevated temperature. *News of Materials Science. Science and technology*, 6, 44–53. (In Russ.).
29. Lomberg, B. S. (1984). Heat-resistant wrought alloys for GTE disks and prospects for their development. *Aviation industry*, 5. (In Russ.).

Information about the authors

E. V. Galieva – Candidate of Technical Sciences, Researcher at the Institute for Metals Superplasticity Problems of the RAS.

A. A. Bikmukhametova – Post-Graduate student at the Institute for Metals Superplasticity Problems of the RAS.

V. A. Valitov – Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher at the Institute for Metals Superplasticity Problems of the RAS.

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

Статья поступила в редакцию 30.06.2022; одобрена после рецензирования 08.07.2022; принята к публикации 14.07.2022.

The article was received by the editorial board on 30 June 22; approved after reviewing on 08 July 22; accepted for publication on 14 July 22.