

## РАЗДЕЛ 2. МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Научная статья

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

УДК 669.017; 620.186

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.012

### АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ И ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДОФАЗНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ЭК61 И ЭП975 ПОСЛЕ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Эльвина Венеровна Галиева<sup>1</sup>, Екатерина Юрьевна Классман<sup>2†</sup>, Венер Анварович Валитов<sup>3</sup>,  
Егор Михайлович Степухов<sup>4</sup>, Радим Рифкатович Габбасов<sup>5</sup>, Азалия Азаматовна Тагирова<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина, 39, 450001 Уфа, Россия

<sup>3, 4, 6</sup> Уфимский университет науки и технологий, ул. Заки Валиди, 32, 450076, Уфа, Россия

<sup>5</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет, ул. Космонавтов, 1, 450064, Уфа, Россия

<sup>1</sup> galieva\_elvina\_v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1074-6274>

<sup>2</sup> klassman@mail.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-1984-5137>

<sup>3</sup> valitov\_va@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1349-6047>

<sup>4</sup> egorstepukhov@mail.ru

<sup>5</sup> awesome.radim@yandex.ru

<sup>6</sup> azaliya\_tagirova72@mail.ru

**Аннотация.** В работе представлены результаты анализа изменений микроструктуры твердофазных соединений (ТФС) из высоколегированных никелевых сплавов ЭК61(Ni<sub>3</sub>Nb) и ЭП975 {(Ni<sub>3</sub>(Al,Ti))} с различным типом упрочняющей фазы после сварки давлением и термической обработки. Также изучены особенности строения поверхности разрушения в сварных образцах после механических испытаний на растяжение при комнатной температуре и 650 °С. Сварку давлением цилиндрических образцов в сочетании сплавов ЭК61//ЭП975 проводили в вакууме в интервале температур (850÷925) °С, который соответствует интервалу проявления сверхпластичности сплава ЭК61 с ультрамелкозернистой структурой. Последующая термическая обработка (ТО) сварных образцов включала закалку и старение, которые применяются для сплава ЭК61. Показано, что в сварных образцах, полученных при T=850 °С, малоугловые границы обнаруживаются как в сплаве ЭК61, так и в сплаве ЭП975. С ростом температуры сварки доля малоугловых границ в сплаве ЭК61 снижается, а в сварных образцах, полученных при T=925 °С, они практически не наблюдаются. Термическая обработка приводит к появлению двойников отжига и росту зерен в сплаве ЭК61. Фрактографический анализ поверхности разрушения сварных образцов показал, что характер разрушения в значительной степени обусловлен строением зоны ТФС сплавов ЭК61//ЭП975. Несмотря на то, что разрушение во всех случаях произошло по зоне твердофазного соединения, вид поверхности излома свидетельствует о преимущественном вязком характере разрушения.

**Ключевые слова:** никелевые сплавы, сварка давлением, твердофазное соединение, термическая обработка.

**Благодарности:** Работа в части исследования структуры и свойств сварных образцов из никелевых сплавов ЭП975//ЭК61 выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (Стипендия Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП-4002.2022.1). Микроструктурные исследования и оценка механических свойств проводились на базе научно-исследовательского оборудования ЦКП ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».

**Для цитирования:** Галиева Э.В., Классман Е.Ю., Валитов В.А., Степухов Е.М., Габбасов Р.Р., Тагирова А.А. Анализ микроструктуры и поверхности разрушения твердофазных соединений из никелевых сплавов ЭК61 и ЭП975 после сварки давлением и термической обработки // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2024. Т. 21, № 3. С. 379–388. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.012.

Original article

**ANALYSIS OF MICROSTRUCTURE AND FRACTURE SURFACE OF SOLID-STATE JOINTS OF NICKEL SUPERALLOYS EK61 AND EP975 AFTER PRESSURE WELDING AND HEAT TREATMENT****Elvina V. Galieva<sup>1</sup>, Ekaterina Yu. Klassman<sup>2†</sup>, Vener A. Valitov<sup>3</sup>, Egor M. Stepukhov<sup>4</sup>, Radim R. Gabbasov<sup>5</sup>, Azaliya A. Tagirova<sup>6</sup>**<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6</sup> Institute for Metals Superplasticity Problems of Russian Academy of Sciences, Khalturina St., 39, Ufa, 450001, Russia<sup>3, 4, 6</sup> Ufa University of Science and Technology, Zaki Validi St., 32, Ufa, 450076, Russia<sup>5</sup> Ufa State Petroleum Technological University, Kosmonavtov St., 1, Ufa, 450064, Russia<sup>1</sup> galieva\_elvina\_v@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1074-6274><sup>2</sup> klassman@mail.ru<sup>†</sup>, <https://orcid.org/0000-0003-1984-5137><sup>3</sup> valitov\_va@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1349-6047><sup>4</sup> egorstepukhov@mail.ru<sup>5</sup> awesome.radim@yandex.ru<sup>6</sup> azaliya\_tagirova72@mail.ru

**Abstract.** The paper presents the results of the analysis of changes in the microstructure solid-state joints (SSJ) from high-alloyed nickel-based EK61 (Ni<sub>3</sub>Nb) and EP975 {(Ni<sub>3</sub>(Al,Ti))} superalloys with different type of hardening phase after welding and heat treatment. pressure welding and heat treatment (HT). The fracture surface structure of welded specimens after mechanical tensile tests at room and 650 °C temperatures were studied. Pressure welding of cylindrical specimens in EC61//EP975 alloy combination was carried out in vacuum in the temperature range of 850-925 °C, which corresponds to the superplasticity of EK61 superalloy with ultrafine grain structure. Subsequent heat treatment of welded specimens included hardening and aging, which is applied to EK61 superalloy. As the welding temperature increases, the proportion of small angle boundaries decreases in the EK61 superalloy and they are practically not observed in the welded specimens obtained at T=925 °C. Thermal treatment leads to the appearance of annealing twins and grain growth in the EK61 superalloy. Fractographic analysis of the fracture surface of the welded specimens shows that the nature of the fracture is largely due to the structure of the SSJ zone of the EK61//EP975 superalloys. Despite the fact that in all cases the fracture occurred in the solid phase joining zone, the appearance of the fracture surface indicates the predominantly ductile nature of the fracture.

**Keywords:** nickel-based superalloys, pressure welding, solid-state joint, heat treatment.

**Acknowledgements:** The study of pressure welding of EP975//EK61 alloys was supported financially by the Grants Council of the President of the Russian Federation (Presidential Scholarship for Young Scientists and Post-graduates SP-4002.2022.1). Microstructural studies and assessment of mechanical properties were carried out on the basis of the Center for Collective Use of IMSP RAS «Structural and physical-mechanical studies of materials».

**For citation:** Galieva, E. V., Klassman, E. Yu., Valitov, V. A., Stepukhov, E. M., Gabbasov, R. R. & Tagirova, A. A. (2024). Analysis of microstructure and fracture surface of solid-state joints of nickel superalloys EK61 and EP975 after pressure welding and heat treatment. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(3), 379–388. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.012.

**Введение**

Жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС) применяются для изготовления широкой номенклатуры деталей, применяемых в авиационных газотурбинных двигателях (ГТД) и аналогичных энергетических установках [1-4]. В настоящее время для дальнейшего повышения экономической эффективности ГТД все большее значение приобретают новые технические решения, направленные на разработку и применение в новых конструкциях ГТД биметаллических деталей, например, типа «блиск» и

«диск-вал» [4, 5]. При создании технологий получения таких биметаллических деталей одной из важнейших является задача, направленная на разработку оптимальных режимов получения качественного неразъемного твердофазного соединения из 2 жаропрочных никелевых сплавов, выбор которых по прочностным и жаропрочным свойствам должен быть обусловлен реальными температурными условиями работы биметаллической детали. Как известно [5-7], в процессе эксплуатации вал ГТД нагревается до температуры не выше 400-500°, в то время как

диск, особенно зона обода может нагреваться до температур 650-750°.

В настоящее время при производстве деталей авиационных двигателей в качестве передовых технологий сварки широко используются сварка трением, лазерная сварка, вакуумная электронно-лучевая сварка (VEBW) и т.д. [8-18]. Широкое распространение получил метод диффузионной сварки, который позволяет соединять не только жаропрочные никелевые сплавы, но и множество других сплавов [8, 16, 17]. В работах [19-21] был предложен метод сварки давлением в вакууме в условиях сверхпластичности. При таком методе сохраняется структурная однородность, отсутствует градиент по температуре, а также возможно снизить температуру сварки на 200 °С и более градусов. Кроме того, данным методом можно получить соединение жаропрочных сплавов на основе Ni, которые содержат высокую объемную долю  $\gamma'$  ( $\geq 40\%$ ) и считаются “не поддающимися сварке” при использовании обычной сварки плавлением [21].

Классическая диффузионная сварка, осуществляемая при температуре, близкой к  $0,8T_{пл}$  кристаллического сплава, под действием напряжений ниже напряжения течения и без осуществления макро пластической деформации фактически является структурно-неконтролируемым технологическим процессом. Это обстоятельство часто приводит к невозможности достижения гарантированного качества твердофазного соединения после диффузионной сварки. Кардинальное решение проблемы обеспечения высокого качества твердофазного соединения достижимо при использовании эффекта структурной сверхпластичности хотя бы в одном из соединяемых сплавов [20-22].

В ранее проведенном исследовании [21] было проанализировано влияние температуры сварки давлением (СД) и термической обработки (ТО) на структуру и свойства твердофазного соединения деформируемых гетерофазных никелевых сплавов в сочетании ЭП975//ЭК61. В этой работе было показано, что температура СД и последующая ТО влияют на ширину зоны диффузионного взаимодействия легирующих элементов соединяемых сплавов ЭП975 и ЭК61, а также значения механических свойств сварных образцов. Однако, для более глубокого понимания взаимосвязи структуры и свойств сварных образцов в сочетании ЭП975//ЭК61

необходимо проведение дополнительных исследований структуры твердофазных соединений ЭП975//ЭК61, например, современным методом EBSD-анализа, а также изучения механизма разрушения сварных образцов.

Данная работа является продолжением исследований, описанных в работе [21] и включает в себя анализ микроструктуры после СД и СД+ТО методом EBSD анализа, а также детальные фрактографические исследования изломов образцов после механических испытаний.

### Материалы и методики исследований

Материалами для исследований были выбраны жаропрочные деформируемые никелевые сплавы: ЭК61 с упрочняющей  $\gamma''$  ( $\delta$ )-фазой  $Ni_3Nb$  и ЭП975 с упрочняющей  $\gamma'$ -фазой  $Ni_3(Al,Ti)$  стандартного химического состава согласно ТУ 14-1-50-45-91 (для сплава ЭК61) и ГОСТ 5632-2014 (для сплава ЭП975).

Исходная микроструктура в сплаве ЭК61 представляет собой УМЗ структуру смешанного типа, в которой УМЗ составляющая по морфологии и размеру близка к субмикродуплексному типу: средний размер зерен  $\gamma$ -фазы и некогерентных частиц  $\delta$ -фазы составил 0,3-0,8 мкм, объемная доля  $\delta$ -фазы составила  $V_\delta=24\%$ . При этом, наряду с УМЗ составляющей, в структуре сплава наблюдаются отдельные относительно крупные частицы  $\delta$ -фазы размером до 2 мкм, доля которых составляет  $V_\delta=5\%$ .

В сплаве ЭП975 исходная микроструктура была мелкозернистой типа микродуплекс со средним размером зерен и фаз  $\gamma$  и  $\gamma'$ -фаз 6-8 мкм и 2-3 мкм соответственно. В теле зерен матричной  $\gamma$ -фазы в процессе охлаждения с температуры деформации до комнатной дополнительно выделены когерентные дисперсные (0,4 мкм) частицы  $\gamma'$ -фазы, которые являются упрочняющими.

Эксперименты по сварке давлением в вакууме образцов из сплавов ЭК61 и ЭП975 проводили с использованием оригинальной установки для высокотемпературной сварки давлением (УВСД-1), включающей высокотемпературную печь, бойки из интерметаллидного сплава типа ВКНА, а также оборудование (форвакуумный + диффузионный насосы) для создания вакуума в процессе деформационной обработки соединяемых материалов. Подготов-

ленные образцы помещали в герметичный контейнер из нержавеющей стали. Внутри контейнера с образцами обеспечивался вакуум, сохраняемый в течение всего процесса СД. Деформация образцов вместе с контейнером проводилась по схеме одноосного сжатия на установке фирмы Schenck Trebel при температурах 850, 900 и 925 °С и начальной скорости деформации  $10^{-4} \text{ с}^{-1}$ . Термическую обработку осуществляли в электропечи по стандартному режиму для сплава ЭК61: закалка с температуры 980 °С и последующее старение при температуре 730 °С.

Прочность ТФС в сочетании сплавов ЭК61//ЭП975 при повышенной (650 °С) и комнатной температурах оценивалась в сравнении с менее жаропрочным сплавом ЭК61. Механические испытания проводили на испытательной машине Instron 5982.

Микроструктурные исследования проводили на растровом электронном микроскопе Mira 3LMH (TESCAN, Чехия). EBSD-анализ с шагом сканирования 0,1 мкм проводили с помощью программы CHANNEL 5. Границы зерен с разориентировкой менее 2° исключались из рассмотрения, учитывая точность измерения. Высокоугловыми границами считали границы с углом разориентировки более 15°.

## Результаты и обсуждение

### *Влияние сварки давлением и последующей термической обработки на микроструктуру твердофазных соединений никелевых сплавов в сочетании ЭК61//ЭП975*

На рисунке 1 представлены микроструктуры соединяемых сплавов и зоны ТФС после сварки давлением (СД) и последующей термической обработки (СД+ТО). В целом вся деформация локализуется в менее прочном сплаве ЭК61, в котором перед сваркой давлением была сформирована УМЗ структура, что обеспечило реализацию эффекта низкотемпературной сверхпластичности в процессе СД.

Анализ микроструктуры сварных образцов из разноименных никелевых сплавов в сочетании ЭК61//ЭП975 показал, что в зоне ТФС, обозначенного стрелками на рисунке 1, видна четкая линия, которая является границей раздела двух сплавов. При низкой температуре указанная линия принимает криволинейный вид, а с ростом температуры ее криволинейность снижается вследствие того, что удельные уси-

лия уменьшаются. При анализе микроструктуры после СД и последующей термической обработки установлено, что УМЗ структура сплава ЭК61 трансформируется в КЗ структуру. Микроструктура сплава ЭП975 термически стабильна, никаких существенных микроструктурных изменений как в процессе СД, так и последующей термической обработки не произошло.

Следует отметить, что методом EBSD не представляется возможным разделить  $\gamma$  и  $\gamma'$  фазы в сплаве ЭП975, поскольку они имеют один и тот же тип решетки и близкие параметры. По результатам EBSD анализа установлено, что в сварных образцах, полученных при  $T=850$  °С малоугловые границы обнаруживаются как в сплаве ЭК61, так и в сплаве ЭП975. С ростом температуры сварки доля малоугловых границ в сплаве ЭК61 снижается, а в сварных образцах, полученных при  $T=925$  °С они практически не наблюдаются. По-видимому, это обуславливается тем, что при температуре  $T=850$  °С усилия выше, чем при 925 °С, что оказывает существенное влияние на напряженно-деформированное состояние и возникновение субструктуры с соединяемых сплавов. Повышение температуры сварки позволяет снизить усилия, активировать диффузионные процессы и снизить долю малоугловых границ.

По результатам EBSD анализа также установлено, что в сварных образцах после СД+ТО малоугловых границ не выявляется, в отличие от сварных образцов без ТО. Вероятно, в процессе термической обработки произошла релаксация напряжений и перераспределение дислокаций. Термическая обработка, включающая закалку и старение, не оказала существенного влияния на микроструктуру сплава ЭП975. Структура оставалась мелкозернистой. В отличие от этого в структуре сплава ЭК61 при ТО произошли следующие изменения: при высокотемпературном нагреве (закалочной температуре) произошло полное растворение  $\delta$ -фазы, зерно  $\gamma$ -фазы в результате собирательной рекристаллизации становится крупнее более чем в 10 раз по сравнению с исходным состоянием. В структуре сплава ЭК61 выявлены двойники отжига, что особенно хорошо видно по EBSD-картам. Граница между двумя сплавами имеет прямую линию. Что касается сплава ЭК61, то в нем после термической обработки микроструктура представляет собой крупные зерна  $\gamma$ -фазы.

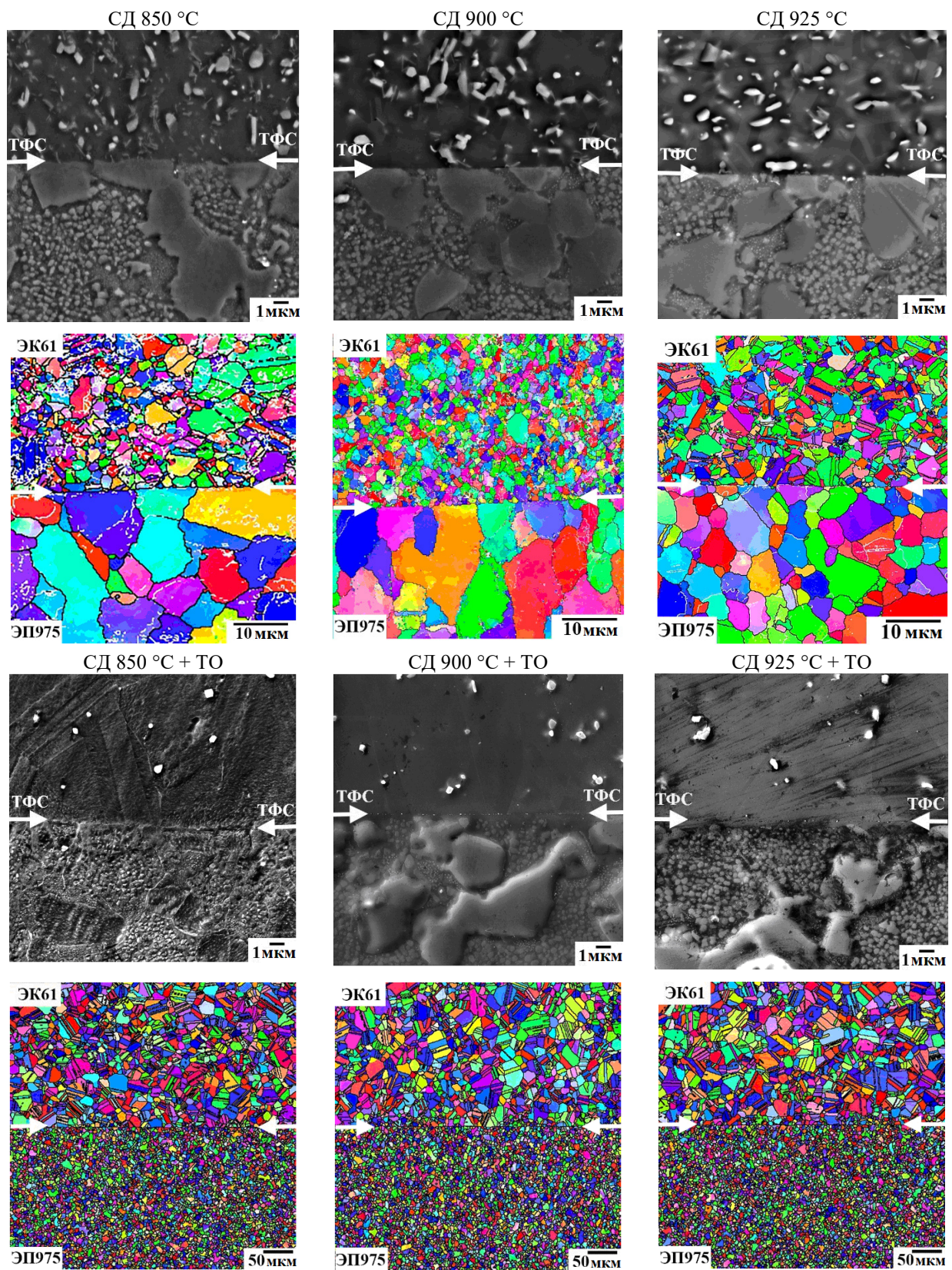


Рис.1. Микроструктура сварных образцов сплавов в сочетании ЭК61//ЭП975 после СД, а также с последующей термической обработкой (СД+ТО)

Fig.1. Microstructure of welded samples in combination of EK61//EP975 after pressure welding (PW) and after pressure welding with subsequent heat treatment (PW+HT)

### **Механические свойства сварных образцов никелевых сплавов в сочетании ЭК61//ЭП975 после сварки давлением и термической обработки**

Результаты механических испытаний сварных образцов по схеме одноосного растяжения представлены в работе [21].

#### ***Испытания при комнатной температуре.***

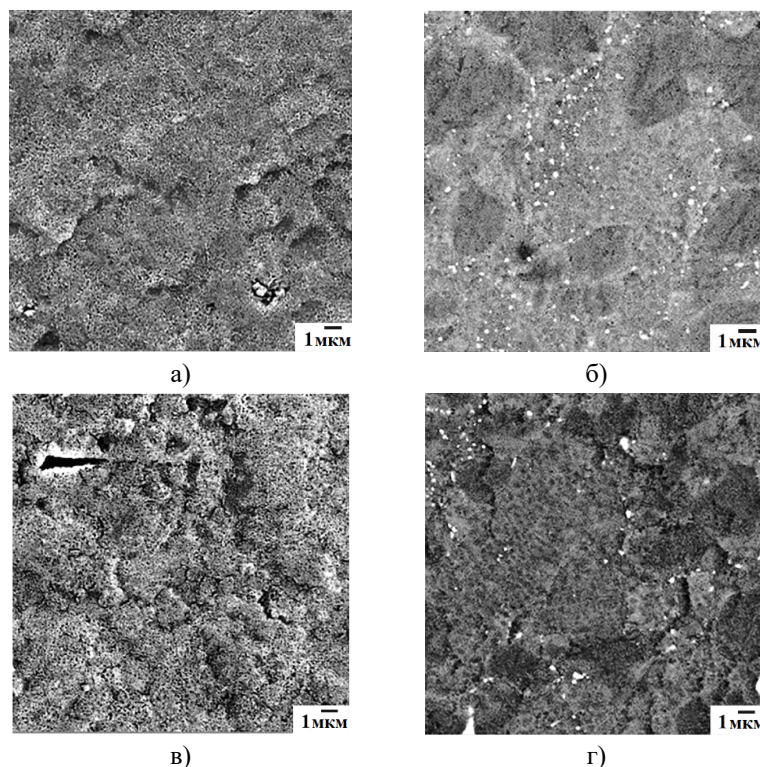
Установлено, что максимальная прочность наблюдается в образцах, полученных сваркой при  $T=850\text{ }^{\circ}\text{C}$  и составляет 0,8 от прочности сплава ЭК61, а минимальная прочность достигается в образцах, полученных при температуре  $925\text{ }^{\circ}\text{C}$  [21]. Вероятно, это связано с тем, что в сплаве ЭК61 после СД при  $T=925\text{ }^{\circ}\text{C}$  вследствие частичного растворения  $\delta$ -фазы, произошло разупрочнение сплава ЭК61, а также зоны соединения.

***Испытания при температуре  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ .*** Максимальная прочность (0,51 от прочности сплава ЭК61) наблюдается в сварных образцах, полученных СД при  $T=925\text{ }^{\circ}\text{C}$ . По-видимому, в про-

цессе эксперимента при  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  в сплаве ЭК61, а также в зоне твердофазного соединения, имеющего промежуточный химический состав, могли дополнительно выделиться дисперсные (наноразмерные) когерентные частицы упрочняющих фаз, как  $\gamma'$ -фазы, так и  $\gamma''$ -фазы, тем самым упрочнив сварной образец.

### **Фрактографический анализ поверхности разрушения сварных образцов никелевых сплавов в сочетании ЭК61//ЭП975 после сварки давлением и термической обработки**

Исследование поверхности излома образцов показало, что вид поверхности излома сварных образцов, разрушенных при разных температурах существенно не отличается. Поэтому на рисунке 2 представлены изломы для сварных образцов, полученных сваркой давлением при температуре  $925\text{ }^{\circ}\text{C}$ , которые отражают типичную картину и позволяют определить характер разрушения.



**Рис.2.** Вид поверхности излома сварных образцов сплавов в сочетании ЭК61//ЭП975 после СД ( $T=925\text{ }^{\circ}\text{C}$ ):  $T$  испытаний =  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  а – ЭК61; б – ЭП975;  $T$  испытаний  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$  в – ЭК61; г – ЭП975

**Fig.2.** View of the fracture surface of welded alloy of samples in combination of EK61//EP975 after pressure welding (PW) ( $T=925\text{ }^{\circ}\text{C}$ ):  $T$  test =  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a – EK61; b – EP975;  $T$  test  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; c – EK61; d – EP975

Изучение особенностей микрорельефа каждой зоны с помощью растровой электронной микроскопии показало, что на поверхности

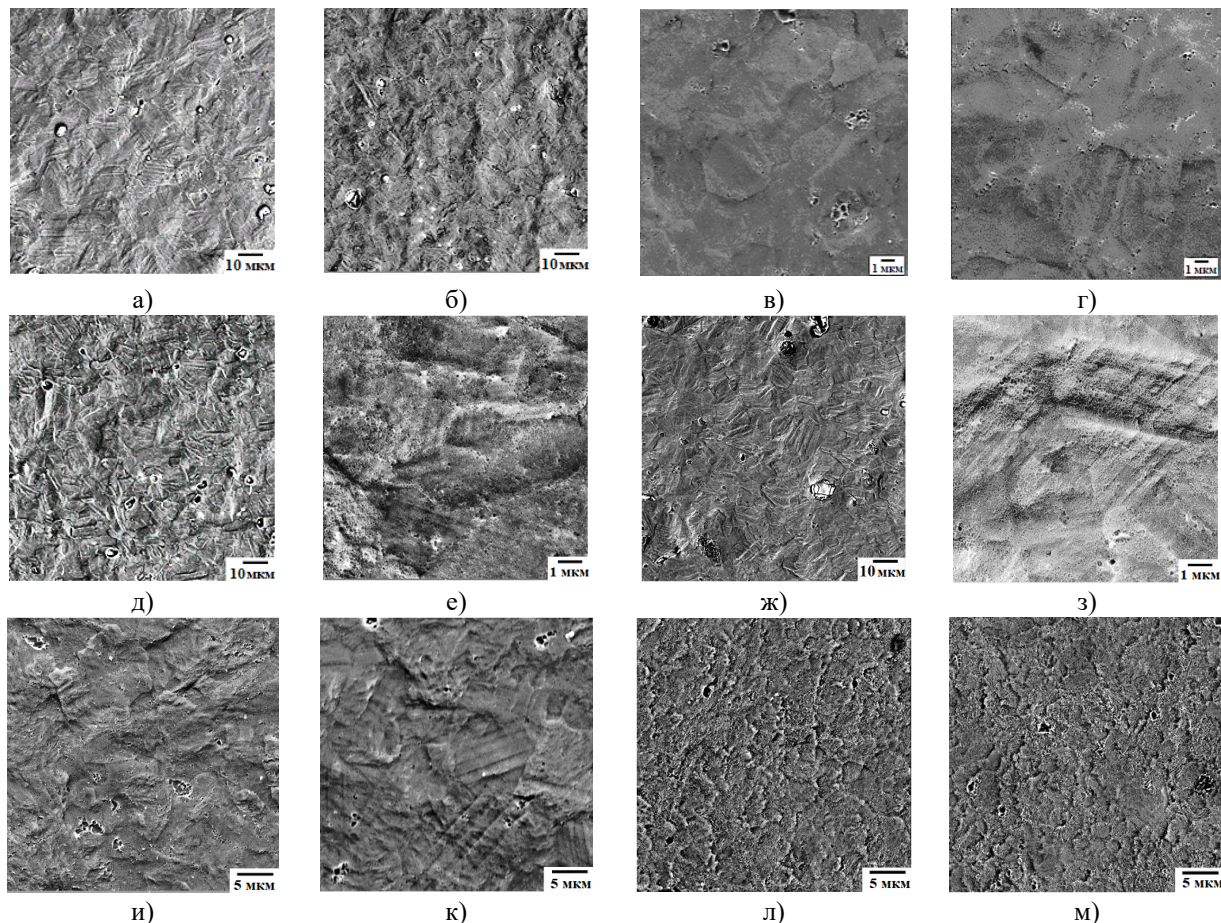
разрушения выявляются отдельные глубокие вторичные трещины вытянутой или неправильной формы, вероятно образованные вблизи

карбидных частиц. На рисунке 2 показано, что на обеих половинках видны следы границ зерен, которые по размеру соответствуют размеру зерен  $\gamma$ -фазы сплава ЭП975. На той, половине, которая относится к свариваемому сплаву ЭК61, виден отпечаток этой границы. Внутри мелких зерен наблюдается микрорельеф в виде округлых ямок равноосной формы расположенных перпендикулярно к поверхности излома, параметры которых сопоставимы с размером внутризеренных частиц  $\gamma'$ -фазы сплава ЭП975 размером 0,1-0,2 мкм. Выявляются элементы вязкого разрушения, характеризующегося наличием микрорельефа в виде ямок и гребней. Обнаруживаются такие элементы рельефа, как гребни отрыва и ручьистый узор.

Следует отметить, что характер разрушения сварных образцов, по-видимому, в значительной степени обусловлен строением зоны ТФС сплавов ЭК61//ЭП975. Изученный температурный интервал (850-925 °С) оптимален для

сплава ЭК61, но низок для сплава ЭП975. При этом внутри зерен  $\gamma$ -фазы сплава ЭП975 присутствуют прочные когерентные выделения  $\gamma'$ -фазы, которые вероятно, затрудняют пластическую деформацию сплава ЭП975 и при сварке давлением они внедряются в менее твердый сплав ЭК61, который сверхпластически деформируется, что приводит к образованию углублений – «отпечатков»  $\gamma'$ -фазы на поверхности разрушения со стороны сплава ЭК61.

Исследование особенностей микрорельефа каждой зоны с помощью сканирующей электронной микроскопии показало, что на поверхности излома выявляются отдельные глубокие вторичные трещины вытянутой или неправильной формы, образовавшиеся, вероятно, вблизи карбидных частиц. На рисунке 3 видно, что на обеих половинах видны следы границ зерен, которые по размеру соответствуют размеру зерен  $\gamma$ -фазы суперсплава ЭП975.



**Рис.3.** Вид поверхности излома сварных образцов сплавов в сочетании ЭК61//ЭП975 после СД+ТО: комнатная температура испытаний а, б – СД 850 °С+ТО; в, г – СД 900 °С+ТО; д, е, ж, з – СД 925 °С+ТО; Т испытаний 650 °С: и, к – СД 850 °С+ТО; л, м – СД 900 °С+ТО

**Fig.3.** View of the fracture surface of welded alloy of samples in combination of EK61//EP975 after pressure welding with subsequent heat treatment (PW+HT): T test 20 °C a, б – PW 850 °C + HT; c, d – PW 900 °C + HT; e, f, g, h – PW 925 °C+HT; T test 650 °C: i, j – PW 850 °C+HT; l, m – PW 900 °C+HT

На той половине, которая принадлежит свариваемому сплаву ЭК61, видны отпечатки таких границ. Внутри мелких зерен наблюдается микрорельеф в виде округлых впадин равноосной формы, расположенных перпендикулярно поверхности излома, параметры которого сравнимы с размерами внутризеренных частиц  $\gamma'$ -первичной фазы суперсплав ЭП975 размером 0,1-0,2 мкм.

Выявлены элементы пластического разрушения, характеризующиеся наличием микрорельефа в виде впадин и гребней. Вероятно, после термообработки характер разрушения носит межкристаллитный характер. На поверхности излома видны границы зерен, размер которых составляет около 5-7 мкм, что сопоставимо с размером границ зерен жаропрочного сплава ЭП975. По-видимому, внутри зерен наблюдаются полосы скольжения, прерываемые границами зерен. Этот факт позволяет предположить, что разрушения произошли вдоль и поперёк.

### Заключение

Экспериментально установлено, что сварка давлением в условиях низкотемпературной сверхпластичности является эффективным методом для получения ТФС из никелевых сплавов ЭК61 и ЭП975 с различным типом упрочняющей фазы. Показано, что в сварных образцах, полученных при  $T=850$  °С, малоугловые границы обнаруживаются как в сплаве ЭК61, так и в сплаве ЭП975. С ростом температуры сварки доля малоугловых границ в сплаве ЭК61 снижается, а в сварных образцах, полученных при  $T=925$  °С, они практически не наблюдаются. Прочность в сварных образцах, полученных СД при  $T=925$  °С подвергнутых термообработке составляет 0,51 от прочности сплава ЭК61. Термическая обработка приводит к появлению двойников отжига и росту зерен в сплаве ЭК61. Фрактографический анализ поверхности разрушения сварных образцов показал, что характер разрушения в значительной степени обусловлен строением зоны ТФС сплавов ЭК61//ЭП975, а вид поверхности излома свидетельствует о преимущественном вязком характере разрушения.

### 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. Xia W., Zhao X., Yue L., Zhang Z. A review of composition evolution in Ni-based single

crystal superalloys // *Journal of Materials Science & Technology*. 2020. V. 44. P. 76–95.

3. Perrut M., Caron P., Thomas M., Couret A. High temperature materials for aerospace applications: Ni-based superalloys and  $\gamma$ -TiAl alloys // *Comptes Rendus Physique*. 2018. V. 19, Is. 8. P. 657–671.

4. Логунов А.В. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин. М.: ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2017. 854 с.

5. Magerramova L.A. Achievement of bimetallic blisks integrated dissimilar alloys for promising high temperature aviation gas turbine engines. 28th International congress of the aeronautical sciences. 2012 [Электронный ресурс] – Режим доступа [http://www.icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS2012/PAPERS/224.PDF](http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2012/PAPERS/224.PDF). Дата обращения: 06.05.2024.

6. Кузменко М.Л., Чигрин В.С., Белова С.Е. Статическая прочность рабочих лопаток и дисков компрессоров и турбин ГТД. Рыбинск: РГТА, 2005. 74 с.

7. Горобец Г.В. К расчету распределения температуры на дисках осевых компрессоров газотурбинных двигателей // *Промышленная теплотехника*. 2004. Т. 26, № 5. С. 37–40.

8. Люшинский А.В., Николич Е.В., Жлоба А.А., Харьковский С.В. Диффузионная сварка жаропрочных сплавов на никелевой основе // *Сварочное производство*. 2014. № 5. С. 25–28.

9. Peng J., Wu R., Zhang J., Cai H. High-temperature mechanical properties and microstructure of welded joint in GH4169/IC10 dissimilar nickel-based superalloys by vacuum electron beam welding // *Materials Science and Engineering: A*. 2023. V. 884. 145561.

10. Geng P., Ma H., Wang M., Qin G., Zhou J. et al. Dissimilar linear friction welding of Ni-based superalloys // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2023. V. 191. 104062.

11. Ye R.R., Li H.Y., Ding R.G., Doel T.J.A., Bray S. et al. Microstructure and microhardness of dissimilar weldment of Ni-based superalloys IN718-IN713LC // *Materials Science and Engineering: A*. 2020. V. 774. 138894.

12. Mary C., Jahazi M. Multi-Scale Analysis of IN-718 Microstructure Evolution During Linear Friction Welding // *Advanced Engineering Materials*. 2008. V. 10, Is. 6. P. 573–578.

13. Winowlin Jappes J.T., Ajithram A., Adamkhan M., Reena D. et al. Welding on Ni based super alloys – A review // *Materials today: Proceedings*. 2022. V. 60, Part 3. P. 1656–1659.

14. Nandan R., DebRoy T., Bhadeshia H.K.D.H. Recent advances in friction-stir welding



– Process, weldment structure and properties // *Progress in Materials Science*. 2008. V. 53, Is. 6. P. 980–1023.

15. Shayakhmetova E.R., Mukhametgalina A.A., Murzinova M.A., Nazarov A.A. Structure and shear strength of ultrasonically welded nickel joints // *Letters on materials*. 2023. V. 13, N 4s, P. 456–461.

16. Lavrishchev A.V., Prokopen S.V., Tynchenko V.S., Myrugin A.V., Kukartsev V.V. et al. Investigation of the Solid-Phase Joint of VT-14 Titanium Alloy with 12KH18N10T Stainless Steel Obtained by Diffusion Welding through Intermediate Layers // *Metals*. 2021. V. 11, N 8. 1325.

17. Khomich Y., Yamshchikov V. The Effect of Preliminary Laser Surface Treatment on the Mechanical Properties of a Solid-Phase Compound of an Iron-Nickel Alloy in Diffusion Welding. *Springer Proceedings in Materials*. 2020. V. 6. Springer, Cham.

18. Catchpole-Smith S., Aboulkhair N., Parry L., Tuck C., Ashcroft I.A. et al. Clare Fractal scan strategies for selective laser melting of ‘unweldable’ nickel superalloys // *Additive Manufacturing*. 2017. V. 15. P. 113–122.

19. Валитова Э.В., Ахунова А.Х., Валитов В.А., Лутфуллин Р.Я., Дмитриев С.В., Мухаметрахимов М.Х. Моделирование процесса сварки давлением жаропрочного никелевого сплава с использованием ультрамелкозернистой прокладки // *Письма о материалах*. 2014. Т. 4, № 3. С. 190–194.

20. Лутфуллин Р.Я. Влияние сверхпластичности на твердофазную свариваемость кристаллических материалов // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2023. Т. 20, № 1. С. 132–138.

21. Галиева Э.В., Классман Е.Ю., Валитов В.А. Влияние температуры сварки давлением и последующей термической обработки на структуру и свойства твердофазных соединений из никелевых сплавов ЭП975 и ЭК61 // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2023. Т. 20, № 4. С. 533–545.

22. Galieva E.V., Povarova K.B., Drozdov A.A., Valitov V.A. Structure and Properties of the Solid-Phase Joints of a Wrought EP975 Nickel Alloy and a Single-Crystal Intermetallic VKNA-25 Alloy Formed by Pressure Welding at a Strain of 24 % under the Superplasticity of the EP975 Alloy // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2018. V. 1. P. 42–50.

#### Информация об авторах

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

Е. Ю. Классман – аспирант, инженер Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

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

Е. М. Степухов – студент Уфимского университета науки и технологий.

Р. Р. Габбасов – магистрант Уфимского государственного нефтяного технического университета.

А. А. Тагирова – магистрант Уфимского университета науки и технологий.

#### References

1. Kishkin, S. T. (2006). Sozdaniye, issledovaniye i primeneniye zharoprochnykh splavov: Izbrannyye trudy (K 100-letiyu so dnya rozhdeniya). M.: Nauka. P. 407. (In Russ.).

2. Xia, W., Zhao, X., Yue, L. & Zhang, Z. (2020). A review of composition evolution in Ni-based single crystal superalloys. *Journal of Materials Science & Technology*, 44, 76–95.

3. Perrut, M., Caron, P., Thomas, M. & Couret, A. (2018). High temperature materials for aerospace applications: Ni-based superalloys and  $\gamma$ -TiAl alloys. *Comptes Rendus Physique*, 19(8), 657–671.

4. Logunov, A. V. (2017). Zharoprochnyye nikelovyye splavy dlya lopatok i diskov gazovykh turbin. M.: OOO «Izdatel'skiy dom «Gazoturbinye tekhnologii». P. 854. (In Russ.).

5. Magerramova, L. A. (2012). Achievement of bimetallic blisks integrated dissimilar alloys for promising high temperature aviation gas turbine engines. 28th International congress of the aeronautical sciences. [Electronic resource] – Access mode [http://www.icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS2012/PAPERS/224.PDF](http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2012/PAPERS/224.PDF). Date of the application: 06.05.2024.

6. Kuzmenko, M. L., Chigrin, V. S. & Belova, S. E. (2005). Statischechnaya prochnost' rabochikh lopatok i diskov kompressorov i turbin GTD. Rybinsk: RGATA. P. 74. (In Russ.).

7. Gorobets, G. V. (2004). K raschetu raspredeleniya temperatury na diskakh osevykh kompressorov gazoturbinykh dvigateley. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 26(5), 37–40. (In Russ.).

8. Lyushinskiy, A. V., Nikolich, E. V., Zhloba, A. A. & Khar'kovskiy, S. V. (2014). Diffuzionnaya svarka zharoprochnykh splavov na nikelovoy osnove. *Svarochnoye proizvodstvo*, (5), 25–28. (In Russ.).

9. Peng, J., Wu, R., Zhang, J. & Cai, H. (2023). High-temperature mechanical properties and microstructure of welded joint in

- GH4169/IC10 dissimilar nickel-based superalloys by vacuum electron beam welding. *Materials Science and Engineering: A*, 884, 145561.
10. Geng, P., Ma, H., Wang, M., Qin, G. & Zhou, J. et al. (2023). Dissimilar linear friction welding of Ni-based superalloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 191, 104062.
11. Ye, R. R., Li, H. Y., Ding, R. G., Doel, T. J. A. & Bray, S. et al. (2020). Microstructure and microhardness of dissimilar weldment of Ni-based superalloys IN718-IN713LC. *Materials Science and Engineering: A*, 774, 138894.
12. Mary, C. & Jahazi, M. (2008). Multi-Scale Analysis of IN-718 Microstructure Evolution During Linear Friction Welding. *Advanced Engineering Materials*, 10(6), 573–578.
13. Winowlin Jappes, J. T., Ajithram, A., Adamkhan, M. & Reena, D. et al. (2022). Welding on Ni based super alloys – A review. *Materials today: Proceedings*, 60, 3, 1656–1659.
14. Nandan, R., DebRoy, T. & Bhadeshia, H. K. D. H. (2008). Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties. *Progress in Materials Science*, 53(6), 980–1023.
15. Shayakhmetova, E. R., Mukhametgalina, A. A., Murzinova, M. A. & Nazarov, A. A. (2023). Structure and shear strength of ultrasonically welded nickel joints. *Letters on materials*, 13(4s), 456–461.
16. Lavrishchev, A. V., Prokopen, S. V. & Tynchenko, V. S., Myrugin, A. V., Kukartsev, V. V. et al. (2021). Investigation of the Solid-Phase Joint of VT-14 Titanium Alloy with 12KH18N10T Stainless Steel Obtained by Diffusion Welding through Intermediate Layers. *Metals*, 11(8), 1325.
17. Khomich, Y. & Yamshchikov, V. (2020). The Effect of Preliminary Laser Surface Treatment on the Mechanical Properties of a Solid-Phase Compound of an Iron-Nickel Alloy in Diffusion Welding. *Springer Proceedings in Materials*, 6, Springer, Cham.
18. Catchpole-Smith, S., Aboulkhair, N., Parry, L., Tuck, C. & Ashcroft, I. A. et al. (2017). Clare Fractal scan strategies for selective laser melting of ‘unweldable’ nickel superalloys. *Additive Manufacturing*, 15, 113–122.
19. Valitova, E. V., Akhunova, A. Kh., Valitov, V. A., Lutfullin, R. Ya., Dmitriyev, S. V. & Mukhametrakhimov, M. Kh. (2014). Modelirovaniye protsessa svarki davleniyem zharoprochnogo nikelvogo splava s ispol'zovaniyem ul'tramelkozernistoy prokladki. *Pis'ma o materialakh*, 4(3), 190–194. (In Russ.).
20. Lutfullin, R. Ya. (2023). Vliyaniye sverkhplastinosti na tverdogfaznyuyu svarivayemost' kristallicheskikh materialov. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(1), 132–138. (In Russ.).
21. Galieva, E. V., Klassman, E. Yu. & Valitov, V. A. (2023). Vliyaniye temperatury svarki davleniyem i posleduyushchey termicheskoy obrabotki na strukturu i svoystva tverdogfaznykh soyedineniy iz nikelvykh splavov EP975 i EK61. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(4), 533–545. (In Russ.).
22. Galieva, E.V., Povarova, K. B., Drozdov A. A. & Valitov, V. A. (2018). Structure and Properties of the Solid-Phase Joints of a Wrought EP975 Nickel Alloy and a Single-Crystal Intermetallic VKNA-25 Alloy Formed by Pressure Welding at a Strain of 24 % under the Superplasticity of the EP975 Alloy. *Russian Metallurgy (Metally)*, 1, 42–50.

#### Information about the authors

*E. V. Galieva* – Candidate of Technical Sciences, Researcher of the Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences.

*E. Yu. Klassman* – Postgraduate Student, Engineer of the Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences.

*V. A. Valitov* – Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher of the Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences.

*E. M. Stepukhov* – Student of the Ufa University of Science and Technology.

*R. R. Gabbasov* – Master Student of Ufa State Petroleum Technological University.

*A. A. Tagirova* – Master Student of the Ufa University of Science and Technology.

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

Статья поступила в редакцию 06.05.2024; одобрена после рецензирования 10.06.2024; принята к публикации 12.08.2024.

The article was received by the editorial board on 06 May 24; approved after reviewing 10 June 24; accepted for publication 12 Aug. 24.