

**MICROSTRUCTURE AND MICROHARDNESS  
OF SOLID-STATE JOINTS OF HIGH-TEMPERATURE  
NICKEL-BASED ALLOYS OBTAINED BY PRESSURE WELDING**

*Elvina Venerovna Galieva*<sup>1a</sup>, *Radim Rifkatovich Gabbasov*<sup>1,2</sup>, *Azaliya Azamatovna Tagirova*<sup>1</sup>,  
*Egor Mikhaylovich Stepukhov*<sup>1</sup>, *Ekaterina Yurievna Klassman*<sup>1</sup>, *Vener Anvarovich Valitov*<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Institute for Metal Superplasticity Problems RAS, 39 Stepana Khalturina St., 450001, Ufa, Russia

<sup>2</sup> Ufa State Petroleum Technological University, 1 Kosmonavtov St., 450064, Ufa, Russia

<sup>3</sup> Ufa University of Science and Technology, 32 Zaki Validi St., 450076, Ufa, Russia

<sup>a</sup> galieva\_elvina\_v@mail.ru

**ABSTRACT**

The task of joining dissimilar high-temperature nickel-based alloys (superalloys) is relevant to the mass reduction of aircraft engine parts. The paper presents the results of the microstructure and microhardness studies of solid-state joints of the high-temperature nickel-based alloys obtained by pressure welding under superplastic conditions in the following combinations: EK61//EP741NP, and EK61//EP975, EP741NP//VKNA-25 and EP975//VKNA-1V. Pressure welding was performed in vacuum at 850 °C for EK61//EP741NP and EK61//EP975, and at 1125 °C for EP741NP//VKNA-25 and EP975//VKNA-1V. After pressure welding at 850 °C, the initial microstructure of the joined EK61//EP741NP and EK61//EP975 superalloys remains stable. During high-temperature (1125 °C) pressure welding in the combination of EP741NP//VKNA-25 and EP975//VKNA-1V superalloys, an increase in the grain size of the  $\gamma$ -phase from 5–6 to 7–8  $\mu\text{m}$  is observed for EP741NP superalloy and from 6–8 to 9–10  $\mu\text{m}$ . At the same time the monocrystalline structure is maintained in the VKNA-25 and VKNA-1V alloy. The microhardness of all solid-state joints is at the average level between the joined materials.

**KEYWORDS**

Pressure welding; high-temperature nickel-based alloy; intermetallic alloy; microhardness.

**МИКРОСТРУКТУРА И МИКРОТВЕРДОСТЬ ТВЕРДОФАЗНЫХ СОЕДИНЕНИЙ,  
ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ДАВЛЕНИЕМ РАЗНОИМЕННЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ  
СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ**

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

<sup>1</sup> Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, 450001, Россия, Уфа, ул. Степана Халтурина, 39

<sup>2</sup> Уфимский государственный нефтяной технический университет, 450064, Россия, Уфа, ул. Космонавтов, 1

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

<sup>a</sup> galieva\_elvina\_v@mail.ru

## АННОТАЦИЯ

Задача формирования неразъемных твердофазных соединений из разноименных жаропрочных никелевых сплавов актуальна для снижения массогабаритных и эксплуатационных характеристик деталей авиадвигателя. В статье представлены результаты исследований микроструктуры и микротвердости твердофазных соединений жаропрочных никелевых сплавов ЭК61//ЭП741НП и ЭК61//ЭП975, ЭП741НП//ВКНА-25 и ЭП975//ВКНА-1В, полученных методом сварки давлением в условиях сверхпластичности. Сварку давлением проводили в вакууме при температуре 850 °С для сплавов в сочетании ЭК61//ЭП741НП и ЭК61//ЭП975, а для сплавов ЭП741НП//ВКНА-25 и ЭП975//ВКНА-1В – при температуре 1125 °С. После сварки давлением при 850 °С сохраняется стабильной исходная микроструктура соединяемых сплавов ЭК61//ЭП741НП и ЭК61//ЭП975. При высокотемпературной (1125 °С) сварке давлением в комбинации сплавов ЭП741НП//ВКНА-25 и ЭП975//ВКНА-1В в соединяемом сплаве ЭП741НП наблюдается небольшой рост размера зерна  $\gamma$ -фазы с 5–6 до 7–8 мкм, а в сплаве ЭП975 с 6–8 мкм до 9–10 мкм, при этом в сплавах ВКНА-25 и ВКНА-1В сохраняется монокристаллическая структура. Микротвердость всех твердофазных соединений находится на среднем уровне между соединяемыми материалами.

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Сварка давлением; жаропрочный никелевый сплав; интерметаллидный сплав; микротвердость.

### Введение

Жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС) обладают таким комплексом свойств, как высокое сопротивление усталости, коррозионная стойкость, прочность при повышенных температурах. Материалы с такими характеристиками находят широкое применение в области авиационного двигателестроения [1–3]. Наиболее нагруженными элементами газотурбинного двигателя являются диски турбины и присоединяемые к ним лопатки. Повышение прочности и эффективности этих элементов непосредственно связано с общей надежностью и эксплуатационными сроками работы двигателя [4].

Одним из решений для повышения надежности является применение деталей типа «блиск», которые могут быть отлиты как единое целое или изготовлены путем сварки отдельных лопаток с диском. Однако механические крепления лопаток могут стать источником проблем, приводя к возникновению трещин и их распространению [5]. Создание неразъемного типа соединения, в свою очередь, способствует снижению массы из-

готовляемой детали (20–30%), а также повышению аэродинамических характеристик [6–10]. Вторым решением повышения надежности и характеристик газотурбинного двигателя является необходимость применения новых теплостойких материалов и современных конструкторских, технологических решений, таких как конструкция «диск-вал». Такие меры не только повышают эффективность работы двигателя, но и существенно влияют на его долговечность и надежность в целом [11–13].

Существуют различные способы получения неразъемных соединений; так, в работе [14] была изучена свариваемость листовых заготовок Nimonic 80A с основным материалом, посредством электронно-лучевой сварки. Исследование микроструктуры показало, что зона сварки в основном состоит из столбчатых дендритов. При этом замечено снижение твердости в зоне соединения, которое, скорее всего, связано с локальным различием в тепловом цикле вызванных сваркой. В работе [15] исследованы сварные соединения сплава GH4169, полученные методом линейной сварки трением. Авторами обнаружено,

что в сварных образцах имеются поры и микротрещины. Основными элементами области пересечения микротрещин являются Al и O, а также имеется небольшое количество Ti и C, что указывает на наличие оксидов Al и Ti и карбидных частиц в сварной зоне.

Перспективным способом получения качественных твердофазных соединений (ТФС) из ЖНС является сварка давлением в условиях сверхпластичности [16–23]. Такой метод получения твердофазных соединений в случае соединения поликристаллического и монокристаллического материала способствует сохранению монокристаллической структуры соединяемого сплава [21]. Достаточным условием для получения качественного соединения является проявление эффекта сверхпластичности хотя бы в одном из соединяемых материалов [22, 23].

В работе [24] авторами представлены результаты исследований сварных образцов, полученных диффузионной сваркой, между никелевым сплавом на основе  $Ni_3Al$  и сталью S31042, с использованием обработки поверхности методом самонанокристаллизации. Авторы подчеркивают, что такой подход значительно улучшает прочность и надежность соединений, обеспечивая их высокую эффективность в экстремальных условиях. В другой работе [25] автор акцентирует внимание на важности этих методов для аэрокосмической отрасли, где требуется создание соединений, способных сохранять свои механические свойства в условиях высоких температур и механических нагрузок. В книге также содержатся подробные примеры применения этих методов в реальных производственных процессах, что делает ее важным источником информации для дальнейших исследований и разработок в данной области.

Структура сварных соединений жаропрочных никелевых сплавов во многом определяет их прочностные характеристики [26]. В работе [26] подробно рассматривается образование  $\gamma'$ -фазы и карбидов, а также их

влияние на свойства сплавов при термической обработке. Эти фазы придают материалу высокую жаропрочность, но также могут стать источником хрупкости при неправильной сварке. Исследования показывают, что для обеспечения оптимальных свойств сварных соединений необходимо учитывать не только режимы сварки, но и последующую термообработку. Важным фактором является контроль за структурой зоны термического влияния, где происходит активное изменение фазового состава и дисперсности частиц. Неправильное распределение упрочняющих фаз, например, чрезмерное выделение карбидов по границам зерен, может значительно снизить долговечность изделия из-за появления склонности к межзеренной коррозии и трещинообразованию [26].

Данная работа посвящена исследованию микроструктуры и микротвердости твердофазных соединений в сочетаниях жаропрочных никелевых сплавов ЭК61//ЭП741НП, ЭК61//ЭП975, ЭП741НП//ВКНА-25 и ЭП975//ВКНА-1В, полученных сваркой давлением в условиях сверхпластичности.

## 1. Материалы и методики исследования

Материалами для исследований были выбраны 5 сплавов: порошковый жаропрочный никелевый сплав ЭП741НП с упрочняющей  $\gamma'$ -фазой  $Ni_3(Al, Ti)$  в двух состояниях – с исходной крупнозернистой (КЗ) структурой и ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой; жаропрочные деформируемые никелевые сплавы ЭК61 с упрочняющей  $\gamma''$  ( $\delta$ )-фазой  $Ni_3Nb$  и ЭП975 с упрочняющей  $\gamma'$ -фазой  $Ni_3(Al, Ti)$ ; монокристаллические интерметаллидные сплавы ВКНА-25 и ВКНА-1В с кристаллографической ориентацией [001].

Заготовки из сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25 были изготовлены посредством вакуумной индукционной плавки методом высокоградиентной направленной кристаллизации [27]. Скорость затвердевания составляла 10 мм/мин, градиент температуры затвердевания –  $G = 150$  °С/см.

Для проведения экспериментов по сварке давлением цилиндрические образцы были вырезаны из заготовок на электроискровых станках Арта-120 и А-207.

Сварка давлением (СД) в условиях сверхпластичности осуществлялась на разработанной в ИПСМ РАН установке для высокотемпературной сварки давлением (УВСД-1), образцы помещались в герметичные контейнеры из нержавеющей стали, в которых в процессе сварки поддерживался вакуум.

Сварку давлением проводили в следующих комбинациях, микроструктурных состояниях и температурах:

1. ЭК61 (УМЗ) // ЭП741НП (КЗ),  $T = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 5 \cdot 10^{-2}\text{ Па}$ ;

2. ЭК61 (УМЗ) // ЭП975 (МЗ),  $T = 850\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 5 \cdot 10^{-2}\text{ Па}$ ;

3. ЭП741НП (МЗ) // ВКНА-25 (монокристаллический),  $T = 1125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 5 \cdot 10^{-2}\text{ Па}$ ;

4. ЭП975 (МЗ) // ВКНА-1В (монокристаллический),  $T = 1125\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P = 10^{-1}\text{ Па}$ .

Скорость деформации при сварке давлением для всех четырех комбинаций сплавов составила  $10^{-4}\text{ с}^{-1}$ .

Исследование микроструктуры проводили на растровом электронном микроскопе Mira 3LMN (TESCAN). Микротвердость измеряли на микротвердомере МНТ-10. Величина нагрузки составляла 100 грамм, скорости нагружения – 50 грамм/секунду и времени выдержки – 10 секунд. Микротвердость измеряли как в основном материале, так и в зоне (ТФС). Для комбинации сплавов ЭК61//ЭП741НП средний размер вдавливания составил 22,3 мкм; для ЭК61//ЭП975 средний размер вдавливания составил 20,6 мкм. Средний размер отпечатка составил 19,9 мкм для комбинации сплавов ЭП741НП//ВКНА-25 и ЭП975//ВКНА-1В.

Все исследуемые сплавы включают основные легирующие элементы такие как Cr, Al, Mo, Ti и Ni. Сплавы ЭП975 и ЭП741НП содержат одинаковое количество  $\gamma'$ -образующих элементов (Al+Ti). Сплав ЭК61 содержит большое количество Nb, что обеспечивает упрочнение этого сплава

$\gamma'$ -фазой. Главное отличие в химическом составе интерметаллидных сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25 заключается в том, что в ВКНА-25 содержится тугоплавкий элемент Re.

## 2. Результаты и их обсуждение

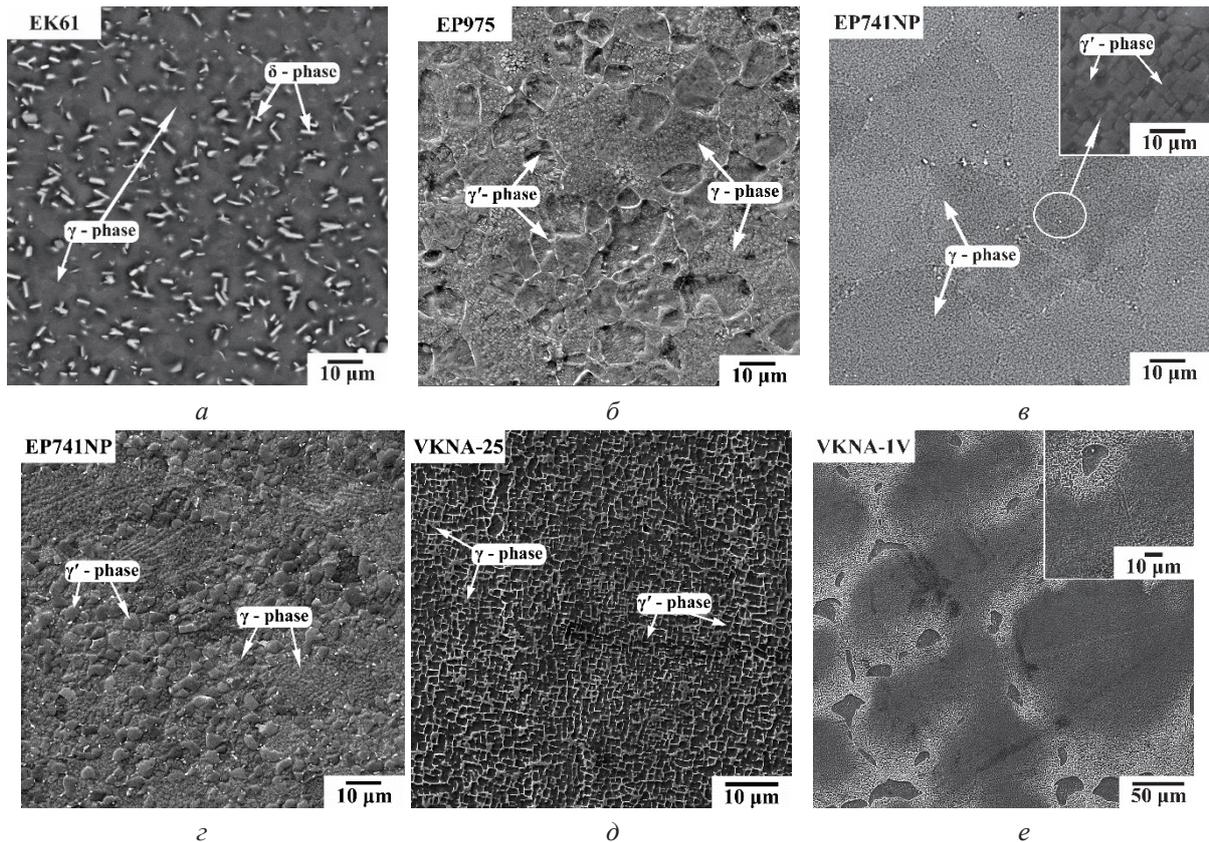
Исходная микроструктура сплавов перед СД представлена на рис. 1.

*Сплав ЭК61.* В исходном состоянии сплав ЭК61 (рис. 1, а) имел смешанную УМЗ структуру, которая была сформирована методом всесторонней изотермическойковки. 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 (показаны стрелками) размером до 2 мкм, доля которых составляет  $V_{\delta} = 5\%$ .

*Сплав ЭП975.* Сплав ЭП975 в исходном состоянии имел мелкозернистую (МЗ) структуру типа микродулекс, средний размер зерен  $\gamma$ -фазы составил 6–8 мкм, а  $\gamma'$  фазы 2–3 мкм (рис. 1, б, в). В теле зерен  $\gamma$ -фазы выделены кубоидной формы, а также выделены когерентные дисперсные частицы  $\gamma'$ -фазы размером до 0,4 мкм.

*Сплав ЭП741НП.* В исходном состоянии сплав ЭП741НП, который используется в комбинации сплавов ЭК61//ЭП741НП, имел крупнозернистую микроструктуру с матричной  $\gamma$ -фазой ( $D_{\text{ср.}\gamma} = 47 \pm 2\text{ мкм}$ ), с выделенными внутри дисперсными частицами  $\gamma'$ -фазы (рис. 1, г). Сплав ЭП741НП, который использовался в комбинации сплавов ЭП741НП//ВКНА-25, имел МЗ структуру со средним размером зерен  $\gamma$ - и частиц  $\gamma'$ -фазы 5–6 мкм (рис. 1, д). В теле зерен  $\gamma$ -фазы выделены кубоидной формы, а также выделены когерентные дисперсные частицы  $\gamma'$ -фазы размером 0,1–0,2 мкм.

*Сплав ВКНА-25 и ВКНА-1В.* Сплав ВКНА-25 имел дендритно-ячеистую структуру, состоящую из прослоек  $\gamma$ -фазы, и дендритов, состоящих из  $\gamma'$ -фазы (рис. 1, е).



**Рис. 1.** Исходная микроструктура деформируемого сплава ЭК61 с УМЗ структурой (а), деформируемого сплава ЭП975 с МЗ структурой (б), порошкового сплава ЭП741НП с КЗ структурой (в) и МЗ (з), монокристаллических интерметаллидных сплавов ВКНА-25 (д) и ВКНА-1В (е)

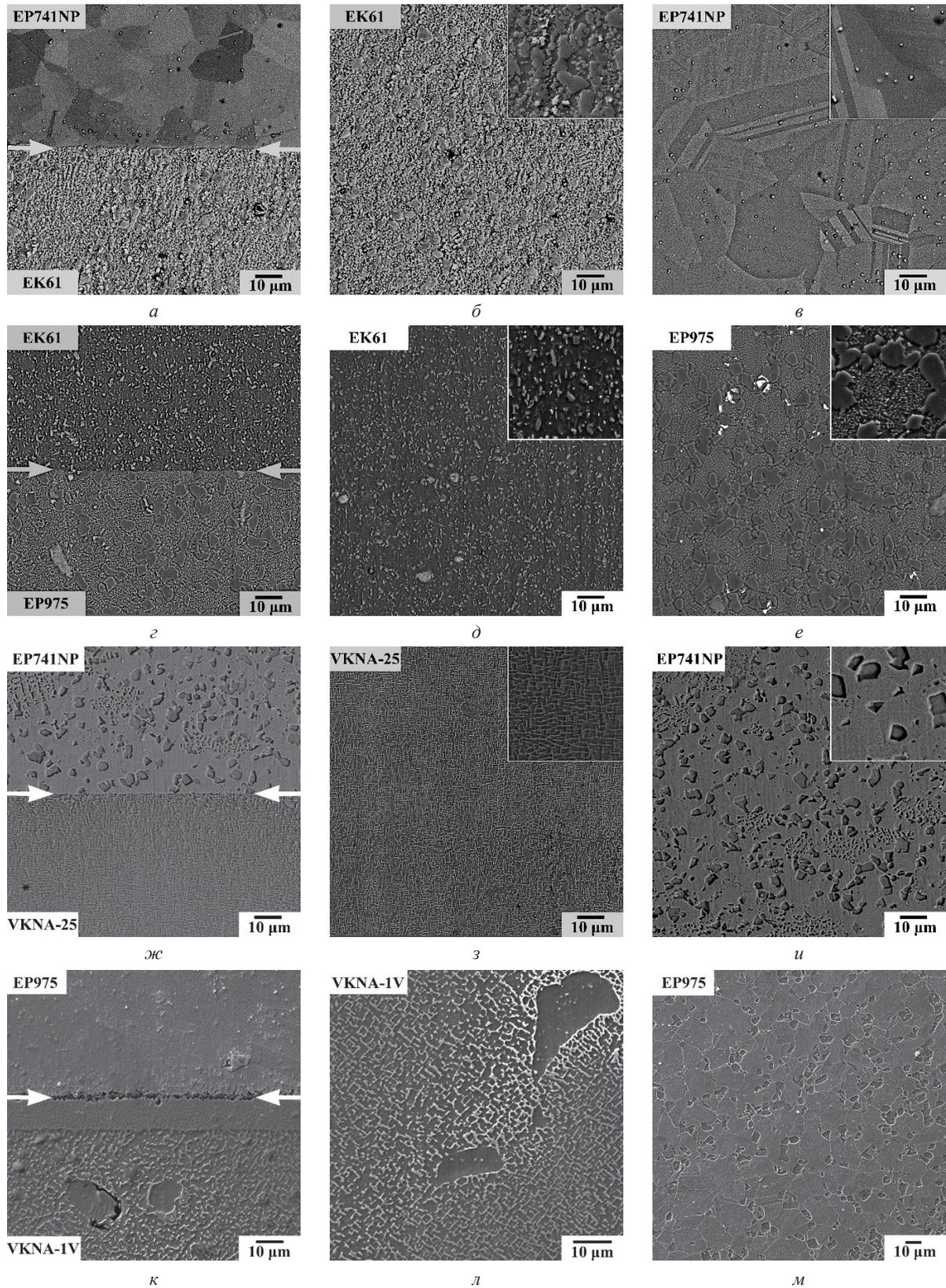
**Fig. 1.** The initial microstructure of the wrought EK61 superalloy with an ultrafine-grained (UFG) microstructure (a), the wrought EP975 superalloy with a fine-grained (FG) microstructure (b), the powder EP741NP superalloy with a coarse-grained (CG) (e) and FG (z) microstructure (e), the single-crystal intermetallic VKNA-25 (d) and VKNA-1V (e)

На рис. 2 представлены микроструктуры свариваемых сплавов и зоны ТФС после сварки давлением. Стрелками указана граница раздела двух сплавов. В комбинации ЭП741НП//ВКНА-25 получено практически беспористое соединение.

Так как сплав ЭК61 с ультрамелкозернистой структурой показывает характеристики низкотемпературной сверхпластичности при температуре СД 850 °С, в отличие от сплавов ЭП975 и ЭП741НП, которые проявляют сверхпластичность при более высоких температурах (выше 900 °С), то в комбинациях сплавов ЭК61//ЭП975 и ЭК61//ЭП741НП деформация в процессе СД происходит в сплаве ЭК61, а сплавы ЭП741НП и ЭП975 остаются практически недеформированными. В парах ЭК61//ЭП741НП и ЭК61//ЭП975 в процессе

СД структура сохраняется стабильной, роста зерна не наблюдается.

Аналогично в комбинациях сплавов ЭП741НП//ВКНА-25 и ЭП975//ВКНА-1В при сварке давлением сверхпластическая деформация развивается только в жаропрочных никелевых сплавах ЭП741НП и ЭП975. При этом, отмечается небольшое увеличение среднего размера зерен  $\gamma$ -фазы во всем объеме до 7–8 мкм в сплаве ЭП741НП и 9–10 мкм в сплаве ЭП975. В интерметаллидном сплаве ВКНА-25 вблизи зоны ТФС происходит незначительное утолщение прослоек  $\gamma$ -фазы, до 500 нм, а в сплаве ВКНА-1В формируется слой, представляющий собой  $\gamma$ -твердый раствор. Однако в обоих сплавах сохраняется исходная монокристаллическая структура.



**Рис. 2.** Микроструктура зоны ТФС и соединяемых сплавов в сварных образцах после СД:  
*a–в – ЭК61//ЭП741НП; з–е – ЭК61//ЭП975; ж–и – ЭП741НП//ВКНА-25; к–м – ЭП975//ВКНА-1В*

**Fig. 2.** Microstructure of SSSJ zone and joined alloys in welded specimens after PW:  
*a–в – EK61//EP741NP; з–е – EK61//EP975; ж–и – EP741NP//VKNA-25; к–м – EP975//VKNA-1V*

**Таблица 1.** Микротвердость основного материала и зоны твердофазного соединения сплавов на основе никеля**Table 1.** Microhardness of the base material and the solid-state joint zone of superalloys

Микротвердость, ГПа / Microhardness, GPa			
Сварка давлением / Pressure welding			
Комбинация сплавов (Сплав 1/Сплав 2) / Combination of superalloys (Superalloy 1/Superalloy 2)	Сплав 1 / Superalloy 1	Твердофазное соединение / Solid-state joint	Сплав 2 / Superalloy 2
ЭК61//ЭП741НП / EK61//EP741NP	2,35±1,60	3,62±0,92	5,41±0,14
ЭК61//ЭП975 / EK61//EP975	4,09±0,13	4,44±0,12	4,45±0,08
ЭП741НП//VKNA-25 / EP741NP//VKNA-25	4,33±0,14	3,95±0,22	3,72±0,32
ЭП975//VKNA-1B / EP975//VKNA-1V	3,5±0,13	4,06±0,18	4,5±0,15

В табл. 1 приведены результаты измерений микротвердости как в области основных материалов, так и в зонах их соединения. В результате измерений микротвердости было установлено, что микротвердость занимает промежуточное значение между соединяемыми сплавами. Это свидетельствует о том, что за счет развития гетеродиффузии легирующих элементов в зоне ТФС образуется переходная зона диффузионного взаимодействия, в которой химический состав монотонно изменяется при переходе от одного соединяемого сплава к другому. Кроме этого, отсутствие пиков в значениях микротвердости свидетельствует о том, что хрупких частиц избыточных фаз не обнаруживается.

### Выводы

1. Экспериментально установлено, что метод сварки давлением в условиях сверхпластичности позволяет успешно получать высококачественные твердофазные соединения из разноименных жаропрочных никелевых сплавов, таких как ЭК61, ЭП741НП, ЭП975 и VKNA-25. При этом наблюдается формирование видимой границы в зоне соединения.

2. Микроструктуры сплавов ЭК61, ЭП975 и ЭП741НП в процессе сварки давлением при температуре 850 °С остаются термически стабильными и практически не изменяются. В сплавах ЭП741НП и ЭП975 в комбинации сплавов ЭП741НП//VKNA-25 и ЭП975//VKNA-1B при сварке давлением незначительно увеличивается средний размер зерен  $\gamma$ -фазы. В интерметаллидном сплаве VKNA-25 происходит утолщение прослоек  $\gamma$ -фазы до 500 нм, а в сплаве VKNA-1B формируется слой  $\gamma$ -твердого раствора.

3. Во всех четырех комбинациях значение микротвердости зоны твердофазного соединения находится на среднем уровне между соединяемыми материалами.

### Благодарности / Acknowledgments

*Работа в части исследований сварных образцов ЭК61//ЭП741НП выполнена в рамках госзадания ИПСМ РАН №124022900007-9, в части исследований сварных образцов ЭК61//ЭП975 в рамках Стипендии Президента РФ молодым ученым и аспирантам СП-4002.2022.1; в части исследований сварных образцов ЭП741НП//VKNA-25 в рамках Гранта РБ молодым ученым (Соглашение*

№1 от 14.08.2023). Микроструктурные исследования проводились на базе научно-исследовательского оборудования ЦКП ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».

*The part of the research dealing with the EK61//EP741NP welded specimens was carried out with the financial support of State assignment of the IMSP RAS No. 124022900007-9, and the part of the research dealing with the EK61//EP975 welded specimens was conducted with the financial support of the scholarship of the President of the Russian Federation (SP-4002.2022.1). The part of the research dealing with the EP741NP//VKNA- 25 welded specimens was supported by the Grant of the Republic of Bashkortostan (Agreement No. 1 dated 14.08.2023). The microstructural studies were performed at the Center of Collective Use “Structural and Physico-Mechanical Studies of Materials” of IMSP RAS.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S.T. Kishkin, Creation, research and application of high-temperature alloys: Selected works (To the 100th anniversary of his birth). Moscow. «Nauka», 2006. 407 p. In Russian [Кишкин С. Т. Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов: Избранные труды (К 100-летию со дня рождения). М.: Наука, 2006. 407 с.].
2. Kablov E. N., Petrushin N. V., Elyutin E. S. Single-crystal heatproof alloys for gas-turbine engines // Bulletin of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. Series «Mechanical Engineering». (SP2) 38-52 (2011). (In Russian) [Каблов Е. Н., Петрушин Н. В., Елютин Е. С. Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». (SP2) 38-52 (2011)].
3. M. Perrut, C. Pierre, Th. Perrut, C. Pierre, Th. Marc, C. Alain. High temperature materials for aerospace applications: Ni-based superalloys and  $\gamma$ -TiAl alloys // C. R. Phys. 19(8), 657-671(2018). DOI:10.1016/j.crhy.2018.10.002
4. Logunov A.V., Shmotin Yu.N. Modern high-temperature nickel alloys for gas turbine disks. Moscow. Science and Technology, 2013. 256 p. (In Russian) [Логунов А.В., Шмотин Ю.Н. Современные жаропрочные никелевые сплавы для дисков газовых турбин. Москва. Наука и технология, 2013. 256 с.]
5. Lakshmi M., Rao V. N. B. Design and life estimation of blisk in gas turbines //Int. Research J. Eng. and Tech, 5(2), 1065-1076(2018).
6. Mateo A. On the feasibility of BLISK produced by linear friction welding. Rev. Metal. 50(3), e023(2014). DOI: 10.3989/revmetalm.023.
7. Kuroki H. et al. Application of linear friction welding technique to aircraft engine parts //IHI Eng. Rev. 47(1), 40-43(2014).
8. Ospennikova O.G., Lukin V.I., Afanasyev-Khodykin A.N., Galushka I.A. Manufacturing of a «blisk» type structure from a heterogeneous combination of materials // Proceedings of VIAM. 10(70) 10-16 (2018). (In Russian) [Оспенникова О.Г., Лукин В.И., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А. Изготовление конструкции типа «блиск» из разноименного сочетания материалов // Труды ВИАМ. 10(70) 10-16 (2018)].
9. Kumar R.V., Venugopal M.M., Chandrasekhar G.L., Tamilselvam N., Gopinath B. Stress Distribution, Frequency Response, Mode Shape of Twisted and Untwisted Compressor Blisk under Different Pressure Loading Conditions, Int. J. Vehicle Structures & Systems, 14(5), 686-692(2020). DOI: 10.4273/ijvss.14.5.25
10. Povarova K.B., Valitov V.A., Obsepyan S.V., et al. Study of the properties and the choice of alloys for bladed disks (blisks) and a method for their joining. Russian Metallurgy (Metally). 2014, 733–741 (2014). DOI: 10.1134/S0036029514090146
11. A. V. Logunov, High-temperature nickel alloys for blades and disks of gas turbines. Moscow. «Publishing House «Gas Turbine Technologies» LLC», 2017. 854 p. In Russian [Логунов А. В. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин. М.: ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2017. 854 с.]
12. Lyushinsky A. V., Nikoli, E. V., Zhlob, A. A., Kharkovsky S.V., Borovsky A.V., et al. Diffusion welding of nickel-based high-temperature alloys. Welding Production. 5, 25–28 (2014). (In Russian). [Люшинский А.В., Николич Е.В., Жлоба А.А., Харьковский С.В., Боровский А.В. и др. Диффузионная сварка жаропрочных сплавов на никелевой основе // Сварочное производство. 5, 25–28 (2014)].
13. Lukin V.I. Peculiarities of rotational friction welding of superalloy VG175 / V. I. Lukin, S. V. Ovsepyan, V. G. Kovalchuk, M. L. Samorukov // Proceedings of VIAM, 12(60), 1 (2017). (In Russian). [Лукин В. И. Особенности ротационной сварки трением высокожаропрочного никелевого сплава ВЖ175 / В. И. Лукин, С. В. Овсеян, В. Г. Ковальчук, М. Л. Саморуков // Труды ВИАМ, 12(60), 1 (2017)].

14. Zhang H. et al. Electron beam welding of Nimonic 80A: Integrity and microstructure evaluation // *Vacuum*, 151, 266-274(2018). DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.01.021
15. Yang X. et al. Investigation of microstructure and mechanical properties of GH4169 superalloy joint produced by linear friction welding // *J. Mater. Res. and Tech.* 24, 8373-8390(2023). <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.081>
16. Drozdov A.A., Povarova K.B., Valitov V.A., Galieva E.V., Arginbaeva E.G., Bazyleva O.A., Bulakhtina M.A., Raevskikh A.N. Effect of temperature of pressure welding of deformable nickel alloy EP975 and single-crystal intermetallic alloy VKNA-25 on the structure and properties of welded samples // *Metals*. 4, 48-55(2020). (In Russian) [Дроздов А.А., Поварова К.Б., Валитов В.А., Галиева Э.В., Аргинбаева Э.Г., Базылева О.А., Булахтина М.А., Раевских А.Н. Влияние температуры сварки давлением деформируемого никелевого сплава ЭП975 и монокристаллического интерметаллидного сплава ВКНА-25 на строение и свойства сварных образцов // *Металлы*. 4, 48–55(2020)].
17. E.V. Galieva, V.A. Valitov, E.Y. Klassman, A.A. Ganeev, R.R. Gabbasov, E.M. Stepukhov, I.I. Khafizov Mechanical properties and weldability of powder EP741NP nickel-based superalloy with an ultrafine-grained mixed type microstructure // *Lett. Mater.* 13(4(52)), 493-498(2023). DOI: 10.22226/2410-3535-2023-4-493-498
18. Galieva E.V., Bataev N.V., Valitov V.A., Lutfullin R.Ya. Solid-phase welding of dissimilar nickel alloys EP741NP and EK61 with different joint surface geometry // *Fundamental Problems of Modern Materials Science*. 14(4), 507-512(2017). (In Russian) [Э.В. Галиева, Н.В. Батаев В.А. Валитов, Лутфуллин Р.Я. Твердофазная сварка разнородных никелевых сплавов ЭП741НП и ЭК61 с различной геометрией поверхности соединения // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 14 (4), 507-512(2017)].
19. Valitov V.A., Mulyukov R.R., Gigliotti M.F.X., Subramanian P. R. Severe thermomechanical processing as an effective method for the preparation of bulk and sheet nanostructured semifinished products from nickel alloys 718 and 718Plus Superalloys 2008. TMS. 25-331(2008). DOI: 10.7449/2008/Superalloys\_2008\_325\_331.
20. Gabbasov R.R., Galieva E.V., Klassman E.Y., Valitov V.A. Effect of pressure welding temperature on the microstructure and mechanical properties of solid-state joints of wrought nickel-based EK79 and EP975 superalloys // *Lett. Mater.* 14(2), 155-160(2024). DOI: 10.48612/letters/2024-2-155-160
21. 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, 1067–1073(2018). DOI:10.1134/S003602951811006X
22. Valitov V.A., Povarova K.B., Bazyleva O.A., Drozdov A.A., Ovsepyan S.V., et al. Research of solid compound formation during thermal deformation effect on intermetallic Ni3Al– alloy with a heat-resistant alloy EP975 and influence on the physical, mechanical and performance properties // *Materials Science Forum*. V. 838–839, 523–527(2016). DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.838-839.523
23. Galieva E.V., Akhunova A.K., Valitov V.A., Klassman E.Y. Computer and physical modeling of multiple isothermal forging of EK61 superalloy // *Lett. Mater.* 12(3), 243-248(2022). DOI:10.22226/2410-3535-2022-3-243-248
24. Z. Peng Y. et al. Vacuum diffusion bonding between Ni3Al-based superalloy and S31042 steel by surface self-nanocrystallization treatment // *Mater. Charact.* 202 (12), 113031(2023).
25. Mohandas T. *Welding Technologies in Aerospace Applications*. Aerospace Materials and Material Technologies: Vol. 2: Aerospace Material Technologies, 2017. P.65-83 (2017). DOI: 10.1007/978-981-10-2143-5
26. Donachie M. J., Donachie S. J. *Superalloys: A Technical Guide* // ASM International, 2002. 439 p.
27. Drozdov A.A., Povarova K.B., Valitov V.A., Galieva E.V., Arginbaeva E.G., Bazyleva O.A., Bulakhtina M.A., Raevskikh A.N. Effect of the temperature of pressure welding of a wrought EP975 nickel alloy and a single-crystal intermetallic VKNA-25 alloy on the structure and properties of the welded joints. // *Russian Metallurgy (Metally)*. 2020, 752–759(2020). DOI: 10.1134/S003602952007006X