

EFFECT OF THE PRESSURE WELDING SCHEME ON THE MICROSTRUCTURE OF SOLID-STATE JOINTS FROM NICKEL-BASED SUPERALLOYS EK61 AND EP975 WITH DIFFERENT PHASE COMPOSITIONS

*Elvina Venerovna Galieva^a, Ekaterina Yurievna Klassman,
Vener Anvarovich Valitov*

Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences, 39 St. Khalturina Str., 450001, Ufa, Russia

^a galieva_elvina_v@mail.ru

ABSTRACT

In recent years, due to the rapid development of the aerospace industry, the need for fundamental studies on high-temperature nickel-based superalloys, especially in the field of solid state joints (SSJs), has become even more urgent. This paper presents the results of research on the microstructure of solid state joints after pressure welding of high-alloyed EK61 (Ni₃Nb) and EP975 {(Ni₃(Al,Ti))} nickel-based superalloys with different types of strengthening phase. The pressure welding of the combination of the EK61//EP975 superalloys was carried out in vacuum at a temperature of 925 °C, which corresponds to the superplasticity manifestation of the EK61 superalloy with an ultrafine-grained microstructure. Two schemes of pressure welding were used in the work: cylindrical specimens when normal compressive stresses act, and model specimens of the "disc-shaft" type when tangential and normal compressive stresses act relative to the joining plane. It is found that both joining schemes lead to the formation of a solid joint. It is shown that a diffusion transition zone is formed between the joined EK61 and EP975 superalloys during the pressure welding process. The width of the diffusion zone after pressure welding is 8–10 microns. The porosity of the solid state zone does not exceed 15%.

KEYWORDS

High-temperature nickel-based superalloys; pressure welding; solid-state joint.

ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ НА МИКРОСТРУКТУРУ ТВЕРДОФАЗНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ЭК61 И ЭП975 С РАЗНЫМ ФАЗОВЫМ СОСТАВОМ

*Эльвина Венеровна Галиева^a, Екатерина Юрьевна Классман,
Венер Анварович Валитов*

Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина, 39, 450001, Уфа, Россия

^a galieva_elvina_v@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В последние годы в связи с быстрым развитием авиационной промышленности потребность в фундаментальных исследованиях жаропрочных никелевых сплавов, в частности, в области твердофазного соединения (ТФС), стала еще более актуальной. В работе представлены результаты исследований микроструктуры твердофазных соединений после сварки давлением из высоколегированных никелевых сплавов ЭК61 (Ni_3Nb) и ЭП975 $\{(\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti}))\}$ с различным типом упрочняющей фазы. Сварку давлением в сочетании сплавов ЭК61//ЭП975 проводили в вакууме при температуре 925 °С, который соответствует интервалу проявления сверхпластичности сплава ЭК61 с ультрамелкозернистой структурой. В работе использовано две схемы сварки давлением: цилиндрические образцы, когда действуют нормальные сжимающие напряжения, и модельные заготовки типа «диск–вал», когда действуют касательные и нормальные сжимающие напряжения относительно плоскости соединения. Установлено, что обе схемы соединения приводят к формированию качественного твердофазного соединения. Показано, что в процессе сварки давлением образуется переходная диффузионная зона между соединяемыми жаропрочными сплавами ЭК61 и ЭП975. Ширина диффузионной зоны после сварки давлением составляет 8–10 мкм. Пористость зоны твердофазного соединения не превышает 15%.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Жаропрочные никелевые сплавы; сварка давлением; твердофазное соединение.

Введение

В настоящее время жаропрочные никелевые сплавы, которые за рубежом называют суперсплавы [1–4], являются одними из основных высокотемпературных материалов, используемых для изготовления компонентов, работающих при высоких температурах в конструкциях газотурбинных двигателей (ГТД). Они используются при изготовлении лопаток и дисков, применяемых в компрессоре и турбине, сопел, а также компонентов камеры сгорания и сопла ГТД [5–7]. Разработка новых высокожаропрочных материалов, инновационных технологий их получения и применения является важнейшим фактором развития двигателестроения для авиакосмической техники. В последние годы при создании новых конструкций ГТД наблюдается тенденция к более широкому применению неразъемных биметаллических деталей («диск-диск», «диск-вал» и «блиск»), что обеспечит существенное повышение их экономической эффективности [4, 7–10]. В этой связи актуальными являются фунда-

ментальные исследования жаропрочных никелевых сплавов, направленные на разработку инновационных технологий получения твердофазных соединений (ТФС), изучение закономерностей формирования таких соединений, оценку их качества по микроструктуре и свойствам. Из-за низкой технологической пластичности жаропрочных никелевых сплавов для изготовления из них деталей целесообразно применение перспективной технологии сверхпластической деформации [11, 12] для получения сложных твердофазных биметаллических конструкций.

Как известно [13–19], разработаны и применяются различные современные передовые методы получения сварных соединений: линейная и ротационная сварка трением, лазерная сварка, вакуумная электронно-лучевая сварка и т.д. Многие из этих методов неприменимы или имеют ограниченное применение при сварке высоколегированных никелевых сплавов, которые содержат высокую объемную долю ($\geq 40\%$) упрочняющей γ' -фазы. Такие сплавы считаются «несвариваемыми» традиционными метода-

ми сварки плавлением [19]. Одним из наиболее перспективных методов получения неразъемных биметаллических соединений является сварка давлением с использованием сверхпластической деформации, которая позволяет получать твердофазные соединения из различных сплавов [20, 21], в том числе из высоколегированных «несвариваемых» сплавов и интерметаллидов на основе никеля [22, 23].

Целью данной работы является сравнительный анализ влияния метода сварки давлением в условиях низкотемпературной сверхпластичности сплава ЭК61 на формирование твердофазных соединений из сплавов ЭК61//ЭП975 с различным типом упрочняющей фазы.

1. Материалы и методики исследований

Отечественный деформируемый сплав ЭК61 является представителем жаропрочных сплавов, упрочняемых γ' -фазой на основе интерметаллида Ni_3Nb [22]. В исходном состоянии сплав ЭК61 представлял собой поковки $40 \times 40 \times 250$ мм³ с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой. Сплав ЭП975 является одним из самых жаропрочных среди серийных деформируемых никелевых спла-

вов [3, 4]. Он является представителем жаропрочных сплавов, упрочняемых γ' -фазой на основе интерметаллида $(Ni_3(Al,Ti))$ [3, 4]. В качестве исходного материала из сплава ЭП975 были использованы заготовки размером $60 \times 50 \times 70$ мм³ с предварительно подготовленной мелкозернистой структурой типа микродуплекс.

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 контейнере с образцами создавался вакуум, который поддерживался в процессе всего эксперимента. Все эксперименты по сварке давлением проходили в условиях сверхпластичности сплава ЭК61. В работе использовано две схемы сварки давлением: цилиндрические образцы, когда действуют нормальные сжимающие напряжения, и модельные заготовки типа «диск (ЭП975) – вал (ЭК61)», когда действуют касательные нормальные сжимающие напряжения относительно плоскости соединения (рис. 1).

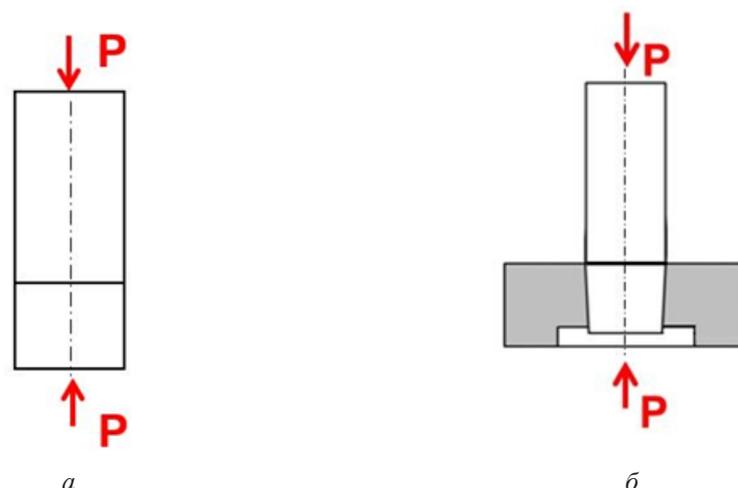


Рис. 1. Схема сварки давлением:
а – цилиндрические образцы, б – модельные образцы по схеме «диск-вал»

Fig. 1. Pressure welding principle:
а – cylindrical specimens, б – model samples according to the «disk-shaft» scheme

Микроструктурные исследования проводили на растровом электронном микроскопе Mira 3LMH (TESCAN, Чехия), а распределение элементов в зоне соединения исследовали с использованием метода энергодисперсионного анализа на микроскопе TESCAN Vega 3SBH. Для построения графиков распределения легирующих элементов по длине сварных образцов брали усредненные данные энергодисперсионного анализа как минимум трех определений на точку. Для исследования пористости в зоне соединения использовали нетравленные шлифы.

2. Результаты и их обсуждение

По результатам анализа исходной микроструктуры сплава ЭК61 (рис. 2, *а*) установлено, что в заготовке, вырезанной из штамповки, сформирована однородная ультрамелкозернистая структура с размером зерен γ -фазы 0,8 мкм и некогерентных частиц δ -фазы 0,75 мкм. Особенностью данного сплава является то, что упрочняющая интерметаллидная фаза может присутствовать в данном сплаве в двух модификациях: низкотемпературной – в виде упорядоченной γ'' с ОЦТ решеткой (DO22); и высокотемпературной, которая выделяется в виде пластин δ -фазы с орторомбической решеткой (т.е. происходит изменение морфологии второй фазы). Формирование δ -фазы происходит в про-

цессе старения или ДТО в интервале температур 650–980 °С [24]. Детальный анализ микроструктуры показал, что в структуре наблюдаются новые рекристаллизованные зерна γ -фазы равноосной формы, свободные от дислокаций. Глобулярные некогерентные выделения термически стабильной δ -фазы эллипсоидной формы присутствуют преимущественно по границам и в тройных стыках зерен γ -фазы. Объемная доля δ -фазы составляет 25%.

По результатам анализа исходной микроструктуры сплава ЭП975 (рис. 2, *б, в*) установлено, что в заготовке, вырезанной из штамповки, сформирована однородная мелкозернистая структура типа микродуплекс. Средний размер зерен γ -фазы составляет 8 мкм, а γ' -фазы – 3,2 мкм. Объемная доля крупных некогерентных частиц-зерен упрочняющей γ' -фазы составляет 28%, объемная доля внутривзеренных когерентных частиц γ' -фазы размером не более 0,4 мкм составляет 27%. Указанные когерентные частицы обычно выделяются при охлаждении с высокой температуры штамповки до комнатной температуры. Низкая плотность дислокаций в зернах γ -фазы и сохранение их равноосности свидетельствует о развитии при штамповке механизмов сверхпластической деформации, в частности основного механизма – зернограницного проскальзывания.

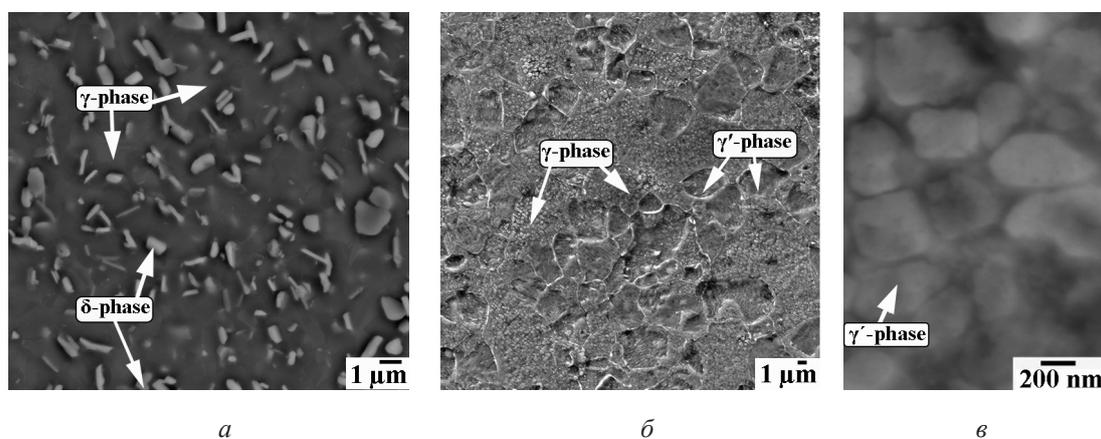


Рис. 2. Исходная микроструктура сплавов ЭК61 (*а*) и ЭП975 (*б, в*) перед сваркой давлением

Fig. 2. Initial microstructure of EK61 (*a*) and EP975 (*б, в*) superalloys before pressure welding

На рис. 3 представлены микроструктуры зоны ТФС после сварки давлением. 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. Сверхпластичность в сплаве ЭК61 с УМЗ структурой проявляется в интервале температур $T = 750\text{--}925\text{ }^{\circ}\text{C}$. То есть температура сварки давлением соответствует температурно-скоростным условиям проявления сверхпластичности в сплаве ЭК61 с УМЗ структурой. В то же время, в сплаве ЭП975 с мелкозернистой структурой типа микродуплекс нижняя температурная граница проявления сверхпластичности составляет $900\text{--}925\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поэтому неудивительно, что во всех случаях деформация локализуется в сплаве ЭК61 с исходной УМЗ структурой, при этом сплав ЭП975 с микродуплексной структурой практически не деформируется. При всех схемах сварки давлением сформировано твердофазное соединение. В зоне ТФС, обозначенного стрелками на рис. 3, видна четкая линия, которая является границей раздела двух сплавов, относительная протяженность пор не превышает 15%.

Более жаропрочный сплав ЭП975 практически не деформировался при СД, морфология и размер фаз в сплаве ЭП975 не изменились по сравнению с исходной структурой (рис. 2). Термическая стабильность микродуплексной структуры во многом обусловлена тем, что температура сварки ($T = 925\text{ }^{\circ}\text{C}$) на $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже стандартной температуры старения сплава ЭП975 ($T = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$). Важно отметить, что присутствующие в микродуплексной структуре внутризеренные дисперсные частицы γ' -фазы размером не более $0,4\text{ }\mu\text{m}$ сохраняются и, соответственно, могут оказывать влияние на формирование твердофазного соединения разноименных сплавов в сочетании ЭК61//ЭП975. В отличие от сплава ЭП975, микроструктура сплава ЭК61 нестабильна. Произошло частичное растворение δ -фазы, относительная доля которой после сварки при температуре $925\text{ }^{\circ}\text{C}$ уменьшилась в 2 раза по сравнению с исходным состоянием до 12%. По-видимому, это привело к укрупнению зерен γ -фазы, средний размер которых составил $2,5\text{ }\mu\text{m}$. В структуре сохранились отдельные относительно «крупные» частицы δ -фазы, размер которых не превышает $2\text{ }\mu\text{m}$ в длину и $1\text{ }\mu\text{m}$ в ширину.

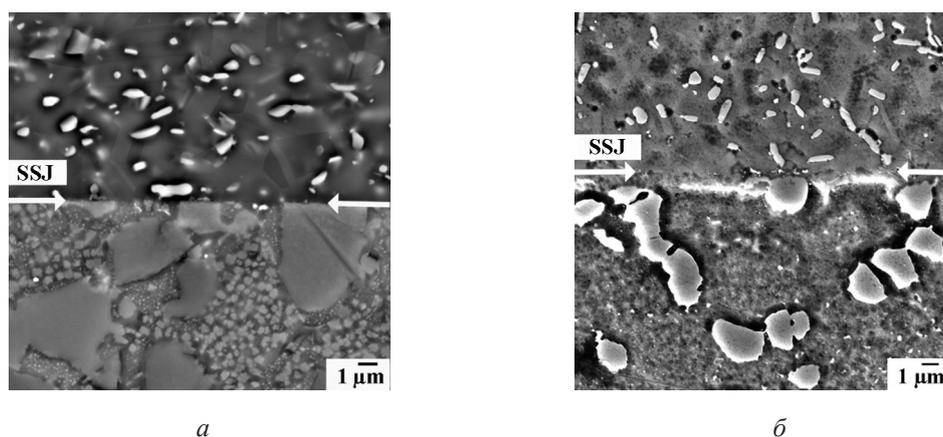


Рис. 3. Микроструктура зоны ТФС после сварки давлением при различных схемах: *а* – цилиндрические образцы, *б* – модельные образцы по схеме «диск-вал»

Fig. 3. Microstructure of the SSJ zone after pressure welding under different schemes: *a* – cylindrical specimens, *b* – model samples according to the «disk-shaft» scheme

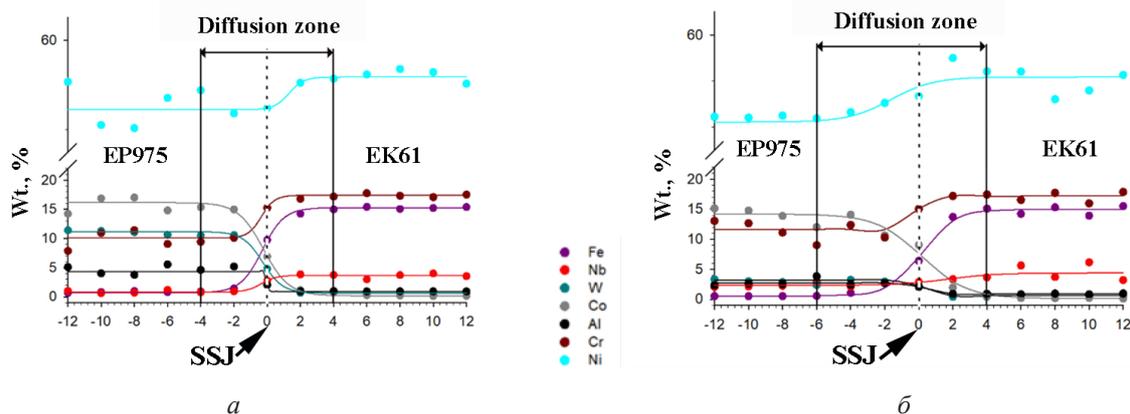


Рис. 4. Распределение легирующих элементов в зоне ТФС сплавов в сочетании ЭК61//ЭП975:
а – цилиндрические образцы, б – модельные образцы по схеме «диск-вал»

Fig. 4. Microstructure of the solid-state joint of alloys in the EK61//EP975 combination:
a – cylindrical samples, б – model samples according to the «disk–shaft» scheme

На рис. 4 представлены результаты энергодисперсионного анализа зоны ТФС сплавов в сочетании ЭК61//ЭП975, где пунктирными линиями обозначены границы диффузионной зоны. На процессы взаимной диффузии легирующих элементов оказывает влияние различие по химическому составу соединяемых сплавов, а также различие в атомном радиусе легирующих элементов. Никелевый сплав ЭП975 обогащен Co и W по сравнению со сплавом ЭК61 и обеднен Fe и Cr, поэтому активно протекает диффузия Co из никелевого сплава ЭП975 в сплав ЭК61, а также встречная диффузия Fe и Cr. Химический состав твердого раствора в зоне ТФС является промежуточным между химическими составами соединяемых сплавов.

В результате сварки давлением формируется зона диффузионного взаимодействия, ширина которой составляет 8 ± 2 мкм и 10 ± 2 мкм. В случае модельных образцов «диск-вал» наблюдается более плавное изменение химического состава в зоне диффузионного взаимодействия.

Выводы

Экспериментально установлено, что сварка давлением в условиях низкотемпературной сверхпластичности является эффективным методом для получения твердофаз-

ного соединения из никелевых сплавов ЭК61 и ЭП975 с различным типом упрочняющей фазы. Экспериментально показано, что сварка давлением также эффективна для получения сварных модельных образцов, имитирующих биметаллическую деталь типа «диск (ЭП975) – вал (ЭК61)».

Благодарности / Acknowledgments

Работа в части исследования структуры 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 проводились на базе научно-исследовательского оборудования ЦКП ИПСМ РАН «Структурные и физико-механические исследования материалов».

Part of this research, namely the study of the structure of the welded samples from the nickel alloys EP975//EK61, was supported by the Council for Grants of the President of the Russian Federation (Scholarship of the President of the Russian Federation for Young Scientists and Postgraduate Students SP-4002.2022.1).

The microstructural studies were performed using the research equipment of the Shared Use Center “Structural and Physico-Mechanical Studies of Materials” at the Institute for Metals Superplasticity Problems of the Russian Academy of Sciences.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. W. Xia, Zh. Xinbao, Y. Liang, Zh. Ze. A review of composition evolution in Ni-based single crystal superalloys // *J. Mater. Sci. Technol.* 44, 76-95(2020). DOI:10.1016/j.jmst.2020.01.026
2. M. Perrut, C. Pierre, Th. Perrut, C. Pierre, Th. Marc, C. Alain. High temperature materials for aerospace applications: Ni-based superalloys and γ -TiAl alloys // *C. R. Phys.* 19(8), 657-671(2018). DOI:10.1016/j.crhy.2018.10.002
3. S.T. Kishkin, Creation, research and application of heat-resistant alloys : Selected works (To the 100th anniversary of his birth). Moscow. «Nauka», 2006. P. 407. In Russian [Кишкин С. Т. Создание, исследование и применение жаропрочных сплавов : Избранные труды (К 100-летию со дня рождения). М. : Наука, 2006. 407 с.].
4. A. V. Logunov, Heat-resistant nickel alloys for blades and disks of gas turbines. Moscow. «Publishing House «Gas Turbine Technologies» LLC», 2017. P. 854. In Russian [Логунов А. В. Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин. М. : ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2017. 854 с.].
5. Kapitanenko D.V., Moiseev N.V., Vazhenov A.R., Gladkov Yu.A. Development of the technology of isothermal stamping in air of turbocharger disk blanks using computer modeling // *Proceedings of VIAM.* (4) (13-21) 2022. (in Russian) [Капитаненко Д.В., Моисеев Н.В., Баженов А.Р., Гладков Ю.А. Разработка с применением компьютерного моделирования технологии изотермической штамповки на воздухе заготовок дисков турбокомпрессоров // *Труды ВИАМ.* (4) 13-21 (2022)].
6. Chunguo Zh., Shengyong Mu, Shuai W., Hongchang Li. Characterization of mechanical properties of in-service nickel-based alloy by continuous indentation // *STRUCTURE*, 48, 1346-1355 (2023). DOI: 10.1016/j.istruc.2023.01.053
7. Kablov E.N. Main directions of development of materials for aerospace engineering of the XXI century // *Perspektivnye Materialy.* (3) 27-36 (2000). in Russian [Каблов Е. Н. Основные направления развития материалов для авиакосмической техники XXI века // *Перспективные материалы.* (3) 27-36 (2000)].
8. 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) http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2012/PAPERS/224.PDF.
9. M. L. Kuzmenko, V. S. Chigrin, S. E. Belova, Static strength of working blades and disks of compressors and turbines of GTE. Rybinsk. «RSATA», 2005. P.74. in Russian [Кузменко М.Л., Чигрин В.С., Белова С.Е. Статическая прочность рабочих лопаток и дисков компрессоров и турбин ГТД. Рыбинск: РГАТА, 2005. 74 с.].
10. Gorobets G.V., To calculation of temperature distribution on disks of axial compressors of gas-turbine engines // *Industrial Heat Engineering*, 26(5), 37-40 (2004). in Russian [Горобец Г.В. К расчету распределения температуры на дисках осевых компрессоров газотурбинных двигателей // *Промышленная теплотехника*, 26(5), 37-40 (2004)].
11. R.R. Mulyukov, R.M. Imaev, A.A. Nazarov et al., Superplasticity of ultrafine-grained alloys: experiment, theory, technology. Moscow. «Nauka», 2014. P. 284. In Russian [Мулюков Р.Р., Имаев Р.М., Назаров А.А. и др. Сверхпластичность ультрамелкозернистых сплавов: эксперимент, теория, технологии. М.: Наука, 2014. 284 с.].
12. Valitov V.A. Deformation and heat treatment - an effective method of obtaining ultrafine-grained and nanocrystalline structure in heat-resistant nickel alloys // *Letters on Materials.* 3(1) 50-55 (2013). In Russian [Валитов В.А. Деформационно-термическая обработка - как эффективный способ получения ультрамелкозернистых и нанокристаллических структур в жаропрочных сплавах на основе никеля // *Письма о материалах.* 3(1) 50-55 (2013)]. DOI: 10.22226/2410-3535-2013-1-50-55.
13. P. Jing, R. Wu, J. Zhang. High-temperature mechanical properties and microstructure of welded joint in GH4169/IC10 dissimilar nickel-based superalloys by vacuum electron beam welding // *Mater. Sci. and Eng.*, 884(8), 45561(2023). DOI:10.1016/j.msea.2023.145561
14. P. Geng, Ma H., Wang M., et. al. Dissimilar linear friction welding of Ni-based superalloys // *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 191(2), 104062(2023). DOI:10.1016/j.ijmachtools.2023.104062
15. R.R. Ye, H.Y. Li , R.G. Ding, S. Bray, et. al. Microstructure and microhardness of dissimilar weldment of Ni-based superalloys IN718-IN713LC // *Mater. Sci. and Eng.*, 774(4), 138894(2020). DOI:10.1016/j.msea.2019.138894
16. C. Mary, M. Jahazi. Multi-Scale Analysis of IN-718 Microstructure Evolution During Linear Friction

Welding // Adv. Eng. Mat., 10(6), 573-578(2008). DOI:10.1002/adem.200700361

17. J.T. Winowlin Jappes, A. Ajithram, M. Adamkhan, D. Reena. Welding on Ni based super alloys – A review // Materials Today Proceedings 60, 1656-1659(2022). DOI:10.1016/j.matpr.2021.12.208

18. R. Nandan, T. DebRoy, H. Bhadeshia. Recent advances in friction-stir welding : Process, weldment structure and properties // Prog. Mater. Sci., 53(6), 980-1023(2008). DOI:10.1016/j.pmatsci.2008.05.001

19. Lukin V.I., Kovalchuk V.G., Samorukov M.L., Gridnev Y.M., Zhegina I.P., Kotelnikova L.V. Features of friction welding technology of joints made of VKNA-25 and EP975 alloys // Welding Production. (5) 28-33 (2010). In Russian [Лукин В.И., Ковальчук В.Г., Саморуков М.Л., Гриднев Ю.М., Жегина И.П., Котельникова Л.В. Особенности технологии сварки трением соединений из сплавов ВКНА–25 и ЭП975 // Сварочное производство. (5) 28–33 (2010)].

20. Lutfullin R.Ya. Mukhametrakhimov M.H., Valitov V.A., Mukhtarov Sh.H., Klassman P.A., Astanin V.V. Nanostructuring and solid-phase welding of hard-to-machine alloys // Perspective Materials. (12) 295-300 (2011). In Russian [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. (12) 295–300 (2011)].

21. Povarova K.B., Valitov V.A., Ovsepyan S.V., Drozdov A.A., Bazyleva O.A., Valitova E.V. Investigation of properties and alloys selection for blade disks («blisks») and their joining method // Metally (5) 61-70 (2014) in Russian [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. (5) 61–70 (2014)].

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(1), 1067–1073 (2018). In Russian [Галиева Э.В., Поварова К.Б., Дроздов А.А., Валитов В.А. Строение и свойства твердофазных соединений деформируемого никелевого сплава ЭП975 и монокристаллического интерметаллидного сплава ВКНА–25, полученных сваркой давлением со степенью деформации 24% в условиях сверхпластичности сплава ЭП975 // Металлы, 2018(6), 64–72 (2018)]. DOI: 10.1134/S003602951811006X.

23. Drozdov A.A., Valitov V.A., Galieva E.V., Arginbaeva E.G., Bulakhtina M.A., Povarova K.B., Bazyleva O.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(7), 752-759 (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, 2020(4), 48—55 (2020)]. DOI:10.1134/S003602952007006X

24. Patent RF № 99111620, 27.04.01. (in Russian) [Патент РФ № 99111620, 27.04.01].